

INTRODUZIONE

Cosa può spingere un giovane a progettare e, dunque, a spendere la propria vita? Quali sono i moventi che potentemente lo guidano nel percorso della sua realizzazione? Una chiara visione dei problemi, una lucida consapevolezza dei propri mezzi, si dirà, sono strumenti indispensabili, sebbene difficili da conquistare, che solo un'attenzione costante e una forte volontà di comprendere se stessi e gli altri è in grado di perseguire. Strumenti necessari, certo, ma non sufficienti; il loro uso, infatti, non può essere proficuo se non riposano essi stessi su un'esigenza più profonda, che ne motiva l'apprendimento e l'esercizio, dando senso e significato all'agire.

Nel ripercorrere il più fedelmente possibile l'avventura intrapresa da Albert Einstein, ci è sembrato di cogliere nell'esigenza insopprimibile della libertà quella forza insuperabile che distingue ed esalta la natura umana sia sul piano teoretico e conoscitivo sia su quello etico, del comportamento. Perché la figura del giovane fisico teso a svelare la verità che si cela dietro i segreti della natura fa tutt'uno con l'uomo che, coerentemente, si spende per rendere possibile a tutti il godimento della propria libertà. Per questo, anche sul piano prettamente scientifico, abbiamo attinto il più possibile allo stesso dettato einsteiniano, convinti che l'approccio diretto e testuale, benché più faticoso, resta sempre e comunque quello più autentico ed esaltante.

INTRODUZIONE

Cosa può spingere un giovane a progettare e, dunque, a spendere la propria vita? Quali sono i moventi che potentemente lo guidano nel percorso della sua realizzazione? Una chiara visione dei problemi, una lucida consapevolezza dei propri mezzi, si dirà, sono strumenti indispensabili, sebbene difficili da conquistare, che solo un'attenzione costante e una forte volontà di comprendere se stessi e gli altri è in grado di perseguire. Strumenti necessari, certo, ma non sufficienti; il loro uso, infatti, non può essere proficuo se non riposano essi stessi su un'esigenza più profonda, che ne motiva l'apprendimento e l'esercizio, dando senso e significato all'agire.

Nel ripercorrere il più fedelmente possibile l'avventura intrapresa da Albert Einstein, ci è sembrato di cogliere nell'esigenza insopprimibile della libertà quella forza insuperabile che distingue ed esalta la natura umana sia sul piano teoretico e conoscitivo sia su quello etico, del comportamento. Perché la figura del giovane fisico teso a svelare la verità che si cela dietro i segreti della natura fa tutt'uno con l'uomo che, coerentemente, si spende per rendere possibile a tutti il godimento della propria libertà. Per questo, anche sul piano prettamente scientifico, abbiamo attinto il più possibile allo stesso dettato einsteiniano, convinti che l'approccio diretto e testuale, benché più faticoso, resta sempre e comunque quello più autentico ed esaltante.

IL PROGETTO DI UNA VITA

1. “Pensare solo per il piacere di pensare”

Nel frequentare i dipartimenti e i laboratori scientifici, specie quelli dei fisici, è davvero raro incontrare uomini dediti alla scienza che parallelamente, e talvolta persino contemporaneamente alla ricerca, coltivano il pensiero storico e soprattutto filosofico relativo al proprio ambito disciplinare. Se non per scelta, almeno per prudenza, gli scienziati di questo genere evitano accuratamente di stringere rapporti molto stretti con oggetti che non siano numeri o strumenti estremamente sofisticati; insomma, con tutto ciò che non è deputato al conseguimento di uno scopo ben preciso: la misura. E se, fortuitamente, la riflessione sulle procedure stabilite ed eseguite in vista dell’obiettivo porta questi ricercatori a sconfinare in territori dove il pensiero finisce per interrogare se stesso, una sottile ma ferma preoccupazione, in gran parte nata sui banchi di studio sotto l’imperativo di non tollerare distrazioni o divagazioni, esige che l’eventuale licenza che ci si è concessi sia confinata nel segreto della coscienza interiore per non esser immediatamente oggetto di scherno e di critica. Ebbene, sotto questo aspetto, Albert Einstein può essere considerato una piacevole e stimolante eccezione.

Che la ricerca e la speculazione costituissero potenzialmente un progetto di vita da far proprio e da difendere tenacemente contro tutto e contro tutti, il Nostro lo comprese con lucidità e chiarezza quando, pressappoco sedicenne, interpellato a proposito delle proprie speranze per il futuro, indicò gli ambiti puramente teorici della matematica e della fisica come quelli prescelti, adducendo considerazioni particolarmente interessanti. L’occasione per esternare le proprie aspettative nacque da un compito in classe, per l’appunto intitolato “I miei progetti per il futuro”, da compilare in lingua francese.

Un uomo contento è troppo soddisfatto del presente per pensare al futuro. Ma d'altra parte sono sempre i giovani che tendono a fare castelli in aria. È inoltre logico che un giovane con intenzioni serie si formi un'idea il più possibile precisa delle sue aspirazioni. Se avrò la fortuna di superare gli esami, andrò all'Istituto federale di tecnologia di Zurigo. Rimarrò lì per quattro anni a studiare matematica e fisica. Penso che diventerò professore in quei rami della scienza specializzandomi nel campo teorico. Queste sono le ragioni che mi hanno suggerito tale progetto: soprattutto la mia attitudine personale per il pensiero astratto e matematico, poi la mancanza di fantasia e di doti pratiche. Anche i miei gusti mi hanno indotto a questa scelta. È una cosa del tutto naturale: è sempre più piacevole fare le cose che si fanno bene. Inoltre la professione scientifica comporta una certa indipendenza che mi attira assai¹.

Com'è agevole capire, nella prima parte di questo breve componimento Einstein enuncia le sue intenzioni, poi, in seguito, espone le ragioni che le motivano. Sin dall'inizio, tuttavia, non si può non essere incuriositi da due affermazioni. Anzitutto, il Nostro parla espressamente di "fortuna" in relazione al superamento della prova conclusiva di esame; in secondo luogo, indica senza esitare l'istituto dove continuare gli studi, come richiesto dalle proprie esigenze e aspettative, cioè il Politecnico di Zurigo (Heidgenössische Technische Hochschule). Perché? Certo, una componente variabile da attribuire alla cosiddetta "dea bendata" (ma perché non al semplice caso?) è quasi sempre comunemente ammessa nel sostenere delle prove; comunque sia, la "fortuna" sembrerebbe non aver niente a che vedere con la scelta precisa di una ben identificata istituzione scolastica. Perché il Politecnico e non l'Università di Zurigo o di Berna, quella di Heidelberg o di Gottinga?

Il testo, anche nella seconda parte, è del resto estremamente chiaro, a tal punto da trasformare pericolosamente la curiosità in precedenza sollecitata in una preoccupante sensazione di dissonanza dovuta a una chiara incoerenza. Da esso, infatti, emerge con palese evidenza la precisa consapevolezza del giovane Albert di essere naturalmente incline alla vita intellettuale e "spirituale", tendenza corroborata dal fatto di essere gradita e soprattutto perseguita, vo-

¹ H. Dukas, B. Hoffmann (a cura di), *The Human Side*, Princeton University Press, Princeton 1979; trad. it. di A. Gilberti, *Albert Einstein. Il lato umano*, Einaudi, Torino 1980, pp. 12-13.

luta, perché fonte di soddisfazione: un piacere da ricercare perché ben raggiunto, e del quale si vorrebbe continuamente godere. Tanto che, come in seguito riferirà lo stesso Einstein, “quando non ho qualche problema particolare cui dedicarmi, mi diverto a ricostruire le prove di teoremi matematici e fisici che mi sono ormai noti da tempo. Non vi è alcuna utilità in questo, si tratta solo di una occasione di concedermi il piacere di pensare”².

Ma allora, a maggior ragione, perché affidare la propria formazione a un istituto come il Politecnico, dove peraltro è la parte espressamente applicativa, tecnologica, e non quella pura della matematica e della fisica, che viene insegnata e perseguita? La prospettiva che si intende guadagnare, infine, offre indubbiamente anche una certa gratificazione pratica, ovvero è in grado di garantire un’indipendenza economica, benché il denaro inteso come fine a se stesso, come mera accumulazione, non sia mai stato un obiettivo di Einstein. “Anch’io”, ci dice infatti, “dovevo diventare ingegnere. Ma trovai intollerabile l’idea di applicare il genio creativo a problemi che non fanno che complicare la vita quotidiana – e tutto ciò unicamente al triste scopo di guadagnare denaro. Pensare solo per il piacere di pensare, come nella musica”³. Eppure, l’importanza attribuita alla questione economica avrebbe dovuto essere una molla ben più tesa: almeno quanto lo era la situazione esistenziale del giovane studente al Politecnico, confidata e descritta in una lettera nel 1888.

Quel che mi opprime sono ovviamente le difficoltà dei miei genitori. Sono profondamente addolorato del fatto che io, ormai adulto, devo starmene a guardare con le mani in mano, senza essere del benché minimo aiuto. Non sono altro che un peso per la famiglia (...) Sarebbe meglio se non fossi mai nato. A volte l’unico pensiero che mi conforta e il mio unico scampo alla disperazione è che ho sempre fatto tutto il poco che potevo: non mi sono permesso, un anno dopo l’altro, né svaghi né divertimenti, tranne quelli forniti dallo studio⁴.

Che la strada più naturale per affermarsi nel mondo delle professioni fosse, per Albert, quella di studiare ingegneria o, più semplicemente, elettrotecnica, lo si comprende facilmente se si precisa il contesto storico e si dà peso all’influenza culturale esercitata dalla

² Ivi, p. 16.

³ *Ibid.*

⁴ Ivi, pp. 13-14.

cerchia familiare. Nato a Ulm, in Germania, il 14 marzo 1879 da Hermann Einstein e Pauline Koch, di origini ebraiche, Albert si trova immerso nella frenesia rivoluzionaria e ottimistica della scoperta delle leggi che governano l'elettricità e che ne consentono l'applicazione. Il magnetismo era esattamente quella forza straordinaria che induceva corrente elettrica attraverso i semplici avvolgimenti di rame delle dinamo e che, non importa a quale distanza, attraverso centrali e reti di fili, consentiva di illuminare le città e i villaggi o, più modestamente, di mettere in moto delle macchine. Ad appena un anno di vita Albert è costretto a trasferirsi nella città di Monaco, in Baviera, dove nel 1881 nasce la sorella Maria, familiarmente detta Maja. Il padre Hermann e il fratello Jakob, ingegnere, che viveva con loro, avevano dato vita, speranzosi in un futuro che – è il caso di dirlo – si prospettava radioso, a una piccola impresa industriale che si occupava proprio della costruzione di dinamo, lampade e altri costituenti elettrici. Inizialmente le cose andarono bene, anzi molto bene; basti pensare che dopo appena due anni di attività a Monaco la piccola impresa poté ben figurare e mostrare lampade, dinamo, e persino un sistema telefonico, all'Esposizione elettrica internazionale del 1882. I buoni risultati, come è naturale, spinsero gli Einstein ad allargare ulteriormente i settori di interesse e di investimento e, ovviamente, di profitto: alla costruzione di apparecchiature elettriche si affiancò l'attività di installazione di reti di energia elettrica e di illuminazione. Nel 1885 l'impresa, rinominata *Elektro-Technische Fabrik J. Einstein & Co.*, si aggiudicò l'appalto per la fornitura della prima illuminazione alla famosa festa bavarese della birra, l'*Oktoberfest*; tre anni dopo, registreranno all'attivo l'allacciamento elettrico della cittadina di Schwabing.

In realtà, come ci apprestiamo a mostrare, le due questioni, quella relativa alla "fortuna" e quella riguardante la scelta del Politecnico, sono intimamente legate e, soprattutto, rinviano a un aspetto fondamentale della personalità e del carattere di Einstein, aspetto al quale inizieremo ad avvicinarci guardando proprio alle ragioni esposte dal giovane studente, e che definiremo aprendo un'ulteriore parentesi sulla sua infanzia e adolescenza. Quella dissonanza che, poco fa, ci aveva fatto temere l'incoerenza, svanirà non appena sarà chiaro che, per realizzare il proprio disegno, Einstein era obbligato a percorrere la strada descritta.

2. Tra bussola e teoremi di geometria

Le “ragioni” portate a giustificazione e fondazione delle scelte future si basano infatti, come annunciavamo, su due precoci ma cruciali esperienze di Einstein, riportate dallo stesso fisico teorico nelle linee autobiografiche tratteggiate nel 1947. La prima esperienza risale al 1884, all'età di cinque anni (nell'autunno dell'anno successivo Albert sarà iscritto alla Petersschule di Monaco, una scuola elementare cattolica: sarà l'unico bambino di origine ebraica della sua classe). Di natura chiaramente pratica, l'esperienza riguarda il funzionamento di una bussola. Che cos'è una bussola? È semplicemente uno strumento di orientamento di cui ci avvaliamo quando intendiamo individuare una direzione rispetto a un punto di riferimento noto. La forma più semplice ed elementare di una bussola è costituita da un ago magnetico in grado di ruotare liberamente su un piano orizzontale fissato, mediante un piccolo perno, al centro di un quadrante circolare diviso in 360° . L'ago della bussola oscilla e si allinea con la direzione del campo magnetico terrestre puntando verso nord. Come sappiamo, il nord magnetico non coincide perfettamente con il nord geografico, che coincide invece con una delle due estremità dell'asse terrestre. Dice Einstein:

Il fatto che l'ago si comportasse in un certo modo non si accordava assolutamente con la natura dei fenomeni che potevano trovar posto nel mio mondo concettuale di allora, tutto basato sull'esperienza diretta del “toccare”. Ricordo ancora – o almeno mi sembra di ricordare – che questa esperienza mi fece un'impressione durevole e profonda⁵.

La seconda esperienza risale al 1891, all'età di dodici anni. Di natura evidentemente teorica, è relativa alla geometria piana euclidea.

Fu leggendo un libretto sulla geometria piana euclidea, capitato fra le mani al principio di un anno scolastico. C'erano delle asserzioni, ad esempio quella che le tre altezze di un triangolo si intersecano in un solo punto, che – pur non essendo affatto evidenti – potevano tuttavia essere dimostrate con tanta certezza da eliminare qualsiasi dubbio. Questa lucidità e certezza mi fecero un'indescrivibile impressione. Il fatto che l'assioma dovesse esse-

⁵ A. Einstein, *Note autobiografiche*, in AA.VV., *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, Bollati Boringhieri, Torino 1958, p. 6.

re accettato senza dimostrazione non mi dava fastidio. Per me era sufficiente, in ogni caso, poter basare le dimostrazioni su proposizioni la cui validità non mi sembrava dubbia. Ricordo, ad esempio, che uno zio mi espose il teorema di Pitagora prima che il sacro libretto di geometria mi fosse capitato fra le mani. Con molta fatica riuscii a “dimostrare” il teorema servendomi della similitudine dei triangoli; e così facendo mi sembrò evidente che il rapporto fra i lati dei triangoli rettangoli dovesse essere completamente determinato da un solo angolo acuto. Mi sembrava che ci fosse bisogno di qualche dimostrazione solo per le cose che non apparissero altrettanto “evidenti”⁶.

A questa data, la Fabrik si affermava ancora una volta all’Esposizione elettrica internazionale di Francoforte con le dinamo progettate da Jakob, mentre lo stabilimento di Monaco produceva materiale e apparecchiature elettriche che coprivano il mercato bavarese e quello dell’Italia settentrionale. Dense e fosche nubi si affacciavano tuttavia minacciose all’orizzonte dell’impresa degli Einstein. Ampliare i settori industriali significava, infatti, anche dover sostenere gravose richieste di capitale finanziario per poter competere nelle gare di appalto con compagnie e gruppi imprenditoriali di ben nota e consolidata fama e credito. Per poter partecipare alla gara di appalto per l’illuminazione di Monaco, gli Einstein furono costretti addirittura a ipotecare la casa. Purtroppo gli eventi precipitarono e, nel 1894, l’azienda era ormai fallita. Dietro suggerimento di un ingegnere italiano che aveva prestato loro la sua opera, gli Einstein decisero – ma fu soprattutto Jakob a premere per una decisione in tal senso – di spostarsi dalla Baviera in Italia settentrionale. La scelta si fondava su solide e valide ragioni: una piccola impresa avrebbe potuto avere buone opportunità in Italia, in zone dove peraltro era già conosciuta e aveva portato a buon fine diversi affari. Così, sbrigate le ultime pratiche, tra cui quelle della vendita dell’abitazione, gli Einstein partirono per l’avventura italiana, stabilendosi inizialmente a Pavia, in una lussuosa casa appartenuta a Ugo Foscolo, poi a Milano, nel palazzo della contessa Clara Maffei, in via Bigli. All’epoca Albert stava compiendo soddisfacentemente, ma non proprio con entusiasmo, gli studi ginnasiali al Luitpold Gymnasium di Monaco e, dal momento che doveva ancora attendere tre anni per giungere al termine del ciclo e poter accedere a una buona univer-

⁶ Ivi, pp. 6-7.

sità, cosa possibile solo col diploma ginnasiale, fu deciso di lasciarlo da un parente residente nella città bavarese. Il distacco dai genitori, con grande sorpresa di questi ultimi, non durò tuttavia a lungo. Lo scarso entusiasmo di Albert nello studio va inquadrato nell'ambito peculiare del sistema dell'istruzione tedesca in generale, e del *Gymnasium* in particolare. Gli studi ginnasiali avevano lo scopo di forgiare giovani dotati di una solida base generale fondata sulla cultura classica greca e latina. Lo studio di queste due civiltà e delle relative lingue era un elemento irrinunciabile, non sacrificabile, a maggior ragione se si pensa all'efficacia di un apprendimento di questo tipo per la preparazione di una *forma mentis* adeguata e pronta a impegni speculativi o, comunque, di severo impegno intellettuale. Naturalmente ciò si traduceva, praticamente, nel dedicare la maggior parte del tempo allo studio della grammatica greca e latina attraverso la ripetizione ossessiva e meccanica di regole: uno sforzo che Albert mal sopportava e che gli ricordava i metodi propri dell'esercito prussiano, dove la disciplina veniva inculcata attraverso l'esecuzione meccanica di ordini privi di senso. Del resto, la disaffezione verso questa mentalità Albert l'aveva già palesata allorché, ancora bambino, accompagnato dai genitori a una delle parate militari che di tanto in tanto si tenevano a Monaco, scoppiò in un sonoro pianto e si fece promettere che, da grande, i genitori avrebbero fatto in modo che a lui non toccasse la sorte di quella povera gente che marciava come tanti automi a comando. La cosa non era così semplice come Albert poteva immaginare o si potrebbe pensare. Per lo Stato tedesco, ogni maschio era costretto a servire nell'esercito; l'unica soluzione praticabile per evitare una simile fine, consisteva nel lasciare il Paese prima del diciassettesimo anno e rinunciare alla cittadinanza tedesca; in caso contrario si sarebbe stati considerati, e di conseguenza perseguiti, come disertori. Non sorprende così che, molto più tardi, Einstein abbia utilizzato lo stesso parallelismo per stigmatizzare le proprie impressioni sulla scuola e sull'insegnamento scolastico: "I maestri della scuola elementare mi sembravano sergenti, i professori del ginnasio mi sembravano tenenti"⁷. I sergenti dell'esercito prussiano godevano della ben triste fama di durezza e brutalità verso i loro sottoposti, cioè i soldati, tanto quanto i tenenti, che non avevano contatti con la truppa perché appartenenti a un rango supe-

⁷ Cit. in P. Frank, *Einstein. La sua vita e il suo tempo*, Garzanti, Milano 1949, p. 12.

riore, e si distinguevano per l'esercizio maniacale, sebbene indiretto, dell'autorità sui rispettivi subordinati. Nulla di più odioso, dunque, di questo modo di insegnare e di esercitare la disciplina, che annientava le inclinazioni naturali, irreggimentava duramente all'automatismo e annichiliva il senso di libertà: basti pensare che al ginnasio, lo studente che non aveva terminato i compiti nel tempo stabilito era punito con l'obbligo di rimanere nell'istituto scolastico, sotto la severa supervisione di un docente, per tutto il tempo necessario a espletare il lavoro incompiuto.

Negli ultimi giorni del mese di dicembre del 1894 Albert si presentò, col proprio bagaglio, alla porta di casa dei suoi famigliari. Non era una visita prevista per le vacanze, ma una scelta definitiva e radicale, di rottura. Il coraggio inizialmente ostentato nelle lettere inviate alla famiglia nascondeva, in realtà, una crescente depressione e insoddisfazione. Trovatosi improvvisamente solo, tutto quanto era motivo di oppressione, tanto al Gymnasium quanto nel clima che caratterizzava la società tedesca, finì per diventare, ora dopo ora, giorno dopo giorno, maledettamente intollerabile. Quel che accadde, e che portò Albert ad assumersi una responsabilità enorme per un ragazzo di quindici anni, non è del tutto chiaro, nel senso che le pieghe prese dagli eventi sembrano non corrispondere a un piano ben determinato, i cui dettagli sono stati studiati e preventivati in anticipo. Fatto sta che un imprecisato giorno, probabilmente della fine del mese di novembre o agli inizi di dicembre, il professore di greco, tale Degenhart, convocò lo studente e, in termini tanto franchi quanto perentori, lo invitò a lasciare l'istituto. La motivazione espressa in seguito alle deboli e formali proteste dell'interessato, che sosteneva di non aver fatto o detto niente di male, fu che la sua stessa presenza fisica in classe era motivo di turbamento. L'occasione di porre fine alle sofferenze provocate da quell'inferno era troppo ghiotta, e Albert se ne rese subito conto; ma doveva essere gestita con prudenza e scaltrezza. Cosa che il Nostro fece, dal momento che ottenne dal medico di famiglia una certificazione nella quale si dichiarava che il soggetto, sofferente di un forte esaurimento nervoso, doveva astenersi dal frequentare la scuola per almeno sei mesi, e strappò al professore di matematica un attestato secondo il quale, in virtù delle doti matematiche che si riconoscevano all'alunno, lo si dichiarava idoneo a poter essere ammesso in qualsiasi istituto superiore.

Di fronte al padre e alla madre, colti di sorpresa da una simile

mossa, Albert dichiarò in termini categorici e definitivi di voler rinunciare alla cittadinanza tedesca escludendo anche la più remota possibilità di un suo ritorno in territorio germanico. Hermann e Pauline non poterono che prendere atto di una decisione presa sulle loro teste. I mesi seguenti Albert li trascorse lavorando per la famiglia, leggendo, visitando parenti e amici finché il padre trovò il modo di parlargli a quattr'occhi e prospettargli, anche in considerazione dei pochi mezzi finanziari a disposizione, di intraprendere degli studi tecnici, tali da consentirgli un futuro lavorativo, magari continuando la tradizione familiare. Naturalmente, gli scenari che Albert immaginava erano ben altri: aveva deciso di dedicarsi alla matematica pura e alla fisica pura e, di lì a poco, tentare l'esame di ammissione al Politecnico di Zurigo. Le premesse non erano certo a suo favore. Al Politecnico si accedeva, generalmente, a diciotto anni, e Albert ne avrebbe compiuti solo sedici, e, requisito indispensabile, dopo aver conseguito il diploma di maturità, di cui era ovviamente sprovvisto. Al suo attivo poteva far pesare solo l'attestato del suo professore di matematica del ginnasio che, nel corso della prova di ammissione comunque tentata e sostenuta da Albert nel settembre del 1895, ottenne ampia conferma. Purtroppo, l'esito della prova di storia e di lingua fu catastrofico e costrinse il giovane a terminare gli studi per la maturità presso la scuola cantonale di Aarau, in Svizzera. In compenso, Hermann ottenne che ad Albert fosse tolta la cittadinanza del Land del Württemberg, a cui apparteneva per nascita. Il 28 gennaio 1896 Albert Einstein aveva definitivamente risolto ogni problema di carattere militare e nell'autunno poté concorrere per la maturità e accedere al Politecnico con un progetto per il proprio futuro ormai ben definito, come sta a testimoniare il compito in classe di lingua francese compilato alla scuola cantonale di Aarau.

Orbene, dobbiamo a questo punto domandarci: perché le due precoci esperienze che abbiamo in precedenza descritto hanno segnato così profondamente Einstein, tanto da indurlo a comunicarle nel contesto di una autobiografia intellettuale? La risposta è articolata sebbene, come vedremo, trovi il luogo del suo più vero e vivo significato nel senso di libertà, di inventiva, di possibilità di mettere in opera le nostre personali inclinazioni. L'importanza delle due esperienze risiede infatti interamente nella loro crucialità, che si propone con nitida consapevolezza quando si pone l'attenzione sull'effetto che tali esperienze provocano sul piano del vissuto, quando si

analizza il loro contenuto, infine, non più sul piano del merito ma del metodo, quando si guarda alla stessa decisione einsteiniana di rivelarle e renderle accessibili, ripercorribili da chiunque lo desideri, nell'ambito peculiare della teoria della conoscenza. Anzitutto sull'effetto provocato, detto "durevole e profondo" nel caso della prima esperienza, indicato come "indescrivibile", nella seconda esperienza, attribuito da Einstein alla "meraviglia". Che cos'è questa "meraviglia"? Non è certo una moda mentale caratterizzata dal modo di porsi di fronte al mondo; al contrario, essa è qualcosa che irrompe, inattesa, scardinando e infrangendo ogni nostro quadro di riferimento, e che si configura propriamente come un atteggiamento spirituale che svela il fatto stesso della libertà, il suo essere un dato originario che precede ogni acquisizione programmata e agevolata dall'esercizio dell'abitudine. Come accade, si chiede il fisico tedesco, "che noi ci 'meravigliamo' di certe esperienze in modo così spontaneo? Questa 'meraviglia' si manifesta quando un'esperienza entra in conflitto con un mondo di concetti già sufficientemente stabilito in noi. Ogni qualvolta sperimentiamo in modo aspro e intenso un simile conflitto, il nostro mondo intellettuale reagisce in modo decisivo. Lo sviluppo di questo mondo intellettuale è in un certo senso una continua fuga dalla 'meraviglia'⁸, dunque dall'orizzonte illimitato della novità, messaggero di libertà.

La crucialità delle due esperienze si rivela poi, come annunciavamo, nel loro contenuto. Infatti, benché proprio dell'ambito del sapere scientifico, ciò che viene colto con sorpresa e "meraviglia" è di ordine propriamente filosofico. Se, da un lato, si fa strada l'annuncio di una realtà oggettiva, che è tale al di là delle condizioni percettive del soggetto conoscente, cioè indipendentemente da quest'ultimo; dall'altro si prospetta la possibilità di una conoscenza *a priori*, che è tale prima e autonomamente da ogni esperienza. Detto in altri termini: il caso dell'esperienza che ha per oggetto la geometria piana euclidea sta a significare che possiamo conoscere attraverso il solo pensiero gli oggetti materiali dell'esperienza sensibile. Così, all'epoca della sua prima esperienza Einstein non è incuriosito o stupito dal funzionamento intrinseco della bussola tascabile donatagli dal padre, ma "meravigliato" da ciò che viene a prospettarsi davanti agli occhi della sua mente, e che sta dietro il fatto che l'ago si orien-

⁸ Einstein, *op. cit.*, p. 6.

ta in una determinata direzione. La diversità, l'anomalia rispetto all'ordinarietà suggeriva che "dietro alle cose doveva esserci un che di profondamente nascosto. Ciò che l'uomo vede davanti ai suoi occhi fin dall'infanzia non provoca alcuna reazione; egli non si stupisce della caduta dei corpi, del vento e della pioggia, della luna o del fatto che la luna non cada, né della differenza tra la materia vivente e non vivente"⁹. Allo stesso modo, ciò che stupirà l'adolescente Einstein non è tanto l'impegno con cui Euclide risolve determinati problemi geometrici né, solo e semplicemente, la possibilità, che in genere sperimentiamo affacciandoci timorosamente nell'universo geometrico, di dimostrare teoremi complessi attraverso un ristretto numero di proposizioni, gli assiomi indimostrabili, quanto l'impressione, che lo stesso Einstein dirà "erronea", che vi sia una perfetta corrispondenza tra gli strumenti del pensiero e quelli della sensibilità così che la stessa fondatezza e solidità di questi ultimi debba essere predicata anche per i primi. Dice il Nostro: "Mi sembrava che le cose di cui tratta la geometria non fossero essenzialmente diverse da quelle che si percepiscono coi sensi, 'che si possono vedere e toccare'. Quest'idea rudimentale, probabilmente la stessa che sta alla base della ben nota problematica kantiana sulla possibilità dei 'giudizi sintetici a priori', si fonda ovviamente sul fatto che il rapporto esistente fra i concetti geometrici e gli oggetti dell'esperienza sensibile (bacchetta rigida, intervallo finito, ecc.) mi era inconsciamente presente. Se quindi sembrava possibile acquistare una certa conoscenza degli oggetti dell'esperienza per mezzo del pensiero puro, questa 'meraviglia' nasceva da un errore"¹⁰. Mettere a nudo la natura dell'"errore" pacificamente ammesso significherà, come avremo modo di vedere allorché ricostruiremo l'epistemologia einsteiniana nei suoi aspetti più intimi, affrontare il terzo aspetto, quello relativo al metodo, che contribuisce a rendere cruciali le due esperienze di cui si è finora parlato.

⁹ *Ivi*, p. 7.

¹⁰ *Ibid.*

IL PROGETTO DI UNA VITA

1. “Pensare solo per il piacere di pensare”

Nel frequentare i dipartimenti e i laboratori scientifici, specie quelli dei fisici, è davvero raro incontrare uomini dediti alla scienza che parallelamente, e talvolta persino contemporaneamente alla ricerca, coltivano il pensiero storico e soprattutto filosofico relativo al proprio ambito disciplinare. Se non per scelta, almeno per prudenza, gli scienziati di questo genere evitano accuratamente di stringere rapporti molto stretti con oggetti che non siano numeri o strumenti estremamente sofisticati; insomma, con tutto ciò che non è deputato al conseguimento di uno scopo ben preciso: la misura. E se, fortuitamente, la riflessione sulle procedure stabilite ed eseguite in vista dell’obiettivo porta questi ricercatori a sconfinare in territori dove il pensiero finisce per interrogare se stesso, una sottile ma ferma preoccupazione, in gran parte nata sui banchi di studio sotto l’imperativo di non tollerare distrazioni o divagazioni, esige che l’eventuale licenza che ci si è concessi sia confinata nel segreto della coscienza interiore per non esser immediatamente oggetto di scherno e di critica. Ebbene, sotto questo aspetto, Albert Einstein può essere considerato una piacevole e stimolante eccezione.

Che la ricerca e la speculazione costituissero potenzialmente un progetto di vita da far proprio e da difendere tenacemente contro tutto e contro tutti, il Nostro lo comprese con lucidità e chiarezza quando, pressappoco sedicenne, interpellato a proposito delle proprie speranze per il futuro, indicò gli ambiti puramente teorici della matematica e della fisica come quelli prescelti, adducendo considerazioni particolarmente interessanti. L’occasione per esternare le proprie aspettative nacque da un compito in classe, per l’appunto intitolato “I miei progetti per il futuro”, da compilare in lingua francese.

Un uomo contento è troppo soddisfatto del presente per pensare al futuro. Ma d'altra parte sono sempre i giovani che tendono a fare castelli in aria. È inoltre logico che un giovane con intenzioni serie si formi un'idea il più possibile precisa delle sue aspirazioni. Se avrò la fortuna di superare gli esami, andrò all'Istituto federale di tecnologia di Zurigo. Rimarrò lì per quattro anni a studiare matematica e fisica. Penso che diventerò professore in quei rami della scienza specializzandomi nel campo teorico. Queste sono le ragioni che mi hanno suggerito tale progetto: soprattutto la mia attitudine personale per il pensiero astratto e matematico, poi la mancanza di fantasia e di doti pratiche. Anche i miei gusti mi hanno indotto a questa scelta. È una cosa del tutto naturale: è sempre più piacevole fare le cose che si fanno bene. Inoltre la professione scientifica comporta una certa indipendenza che mi attira assai¹.

Com'è agevole capire, nella prima parte di questo breve componimento Einstein enuncia le sue intenzioni, poi, in seguito, espone le ragioni che le motivano. Sin dall'inizio, tuttavia, non si può non essere incuriositi da due affermazioni. Anzitutto, il Nostro parla espressamente di "fortuna" in relazione al superamento della prova conclusiva di esame; in secondo luogo, indica senza esitare l'istituto dove continuare gli studi, come richiesto dalle proprie esigenze e aspettative, cioè il Politecnico di Zurigo (Heidgenössische Technische Hochschule). Perché? Certo, una componente variabile da attribuire alla cosiddetta "dea bendata" (ma perché non al semplice caso?) è quasi sempre comunemente ammessa nel sostenere delle prove; comunque sia, la "fortuna" sembrerebbe non aver niente a che vedere con la scelta precisa di una ben identificata istituzione scolastica. Perché il Politecnico e non l'Università di Zurigo o di Berna, quella di Heidelberg o di Gottinga?

Il testo, anche nella seconda parte, è del resto estremamente chiaro, a tal punto da trasformare pericolosamente la curiosità in precedenza sollecitata in una preoccupante sensazione di dissonanza dovuta a una chiara incoerenza. Da esso, infatti, emerge con palese evidenza la precisa consapevolezza del giovane Albert di essere naturalmente incline alla vita intellettuale e "spirituale", tendenza corroborata dal fatto di essere gradita e soprattutto perseguita, vo-

¹ H. Dukas, B. Hoffmann (a cura di), *The Human Side*, Princeton University Press, Princeton 1979; trad. it. di A. Gilberti, *Albert Einstein. Il lato umano*, Einaudi, Torino 1980, pp. 12-13.

luta, perché fonte di soddisfazione: un piacere da ricercare perché ben raggiunto, e del quale si vorrebbe continuamente godere. Tanto che, come in seguito riferirà lo stesso Einstein, “quando non ho qualche problema particolare cui dedicarmi, mi diverto a ricostruire le prove di teoremi matematici e fisici che mi sono ormai noti da tempo. Non vi è alcuna utilità in questo, si tratta solo di una occasione di concedermi il piacere di pensare”².

Ma allora, a maggior ragione, perché affidare la propria formazione a un istituto come il Politecnico, dove peraltro è la parte espressamente applicativa, tecnologica, e non quella pura della matematica e della fisica, che viene insegnata e perseguita? La prospettiva che si intende guadagnare, infine, offre indubbiamente anche una certa gratificazione pratica, ovvero è in grado di garantire un’indipendenza economica, benché il denaro inteso come fine a se stesso, come mera accumulazione, non sia mai stato un obiettivo di Einstein. “Anch’io”, ci dice infatti, “dovevo diventare ingegnere. Ma trovai intollerabile l’idea di applicare il genio creativo a problemi che non fanno che complicare la vita quotidiana – e tutto ciò unicamente al triste scopo di guadagnare denaro. Pensare solo per il piacere di pensare, come nella musica”³. Eppure, l’importanza attribuita alla questione economica avrebbe dovuto essere una molla ben più tesa: almeno quanto lo era la situazione esistenziale del giovane studente al Politecnico, confidata e descritta in una lettera nel 1888.

Quel che mi opprime sono ovviamente le difficoltà dei miei genitori. Sono profondamente addolorato del fatto che io, ormai adulto, devo starmene a guardare con le mani in mano, senza essere del benché minimo aiuto. Non sono altro che un peso per la famiglia (...) Sarebbe meglio se non fossi mai nato. A volte l’unico pensiero che mi conforta e il mio unico scampo alla disperazione è che ho sempre fatto tutto il poco che potevo: non mi sono permesso, un anno dopo l’altro, né svaghi né divertimenti, tranne quelli forniti dallo studio⁴.

Che la strada più naturale per affermarsi nel mondo delle professioni fosse, per Albert, quella di studiare ingegneria o, più semplicemente, elettrotecnica, lo si comprende facilmente se si precisa il contesto storico e si dà peso all’influenza culturale esercitata dalla

² Ivi, p. 16.

³ *Ibid.*

⁴ Ivi, pp. 13-14.

cerchia familiare. Nato a Ulm, in Germania, il 14 marzo 1879 da Hermann Einstein e Pauline Koch, di origini ebraiche, Albert si trova immerso nella frenesia rivoluzionaria e ottimistica della scoperta delle leggi che governano l'elettricità e che ne consentono l'applicazione. Il magnetismo era esattamente quella forza straordinaria che induceva corrente elettrica attraverso i semplici avvolgimenti di rame delle dinamo e che, non importa a quale distanza, attraverso centrali e reti di fili, consentiva di illuminare le città e i villaggi o, più modestamente, di mettere in moto delle macchine. Ad appena un anno di vita Albert è costretto a trasferirsi nella città di Monaco, in Baviera, dove nel 1881 nasce la sorella Maria, familiarmente detta Maja. Il padre Hermann e il fratello Jakob, ingegnere, che viveva con loro, avevano dato vita, speranzosi in un futuro che – è il caso di dirlo – si prospettava radioso, a una piccola impresa industriale che si occupava proprio della costruzione di dinamo, lampade e altri costituenti elettrici. Inizialmente le cose andarono bene, anzi molto bene; basti pensare che dopo appena due anni di attività a Monaco la piccola impresa poté ben figurare e mostrare lampade, dinamo, e persino un sistema telefonico, all'Esposizione elettrica internazionale del 1882. I buoni risultati, come è naturale, spinsero gli Einstein ad allargare ulteriormente i settori di interesse e di investimento e, ovviamente, di profitto: alla costruzione di apparecchiature elettriche si affiancò l'attività di installazione di reti di energia elettrica e di illuminazione. Nel 1885 l'impresa, rinominata *Elektro-Technische Fabrik J. Einstein & Co.*, si aggiudicò l'appalto per la fornitura della prima illuminazione alla famosa festa bavarese della birra, l'*Oktoberfest*; tre anni dopo, registreranno all'attivo l'allacciamento elettrico della cittadina di Schwabing.

In realtà, come ci apprestiamo a mostrare, le due questioni, quella relativa alla “fortuna” e quella riguardante la scelta del Politecnico, sono intimamente legate e, soprattutto, rinviano a un aspetto fondamentale della personalità e del carattere di Einstein, aspetto al quale inizieremo ad avvicinarci guardando proprio alle ragioni esposte dal giovane studente, e che definiremo aprendo un'ulteriore parentesi sulla sua infanzia e adolescenza. Quella dissonanza che, poco fa, ci aveva fatto temere l'incoerenza, svanirà non appena sarà chiaro che, per realizzare il proprio disegno, Einstein era obbligato a percorrere la strada descritta.

2. Tra bussola e teoremi di geometria

Le “ragioni” portate a giustificazione e fondazione delle scelte future si basano infatti, come annunciavamo, su due precoci ma cruciali esperienze di Einstein, riportate dallo stesso fisico teorico nelle linee autobiografiche tratteggiate nel 1947. La prima esperienza risale al 1884, all'età di cinque anni (nell'autunno dell'anno successivo Albert sarà iscritto alla Petersschule di Monaco, una scuola elementare cattolica: sarà l'unico bambino di origine ebraica della sua classe). Di natura chiaramente pratica, l'esperienza riguarda il funzionamento di una bussola. Che cos'è una bussola? È semplicemente uno strumento di orientamento di cui ci avvaliamo quando intendiamo individuare una direzione rispetto a un punto di riferimento noto. La forma più semplice ed elementare di una bussola è costituita da un ago magnetico in grado di ruotare liberamente su un piano orizzontale fissato, mediante un piccolo perno, al centro di un quadrante circolare diviso in 360° . L'ago della bussola oscilla e si allinea con la direzione del campo magnetico terrestre puntando verso nord. Come sappiamo, il nord magnetico non coincide perfettamente con il nord geografico, che coincide invece con una delle due estremità dell'asse terrestre. Dice Einstein:

Il fatto che l'ago si comportasse in un certo modo non si accordava assolutamente con la natura dei fenomeni che potevano trovar posto nel mio mondo concettuale di allora, tutto basato sull'esperienza diretta del “toccare”. Ricordo ancora – o almeno mi sembra di ricordare – che questa esperienza mi fece un'impressione durevole e profonda⁵.

La seconda esperienza risale al 1891, all'età di dodici anni. Di natura evidentemente teorica, è relativa alla geometria piana euclidea.

Fu leggendo un libretto sulla geometria piana euclidea, capitato fra le mani al principio di un anno scolastico. C'erano delle asserzioni, ad esempio quella che le tre altezze di un triangolo si intersecano in un solo punto, che – pur non essendo affatto evidenti – potevano tuttavia essere dimostrate con tanta certezza da eliminare qualsiasi dubbio. Questa lucidità e certezza mi fecero un'indescrivibile impressione. Il fatto che l'assioma dovesse esse-

⁵ A. Einstein, *Note autobiografiche*, in AA.VV., *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, Bollati Boringhieri, Torino 1958, p. 6.

re accettato senza dimostrazione non mi dava fastidio. Per me era sufficiente, in ogni caso, poter basare le dimostrazioni su proposizioni la cui validità non mi sembrava dubbia. Ricordo, ad esempio, che uno zio mi espose il teorema di Pitagora prima che il sacro libretto di geometria mi fosse capitato fra le mani. Con molta fatica riuscii a “dimostrare” il teorema servendomi della similitudine dei triangoli; e così facendo mi sembrò evidente che il rapporto fra i lati dei triangoli rettangoli dovesse essere completamente determinato da un solo angolo acuto. Mi sembrava che ci fosse bisogno di qualche dimostrazione solo per le cose che non apparissero altrettanto “evidenti”⁶.

A questa data, la Fabrik si affermava ancora una volta all’Esposizione elettrica internazionale di Francoforte con le dinamo progettate da Jakob, mentre lo stabilimento di Monaco produceva materiale e apparecchiature elettriche che coprivano il mercato bavarese e quello dell’Italia settentrionale. Dense e fosche nubi si affacciavano tuttavia minacciose all’orizzonte dell’impresa degli Einstein. Ampliare i settori industriali significava, infatti, anche dover sostenere gravose richieste di capitale finanziario per poter competere nelle gare di appalto con compagnie e gruppi imprenditoriali di ben nota e consolidata fama e credito. Per poter partecipare alla gara di appalto per l’illuminazione di Monaco, gli Einstein furono costretti addirittura a ipotecare la casa. Purtroppo gli eventi precipitarono e, nel 1894, l’azienda era ormai fallita. Dietro suggerimento di un ingegnere italiano che aveva prestato loro la sua opera, gli Einstein decisero – ma fu soprattutto Jakob a premere per una decisione in tal senso – di spostarsi dalla Baviera in Italia settentrionale. La scelta si fondava su solide e valide ragioni: una piccola impresa avrebbe potuto avere buone opportunità in Italia, in zone dove peraltro era già conosciuta e aveva portato a buon fine diversi affari. Così, sbrigate le ultime pratiche, tra cui quelle della vendita dell’abitazione, gli Einstein partirono per l’avventura italiana, stabilendosi inizialmente a Pavia, in una lussuosa casa appartenuta a Ugo Foscolo, poi a Milano, nel palazzo della contessa Clara Maffei, in via Bigli. All’epoca Albert stava compiendo soddisfacentemente, ma non proprio con entusiasmo, gli studi ginnasiali al Luitpold Gymnasium di Monaco e, dal momento che doveva ancora attendere tre anni per giungere al termine del ciclo e poter accedere a una buona univer-

⁶ Ivi, pp. 6-7.

sità, cosa possibile solo col diploma ginnasiale, fu deciso di lasciarlo da un parente residente nella città bavarese. Il distacco dai genitori, con grande sorpresa di questi ultimi, non durò tuttavia a lungo. Lo scarso entusiasmo di Albert nello studio va inquadrato nell'ambito peculiare del sistema dell'istruzione tedesca in generale, e del *Gymnasium* in particolare. Gli studi ginnasiali avevano lo scopo di forgiare giovani dotati di una solida base generale fondata sulla cultura classica greca e latina. Lo studio di queste due civiltà e delle relative lingue era un elemento irrinunciabile, non sacrificabile, a maggior ragione se si pensa all'efficacia di un apprendimento di questo tipo per la preparazione di una *forma mentis* adeguata e pronta a impegni speculativi o, comunque, di severo impegno intellettuale. Naturalmente ciò si traduceva, praticamente, nel dedicare la maggior parte del tempo allo studio della grammatica greca e latina attraverso la ripetizione ossessiva e meccanica di regole: uno sforzo che Albert mal sopportava e che gli ricordava i metodi propri dell'esercito prussiano, dove la disciplina veniva inculcata attraverso l'esecuzione meccanica di ordini privi di senso. Del resto, la disaffezione verso questa mentalità Albert l'aveva già palesata allorché, ancora bambino, accompagnato dai genitori a una delle parate militari che di tanto in tanto si tenevano a Monaco, scoppiò in un sonoro pianto e si fece promettere che, da grande, i genitori avrebbero fatto in modo che a lui non toccasse la sorte di quella povera gente che marciava come tanti automi a comando. La cosa non era così semplice come Albert poteva immaginare o si potrebbe pensare. Per lo Stato tedesco, ogni maschio era costretto a servire nell'esercito; l'unica soluzione praticabile per evitare una simile fine, consisteva nel lasciare il Paese prima del diciassettesimo anno e rinunciare alla cittadinanza tedesca; in caso contrario si sarebbe stati considerati, e di conseguenza perseguiti, come disertori. Non sorprende così che, molto più tardi, Einstein abbia utilizzato lo stesso parallelismo per stigmatizzare le proprie impressioni sulla scuola e sull'insegnamento scolastico: "I maestri della scuola elementare mi sembravano sergenti, i professori del ginnasio mi sembravano tenenti"⁷. I sergenti dell'esercito prussiano godevano della ben triste fama di durezza e brutalità verso i loro sottoposti, cioè i soldati, tanto quanto i tenenti, che non avevano contatti con la truppa perché appartenenti a un rango supe-

⁷ Cit. in P. Frank, *Einstein. La sua vita e il suo tempo*, Garzanti, Milano 1949, p. 12.

riore, e si distinguevano per l'esercizio maniacale, sebbene indiretto, dell'autorità sui rispettivi subordinati. Nulla di più odioso, dunque, di questo modo di insegnare e di esercitare la disciplina, che annientava le inclinazioni naturali, irreggimentava duramente all'automatismo e annichiliva il senso di libertà: basti pensare che al ginnasio, lo studente che non aveva terminato i compiti nel tempo stabilito era punito con l'obbligo di rimanere nell'istituto scolastico, sotto la severa supervisione di un docente, per tutto il tempo necessario a espletare il lavoro incompiuto.

Negli ultimi giorni del mese di dicembre del 1894 Albert si presentò, col proprio bagaglio, alla porta di casa dei suoi famigliari. Non era una visita prevista per le vacanze, ma una scelta definitiva e radicale, di rottura. Il coraggio inizialmente ostentato nelle lettere inviate alla famiglia nascondeva, in realtà, una crescente depressione e insoddisfazione. Trovatosi improvvisamente solo, tutto quanto era motivo di oppressione, tanto al Gymnasium quanto nel clima che caratterizzava la società tedesca, finì per diventare, ora dopo ora, giorno dopo giorno, maledettamente intollerabile. Quel che accadde, e che portò Albert ad assumersi una responsabilità enorme per un ragazzo di quindici anni, non è del tutto chiaro, nel senso che le pieghe prese dagli eventi sembrano non corrispondere a un piano ben determinato, i cui dettagli sono stati studiati e preventivati in anticipo. Fatto sta che un imprecisato giorno, probabilmente della fine del mese di novembre o agli inizi di dicembre, il professore di greco, tale Degenhart, convocò lo studente e, in termini tanto franchi quanto perentori, lo invitò a lasciare l'istituto. La motivazione espressa in seguito alle deboli e formali proteste dell'interessato, che sosteneva di non aver fatto o detto niente di male, fu che la sua stessa presenza fisica in classe era motivo di turbamento. L'occasione di porre fine alle sofferenze provocate da quell'inferno era troppo ghiotta, e Albert se ne rese subito conto; ma doveva essere gestita con prudenza e scaltrezza. Cosa che il Nostro fece, dal momento che ottenne dal medico di famiglia una certificazione nella quale si dichiarava che il soggetto, sofferente di un forte esaurimento nervoso, doveva astenersi dal frequentare la scuola per almeno sei mesi, e strappò al professore di matematica un attestato secondo il quale, in virtù delle doti matematiche che si riconoscevano all'alunno, lo si dichiarava idoneo a poter essere ammesso in qualsiasi istituto superiore.

Di fronte al padre e alla madre, colti di sorpresa da una simile

mossa, Albert dichiarò in termini categorici e definitivi di voler rinunciare alla cittadinanza tedesca escludendo anche la più remota possibilità di un suo ritorno in territorio germanico. Hermann e Pauline non poterono che prendere atto di una decisione presa sulle loro teste. I mesi seguenti Albert li trascorse lavorando per la famiglia, leggendo, visitando parenti e amici finché il padre trovò il modo di parlargli a quattr'occhi e prospettargli, anche in considerazione dei pochi mezzi finanziari a disposizione, di intraprendere degli studi tecnici, tali da consentirgli un futuro lavorativo, magari continuando la tradizione familiare. Naturalmente, gli scenari che Albert immaginava erano ben altri: aveva deciso di dedicarsi alla matematica pura e alla fisica pura e, di lì a poco, tentare l'esame di ammissione al Politecnico di Zurigo. Le premesse non erano certo a suo favore. Al Politecnico si accedeva, generalmente, a diciotto anni, e Albert ne avrebbe compiuti solo sedici, e, requisito indispensabile, dopo aver conseguito il diploma di maturità, di cui era ovviamente sprovvisto. Al suo attivo poteva far pesare solo l'attestato del suo professore di matematica del ginnasio che, nel corso della prova di ammissione comunque tentata e sostenuta da Albert nel settembre del 1895, ottenne ampia conferma. Purtroppo, l'esito della prova di storia e di lingua fu catastrofico e costrinse il giovane a terminare gli studi per la maturità presso la scuola cantonale di Aarau, in Svizzera. In compenso, Hermann ottenne che ad Albert fosse tolta la cittadinanza del Land del Württemberg, a cui apparteneva per nascita. Il 28 gennaio 1896 Albert Einstein aveva definitivamente risolto ogni problema di carattere militare e nell'autunno poté concorrere per la maturità e accedere al Politecnico con un progetto per il proprio futuro ormai ben definito, come sta a testimoniare il compito in classe di lingua francese compilato alla scuola cantonale di Aarau.

Orbene, dobbiamo a questo punto domandarci: perché le due precoci esperienze che abbiamo in precedenza descritto hanno segnato così profondamente Einstein, tanto da indurlo a comunicarle nel contesto di una autobiografia intellettuale? La risposta è articolata sebbene, come vedremo, trovi il luogo del suo più vero e vivo significato nel senso di libertà, di inventiva, di possibilità di mettere in opera le nostre personali inclinazioni. L'importanza delle due esperienze risiede infatti interamente nella loro crucialità, che si propone con nitida consapevolezza quando si pone l'attenzione sull'effetto che tali esperienze provocano sul piano del vissuto, quando si

analizza il loro contenuto, infine, non più sul piano del merito ma del metodo, quando si guarda alla stessa decisione einsteiniana di rivelarle e renderle accessibili, ripercorribili da chiunque lo desideri, nell'ambito peculiare della teoria della conoscenza. Anzitutto sull'effetto provocato, detto "durevole e profondo" nel caso della prima esperienza, indicato come "indescrivibile", nella seconda esperienza, attribuito da Einstein alla "meraviglia". Che cos'è questa "meraviglia"? Non è certo una moda mentale caratterizzata dal modo di porsi di fronte al mondo; al contrario, essa è qualcosa che irrompe, inattesa, scardinando e infrangendo ogni nostro quadro di riferimento, e che si configura propriamente come un atteggiamento spirituale che svela il fatto stesso della libertà, il suo essere un dato originario che precede ogni acquisizione programmata e agevolata dall'esercizio dell'abitudine. Come accade, si chiede il fisico tedesco, "che noi ci 'meravigliamo' di certe esperienze in modo così spontaneo? Questa 'meraviglia' si manifesta quando un'esperienza entra in conflitto con un mondo di concetti già sufficientemente stabilito in noi. Ogni qualvolta sperimentiamo in modo aspro e intenso un simile conflitto, il nostro mondo intellettuale reagisce in modo decisivo. Lo sviluppo di questo mondo intellettuale è in un certo senso una continua fuga dalla 'meraviglia'⁸, dunque dall'orizzonte illimitato della novità, messaggero di libertà.

La crucialità delle due esperienze si rivela poi, come annunciavamo, nel loro contenuto. Infatti, benché proprio dell'ambito del sapere scientifico, ciò che viene colto con sorpresa e "meraviglia" è di ordine propriamente filosofico. Se, da un lato, si fa strada l'annuncio di una realtà oggettiva, che è tale al di là delle condizioni percettive del soggetto conoscente, cioè indipendentemente da quest'ultimo; dall'altro si prospetta la possibilità di una conoscenza *a priori*, che è tale prima e autonomamente da ogni esperienza. Detto in altri termini: il caso dell'esperienza che ha per oggetto la geometria piana euclidea sta a significare che possiamo conoscere attraverso il solo pensiero gli oggetti materiali dell'esperienza sensibile. Così, all'epoca della sua prima esperienza Einstein non è incuriosito o stupito dal funzionamento intrinseco della bussola tascabile donatagli dal padre, ma "meravigliato" da ciò che viene a prospettarsi davanti agli occhi della sua mente, e che sta dietro il fatto che l'ago si orien-

⁸ Einstein, *op. cit.*, p. 6.

ta in una determinata direzione. La diversità, l'anomalia rispetto all'ordinarietà suggeriva che "dietro alle cose doveva esserci un che di profondamente nascosto. Ciò che l'uomo vede davanti ai suoi occhi fin dall'infanzia non provoca alcuna reazione; egli non si stupisce della caduta dei corpi, del vento e della pioggia, della luna o del fatto che la luna non cada, né della differenza tra la materia vivente e non vivente"⁹. Allo stesso modo, ciò che stupirà l'adolescente Einstein non è tanto l'impegno con cui Euclide risolve determinati problemi geometrici né, solo e semplicemente, la possibilità, che in genere sperimentiamo affacciandoci timorosamente nell'universo geometrico, di dimostrare teoremi complessi attraverso un ristretto numero di proposizioni, gli assiomi indimostrabili, quanto l'impressione, che lo stesso Einstein dirà "erronea", che vi sia una perfetta corrispondenza tra gli strumenti del pensiero e quelli della sensibilità così che la stessa fondatezza e solidità di questi ultimi debba essere predicata anche per i primi. Dice il Nostro: "Mi sembrava che le cose di cui tratta la geometria non fossero essenzialmente diverse da quelle che si percepiscono coi sensi, 'che si possono vedere e toccare'. Quest'idea rudimentale, probabilmente la stessa che sta alla base della ben nota problematica kantiana sulla possibilità dei 'giudizi sintetici a priori', si fonda ovviamente sul fatto che il rapporto esistente fra i concetti geometrici e gli oggetti dell'esperienza sensibile (bacchetta rigida, intervallo finito, ecc.) mi era inconsciamente presente. Se quindi sembrava possibile acquistare una certa conoscenza degli oggetti dell'esperienza per mezzo del pensiero puro, questa 'meraviglia' nasceva da un errore"¹⁰. Mettere a nudo la natura dell'"errore" pacificamente ammesso significherà, come avremo modo di vedere allorché ricostruiremo l'epistemologia einsteiniana nei suoi aspetti più intimi, affrontare il terzo aspetto, quello relativo al metodo, che contribuisce a rendere cruciali le due esperienze di cui si è finora parlato.

⁹ *Ivi*, p. 7.

¹⁰ *Ibid.*

MECCANICA CLASSICA ED ELETTROMAGNETISMO

1. Al Politecnico federale

La sesta sezione A di fisica e matematica del Politecnico comprendeva, nel 1896, un gruppo di cinque studenti, quattro maschi, tra cui Albert, e una femmina. Marcel Grossmann, dichiaratamente aspirante matematico di successo, legò subito con Einstein; il suo istinto infallibile e la sua altrettanto sviluppata capacità di discernere accuratamente i caratteri e le doti anche questa volta lo avevano ben indirizzato. A tal punto che Albert divenne, dopo una formale presentazione, frequentatore gradito di casa Grossmann. Si tratta di un rapporto, quello con Marcel e la sua famiglia, che si rivelerà molto importante per il Nostro, tanto nel periodo di studi quanto in quello successivo: nel corso degli studi al Politecnico, perché sarà Marcel, sempre presente e attento alle lezioni, che poi rielaborava, a mettere al corrente e a tappare le numerose falle della incostante presenza di Albert; dopo il diploma conseguito al Politecnico, perché la possibilità di entrare prima come stagista, poi come impiegato in pianta stabile all'Ufficio brevetti di Berna, dunque di poter contare su uno stipendio mensile adeguato, si deve all'interessamento del padre di Marcel, mentre a quest'ultimo Albert si affiderà nell'arco del decennio che lo vedrà impegnato sul fronte dell'elaborazione di una teoria della gravitazione, come supporto necessario sul piano matematico. Jakob Ehrat, di Schaffhouse, sedeva spesso a fianco di Albert nel corso delle lezioni; gran lavoratore, grazie all'impegno e a una tenace determinazione era riuscito ad accedere al Politecnico. Il suo carattere ansioso lo costringeva, specie nei periodi forti, quelli di preparazione agli esami, a chiedere frequenti colloqui con il Nostro che, anche in questo caso, era sempre ospite gradito della madre di Ehrat, che spesso visitava, specie quando più forte si faceva sentire il senso di solitudine. Louis Kollros, proveniente da una cittadina nei pressi del confine francese, chiudeva il contingente maschile. Il quinto membro del gruppo, e

anche il più anziano, era una ragazza ungherese di ventuno anni, Mileva Marić, figlia di un accorto proprietario terriero, nonché giudice in terra di Serbia. Si dice che fosse bella in maniera intensa, inquietante, nonostante un difetto all'anca che ne limitava visibilmente la deambulazione. Il 6 gennaio 1903, contro tutto e contro tutti, diverrà la signora Einstein.

L'inizio degli studi universitari vide, come c'era da aspettarsi, un approccio assai poco entusiastico da parte di Albert, ma per motivi che, come vedremo, sono completamente diversi rispetto a quelli che avevano caratterizzato la precedente e sofferta stagione scolastica. Al primo anno, dei ben sei corsi obbligatori, cinque erano di matematica e quello di fisica, dedicato alla meccanica, iniziava solo nel secondo semestre. Come si spiega questa disaffezione per uno che espressamente, e con una determinata ostinazione, intendeva dedicare la propria esistenza alla matematica e alla fisica teorica? Affermare, come talvolta si è fatto anche recentemente, che Einstein non aveva inclinazione per gli studi matematici, e ancor meno a seguire le lezioni¹¹, stride in modo evidente col fatto che dai dieci ai sedici anni il Nostro si interessò in modo approfondito non solo di filosofia, ma anche e soprattutto di matematica e fisica, in ambiti non certo agevoli quali i calcoli integrale e differenziale¹². È ben vero che lo stesso Einstein riconoscerà di non essere stato uno "studente modello", nel senso della assiduità alle lezioni, ben consapevole di aver gettato alle ortiche un'opportunità davvero molto importante vista la classe docente, che comprendeva tutti insegnanti di primo ordine, sui quali poter contare. Afferma infatti il Nostro: "Ebbi maestri eccellenti (Hurwitz, Minkowski, ad esempio), e avrei potuto farmi una preparazione matematica veramente solida. Invece, lavorai per la maggior parte del tempo nel laboratorio di fisica, affascinato dal contatto diretto con l'esperienza. Il resto del tempo lo dedicai soprattutto a studiare a casa le opere di Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, ecc."¹³. Ma lo stesso fisico tedesco ci spiega anche i motivi del pro-

¹¹ Cfr. D. Overbye, *Einstein in Love. A Scientific Romance*, Viking Penguin, New York-London 2000; trad. it. di O. Gargano, *Einstein innamorato. La vita di un genio tra scoperte scientifiche e passione romantica*, Bompiani, Milano 2002, p. 28.

¹² Cfr. Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 9. Se gli zii stimolavano Albert sul piano della scienza, con Max Talmey, un giovane polacco studente di medicina che divenne abituale frequentatore degli Einstein, discusse approfonditamente la *Critica della ragion pura* di Immanuel Kant, nonché i lavori di Arthur Schopenhauer (cfr. Overbye, *op. cit.* pp. 8-9).

¹³ *Ibid.*

prio comportamento, delineando così la figura di un giovane studente tutt'altro che vagabondo o molto propenso alle distrazioni.

Il fatto che trascurassi in parte le matematiche dipese non soltanto dal maggiore interesse che avevo per le scienze naturali, ma anche da questa strana esperienza: mi accorsi, cioè, che le matematiche si dividevano in numerosi rami, ciascuno dei quali poteva facilmente assorbire il breve tempo che ci è concesso di vivere; per conseguenza mi trovai nella posizione dell'asino di Buridano che non era capace di scegliere fra due mucchi di fieno. Ciò era ovviamente dovuto al fatto che non ero in grado, nel campo delle matematiche, di distinguere con chiarezza e con intuizione sicura ciò che ha importanza fondamentale, che è veramente essenziale, da tutte le rimanenti nozioni più o meno utili¹⁴.

D'altra parte, continua Einstein,

il mio interesse a conoscere la natura era indiscutibilmente più forte, e da studente non capivo molto bene che la possibilità di conoscere più profondamente i principi fondamentali della fisica è legata ai metodi matematici più complicati. Me ne resi conto solo a poco, dopo anni di lavoro scientifico indipendente. Certo, anche la fisica era divisa in diversi rami, ciascuno dei quali avrebbe potuto divorare una breve vita di lavoro senza soddisfare la fame di più profonda conoscenza. Anche qui la massa di dati sperimentali non sufficientemente collegati fra loro era enorme. Ma in questo campo imparai subito a discernere ciò che poteva condurre ai principi fondamentali da quella moltitudine di cose che confondono la mente e la distolgono dall'essenziale¹⁵.

Naturalmente, questa esigenza di economizzare il tempo, seppur legittima e comprensibile, nascondeva delle insidie non solo teoriche ma anche pratiche. Teoriche, dal momento che la possibilità di andare davvero al fondo dei segreti della natura è direttamente legata all'efficacia e alla raffinatezza dell'intelligenza matematica, come il problema della gravitazione nella Relatività generale, che avremo modo di affrontare, farà sperimentare sulla propria pelle al fisico tedesco; pratiche, perché trascurare, dare un rilievo comunque superficiale, o addirittura ignorare ambiti importanti delle discipline matematiche poteva implicare una preparazione di basso profilo e,

¹⁴ Ivi, pp. 9-10.

¹⁵ Ivi, p. 10.

di conseguenza, risultati poco soddisfacenti ai fini del curriculum degli studi. Anche di ciò, il Nostro era ben consapevole:

Il guaio era, naturalmente, che, piacesse o no, bisognava ammucchiare tutta questa roba nella testa per gli esami. Questa coercizione ebbe un effetto così dirompente su di me, che quando ebbi dato l'ultimo esame, per un anno intero qualsiasi problema scientifico mi parve disgustoso. Devo tuttavia aggiungere che di questa coercizione – capace di smorzare ogni vero impulso scientifico – si soffre assai meno in Svizzera che in molti altri paesi. C'erano solo due esami obbligatori; per il resto si poteva scegliere quello che si voleva, o quasi. E lo poteva soprattutto chi aveva un amico, come avevo io, che seguiva regolarmente la lezione e ne elaborava coscienziosamente il contenuto. Così fui libero di scegliere il mio lavoro fino a pochi mesi prima dell'esame; libertà di cui approfittai molto largamente, accettando volentieri la cattiva coscienza che ne derivava come il male di gran lunga minore¹⁶.

L'amico fedele e disponibile, come abbiamo avuto modo di precisare, altri non era che Marcel Grossmann, cui si affiancava il silenzioso e puntuale apporto della fascinosa e amorevole, almeno per i primi anni, Mileva.

2. A caccia di un fantasma

Ma qual era lo *status* della scienza fisica al tempo in cui Einstein si forma al Politecnico federale di Zurigo e, soprattutto, che percezione ne aveva lo stesso giovane studente? Si è visto, per sua stessa ammissione, che la maggior parte del tempo “libero” Einstein lo dedicava allo studio delle opere di scienziati del calibro di Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, ma possiamo tranquillamente allungare la lista e aggiungere Maxwell e Boltzmann. Orbene, sono questi i punti di riferimento teorico del Nostro, ed è attraverso di essi che sarà possibile avere la percezione chiara e precisa delle problematiche che bollivano nella pentola della fisica. Per questo, nel 1949, Einstein non avrà difficoltà ad affermare, utilizzando un termine dal forte significato quale quello di “rivoluzionario”:

Al tempo in cui ero studente, l'argomento più affascinante era la teoria di Maxwell. Ciò che la faceva sembrare rivoluzionaria era

¹⁶ *Ibid.*

il fatto che assumeva, come grandezze fondamentali, non più le forze a distanza, ma i campi. L'incorporazione dell'ottica nella teoria dell'elettromagnetismo, con la conseguente relazione fra la velocità della luce e il sistema assoluto di misura delle grandezze elettriche e magnetiche, con la relazione fra il coefficiente di rifrazione e la costante dielettrica, con la relazione qualitativa fra il coefficiente di riflessione e la conduttività elettrica dei corpi metallici, tutto ciò era una rivelazione¹⁷.

Non che tutto andasse per il meglio; anzi, permaneva in modo pernicioso una nozione della quale non si sapeva bene né come, né perché, non si poteva fare a meno: la nozione di etere. Come si sia giunti a formare questa nozione ce lo dice lo stesso Einstein, che sulla questione si sofferma assai diffusamente nel 1910, nella memoria intitolata *Il principio di relatività e le sue conseguenze nella fisica moderna*, ritornandovi poi, in modo più sintetico, nel 1920 con la lezione inaugurale tenuta all'Università di Leida, intitolata *L'etere e la teoria della relatività*. "Come giungono, i fisici" si chiede il Nostro iniziando la lezione di Leida "ad ammettere, accanto all'idea di una materia ponderabile, ottenuta per astrazione dalla vita quotidiana, l'idea che esista un'altra materia, cioè l'etere?"¹⁸. La risposta è particolarmente importante, perché coinvolge indistintamente le due teorie opposte, formulate per dare una spiegazione del fenomeno luminoso, cioè la luce, ovvero la teoria corpuscolare e la teoria ondulatoria. Ebbene, afferma Einstein, "la ragione risiede certamente nei fenomeni che hanno dato origine alla teoria delle azioni a distanza e nelle proprietà della luce che hanno condotto alla teoria ondulatoria"¹⁹.

Vediamo anzitutto il problema dell'origine della nozione di etere a partire dalla teoria delle azioni o forze a distanza, uno dei punti deboli²⁰ della teoria fisica di Newton. Per azione o forza a distanza possiamo facilmente intendere un'azione o una forza esercitata tra due oggetti che non si trovano a contatto diretto tra loro. Ciò che rende particolarmente sorprendente questa teoria sta nel fatto che queste azioni o queste forze, tra le quali rintracciamo anche il peso, pur operando a distanza sembrano non esser sottoposte ad alcun

¹⁷ Ivi, pp. 18-19.

¹⁸ A. Einstein, *L'etere e la teoria della relatività*, in A. Einstein, *Opere scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 2004, p. 507.

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ Cfr. A. Einstein, *La meccanica di Newton e la sua influenza sullo sviluppo della fisica teorica*, in A. Einstein, *Idee e opinioni*, Schwarz Editore, Milano 1958, pp. 243-244.

parametro temporale, sarebbero cioè istantanee, agirebbero istantaneamente. Senza un prima e un dopo, come è facile capire, viene meno il principio di causalità. Dice Einstein:

La mente non avvezza all'indagine fisica nulla sa delle azioni a distanza. Quando si tratta di stabilire un nesso causale tra le esperienze compiute sui corpi, sembra, a tutta prima, che non possano esistere azioni reciproche oltre a quelle che si esercitano per contatto immediato; ad esempio: trasferimento del moto per urto, pressione o trazione, riscaldamento o combustione provocato da una fiamma, e così via. Certo, il peso, che è una forza che agisce a distanza, anche nella nostra comune esperienza assume una grande importanza. Ma poiché esso ci appare come qualcosa di costante, del tutto indipendente da una causa variabile nel tempo e nello spazio, rinunciamo a cercarne una qualsiasi causa, non ci rendiamo conto della sua capacità di agire a distanza²¹.

La stupenda costruzione newtoniana della gravitazione, individuando nell'azione o forza a distanza la causa del peso, manifestava così una difficoltà interna che avrebbe lasciato tracce ben manifeste di disagio. Un sentimento, del resto, più che motivato, dal momento che il dettato di Newton sembrava andar palesemente contro il principio affermato per esperienza che vuole le azioni o forze a distanza limitate solo al caso del contatto, negando ogni loro possibilità in mancanza di un mezzo interposto, qualunque esso sia, che ricomponga il nesso causale. Non ci si stupirà se, di fronte a una tale situazione, “il desiderio di conoscere, proprio dell'uomo, mal sopportò un simile dualismo. Come salvare allora la concezione unitaria delle forze della natura?”²². Secondo il Nostro si prospettavano due soluzioni:

O cercare di concepire le forze, le quali ci si manifestano come agenti per contatto, come agenti anche a distanza, beninteso, a piccola distanza – ed è questa la strada che seguirono di preferenza i successori immediati di Newton, ancora affascinati dalla sua teoria –, o ammettere che le forze newtoniane, apparentemente azioni a distanza, fossero trasformate da un mezzo che penetrasse tutto lo spazio, sia con movimenti sia con deformazione elastica del mezzo stesso. Lo sforzo inteso a stabilire l'unità concettuale della natura delle forze condusse così all'ipotesi dell'etere. Quest'ipotesi, se da principio non portò alcun progresso, né

²¹ Einstein, *L'etere e la teoria della relatività*, cit., p. 507.

²² Ivi, p. 508.

alla teoria della gravitazione né alla fisica in genere – tanto che ci si abituò a considerare la legge newtoniana come un assioma irriducibile –, esercitò sempre, nel pensiero dei fisici, una funzione molto importante, sebbene per lungo tempo solo latente²³.

Veniamo adesso alla seconda fonte da cui, einsteinianamente, trarrebbe origine la nozione di etere, ovvero la teoria ondulatoria della luce, dovuta al fisico olandese Christiaan Huygens²⁴. A questo scopo, faremo diretto riferimento al primo paragrafo, per l'appunto intitolato "L'etere", della memoria del 1910 precedentemente notificata, alla quale continueremo a guardare quando affronteremo i problemi sollevati dal principio di relatività. Dice Einstein:

Allorché si riconobbe che tra le oscillazioni elastiche della materia ponderabile ed i fenomeni d'interferenza e di diffrazione luminosa esisteva una profonda analogia, non si dubitò più che la luce dovesse essere considerata come uno stato vibratorio di una materia speciale. Inoltre, poiché la luce può propagarsi là dove la materia ponderabile viene meno, ci si vide costretti ad ammettere, per la propagazione luminosa, l'esistenza di una materia particolare, diversa dalla materia ponderabile e che si chiamò etere²⁵.

Non solo:

Poiché nei corpi di debole densità, come i gas, la velocità di propagazione della luce è all'incirca la stessa che nel vuoto, bisognava ammettere che anche lì l'etere formava il supporto principale dei fenomeni luminosi. Infine, l'ipotesi della presenza dell'etere all'interno di corpi liquidi e solidi era necessaria per permettere di comprendere la propagazione della luce in tali corpi, perché

²³ *Ibid.*

²⁴ Nella celebre opera *Traité de lumière*, stampata a Leida nel 1690, lo scienziato Christiaan Huygens formulò il principio secondo cui ogni punto di un fronte d'onda considerato all'istante t diviene un fronte di un'onda sferica elementare; all'istante successivo, l'involuppo delle onde secondarie crea a sua volta un nuovo fronte d'onda, e così via. A partire da questo principio, Huygens sviluppò la teoria ondulatoria della luce, spiegandone il meccanismo di propagazione secondo le leggi del moto ondulatorio.

²⁵ A. Einstein, *Le principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne*, Bureau des Archives, Genève 1910; trad. it. a cura di A. Genovesi, *Il principio di relatività e le sue conseguenze nella fisica moderna*, Istituti editoriali e poligrafici internazionali, Pisa-Roma 2002, p. 23. Quando si fanno sovrapporre due fasci di luce, si può osservare un'alternanza di zone più brillanti e zone più scure là dove i raggi vengono a sovrapporsi. Sono queste le frange che ci segnalano una interazione, una *interferenza* dei due fasci luminosi. Il fenomeno della *diffrazione* si rivela allorché si fa passare un fascio di luce attraverso una fenditura o un foro; si osserva allora che il fascio luminoso non si propaga in direzione rettilinea, ma si sparpaglia seguendo diverse direzioni.

non era possibile spiegare la grande velocità di propagazione servendosi delle sole proprietà elastiche della materia ponderabile. Da tutte queste considerazioni, l'esistenza di un mezzo speciale, che penetra tutta la materia, sembrò indubitabile e l'ipotesi dell'etere formò una parte essenziale dell'immagine dell'Universo che si presentò ai fisici del secolo scorso²⁶.

Nemmeno la "rivoluzionaria" nozione di campo²⁷, qualitativamente elaborata da Faraday e poi formalizzata da Maxwell nella teoria elettromagnetica della luce, è riuscita a sottrarsi al retaggio dell'ipotesi dell'etere, benché quest'ultima ne sia uscita in qualche modo modificata. Inizialmente, continua infatti il Nostro, "i fisici non dubitarono che si dovessero ricondurre i fenomeni elettromagnetici a modi di movimenti di questo mezzo. Ma quando, a poco a poco, si fu persuasi che nessuna teoria meccanica dell'etere dava, in modo particolarmente sorprendente, un'immagine dei fenomeni elettromagnetici, ci si abituò a considerare i campi elettrico e magnetico come delle entità la cui interpretazione meccanica era superflua. Si giunse così a guardare questi campi nel vuoto come degli stati particolari dell'etere, senza richiedere un'analisi più profonda"²⁸. Sicché, da una parte, l'interpretazione meccanica e l'interpretazione elettromagnetica dei fenomeni ottici ed elettromagnetici si trovarono a condividere la stessa posizione in merito allo *status* da conferire all'etere: per entrambe il campo elettromagnetico non era altro che uno stato particolare di un mezzo ipote-

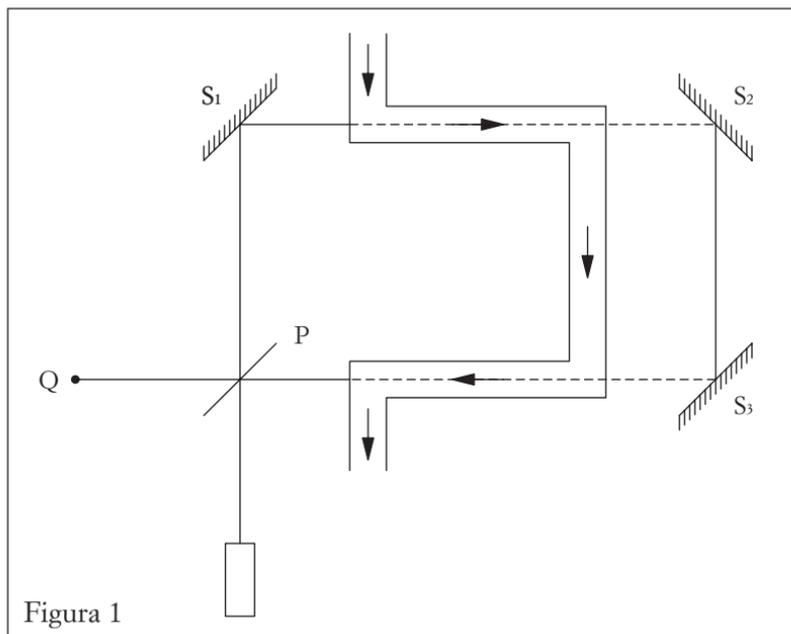
²⁶ *Ibid.*

²⁷ Con il concetto di campo, introdotto dallo scienziato inglese Michael Faraday, si intende manualisticamente una regione delimitata dello spazio dove si rivela l'azione di una forza. Le caratteristiche di questa porzione di spazio sono tratteggiate attraverso delle linee di forza, cioè delle curve che seguono il comportamento della forza specificandone in ogni punto l'intensità, la direzione e il verso. L'intensità del campo dipende dalla densità delle linee di forza, che saranno più fitte nella zona in cui la forza ha maggiore influenza, più rare dove questa influenza diminuisce. La direzione del campo è semplicemente la tangente alla curva nel punto che viene considerato, mentre il verso viene indicato con una freccia. Associato a una forza, il campo è una grandezza vettoriale; parleremo così di campo elettrico, magnetico, gravitazionale. È importante sottolineare, e il caso della gravitazione ce ne dà l'occasione, che si ha campo anche là dove si registra la presenza di un solo corpo. Questo corpo, che chiamiamo A, è infatti la condizione dell'azione, dell'attrazione o della repulsione. Il movimento risulta così da questa condizione che viene ad attualizzarsi quando si introduce nello spazio un secondo corpo, che chiamiamo B. La sua introduzione ci dà insomma la prova che c'è una forza. Detto in altri termini, B manifesta come forza la condizione creata nello spazio dalla presenza di A prima che B venga introdotto. Così come lo comprese Faraday, il campo è allora una regione di spazio in cui l'introduzione di un corpo ci avverte, ci rivela che tale regione non è inerte, ma che presenta l'influenza di un primo corpo A.

²⁸ Einstein, *Il principio di relatività...*, cit., pp. 23-25.

tico che riempie tutto lo spazio. Dall'altra parte, in virtù di quanto detto, le due interpretazioni si distinsero in maniera radicale dalla teoria dell'emissione, che considera lo spazio come perfettamente vuoto, privo tanto di materia ponderabile quanto di raggi luminosi, e il comportamento della luce alla stregua di quello di una particella in moto.

Orbene, una volta ammessa l'ipotesi dell'etere, si pose tuttavia il problema di sapere quali legami uniscono questo mezzo alla materia. In altri termini, si trattava di rispondere alle seguenti questioni: quando la materia si muove, è in moto, come si comporta l'etere? Partecipa completamente al movimento della materia o si lascia trasportare solo in parte o, infine, è completamente immobile? Ovviamente, la via più semplice da seguire è quella di considerare l'etere come completamente trascinato dai corpi che lo contengono, ed è in questa direzione che si era mosso Heinrich Hertz. Questa ipotesi, tuttavia, non ha retto alla prova dei fatti, come l'esperimento ideato e condotto dal fisico francese A.-H.-L. Fizeau ha efficacemente mostrato. L'esperimento si basa sulle seguenti considerazioni. Indichiamo con u' la velocità di propagazione della luce in un mezzo trasparente e immobile fino a nuovo ordine. A questo mezzo trasparente e immobile, sia comunicato un moto traslatorio rettilineo e uniforme di velocità v . Posto che il nostro mezzo trasparente in moto trascini completamente l'etere che contiene, la propagazione della luce rispetto allo stesso mezzo trasparente in moto avverrà come se il mezzo fosse in riposo, ovvero u' continuerà ancora a essere la velocità con la quale la luce si propaga rispetto al mezzo trasparente in moto. Se un osservatore che non partecipa al moto del mezzo intende calcolare questa velocità, non dovrà fare altro che applicare la nota regola di addizione, cioè aggiungere geometricamente alla velocità u' la velocità v . Posto che u' e v abbiano la stessa direzione, il risultato che l'osservatore sta cercando sarà dato da $u' + v$, o da $u' - v$ a seconda che u' e v siano dello stesso verso o di verso contrario. Solo che, come è facile capire, le più considerevoli velocità che siamo in grado di comunicare a un corpo sono comunque sempre estremamente piccole rispetto alla velocità della luce; per riuscire a evidenziare l'influenza del moto del mezzo era necessario escogitare qualcosa di molto raffinato, cosa che Fizeau riuscì a concretizzare nei seguenti termini (vedi fig. 1 a p. 32).



Dati due raggi luminosi in grado di interferire tra di loro e due tubi riempiti del medesimo liquido, facciamo percorrere ciascun tubo, parallelamente al proprio asse, da uno dei due raggi luminosi, in modo che interferiscano tra loro una volta usciti dai tubi. In base alle diverse posizioni che le frange di interferenza assumono al variare della velocità di scorrimento, potremo calcolare, rispetto alle pareti dei tubi, la velocità con la quale si propaga la luce nel liquido, cioè il mezzo in moto. Che risultato ottenne Fizeau? Non certo il valore $u' \pm v$, come ci si poteva aspettare, bensì il valore $u' \pm \alpha v$, dove α è un numero compreso tra 0 e 1 e dipende dall'indice di rifrazione

$n = 1 - \frac{1}{n^2}$. Ci trovavamo dunque di fronte a un effettivo trasciamento della luce attraverso il liquido in moto, ma a un trasciamento solo parziale.

Decretato il fallimento dell'ipotesi di un trasciamento totale dell'etere, non restavano che due possibilità:

- a) l'etere in seno alla materia è mobile, ma la velocità con la quale si muove è diversa da quella con la quale si muove la materia. In

altri termini, non essendovi un trascinamento totale dell'etere con la materia in moto, si è in presenza di uno spostamento relativo dell'etere rispetto alla materia;

b) oppure l'etere è perfettamente immobile, ed evidentemente non prende parte in alcun modo al moto della materia.

È importante considerare che, *a priori*, le due possibilità enunciate presentano differenze che non possono essere trascurate. In effetti, la prima può essere sviluppata, ma a costo di una pesante pregiudiziale di carattere epistemologico: l'introduzione di ipotesi arbitrarie circa le relazioni esistenti tra la materia e l'etere. La seconda possibilità prospettata, al contrario, non solo è semplice, ma il suo sviluppo, perfettamente compatibile con la teoria di Maxwell, non ricorre ad alcuna ipotesi *ad hoc* che potrebbe ulteriormente complicare i fondamenti della teoria. In concreto, *a posteriori*, la prima possibilità doveva condurci, come ci apprestiamo a mostrare, in un vicolo cieco.

Noi sappiamo che il pianeta che ci ospita, la Terra, è un corpo che ruota su se stesso e che si muove intorno al Sole nel corso di un anno con velocità di diverse direzioni; in base alla conclusione che era necessario trarre dall'esperienza di Fizeau, ciò significa ammettere che nei nostri laboratori terrestri l'etere partecipa al moto terrestre nella stessa misura in cui esso prende parte al moto del liquido dell'esperienza suddetta. Allora, rispetto ai nostri apparecchi terrestri, doveva esserci, e doveva poter essere registrata, una velocità relativa dell'etere variabile nel tempo. Di conseguenza, i fenomeni ottici sarebbero dovuti dipendere dall'orientamento delle nostre apparecchiature di osservazione. In verità, non si sarebbe potuto nemmeno pensare di compiere una vera e propria verifica di una simile conseguenza, una volta preso atto dell'ordine di grandezza del termine considerato, pari a 10^{-4} , cioè il termine del rapporto tra la velocità della Terra con la velocità della luce. Il conseguimento di un tale grado di precisione restava insperato anche per la determinazione diretta della velocità della luce²⁹. Si conoscevano, erano naturalmente noti, molti fenomeni ottici nei quali variazioni della velocità della luce dell'ordine di 10^{-4} avrebbero potuto manifestarsi con risultati di-

²⁹ Dice Einstein: "Poi – ed è questo un punto capitale –, i metodi delle misure terrestri misurano tutti la velocità della luce utilizzando dei raggi luminosi che percorrono un cammino chiuso – andata e ritorno – e non un cammino semplice" (Einstein, *Il principio di relatività*, cit., p. 31).

versi a seconda dell'orientamento impresso agli apparecchi rispetto al moto della Terra, ma ogni tentativo compiuto in questo senso non offrì alcun esito positivo. La situazione era la seguente:

- l'esperienza di Fizeau concludeva affermando l'ipotesi del moto relativo dell'etere rispetto ai corpi in moto;
- tutti i tentativi esperiti per mettere in evidenza un tale moto relativo erano falliti.

Fu il fisico teorico olandese H.A. Lorentz a offrire una soddisfacente via d'uscita da una situazione sempre più ambigua e imbarazzante. Da tempo, Lorentz stava lavorando all'elaborazione di una teoria, comparsa poi nel 1895 con la pubblicazione dell'opera *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, che supponeva l'etere come perfettamente immobile, ossia la seconda possibilità che di fatto si era prospettata dopo il risultato dell'esperienza di Fizeau. Dice Einstein:

La grande fecondità della teoria di Lorentz deriva dal fatto che gli stati della materia che giocano un ruolo in Ottica e nell'Elettromagnetismo sono spiegati unicamente attraverso le posizioni relative e i moti delle particelle cariche³⁰.

E ancora:

Supponendo l'etere perfettamente immobile, [Lorentz] immaginò una teoria dei fenomeni elettromagnetici molto soddisfacente: una teoria che non solo permetteva di prevedere quantitativamente l'esperienza di Fizeau, ma spiegava anche in modo semplice quasi tutte le esperienze che si possono immaginare in questo campo. Secondo Lorentz, la materia si compone di particelle elementari che, almeno in parte, sono provviste di cariche elettriche. Una particella carica, in moto rispetto all'etere, è assimilabile a un elemento di corrente; le azioni del campo elettromagnetico sulla particella e le reazioni di quest'ultima sul campo sono i reali legami che collegano la materia all'etere. In quest'ultimo, là dove lo spazio non è già occupato da una particella, le intensità del campo elettrico e magnetico sono espresse attraverso le equazioni di Maxwell per l'etere libero, se si suppone che le equazioni sono state scritte rispetto ad un sistema di assi immobile rispetto all'etere³¹.

³⁰ *Ibid.*

³¹ *Ivi*, pp. 29-31.

I risultati negativi delle esperienze tese a mettere in evidenza il moto relativo della Terra rispetto all'etere si spiegherebbero, secondo la teoria di Lorentz, semplicemente col fatto che l'influenza sui fenomeni, determinata dalla traslazione uniforme di velocità v dell'apparecchio rispetto all'etere, nella disposizione delle intensità luminose osservabili poteva essere rilevata solo a partire da termini estremamente piccoli, precisamente dell'ordine di $\left(\frac{v}{c}\right)^2$, ossia 10^{-8} se con v si

indica la velocità della Terra e con c la velocità della luce nel vuoto. Orbene, l'esperienza estremamente accurata e sofisticata messa a punto da A.A. Michelson e E.W. Morley nel 1887 si rivelò in grado di evidenziare variazioni dell'entità desiderata. I due ricercatori si basarono su una semplice osservazione. Poniamo che M ed N siano due punti di un corpo solido; supponiamo che un raggio luminoso parta da M, vada verso N, dove viene riflesso e torni in M. Allorché il corpo subisce una traslazione uniforme rispetto all'etere, al tempo t , cioè il tempo che il raggio luminoso impiega per percorrere il cammino chiuso MNM, si dovrebbero rilevare valori differenti a seconda che il moto del corpo avvenga nella direzione MN o nella direzione a essa perpendicolare. Sebbene debolissima, perché appunto dell'ordine di 10^{-8} , l'interferometro messo a punto per la circostanza sarebbe stato in grado di registrare la differenza. Il dispositivo (vedi fig. 2 a p. 36), presenta le seguenti caratteristiche.

Due raggi di luce provenienti da una sorgente S si dividono in due fasci in A, dove è collocato uno specchio trasparente. Uno dei due fasci luminosi va a riflettersi in B, ritorna in A dove si divide e dà un raggio che va in I. Il secondo fascio luminoso passa lo specchio, va cioè in B', dove è riflesso verso A; giunto in A, il secondo fascio si divide a sua volta e dà un raggio che va in I. In I i due diversi raggi interferiscono. La posizione delle frange di interferenza dipende dalla differenza che i raggi hanno acquisito l'uno rispetto all'altro nel corso dei loro rispettivi percorsi ABA e AB'A. La differenza di cammino doveva dipendere dall'orientamento dato all'interferometro: appena AB' fosse caduto nella direzione del moto della Terra si sarebbe dovuto osservare uno spostamento delle frange d'interferenza. Con grande stupore, quasi con incredulità, si prese atto che anche questa volta si era di fronte a un esito negativo. L'esperienza di Michelson e Morley finì per diventare, come dice Einstein, "un vero rompicapo", e un grave problema che minava le basi stesse

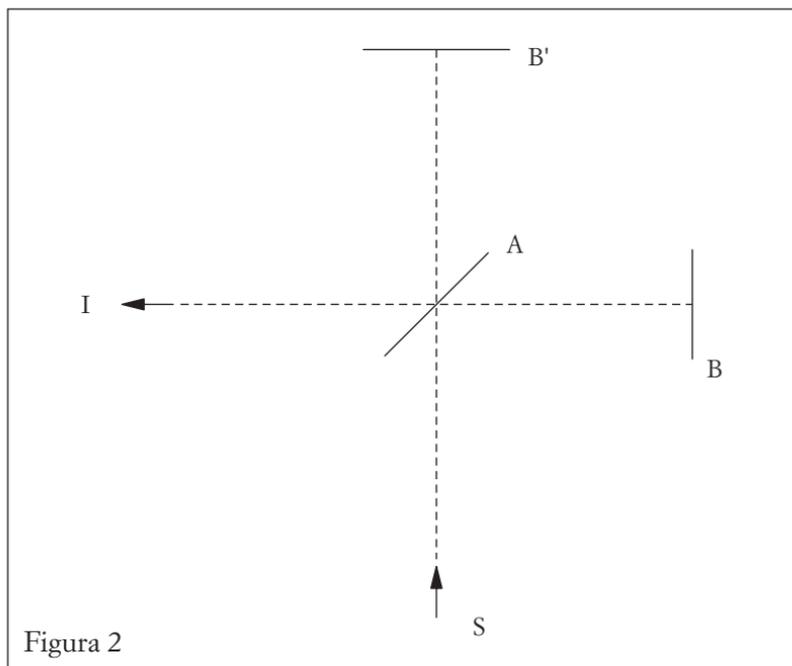


Figura 2

della teoria di Lorentz. Il panico, che stava per diffondersi nel ristretto mondo dei ricercatori, fu evitato ancora una volta da Lorentz, evidentemente interessato a tenere in piedi la sua teoria, cui si affiancò, indipendentemente, lo scienziato irlandese G.F. Fitzgerald. Entrambi, dice Einstein “fecero ricorso a una ipotesi strana: ammisero che ogni corpo in moto rispetto all’etere si

accorcia nella direzione del moto di una frazione uguale a $\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2$ o – il che è lo stesso se non si considerano che i termini del secondo ordine – che la lunghezza del corpo è diminuita in questa direzione

nel rapporto $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Questa ipotesi, in effetti, faceva scomparire il disaccordo tra la teoria e l’esperienza”³². Del resto, è assai agevole rilevare che, poste le

³² Ivi, p. 37.

cose in questi termini, i tempi di percorrenza dei raggi luminosi sono gli stessi nei due bracci dell'interferometro. Si faccia bene attenzione: pur definendo "strana" l'ipotesi della contrazione, Einstein non dice che essa deve essere considerata artificiosa, insomma un'ipotesi *ad hoc*. E tale sarebbe se, in quanto ipotesi, fosse stata inserita a sorpresa per salvare la teoria. In realtà essa rientrava legittimamente nella concezione generale che Lorentz si era fatto della materia, che egli riteneva a ragione tenuta insieme, dal punto di vista dei corpi solidi, da forze elettriche. La contrazione, infatti, potrebbe ben essere attribuita al fatto che, nel passaggio dal sistema di riferimento dell'etere al sistema in moto, queste forze potevano variare. Ciò non significa che la teoria di Lorentz debba essere accettata così com'è. In effetti, precisa Einstein, "la teoria non offriva un insieme ben soddisfacente per lo spirito. Essa si basava sull'esistenza dell'etere che bisognava credere in moto rispetto alla Terra, moto le cui conseguenze erano per sempre sperimentalmente inverificabili; questa particolarità non si spiegava che introducendo nella teoria delle ipotesi poco verosimili *a priori*"³³. Sicché, il Nostro non può che chiudere provvisoriamente la questione con i seguenti interrogativi:

Si può veramente credere che, in seguito ad un curioso caso, le leggi della Natura si presentino a noi in maniera così straordinaria che nessuna di esse ci permette di prender conoscenza del moto rapido del nostro pianeta attraverso l'etere? Non è più verosimile ammettere che qualche considerazione inesatta o difettosa ci abbia condotti in un vicolo cieco³⁴?

3. Esistono gli atomi?

Oltre al problema suscitato dalla nozione di etere, all'epoca in cui Albert Einstein iniziava il suo percorso formativo al Politecnico federale di Zurigo un certo gruppo di ricercatori, di fatto apertamente osteggiato, era alle prese con una questione altrettanto decisiva: quella dell'effettiva esistenza degli atomi. Una volta raggiunta una risposta positiva, si sarebbe trattato di stabilire le loro esatte dimensioni, cioè la loro misura. I detrattori di una simile ipotesi di ricerca fondavano la loro ostilità sulla considerazione che, anche ammesso che

³³ *Ibid.*

³⁴ *Ibid.*

entità di quel tipo esistessero, non si vedeva quale utilità potevano recare alla fisica *tout court*, dal momento che non erano percepibili. Naturalmente, dal punto di vista chimico l'ipotesi atomica era un dato ormai indiscutibile; “nella chimica, però”, ricorda lo stesso Einstein “avevano importanza solo i rapporti delle masse atomiche, non le loro grandezze assolute; cosicché la teoria atomica, più che far conoscere l'effettiva struttura della materia, poteva servire a darne una rappresentazione illustrativa”³⁵. Era altresì chiaro che dimensioni e misura atomiche dovevano essere necessariamente ridotte in modo da garantire la continuità della materia, quale essa ci appare alla scala che ci consente di compiere esperienze nei nostri laboratori, ed erano stati approntati diversi modi per giungere a una stima, verso l'alto, cioè verso il limite superiore, delle dimensioni atomiche. Un modo per ottenere un risultato di questo genere consisteva nel misurare lo spessore delle pellicole più sottili che si possono ottenere delle diverse sostanze, in particolare realizzando pellicole sottilissime di liquidi organici disposti sulla superficie dell'acqua. I risultati ottenuti da questo approccio metodologico evidenziavano tuttavia la loro grossolana inadeguatezza rispetto alle dimensioni effettive da raggiungere molto al di sotto. Occorreva cambiare in qualche modo l'approccio strategico. E infatti, anziché tentare di determinare le dimensioni atomiche, si cercò di stabilire la massa dell'atomo. Questa modalità si basava sulle seguenti considerazioni. Se con la nozione di “mole” definiamo la massa in grammi che equivale numericamente alle molecole, potremo anche definire il numero N di Avogadro. Quest'ultimo, infatti, non è altro che il numero di molecole presenti in una mole. La determinazione di N ci consentirebbe, così, di giungere alla massa di ogni singola molecola. Il problema della determinazione del numero di Avogadro fu posto in termini definitivi nell'ambito della teoria cinetica dei gas; su questo sfondo, e sulla base di specifiche assunzioni nei riguardi del comportamento della materia microscopica, nel 1865 il fisico austriaco J.J. Loschmidt giunse a una prima determinazione del numero di Avogadro. Un secondo ulteriore risultato in questa direzione fu ottenuto da Lord Rayleigh nel 1899 nel corso dei suoi studi riguardanti la diffusione della luce nei gas. Del resto, almeno due anni prima J.J. Thomson aveva definitivamente messo i presupposti attraverso i quali si potrà affermare che i raggi catodici sono semplicemente costituiti da

³⁵ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 12.

particelle cariche negativamente, ovvero da elettroni, e tentato persino di elaborare, per la prima volta, un modello atomico ben definito.

Nonostante i risultati ottenuti, tra gli scienziati restava, come in precedenza annunciato, uno zoccolo duro e inflessibile che rivendicava l'essenziale inutilità, per la scienza fisica, della nozione di atomo. I campioni, i capofila di questa dura opposizione erano, da un lato, il chimico Wilhelm Ostwald, dall'altro, il filosofo e fisico Ernst Mach con la sua posizione, elaborata sul piano prettamente epistemologico, della teoria della conoscenza scientifica, secondo la quale la fisica, in quanto scienza, deve occuparsi solo ed esclusivamente dei puri fatti sperimentali. E poiché, in questo senso, assume un grande rilievo il concetto di economicità della scienza stigmatizzato dal celebre "ra-soio di Ockham"³⁶, della nozione di atomo, in quanto non direttamente sperimentabile e non utile alla scienza, si può tranquillamente fare a meno. Non bisogna tuttavia dimenticare che una singola determinazione del numero di Avogadro, peraltro raggiunta sulla base di specifiche assunzioni sul comportamento della materia, non poteva essere sufficiente. Per raggiungere una prova convincente della realtà atomica, tale almeno da far barcollare l'ostinata resistenza di due veri e propri mostri sacri come Ostwald e Mach, occorre un concorso di risultati numerici univoci e provenienti da diversi contesti di indagine. Di ciò si era ben consapevoli, tanto che ben oltre il primo decennio del Novecento si intensificò l'impegno per giungere a una molteplicità di derivazioni numeriche di N ; come vedremo, Einstein contribuì in modo forse decisivo nell'individuazione del terreno dal quale sarebbe stato possibile derivare direttamente, sicché in modo convincente e persuasivo, il numero di Avogadro.

4. La radiazione di corpo nero

Un ultimo ambito, quello termodinamico, poneva un problema di difficile soluzione che aveva tormentato i sonni di quel Kirchhoff, docente di fisica a Heidelberg e successivamente a Berlino, che Albert si era preso la briga di studiare e approfondire per proprio conto: il problema della radiazione termica o radiazione di corpo nero. Dopo il 1860, Kirchhoff aveva condotto una serie di esperimenti sull'emissione e sull'assorbimento della luce. L'espressione

³⁶ *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem.*

“radiazione di corpo nero”, che a prima vista può incutere un certo disagio, nasce nel contesto della descrizione di questi esperimenti, ed è semplicemente dovuta al fatto che per osservare la luce prodotta da un corpo che viene riscaldato, si è costretti a chiudere quest’ultimo in un forno, dove ovviamente c’è oscurità, e osservare la luce emessa da un piccolo foro appositamente praticato nella parete del forno stesso. Possiamo fare a meno del forno e servirci di un pezzo di tubo metallico di cui una delle due estremità è completamente sigillata mentre nell’altra è presente un piccolo foro dal quale può entrare o uscire un raggio di luce. Se riscaldiamo il nostro tubo si osserverà che mentre la superficie diverrà via via più splendente, la radiazione che esce all’esterno dal foro lo sarà sempre di più e, col crescere della temperatura, la radiazione cambierà colore: dal rosso scuro si passerà al giallo e, infine, al bianco intenso. Ciò accade perché gli elettroni del metallo delle pareti del tubo oscillano, sono cioè dei veri e propri oscillatori, e così facendo emettono una radiazione elettromagnetica. Questa radiazione può essere assorbita dagli stessi elettroni ed essere irradiata di nuovo. Il processo va avanti indefinitamente, benché vi sia ovviamente una perdita di radiazione attraverso il piccolo foro che ce ne consente l’osservazione e la misura. A questi colori e alla loro distribuzione corrisponde il dispiegamento delle lunghezze d’onda, indipendentemente dal tipo di metallo di cui è costituito il tubo. Come ricorda lo stesso Einstein, “basandosi sulla termodinamica, Kirchhoff era giunto alla conclusione che la densità di energia e la composizione della radiazione emessa nell’interno di un corpo cavo, delimitato da pareti impenetrabili di temperatura T , dovevano essere indipendenti dalla natura delle pareti stesse. In altri termini, la densità di radiazione non cromatica ρ è una funzione universale della frequenza ν e della temperatura assoluta T . Così sorse l’interessante problema di determinare la funzione $\rho(\nu/T)$. Quale significato teorico si poteva attribuire a questa funzione?”³⁷. Sempre in ambito termodinamico, notevoli progressi erano stati conseguiti dal fisico tedesco W. Wien, per il quale la formula generale di ρ avrebbe assunto la seguente forma:

$$\rho = \nu^3 f \left(\frac{\nu}{T} \right).$$

³⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 21.

Se si definisce potere emissivo di un corpo l'intensità di energia che esso emette nell'unità di tempo e per unità di superficie, la formula precedente ci conduce a stabilire una relazione tra l'intensità della luce emessa e la temperatura del corpo, ossia alla legge formulata dal fisico austriaco J. Stefan e dal suo connazionale Boltzmann. Per questa legge, il potere emissivo di un corpo è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Ciò significa che quanto più un corpo è caldo, tanto più emette calore, mentre il prodotto della temperatura per la lunghezza d'onda che dà il massimo dell'emissione (legge dello spostamento di Wien) risulta costante. Le due leggi potevano contare sul riscontro sperimentale, ma restava aperta la questione di dare una forma esplicita della funzione $\rho(\nu, T)$.

Nel 1896, Wien aveva avanzato la forma

$$f(\nu/T) = \alpha e^{-\beta \nu/T},$$

dove α e β , sono due costanti. Nuove indagini evidenziarono, tuttavia, che la legge formulata non valeva per le basse frequenze. Come è noto, agli inizi del Novecento M. Planck, che era stato allievo di Kirchhoff a Berlino, giunse a risolvere la questione della radiazione termica o di corpo nero: la sua formula, in accordo con i fatti sperimentali, era stata raggiunta assumendo che gli oscillatori cui si deve l'emissione della radiazione di frequenza ν non potevano avere che energie multiple di $h\nu$, dove h è, appunto, la famosa costante di Planck.

MECCANICA CLASSICA ED ELETTROMAGNETISMO

1. Al Politecnico federale

La sesta sezione A di fisica e matematica del Politecnico comprendeva, nel 1896, un gruppo di cinque studenti, quattro maschi, tra cui Albert, e una femmina. Marcel Grossmann, dichiaratamente aspirante matematico di successo, legò subito con Einstein; il suo istinto infallibile e la sua altrettanto sviluppata capacità di discernere accuratamente i caratteri e le doti anche questa volta lo avevano ben indirizzato. A tal punto che Albert divenne, dopo una formale presentazione, frequentatore gradito di casa Grossmann. Si tratta di un rapporto, quello con Marcel e la sua famiglia, che si rivelerà molto importante per il Nostro, tanto nel periodo di studi quanto in quello successivo: nel corso degli studi al Politecnico, perché sarà Marcel, sempre presente e attento alle lezioni, che poi rielaborava, a mettere al corrente e a tappare le numerose falle della incostante presenza di Albert; dopo il diploma conseguito al Politecnico, perché la possibilità di entrare prima come stagista, poi come impiegato in pianta stabile all'Ufficio brevetti di Berna, dunque di poter contare su uno stipendio mensile adeguato, si deve all'interessamento del padre di Marcel, mentre a quest'ultimo Albert si affiderà nell'arco del decennio che lo vedrà impegnato sul fronte dell'elaborazione di una teoria della gravitazione, come supporto necessario sul piano matematico. Jakob Ehrat, di Schaffhouse, sedeva spesso a fianco di Albert nel corso delle lezioni; gran lavoratore, grazie all'impegno e a una tenace determinazione era riuscito ad accedere al Politecnico. Il suo carattere ansioso lo costringeva, specie nei periodi forti, quelli di preparazione agli esami, a chiedere frequenti colloqui con il Nostro che, anche in questo caso, era sempre ospite gradito della madre di Ehrat, che spesso visitava, specie quando più forte si faceva sentire il senso di solitudine. Louis Kollros, proveniente da una cittadina nei pressi del confine francese, chiudeva il contingente maschile. Il quinto membro del gruppo, e

anche il più anziano, era una ragazza ungherese di ventuno anni, Mileva Marić, figlia di un accorto proprietario terriero, nonché giudice in terra di Serbia. Si dice che fosse bella in maniera intensa, inquietante, nonostante un difetto all'anca che ne limitava visibilmente la deambulazione. Il 6 gennaio 1903, contro tutto e contro tutti, diverrà la signora Einstein.

L'inizio degli studi universitari vide, come c'era da aspettarsi, un approccio assai poco entusiastico da parte di Albert, ma per motivi che, come vedremo, sono completamente diversi rispetto a quelli che avevano caratterizzato la precedente e sofferta stagione scolastica. Al primo anno, dei ben sei corsi obbligatori, cinque erano di matematica e quello di fisica, dedicato alla meccanica, iniziava solo nel secondo semestre. Come si spiega questa disaffezione per uno che espressamente, e con una determinata ostinazione, intendeva dedicare la propria esistenza alla matematica e alla fisica teorica? Affermare, come talvolta si è fatto anche recentemente, che Einstein non aveva inclinazione per gli studi matematici, e ancor meno a seguire le lezioni¹¹, stride in modo evidente col fatto che dai dieci ai sedici anni il Nostro si interessò in modo approfondito non solo di filosofia, ma anche e soprattutto di matematica e fisica, in ambiti non certo agevoli quali i calcoli integrale e differenziale¹². È ben vero che lo stesso Einstein riconoscerà di non essere stato uno "studente modello", nel senso della assiduità alle lezioni, ben consapevole di aver gettato alle ortiche un'opportunità davvero molto importante vista la classe docente, che comprendeva tutti insegnanti di primo ordine, sui quali poter contare. Afferma infatti il Nostro: "Ebbi maestri eccellenti (Hurwitz, Minkowski, ad esempio), e avrei potuto farmi una preparazione matematica veramente solida. Invece, lavorai per la maggior parte del tempo nel laboratorio di fisica, affascinato dal contatto diretto con l'esperienza. Il resto del tempo lo dedicai soprattutto a studiare a casa le opere di Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, ecc."¹³. Ma lo stesso fisico tedesco ci spiega anche i motivi del pro-

¹¹ Cfr. D. Overbye, *Einstein in Love. A Scientific Romance*, Viking Penguin, New York-London 2000; trad. it. di O. Gargano, *Einstein innamorato. La vita di un genio tra scoperte scientifiche e passione romantica*, Bompiani, Milano 2002, p. 28.

¹² Cfr. Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 9. Se gli zii stimolavano Albert sul piano della scienza, con Max Talmey, un giovane polacco studente di medicina che divenne abituale frequentatore degli Einstein, discusse approfonditamente la *Critica della ragion pura* di Immanuel Kant, nonché i lavori di Arthur Schopenhauer (cfr. Overbye, *op. cit.* pp. 8-9).

¹³ *Ibid.*

prio comportamento, delineando così la figura di un giovane studente tutt'altro che vagabondo o molto propenso alle distrazioni.

Il fatto che trascurassi in parte le matematiche dipese non soltanto dal maggiore interesse che avevo per le scienze naturali, ma anche da questa strana esperienza: mi accorsi, cioè, che le matematiche si dividevano in numerosi rami, ciascuno dei quali poteva facilmente assorbire il breve tempo che ci è concesso di vivere; per conseguenza mi trovai nella posizione dell'asino di Buridano che non era capace di scegliere fra due mucchi di fieno. Ciò era ovviamente dovuto al fatto che non ero in grado, nel campo delle matematiche, di distinguere con chiarezza e con intuizione sicura ciò che ha importanza fondamentale, che è veramente essenziale, da tutte le rimanenti nozioni più o meno utili¹⁴.

D'altra parte, continua Einstein,

il mio interesse a conoscere la natura era indiscutibilmente più forte, e da studente non capivo molto bene che la possibilità di conoscere più profondamente i principi fondamentali della fisica è legata ai metodi matematici più complicati. Me ne resi conto solo a poco, dopo anni di lavoro scientifico indipendente. Certo, anche la fisica era divisa in diversi rami, ciascuno dei quali avrebbe potuto divorare una breve vita di lavoro senza soddisfare la fame di più profonda conoscenza. Anche qui la massa di dati sperimentali non sufficientemente collegati fra loro era enorme. Ma in questo campo imparai subito a discernere ciò che poteva condurre ai principi fondamentali da quella moltitudine di cose che confondono la mente e la distolgono dall'essenziale¹⁵.

Naturalmente, questa esigenza di economizzare il tempo, seppur legittima e comprensibile, nascondeva delle insidie non solo teoriche ma anche pratiche. Teoriche, dal momento che la possibilità di andare davvero al fondo dei segreti della natura è direttamente legata all'efficacia e alla raffinatezza dell'intelligenza matematica, come il problema della gravitazione nella Relatività generale, che avremo modo di affrontare, farà sperimentare sulla propria pelle al fisico tedesco; pratiche, perché trascurare, dare un rilievo comunque superficiale, o addirittura ignorare ambiti importanti delle discipline matematiche poteva implicare una preparazione di basso profilo e,

¹⁴ Ivi, pp. 9-10.

¹⁵ Ivi, p. 10.

di conseguenza, risultati poco soddisfacenti ai fini del curriculum degli studi. Anche di ciò, il Nostro era ben consapevole:

Il guaio era, naturalmente, che, piacesse o no, bisognava ammucchiare tutta questa roba nella testa per gli esami. Questa coercizione ebbe un effetto così dirompente su di me, che quando ebbi dato l'ultimo esame, per un anno intero qualsiasi problema scientifico mi parve disgustoso. Devo tuttavia aggiungere che di questa coercizione – capace di smorzare ogni vero impulso scientifico – si soffre assai meno in Svizzera che in molti altri paesi. C'erano solo due esami obbligatori; per il resto si poteva scegliere quello che si voleva, o quasi. E lo poteva soprattutto chi aveva un amico, come avevo io, che seguiva regolarmente la lezione e ne elaborava coscienziosamente il contenuto. Così fui libero di scegliere il mio lavoro fino a pochi mesi prima dell'esame; libertà di cui approfittai molto largamente, accettando volentieri la cattiva coscienza che ne derivava come il male di gran lunga minore¹⁶.

L'amico fedele e disponibile, come abbiamo avuto modo di precisare, altri non era che Marcel Grossmann, cui si affiancava il silenzioso e puntuale apporto della fascinosa e amorevole, almeno per i primi anni, Mileva.

2. A caccia di un fantasma

Ma qual era lo *status* della scienza fisica al tempo in cui Einstein si forma al Politecnico federale di Zurigo e, soprattutto, che percezione ne aveva lo stesso giovane studente? Si è visto, per sua stessa ammissione, che la maggior parte del tempo “libero” Einstein lo dedicava allo studio delle opere di scienziati del calibro di Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, ma possiamo tranquillamente allungare la lista e aggiungere Maxwell e Boltzmann. Orbene, sono questi i punti di riferimento teorico del Nostro, ed è attraverso di essi che sarà possibile avere la percezione chiara e precisa delle problematiche che bollivano nella pentola della fisica. Per questo, nel 1949, Einstein non avrà difficoltà ad affermare, utilizzando un termine dal forte significato quale quello di “rivoluzionario”:

Al tempo in cui ero studente, l'argomento più affascinante era la teoria di Maxwell. Ciò che la faceva sembrare rivoluzionaria era

¹⁶ *Ibid.*

cose in questi termini, i tempi di percorrenza dei raggi luminosi sono gli stessi nei due bracci dell'interferometro. Si faccia bene attenzione: pur definendo "strana" l'ipotesi della contrazione, Einstein non dice che essa deve essere considerata artificiosa, insomma un'ipotesi *ad hoc*. E tale sarebbe se, in quanto ipotesi, fosse stata inserita a sorpresa per salvare la teoria. In realtà essa rientrava legittimamente nella concezione generale che Lorentz si era fatto della materia, che egli riteneva a ragione tenuta insieme, dal punto di vista dei corpi solidi, da forze elettriche. La contrazione, infatti, potrebbe ben essere attribuita al fatto che, nel passaggio dal sistema di riferimento dell'etere al sistema in moto, queste forze potevano variare. Ciò non significa che la teoria di Lorentz debba essere accettata così com'è. In effetti, precisa Einstein, "la teoria non offriva un insieme ben soddisfacente per lo spirito. Essa si basava sull'esistenza dell'etere che bisognava credere in moto rispetto alla Terra, moto le cui conseguenze erano per sempre sperimentalmente inverificabili; questa particolarità non si spiegava che introducendo nella teoria delle ipotesi poco verosimili *a priori*"³³. Sicché, il Nostro non può che chiudere provvisoriamente la questione con i seguenti interrogativi:

Si può veramente credere che, in seguito ad un curioso caso, le leggi della Natura si presentino a noi in maniera così straordinaria che nessuna di esse ci permette di prender conoscenza del moto rapido del nostro pianeta attraverso l'etere? Non è più verosimile ammettere che qualche considerazione inesatta o difettosa ci abbia condotti in un vicolo cieco³⁴?

3. Esistono gli atomi?

Oltre al problema suscitato dalla nozione di etere, all'epoca in cui Albert Einstein iniziava il suo percorso formativo al Politecnico federale di Zurigo un certo gruppo di ricercatori, di fatto apertamente osteggiato, era alle prese con una questione altrettanto decisiva: quella dell'effettiva esistenza degli atomi. Una volta raggiunta una risposta positiva, si sarebbe trattato di stabilire le loro esatte dimensioni, cioè la loro misura. I detrattori di una simile ipotesi di ricerca fondavano la loro ostilità sulla considerazione che, anche ammesso che

³³ *Ibid.*

³⁴ *Ibid.*

entità di quel tipo esistessero, non si vedeva quale utilità potevano recare alla fisica *tout court*, dal momento che non erano percepibili. Naturalmente, dal punto di vista chimico l'ipotesi atomica era un dato ormai indiscutibile; “nella chimica, però”, ricorda lo stesso Einstein “avevano importanza solo i rapporti delle masse atomiche, non le loro grandezze assolute; cosicché la teoria atomica, più che far conoscere l'effettiva struttura della materia, poteva servire a darne una rappresentazione illustrativa”³⁵. Era altresì chiaro che dimensioni e misura atomiche dovevano essere necessariamente ridotte in modo da garantire la continuità della materia, quale essa ci appare alla scala che ci consente di compiere esperienze nei nostri laboratori, ed erano stati approntati diversi modi per giungere a una stima, verso l'alto, cioè verso il limite superiore, delle dimensioni atomiche. Un modo per ottenere un risultato di questo genere consisteva nel misurare lo spessore delle pellicole più sottili che si possono ottenere delle diverse sostanze, in particolare realizzando pellicole sottilissime di liquidi organici disposti sulla superficie dell'acqua. I risultati ottenuti da questo approccio metodologico evidenziavano tuttavia la loro grossolana inadeguatezza rispetto alle dimensioni effettive da raggiungere molto al di sotto. Occorreva cambiare in qualche modo l'approccio strategico. E infatti, anziché tentare di determinare le dimensioni atomiche, si cercò di stabilire la massa dell'atomo. Questa modalità si basava sulle seguenti considerazioni. Se con la nozione di “mole” definiamo la massa in grammi che equivale numericamente alle molecole, potremo anche definire il numero N di Avogadro. Quest'ultimo, infatti, non è altro che il numero di molecole presenti in una mole. La determinazione di N ci consentirebbe, così, di giungere alla massa di ogni singola molecola. Il problema della determinazione del numero di Avogadro fu posto in termini definitivi nell'ambito della teoria cinetica dei gas; su questo sfondo, e sulla base di specifiche assunzioni nei riguardi del comportamento della materia microscopica, nel 1865 il fisico austriaco J.J. Loschmidt giunse a una prima determinazione del numero di Avogadro. Un secondo ulteriore risultato in questa direzione fu ottenuto da Lord Rayleigh nel 1899 nel corso dei suoi studi riguardanti la diffusione della luce nei gas. Del resto, almeno due anni prima J.J. Thomson aveva definitivamente messo i presupposti attraverso i quali si potrà affermare che i raggi catodici sono semplicemente costituiti da

³⁵ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 12.

particelle cariche negativamente, ovvero da elettroni, e tentato persino di elaborare, per la prima volta, un modello atomico ben definito.

Nonostante i risultati ottenuti, tra gli scienziati restava, come in precedenza annunciato, uno zoccolo duro e inflessibile che rivendicava l'essenziale inutilità, per la scienza fisica, della nozione di atomo. I campioni, i capofila di questa dura opposizione erano, da un lato, il chimico Wilhelm Ostwald, dall'altro, il filosofo e fisico Ernst Mach con la sua posizione, elaborata sul piano prettamente epistemologico, della teoria della conoscenza scientifica, secondo la quale la fisica, in quanto scienza, deve occuparsi solo ed esclusivamente dei puri fatti sperimentali. E poiché, in questo senso, assume un grande rilievo il concetto di economicità della scienza stigmatizzato dal celebre "ra-soio di Ockham"³⁶, della nozione di atomo, in quanto non direttamente sperimentabile e non utile alla scienza, si può tranquillamente fare a meno. Non bisogna tuttavia dimenticare che una singola determinazione del numero di Avogadro, peraltro raggiunta sulla base di specifiche assunzioni sul comportamento della materia, non poteva essere sufficiente. Per raggiungere una prova convincente della realtà atomica, tale almeno da far barcollare l'ostinata resistenza di due veri e propri mostri sacri come Ostwald e Mach, occorreva un concorso di risultati numerici univoci e provenienti da diversi contesti di indagine. Di ciò si era ben consapevoli, tanto che ben oltre il primo decennio del Novecento si intensificò l'impegno per giungere a una molteplicità di derivazioni numeriche di N ; come vedremo, Einstein contribuì in modo forse decisivo nell'individuazione del terreno dal quale sarebbe stato possibile derivare direttamente, sicché in modo convincente e persuasivo, il numero di Avogadro.

4. La radiazione di corpo nero

Un ultimo ambito, quello termodinamico, poneva un problema di difficile soluzione che aveva tormentato i sonni di quel Kirchhoff, docente di fisica a Heidelberg e successivamente a Berlino, che Albert si era preso la briga di studiare e approfondire per proprio conto: il problema della radiazione termica o radiazione di corpo nero. Dopo il 1860, Kirchhoff aveva condotto una serie di esperimenti sull'emissione e sull'assorbimento della luce. L'espressione

³⁶ *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem.*

particelle cariche negativamente, ovvero da elettroni, e tentato persino di elaborare, per la prima volta, un modello atomico ben definito.

Nonostante i risultati ottenuti, tra gli scienziati restava, come in precedenza annunciato, uno zoccolo duro e inflessibile che rivendicava l'essenziale inutilità, per la scienza fisica, della nozione di atomo. I campioni, i capofila di questa dura opposizione erano, da un lato, il chimico Wilhelm Ostwald, dall'altro, il filosofo e fisico Ernst Mach con la sua posizione, elaborata sul piano prettamente epistemologico, della teoria della conoscenza scientifica, secondo la quale la fisica, in quanto scienza, deve occuparsi solo ed esclusivamente dei puri fatti sperimentali. E poiché, in questo senso, assume un grande rilievo il concetto di economicità della scienza stigmatizzato dal celebre "ra-soio di Ockham"³⁶, della nozione di atomo, in quanto non direttamente sperimentabile e non utile alla scienza, si può tranquillamente fare a meno. Non bisogna tuttavia dimenticare che una singola determinazione del numero di Avogadro, peraltro raggiunta sulla base di specifiche assunzioni sul comportamento della materia, non poteva essere sufficiente. Per raggiungere una prova convincente della realtà atomica, tale almeno da far barcollare l'ostinata resistenza di due veri e propri mostri sacri come Ostwald e Mach, occorre un concorso di risultati numerici univoci e provenienti da diversi contesti di indagine. Di ciò si era ben consapevoli, tanto che ben oltre il primo decennio del Novecento si intensificò l'impegno per giungere a una molteplicità di derivazioni numeriche di N ; come vedremo, Einstein contribuì in modo forse decisivo nell'individuazione del terreno dal quale sarebbe stato possibile derivare direttamente, sicché in modo convincente e persuasivo, il numero di Avogadro.

4. La radiazione di corpo nero

Un ultimo ambito, quello termodinamico, poneva un problema di difficile soluzione che aveva tormentato i sonni di quel Kirchhoff, docente di fisica a Heidelberg e successivamente a Berlino, che Albert si era preso la briga di studiare e approfondire per proprio conto: il problema della radiazione termica o radiazione di corpo nero. Dopo il 1860, Kirchhoff aveva condotto una serie di esperimenti sull'emissione e sull'assorbimento della luce. L'espressione

³⁶ *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem.*

“radiazione di corpo nero”, che a prima vista può incutere un certo disagio, nasce nel contesto della descrizione di questi esperimenti, ed è semplicemente dovuta al fatto che per osservare la luce prodotta da un corpo che viene riscaldato, si è costretti a chiudere quest’ultimo in un forno, dove ovviamente c’è oscurità, e osservare la luce emessa da un piccolo foro appositamente praticato nella parete del forno stesso. Possiamo fare a meno del forno e servirci di un pezzo di tubo metallico di cui una delle due estremità è completamente sigillata mentre nell’altra è presente un piccolo foro dal quale può entrare o uscire un raggio di luce. Se riscaldiamo il nostro tubo si osserverà che mentre la superficie diverrà via via più splendente, la radiazione che esce all’esterno dal foro lo sarà sempre di più e, col crescere della temperatura, la radiazione cambierà colore: dal rosso scuro si passerà al giallo e, infine, al bianco intenso. Ciò accade perché gli elettroni del metallo delle pareti del tubo oscillano, sono cioè dei veri e propri oscillatori, e così facendo emettono una radiazione elettromagnetica. Questa radiazione può essere assorbita dagli stessi elettroni ed essere irradiata di nuovo. Il processo va avanti indefinitamente, benché vi sia ovviamente una perdita di radiazione attraverso il piccolo foro che ce ne consente l’osservazione e la misura. A questi colori e alla loro distribuzione corrisponde il dispiegamento delle lunghezze d’onda, indipendentemente dal tipo di metallo di cui è costituito il tubo. Come ricorda lo stesso Einstein, “basandosi sulla termodinamica, Kirchhoff era giunto alla conclusione che la densità di energia e la composizione della radiazione emessa nell’interno di un corpo cavo, delimitato da pareti impenetrabili di temperatura T , dovevano essere indipendenti dalla natura delle pareti stesse. In altri termini, la densità di radiazione non cromatica ρ è una funzione universale della frequenza ν e della temperatura assoluta T . Così sorse l’interessante problema di determinare la funzione $\rho(\nu/T)$. Quale significato teorico si poteva attribuire a questa funzione?”³⁷. Sempre in ambito termodinamico, notevoli progressi erano stati conseguiti dal fisico tedesco W. Wien, per il quale la formula generale di ρ avrebbe assunto la seguente forma:

$$\rho = \nu^3 f \left(\frac{\nu}{T} \right).$$

³⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 21.

Se si definisce potere emissivo di un corpo l'intensità di energia che esso emette nell'unità di tempo e per unità di superficie, la formula precedente ci conduce a stabilire una relazione tra l'intensità della luce emessa e la temperatura del corpo, ossia alla legge formulata dal fisico austriaco J. Stefan e dal suo connazionale Boltzmann. Per questa legge, il potere emissivo di un corpo è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Ciò significa che quanto più un corpo è caldo, tanto più emette calore, mentre il prodotto della temperatura per la lunghezza d'onda che dà il massimo dell'emissione (legge dello spostamento di Wien) risulta costante. Le due leggi potevano contare sul riscontro sperimentale, ma restava aperta la questione di dare una forma esplicita della funzione $\rho(\nu, T)$.

Nel 1896, Wien aveva avanzato la forma

$$f(\nu/T) = \alpha e^{-\beta \nu/T},$$

dove α e β , sono due costanti. Nuove indagini evidenziarono, tuttavia, che la legge formulata non valeva per le basse frequenze. Come è noto, agli inizi del Novecento M. Planck, che era stato allievo di Kirchhoff a Berlino, giunse a risolvere la questione della radiazione termica o di corpo nero: la sua formula, in accordo con i fatti sperimentali, era stata raggiunta assumendo che gli oscillatori cui si deve l'emissione della radiazione di frequenza ν non potevano avere che energie multiple di $h\nu$, dove h è, appunto, la famosa costante di Planck.

I PRIMI PASSI

1. In cerca di prima occupazione

Agli esami finali del suo corso, nel luglio del 1900, Albert ottenne la media di 4,91. Si collocava così al quarto posto dietro Grossmann, Kollros ed Ehrat, ma aveva raggiunto lo scopo: il conseguimento del diploma al Politecnico federale di Zurigo, che gli fu rilasciato con la proverbiale puntualità svizzera il 28 luglio del 1900. Il titolo di *Fachlehrer in mathematischer Richtung* lo abilitava a insegnare matematica e scienze nelle scuole secondarie. Naturalmente, Albert aveva ben altri orizzonti verso cui puntare, e si diede subito daffare per accaparrarsi un posto come *Assistent*, l'ulteriore gradino per la carriera accademica, di uno dei docenti del Politecnico. L'impresa era tutt'altro che semplice. Non solo: nel corso dell'estate informa debitamente la madre Pauline della sua ferma intenzione, apertamente osteggiata³⁸, di sposare Mileva Marić, di ben quattro anni più grande di lui. Al contempo, iniziava a lavorare alla stesura di una dissertazione per ottenere il dottorato, e alla stesura del suo primo articolo, intitolato *Conclusioni tratte dal fenomeno della capillarità*, inviato alla prestigiosa rivista "Annalen der Physik" verso la fine dell'anno.

Il Politecnico federale non era abilitato a rilasciare il dottorato, ma una particolare convenzione consentiva agli studenti che vi si erano diplomati di accedere al titolo presentando semplicemente il testo della dissertazione all'Università di Zurigo. Sembra che nel semestre invernale del 1900-1901 Einstein abbia manifestato l'intenzione di preparare il lavoro sotto la supervisione di H.F. Weber, che occupava la cattedra di Fisica teorica e Matematica al Politecnico. L'argomento doveva essere probabilmente quello della termoelettricità,

³⁸ Cfr. *Albert a Mileva*, 29 (?) luglio 1900, in A. Einstein, M. Marić, *The Love Letters*, Princeton University Press, Princeton 1992; trad. it. di M. Premoli, *Lettere d'amore*, Bollati Boringhieri, Torino 1993, pp. 61-63.

ambito che lo interessava e che era comune a diversi dottorandi del gruppo di Weber. Dopo un litigio con il docente, sembra però che Albert si sia rivolto ad A. Kleiner, docente di Fisica all'Università di Zurigo, un fisico sperimentale che si occupava di strumenti di misura, ma che aveva anche un certo interesse verso i problemi fondamentali della fisica. Kleiner vide sicuramente il lavoro di Einstein prima che esso fosse consegnato, nel novembre 1901, all'Università di Zurigo. Questo scritto è andato purtroppo perduto e anche le testimonianze indirette sul suo contenuto sono ambigue. Dalle indicazioni che emergono, sembra che la dissertazione discutesse, in particolare, le ricerche di Boltzmann sulla teoria dei gas e quelle di Drude circa la teoria elettronica dei metalli. In ogni caso, il testo non seguì fino in fondo l'iter previsto, perché nel febbraio 1902 Albert decise di ritirare la dissertazione, probabilmente su pressione di Kleiner, che gli suggeriva di evitare uno scontro con Boltzmann. Si può anche congetturare che, vista la preponderanza delle dissertazioni di fisica sperimentale presentate a Zurigo, la mancanza di prove o verifiche dei risultati teorici del lavoro einsteiniano abbia consigliato il candidato al dottorato di ritirare la propria dissertazione e, forse, ad abbandonare, almeno temporaneamente, l'idea di giungere al titolo. In effetti, benché nel gennaio del 1903 Einstein coltivò ancora un certo interesse per le forze molecolari, in una missiva all'amico Michele Angelo Besso confida: "Mi sono deciso di nuovo a far parte del corpo dei liberi docenti, supposto che vi giunga. Al contrario, non preparerò il dottorato perché ciò non mi è affatto utile, e tutta questa commedia mi è diventata fastidiosa"³⁹.

Con il suo primo articolo Einstein inizia a cogliere i frutti di quella preparazione coltivata personalmente, che culminerà con l'incredibile ed eccezionale produzione di memorie nel 1905, il suo *annus mirabilis*. Sin d'ora, è tuttavia chiaro che Albert non solo ha una visione complessiva ed essenziale dello *status* della scienza fisica e dei suoi problemi, ma è anche in grado di esprimere una propria linea interpretativa, che viene pian piano a chiarirsi nell'individuazione di ambiti e questioni fondamentali alle quali risponderà in modo decisivo ed essenziale.

Uno di questi ambiti è certamente quello termodinamico. Come è noto, e come si evince dallo stesso termine, la termodinamica si oc-

³⁹ A. Einstein a M.A. Besso, Berna, giovedì [gennaio 1903], in A. Einstein, M.A. Besso, *Correspondance 1903-1955*, Hermann, Paris 1972, p. 4.

cupa dello studio delle trasformazioni della materia in rapporto ai cambiamenti di temperatura. Sia Clausius che Maxwell avevano indirizzato le loro ricerche a partire dal comportamento dei costituenti elementari della materia, nel tentativo di ritrovare le leggi e i principi generali della termodinamica espressi in termini di parametri macroscopici per il comportamento dei sistemi macroscopici. Ciò rese possibile la costruzione della teoria cinetico-molecolare della materia. D'altra parte, Boltzmann e J. Willard Gibbs, negli anni 1890-1905 erano riusciti nell'intento di dimostrare che, nel loro insieme, le leggi della termodinamica potevano essere fondate su una rappresentazione atomica della materia e sullo studio del moto degli atomi che la costituiscono in funzione della temperatura. Di qui la nascita di una vera e propria disciplina fisica, la meccanica statistica. L'espressione è facilmente comprensibile: si parla di meccanica, dal momento che si studia il moto degli atomi; si aggiunge il predicato statistica per il semplice motivo che la termodinamica è una teoria macroscopica e solo metodi statistici, legittimati dal fatto che il minimo volume di materia contiene un numero enorme di elementi atomici, ci permettono di passare dal livello microscopico al livello macroscopico.

Uno dei principali risultati degli studi di Boltzmann riguardava il secondo principio della termodinamica, secondo il quale la trasformazione di energia meccanica in calore non è reversibile. Il fisico austriaco aveva infatti interpretato tale principio in termini di ordine e disordine, e dimostrato che se l'energia meccanica è ordinata, il calore corrisponde a un'agitazione molecolare che si svolge in tutti i sensi, ossia a un moto disordinato. Poste le cose in questi termini, il secondo principio della termodinamica ci dice semplicemente che la natura procede sempre nel senso di un crescente disordine, sicché mentre è possibile produrre disordine a partire dall'ordine, non è possibile l'operazione inversa. Boltzmann aveva anche reso in termini quantitativi questo progressivo avanzare del disordine; esso viene espresso dalla formula

$$S = k \ln W,$$

dove S è l'entropia, cioè la quantità termodinamica introdotta da Clausius, k è una costante (detta appunto di Boltzmann), W la probabilità. L'importanza di questa relazione sta nel fatto che essa lega questa grandezza macroscopica, definita per ciascuno stato macroscopico

del sistema considerato, a una grandezza dipendente dallo stato microscopico del sistema o, per esser più precisi, il numero di possibilità microscopiche che ci sono di realizzare questo stato macroscopico, dal momento che uno stato di quest'ultimo tipo può corrispondere a diverse e molteplici configurazioni dei suoi costituenti atomici.

Orbene, scopo del giovane diplomato al Politecnico federale sarà appunto quello di giungere a una comprensione più profonda, più immediata e meno appesantita di ipotesi, delle leggi della termodinamica. Non è così casuale che all'articolo dedicato al fenomeno della capillarità, reso noto nel marzo del 1901, seguiranno altri tre articoli che, tra il 1902 e il 1904, saranno anch'essi pubblicati presso gli "Annalen der Physik". In questi lavori Einstein dà vita a una sua personale interpretazione della meccanica statistica che si rivelerà in linea, come lo stesso fisico tedesco riconoscerà⁴⁰, con l'esposizione data da Gibbs, di cui Albert, che in quel periodo non era integrato nel sistema universitario, ignorava i lavori. Ciò nonostante, l'interpretazione einsteiniana segna l'inizio di una diversa prospettiva di sviluppo: la possibilità di poter investigare fenomeni che fino a quel momento sfuggivano all'ambito termodinamico e che ora potevano essere individuati e descritti dalla meccanica statistica. Questi fenomeni sono, precisamente, le fluttuazioni che un sistema all'equilibrio può presentare.

Consideriamo un sistema fisico chiuso, ma non isolato; un sistema, cioè, che non può scambiare materia con l'esterno, perché è chiuso, ma che tuttavia è in contatto con quest'ultimo, sicché non isolato, attraverso un termostato che mantiene la temperatura su valori fissati. Avremo chiaramente degli scambi termici tra il nostro sistema chiuso e l'ambiente esterno. Ciò significa che l'energia del sistema non è rigorosamente determinata. Ebbene, Einstein si rese conto che la scala delle fluttuazioni era fissata da k , la costante di Boltzmann. Ma per il teorema di equipartizione dell'energia, che appunto ripartisce l'energia cinetica in misura uguale tra i differenti gradi di libertà di un sistema, k determina anche l'energia media che deve essere attribuita a ciascun grado di libertà di un sistema fisico alla temperatura T . Il numero dei gradi di libertà di un sistema può esser definito come il numero di possibilità indipendenti di cui godono gli elementi costitutivi del sistema; ad esempio, un sistema come quello descritto in precedenza ha tre gradi di libertà, che cor-

⁴⁰ *Einstein, Note autobiografiche*, cit., p. 25.

rispondono alla possibilità che il sistema ha di spostarsi secondo ciascuna delle tre direzioni indipendenti dello spazio; un sistema di due atomi senza interazione possiede sei gradi di libertà, e così via di seguito. Avremo allora

$$\bar{E} = \frac{1}{2} k T.$$

Naturalmente, tutto ciò non era sfuggito né a Boltzmann né a Gibbs; ma se quest'ultimo riteneva che le fluttuazioni sarebbero state estremamente deboli sicché, di fatto, praticamente non rilevabili in qualsiasi sistema di dimensioni ordinarie e in condizioni normali, Boltzmann considerava addirittura inutile il tentativo di osservarle. Einstein sapeva bene che le fluttuazioni sarebbero state minime, ma ciò, pensava, non legittimava affatto la decisione di rinunciare a investigare eventuali casi particolari. L'importanza della questione sta nel fatto che la misura delle fluttuazioni energetiche sarebbe servita per determinare k e, attraverso k , il numero di Avogadro N , ossia il numero di molecole contenute nella mole di ogni sostanza, attraverso la relazione

$$N = \frac{R}{k}.$$

Si trattava, insomma, di andare a fondo della questione atomica, di misurare l'atomo. Ed è a questo punto che Einstein si convince che il sistema fisico, costituito dalla radiazione termica all'interno di una cavità con le pareti mantenute a una data temperatura, avrebbe costituito il caso speciale in cui le fluttuazioni energetiche si sarebbero potute rilevare. Tutto questo lo spinse a occuparsi della ricerca di Planck e ai problemi cui il grande fisico tedesco aveva dato una risposta originale e rivoluzionaria agli inizi del XX secolo.

2. L'Akademie Olympia

Nel frattempo, nel 1901, Albert ottiene la cittadinanza svizzera e, dal momento che ogni tentativo di strappare un posto di assistente è caduto nel vuoto, si mette in cerca di un lavoro. Nel corso dell'estate accetta di insegnare come supplente alla scuola tecnica di Winterthur e, in autunno, dà ripetizioni in un collegio privato di Schaffhouse. Naturalmente incontra regolarmente Mile-

va. Nel mese di dicembre, dietro interessamento del padre di Marcel Grossmann, il nostro giovane insegnante presenta la domanda di assunzione presso l'Ufficio brevetti di Berna. La necessità di un lavoro stabile e sicuro, e naturalmente ben retribuito, era ormai pressante, anzi, doveva essere adeguatamente e soprattutto celermente soddisfatta: di lì a poco Albert sarebbe diventato padre di una bambina, presumibilmente data alla luce nel gennaio 1902, a cui venne imposto il nome di Lieserl. In attesa di un positivo responso da parte dell'Ufficio brevetti, Einstein si preoccupò di far pubblicare a più riprese, sul giornale quotidiano di Berna "Anzeiger für di Stadt Bern", un'inserzione che suonava così: "Lezioni private di Matematica e Fisica per studenti universitari e di scuola superiore tenute con la massima accuratezza da Albert Einstein, diplomato al Politecnico federale, Gerechtigkeitsgasse 32, primo piano. Lezioni di prova gratuite"⁴¹. La prima inserzione reca la data di mercoledì 5 febbraio 1902; la tariffa oraria era di 2 franchi svizzeri, ben presto, tuttavia, elevata a 3.

Uno dei primi visitatori della nuova residenza del neodiplomato, indipendentemente dall'attività di ripetizione, fu l'amico universitario Max Talmey che, nel corso della sua infanzia e adolescenza, lo aveva stimolato tanto sul versante della filosofia quanto su quello della matematica e delle scienze della natura. Ormai diventato medico, Talmey si era informato sulle peripezie del giovane amico mettendosi in contatto con la famiglia Einstein a Milano. La visita non poteva non suscitare in lui una certa tristezza: le condizioni di vita di Albert erano davvero assai modeste e si riassumevano in una semplice occhiata: una piccola stanza arredata esclusivamente con lo stretto necessario. Nonostante la durezza dei tempi, il Nostro non si perse d'animo e, soprattutto, continuò a segnalare la sua disponibilità sul quotidiano bernese. Fu proprio in una di queste circostanze che Maurice Solovine, uno studente romeno di buona famiglia ormai maturo presso l'Università di Berna, ma purtroppo ancora molto incerto in merito all'ambito del sapere a cui avrebbe applicato la sua intelligenza e speso le sue energie, lesse l'annuncio e si recò, incuriosito, all'indirizzo segnalato. Dall'incontro tra i due nascerà una solida e bella amicizia che si concretizzerà con la creazione dell'Akademie Olympia. L'impatto fu folgorante, come si evince dal resoconto che lo stesso Solovine ri-

⁴¹ Overbye, *Einstein innamorato* ..., cit., p. 119.

porta introducendo il volume che raccoglie le lettere a lui indirizzate da parte di Einstein dal 3 maggio 1906 al 27 febbraio 1955. Ricorda Solovine:

Un giorno, durante le vacanze di Pasqua del 1902, passeggiando nelle strade di Berna e avendo acquistato un quotidiano, sono caduto su un passo che diceva che Albert Einstein, ex allievo della Scuola politecnica di Zurigo, impartiva delle lezioni di fisica teorica per tre franchi l'ora. Mi diressi così verso la casa indicata dall'annuncio, salii al primo piano e tirai il campanello. Intesi un tuonante *herein* [avanti] e vidi subito apparire Einstein. Poiché la porta del suo appartamento dava su un colore scuro, fui colpito dalla straordinaria luminosità dei suoi grandi occhi. Entrato da lui, dopo aver preso posto, gli dissi che studiavo filosofia, ma che desideravo anche approfondire un po' lo studio della fisica per acquisire una solida conoscenza della natura. Mi confidò che anche lui, quando era più giovane, aveva avuto una passione molto viva per la filosofia, ma che il vago e l'arbitrario che vi regnavano lo avevano distolto, e che ora si occupava unicamente di fisica. Abbiamo discusso per circa due ore di ogni genere di questioni e ci siamo sentiti in comunione di idee e attratti l'uno verso l'altro. Preparandomi a lasciarlo, mi accompagnò, e discutemmo ancora per strada circa una mezzora e fu fissato l'incontro per il giorno dopo. Quando ci siamo rivisti abbiamo ripreso la discussione su certe questioni affrontate la volta precedente e la lezione di fisica fu completamente dimenticata. E quando, due giorni dopo, sono tornato da lui, dopo aver discusso per un certo tempo mi disse: "A dire il vero non è necessario darle delle lezioni di fisica, la discussione dei problemi di cui essa si occupa è molto più interessante. Venga dunque a trovarmi molto semplicemente, sarò felice di discutere con lei". Così sono tornato più volte, e più lo conoscevo, più lo trovavo avvincente⁴².

Fu appunto nel corso di una di queste interminabili discussioni che Solovine fece una proposta che Einstein accolse con grande entusiasmo: si trattava di leggere insieme qualche opera di un grande maestro, fosse essa un classico della scienza, della filosofia o della letteratura, e di intavolare la discussione sui problemi da essa sollevati. Alle sedute, che Einstein impose fossero tenute dopo aver con-

⁴² M. Solovine, *Introduction. A. Einstein, Lettres à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paris 1956, pp. VI-VII.

sumato insieme una ben modesta cena, si aggregò ben presto Conrad Habicht, che Albert aveva conosciuto a Schaffhouse, e che si era trasferito a Berna per terminare i propri studi matematici in vista dell'insegnamento al liceo. Nonostante le ristrettezze economiche, come sembra, Albert abbia addirittura sostenuto che sarebbe stato meglio suonare il violino nelle strade di Berna, il clima delle riunioni era animato da un incredibile ardore. "Proprio a noi" dice Solovine, "si applicavano bene le parole di Epicureo: *Che cosa bella la povertà gioiosa!*"⁴³.

In effetti, (...) ciò che dava un timbro particolare alla nostra accademia, è così che chiamavamo piacevolmente le nostre riunioni di ogni sera, era il desiderio di estendere e di approfondire le nostre conoscenze e i sentimenti di vivo affetto che provavamo l'uno per l'altro. Ho seguito queste sedute con un interesse appassionante e, ciò che è curioso, è che Einstein le ha seguite con un interesse non meno vivo del mio"⁴⁴.

Per render l'idea dell'attenzione e della dedizione con la quale Einstein si impegnava quando la discussione verteva su tematiche che maggiormente lo coinvolgevano, Solovine ricorda un episodio davvero comico che ebbe luogo il giorno del compleanno di Albert. Nel corso delle frequenti passeggiate sotto i caratteristici portici di Berna, durante le quali continuavano normalmente le discussioni, Solovine ebbe modo di vedere esposta, in una bella vetrina di delicatezze gastronomiche, una confezione di caviale. Ricordando la piacevolezza dell'alimento, che nella sua terra natale era accessibile a un prezzo modesto rispetto a quello proibitivo della vetrina bernese, ebbe l'idea di conferire con Habicht sulla possibilità, unendo gli sforzi finanziari, di offrire una porzione della prelibatezza ad Albert, che sapeva non averlo mai apprezzato. Ricorda Solovine:

Quando Einstein mangiava un piatto fuori dal comune, si estasiava ed impiegava gli epiteti più espressivi per caratterizzarlo. Gioivamo già all'idea di vederlo entusiasinarsi e di servirsi dei termini i più ricercati per esprimere la sua soddisfazione. Giunto il 14 marzo, siamo andati da lui per cenare insieme e, fingendo di mettere sul tavolo i salsicciotti e le altre parti del

⁴³ Ivi, p. VII.

⁴⁴ Ivi, p. X.

menu, ho disposto il caviale in tre piatti e poi mi sono avvicinato ad Einstein. Il caso volle che, quella sera, Einstein parlasse del principio d'inerzia di Galileo, e quando egli affrontava un problema, dimenticava completamente la terra, le sue miserie e le sue gioie. Ad un dato momento ci siamo messi a tavola; Einstein mandava giù il caviale, boccone dopo boccone, senza dire niente e continuando a parlare del principio d'inerzia. Noi ci guardammo, Habicht ed io, furtivamente stupiti, e quando Einstein ebbe finito di mangiare il caviale esclamai: "Ebbene, sapete che cosa avete appena mangiato?" "Cosa", disse, guardandomi con i suoi grandi occhi, "che cosa era?" "Che diavole, era il famoso caviale, "Era questo il caviale?", disse tutto meravigliato. E dopo un minuto di silenzio aggiunse: "È lo stesso, si ha un bell'offrire agli zoticoni i piatti più squisiti, non sanno apprezzarli"⁴⁵.

Intanto, nell'ottobre del 1902 Hermann Einstein moriva a Milano. Pochi mesi dopo, il 6 gennaio 1903, Albert sposa civilmente Mileva a Berna: suoi testimoni di nozze sono Maurice Solovine e Conrad Habicht. Il matrimonio, precisa Solovine, "non portò alcun cambiamento nelle nostre riunioni. Mileva, intelligente e riservata, ci ascoltava attentamente, ma non interveniva mai nelle nostre discussioni"⁴⁶. Nel settembre dello stesso anno Lieserl viene registrata all'anagrafe, atto che ha fatto ipotizzare una sua eventuale adozione nel caso la nascita illegittima avesse avuto delle ripercussioni sull'assunzione in pianta stabile di Einstein all'Ufficio brevetti, cosa che avvenne di lì a poco. Purtroppo, sembra che la piccola, che si trovava con la madre a Budapest dai famigliari di lei, sia stata affetta, in quel periodo, da scarlattina. Dopo questo evento, Lieserl non viene più menzionata, ed è probabile che la bambina non abbia mai abitato con i genitori. In ogni caso, di lei si è persa ogni traccia. Mileva, intanto, è di nuovo incinta: il 14 maggio del 1904, a Berna, nasce un maschio, che si chiamerà Hans Albert⁴⁷.

Verso la metà del 1905, Habicht lascia Berna e Solovine, pochi mesi dopo, in novembre, si trasferisce a Lione; l'esperienza esaltante dell'Äkademie Olympia, iniziata tre anni prima, cessa di esistere. "Ciò che mi ha sempre stupito", osserva Solovine, "è vedere più

⁴⁵ Ivi, pp. IX-X.

⁴⁶ Ivi, p. XII.

⁴⁷ Mileva darà un terzo figlio a Einstein, il 28 luglio 1910. Il bambino, chiamato Eduard, mostrerà fin dalla tenera infanzia gravi problemi psichici.

tardi Einstein, che era coperto di gloria e di onori, pensare alle nostre riunioni con emozione e una specie di nostalgia⁴⁸; era il sentimento che testimoniava il ricordo della libertà della ricerca e della scoperta condotte senza condizionamenti interni o esterni, solo per provare il piacere di pensare, e di sperare di cogliere un frammento di verità.

⁴⁸ Solovine, *op. cit.*, p. XIII.

I PRIMI PASSI

1. In cerca di prima occupazione

Agli esami finali del suo corso, nel luglio del 1900, Albert ottenne la media di 4,91. Si collocava così al quarto posto dietro Grossmann, Kollros ed Ehrat, ma aveva raggiunto lo scopo: il conseguimento del diploma al Politecnico federale di Zurigo, che gli fu rilasciato con la proverbiale puntualità svizzera il 28 luglio del 1900. Il titolo di *Fachlehrer in mathematischer Richtung* lo abilitava a insegnare matematica e scienze nelle scuole secondarie. Naturalmente, Albert aveva ben altri orizzonti verso cui puntare, e si diede subito daffare per accaparrarsi un posto come *Assistent*, l'ulteriore gradino per la carriera accademica, di uno dei docenti del Politecnico. L'impresa era tutt'altro che semplice. Non solo: nel corso dell'estate informa debitamente la madre Pauline della sua ferma intenzione, apertamente osteggiata³⁸, di sposare Mileva Marić, di ben quattro anni più grande di lui. Al contempo, iniziava a lavorare alla stesura di una dissertazione per ottenere il dottorato, e alla stesura del suo primo articolo, intitolato *Conclusioni tratte dal fenomeno della capillarità*, inviato alla prestigiosa rivista "Annalen der Physik" verso la fine dell'anno.

Il Politecnico federale non era abilitato a rilasciare il dottorato, ma una particolare convenzione consentiva agli studenti che vi si erano diplomati di accedere al titolo presentando semplicemente il testo della dissertazione all'Università di Zurigo. Sembra che nel semestre invernale del 1900-1901 Einstein abbia manifestato l'intenzione di preparare il lavoro sotto la supervisione di H.F. Weber, che occupava la cattedra di Fisica teorica e Matematica al Politecnico. L'argomento doveva essere probabilmente quello della termoelettricità,

³⁸ Cfr. *Albert a Mileva*, 29 (?) luglio 1900, in A. Einstein, M. Marić, *The Love Letters*, Princeton University Press, Princeton 1992; trad. it. di M. Premoli, *Lettere d'amore*, Bollati Boringhieri, Torino 1993, pp. 61-63.

ambito che lo interessava e che era comune a diversi dottorandi del gruppo di Weber. Dopo un litigio con il docente, sembra però che Albert si sia rivolto ad A. Kleiner, docente di Fisica all'Università di Zurigo, un fisico sperimentale che si occupava di strumenti di misura, ma che aveva anche un certo interesse verso i problemi fondamentali della fisica. Kleiner vide sicuramente il lavoro di Einstein prima che esso fosse consegnato, nel novembre 1901, all'Università di Zurigo. Questo scritto è andato purtroppo perduto e anche le testimonianze indirette sul suo contenuto sono ambigue. Dalle indicazioni che emergono, sembra che la dissertazione discutesse, in particolare, le ricerche di Boltzmann sulla teoria dei gas e quelle di Drude circa la teoria elettronica dei metalli. In ogni caso, il testo non seguì fino in fondo l'iter previsto, perché nel febbraio 1902 Albert decise di ritirare la dissertazione, probabilmente su pressione di Kleiner, che gli suggeriva di evitare uno scontro con Boltzmann. Si può anche congetturare che, vista la preponderanza delle dissertazioni di fisica sperimentale presentate a Zurigo, la mancanza di prove o verifiche dei risultati teorici del lavoro einsteiniano abbia consigliato il candidato al dottorato di ritirare la propria dissertazione e, forse, ad abbandonare, almeno temporaneamente, l'idea di giungere al titolo. In effetti, benché nel gennaio del 1903 Einstein coltivò ancora un certo interesse per le forze molecolari, in una missiva all'amico Michele Angelo Besso confida: "Mi sono deciso di nuovo a far parte del corpo dei liberi docenti, supposto che vi giunga. Al contrario, non preparerò il dottorato perché ciò non mi è affatto utile, e tutta questa commedia mi è diventata fastidiosa"³⁹.

Con il suo primo articolo Einstein inizia a cogliere i frutti di quella preparazione coltivata personalmente, che culminerà con l'incredibile ed eccezionale produzione di memorie nel 1905, il suo *annus mirabilis*. Sin d'ora, è tuttavia chiaro che Albert non solo ha una visione complessiva ed essenziale dello *status* della scienza fisica e dei suoi problemi, ma è anche in grado di esprimere una propria linea interpretativa, che viene pian piano a chiarirsi nell'individuazione di ambiti e questioni fondamentali alle quali risponderà in modo decisivo ed essenziale.

Uno di questi ambiti è certamente quello termodinamico. Come è noto, e come si evince dallo stesso termine, la termodinamica si oc-

³⁹ A. Einstein a M.A. Besso, Berna, giovedì [gennaio 1903], in A. Einstein, M.A. Besso, *Correspondance 1903-1955*, Hermann, Paris 1972, p. 4.

cupa dello studio delle trasformazioni della materia in rapporto ai cambiamenti di temperatura. Sia Clausius che Maxwell avevano indirizzato le loro ricerche a partire dal comportamento dei costituenti elementari della materia, nel tentativo di ritrovare le leggi e i principi generali della termodinamica espressi in termini di parametri macroscopici per il comportamento dei sistemi macroscopici. Ciò rese possibile la costruzione della teoria cinetico-molecolare della materia. D'altra parte, Boltzmann e J. Willard Gibbs, negli anni 1890-1905 erano riusciti nell'intento di dimostrare che, nel loro insieme, le leggi della termodinamica potevano essere fondate su una rappresentazione atomica della materia e sullo studio del moto degli atomi che la costituiscono in funzione della temperatura. Di qui la nascita di una vera e propria disciplina fisica, la meccanica statistica. L'espressione è facilmente comprensibile: si parla di meccanica, dal momento che si studia il moto degli atomi; si aggiunge il predicato statistica per il semplice motivo che la termodinamica è una teoria macroscopica e solo metodi statistici, legittimati dal fatto che il minimo volume di materia contiene un numero enorme di elementi atomici, ci permettono di passare dal livello microscopico al livello macroscopico.

Uno dei principali risultati degli studi di Boltzmann riguardava il secondo principio della termodinamica, secondo il quale la trasformazione di energia meccanica in calore non è reversibile. Il fisico austriaco aveva infatti interpretato tale principio in termini di ordine e disordine, e dimostrato che se l'energia meccanica è ordinata, il calore corrisponde a un'agitazione molecolare che si svolge in tutti i sensi, ossia a un moto disordinato. Poste le cose in questi termini, il secondo principio della termodinamica ci dice semplicemente che la natura procede sempre nel senso di un crescente disordine, sicché mentre è possibile produrre disordine a partire dall'ordine, non è possibile l'operazione inversa. Boltzmann aveva anche reso in termini quantitativi questo progressivo avanzare del disordine; esso viene espresso dalla formula

$$S = k \ln W,$$

dove S è l'entropia, cioè la quantità termodinamica introdotta da Clausius, k è una costante (detta appunto di Boltzmann), W la probabilità. L'importanza di questa relazione sta nel fatto che essa lega questa grandezza macroscopica, definita per ciascuno stato macroscopico

del sistema considerato, a una grandezza dipendente dallo stato microscopico del sistema o, per esser più precisi, il numero di possibilità microscopiche che ci sono di realizzare questo stato macroscopico, dal momento che uno stato di quest'ultimo tipo può corrispondere a diverse e molteplici configurazioni dei suoi costituenti atomici.

Orbene, scopo del giovane diplomato al Politecnico federale sarà appunto quello di giungere a una comprensione più profonda, più immediata e meno appesantita di ipotesi, delle leggi della termodinamica. Non è così casuale che all'articolo dedicato al fenomeno della capillarità, reso noto nel marzo del 1901, seguiranno altri tre articoli che, tra il 1902 e il 1904, saranno anch'essi pubblicati presso gli "Annalen der Physik". In questi lavori Einstein dà vita a una sua personale interpretazione della meccanica statistica che si rivelerà in linea, come lo stesso fisico tedesco riconoscerà⁴⁰, con l'esposizione data da Gibbs, di cui Albert, che in quel periodo non era integrato nel sistema universitario, ignorava i lavori. Ciò nonostante, l'interpretazione einsteiniana segna l'inizio di una diversa prospettiva di sviluppo: la possibilità di poter investigare fenomeni che fino a quel momento sfuggivano all'ambito termodinamico e che ora potevano essere individuati e descritti dalla meccanica statistica. Questi fenomeni sono, precisamente, le fluttuazioni che un sistema all'equilibrio può presentare.

Consideriamo un sistema fisico chiuso, ma non isolato; un sistema, cioè, che non può scambiare materia con l'esterno, perché è chiuso, ma che tuttavia è in contatto con quest'ultimo, sicché non isolato, attraverso un termostato che mantiene la temperatura su valori fissati. Avremo chiaramente degli scambi termici tra il nostro sistema chiuso e l'ambiente esterno. Ciò significa che l'energia del sistema non è rigorosamente determinata. Ebbene, Einstein si rese conto che la scala delle fluttuazioni era fissata da k , la costante di Boltzmann. Ma per il teorema di equipartizione dell'energia, che appunto ripartisce l'energia cinetica in misura uguale tra i differenti gradi di libertà di un sistema, k determina anche l'energia media che deve essere attribuita a ciascun grado di libertà di un sistema fisico alla temperatura T . Il numero dei gradi di libertà di un sistema può esser definito come il numero di possibilità indipendenti di cui godono gli elementi costitutivi del sistema; ad esempio, un sistema come quello descritto in precedenza ha tre gradi di libertà, che cor-

⁴⁰ *Einstein, Note autobiografiche*, cit., p. 25.

rispondono alla possibilità che il sistema ha di spostarsi secondo ciascuna delle tre direzioni indipendenti dello spazio; un sistema di due atomi senza interazione possiede sei gradi di libertà, e così via di seguito. Avremo allora

$$\bar{E} = \frac{1}{2} k T.$$

Naturalmente, tutto ciò non era sfuggito né a Boltzmann né a Gibbs; ma se quest'ultimo riteneva che le fluttuazioni sarebbero state estremamente deboli sicché, di fatto, praticamente non rilevabili in qualsiasi sistema di dimensioni ordinarie e in condizioni normali, Boltzmann considerava addirittura inutile il tentativo di osservarle. Einstein sapeva bene che le fluttuazioni sarebbero state minime, ma ciò, pensava, non legittimava affatto la decisione di rinunciare a investigare eventuali casi particolari. L'importanza della questione sta nel fatto che la misura delle fluttuazioni energetiche sarebbe servita per determinare k e, attraverso k , il numero di Avogadro N , ossia il numero di molecole contenute nella mole di ogni sostanza, attraverso la relazione

$$N = \frac{R}{k}.$$

Si trattava, insomma, di andare a fondo della questione atomica, di misurare l'atomo. Ed è a questo punto che Einstein si convince che il sistema fisico, costituito dalla radiazione termica all'interno di una cavità con le pareti mantenute a una data temperatura, avrebbe costituito il caso speciale in cui le fluttuazioni energetiche si sarebbero potute rilevare. Tutto questo lo spinse a occuparsi della ricerca di Planck e ai problemi cui il grande fisico tedesco aveva dato una risposta originale e rivoluzionaria agli inizi del XX secolo.

2. L'Akademie Olympia

Nel frattempo, nel 1901, Albert ottiene la cittadinanza svizzera e, dal momento che ogni tentativo di strappare un posto di assistente è caduto nel vuoto, si mette in cerca di un lavoro. Nel corso dell'estate accetta di insegnare come supplente alla scuola tecnica di Winterthur e, in autunno, dà ripetizioni in un collegio privato di Schaffhouse. Naturalmente incontra regolarmente Mile-

rispondono alla possibilità che il sistema ha di spostarsi secondo ciascuna delle tre direzioni indipendenti dello spazio; un sistema di due atomi senza interazione possiede sei gradi di libertà, e così via di seguito. Avremo allora

$$\bar{E} = \frac{1}{2} k T.$$

Naturalmente, tutto ciò non era sfuggito né a Boltzmann né a Gibbs; ma se quest'ultimo riteneva che le fluttuazioni sarebbero state estremamente deboli sicché, di fatto, praticamente non rilevabili in qualsiasi sistema di dimensioni ordinarie e in condizioni normali, Boltzmann considerava addirittura inutile il tentativo di osservarle. Einstein sapeva bene che le fluttuazioni sarebbero state minime, ma ciò, pensava, non legittimava affatto la decisione di rinunciare a investigare eventuali casi particolari. L'importanza della questione sta nel fatto che la misura delle fluttuazioni energetiche sarebbe servita per determinare k e, attraverso k , il numero di Avogadro N , ossia il numero di molecole contenute nella mole di ogni sostanza, attraverso la relazione

$$N = \frac{R}{k}.$$

Si trattava, insomma, di andare a fondo della questione atomica, di misurare l'atomo. Ed è a questo punto che Einstein si convince che il sistema fisico, costituito dalla radiazione termica all'interno di una cavità con le pareti mantenute a una data temperatura, avrebbe costituito il caso speciale in cui le fluttuazioni energetiche si sarebbero potute rilevare. Tutto questo lo spinse a occuparsi della ricerca di Planck e ai problemi cui il grande fisico tedesco aveva dato una risposta originale e rivoluzionaria agli inizi del XX secolo.

2. L'Akademie Olympia

Nel frattempo, nel 1901, Albert ottiene la cittadinanza svizzera e, dal momento che ogni tentativo di strappare un posto di assistente è caduto nel vuoto, si mette in cerca di un lavoro. Nel corso dell'estate accetta di insegnare come supplente alla scuola tecnica di Winterthur e, in autunno, dà ripetizioni in un collegio privato di Schaffhouse. Naturalmente incontra regolarmente Mile-

va. Nel mese di dicembre, dietro interessamento del padre di Marcel Grossmann, il nostro giovane insegnante presenta la domanda di assunzione presso l'Ufficio brevetti di Berna. La necessità di un lavoro stabile e sicuro, e naturalmente ben retribuito, era ormai pressante, anzi, doveva essere adeguatamente e soprattutto celermente soddisfatta: di lì a poco Albert sarebbe diventato padre di una bambina, presumibilmente data alla luce nel gennaio 1902, a cui venne imposto il nome di Lieserl. In attesa di un positivo responso da parte dell'Ufficio brevetti, Einstein si preoccupò di far pubblicare a più riprese, sul giornale quotidiano di Berna "Anzeiger für di Stadt Bern", un'inserzione che suonava così: "Lezioni private di Matematica e Fisica per studenti universitari e di scuola superiore tenute con la massima accuratezza da Albert Einstein, diplomato al Politecnico federale, Gerechtigkeitsgasse 32, primo piano. Lezioni di prova gratuite"⁴¹. La prima inserzione reca la data di mercoledì 5 febbraio 1902; la tariffa oraria era di 2 franchi svizzeri, ben presto, tuttavia, elevata a 3.

Uno dei primi visitatori della nuova residenza del neodiplomato, indipendentemente dall'attività di ripetizione, fu l'amico universitario Max Talmey che, nel corso della sua infanzia e adolescenza, lo aveva stimolato tanto sul versante della filosofia quanto su quello della matematica e delle scienze della natura. Ormai diventato medico, Talmey si era informato sulle peripezie del giovane amico mettendosi in contatto con la famiglia Einstein a Milano. La visita non poteva non suscitare in lui una certa tristezza: le condizioni di vita di Albert erano davvero assai modeste e si riassumevano in una semplice occhiata: una piccola stanza arredata esclusivamente con lo stretto necessario. Nonostante la durezza dei tempi, il Nostro non si perse d'animo e, soprattutto, continuò a segnalare la sua disponibilità sul quotidiano bernese. Fu proprio in una di queste circostanze che Maurice Solovine, uno studente romeno di buona famiglia ormai maturo presso l'Università di Berna, ma purtroppo ancora molto incerto in merito all'ambito del sapere a cui avrebbe applicato la sua intelligenza e speso le sue energie, lesse l'annuncio e si recò, incuriosito, all'indirizzo segnalato. Dall'incontro tra i due nascerà una solida e bella amicizia che si concretizzerà con la creazione dell'Akademie Olympia. L'impatto fu folgorante, come si evince dal resoconto che lo stesso Solovine ri-

⁴¹ Overbye, *Einstein innamorato* ..., cit., p. 119.

porta introducendo il volume che raccoglie le lettere a lui indirizzate da parte di Einstein dal 3 maggio 1906 al 27 febbraio 1955. Ricorda Solovine:

Un giorno, durante le vacanze di Pasqua del 1902, passeggiando nelle strade di Berna e avendo acquistato un quotidiano, sono caduto su un passo che diceva che Albert Einstein, ex allievo della Scuola politecnica di Zurigo, impartiva delle lezioni di fisica teorica per tre franchi l'ora. Mi diressi così verso la casa indicata dall'annuncio, salii al primo piano e tirai il campanello. Intesi un tuonante *herein* [avanti] e vidi subito apparire Einstein. Poiché la porta del suo appartamento dava su un colore scuro, fui colpito dalla straordinaria luminosità dei suoi grandi occhi. Entrato da lui, dopo aver preso posto, gli dissi che studiavo filosofia, ma che desideravo anche approfondire un po' lo studio della fisica per acquisire una solida conoscenza della natura. Mi confidò che anche lui, quando era più giovane, aveva avuto una passione molto viva per la filosofia, ma che il vago e l'arbitrario che vi regnavano lo avevano distolto, e che ora si occupava unicamente di fisica. Abbiamo discusso per circa due ore di ogni genere di questioni e ci siamo sentiti in comunione di idee e attratti l'uno verso l'altro. Preparandomi a lasciarlo, mi accompagnò, e discutemmo ancora per strada circa una mezzora e fu fissato l'incontro per il giorno dopo. Quando ci siamo rivisti abbiamo ripreso la discussione su certe questioni affrontate la volta precedente e la lezione di fisica fu completamente dimenticata. E quando, due giorni dopo, sono tornato da lui, dopo aver discusso per un certo tempo mi disse: "A dire il vero non è necessario darle delle lezioni di fisica, la discussione dei problemi di cui essa si occupa è molto più interessante. Venga dunque a trovarmi molto semplicemente, sarò felice di discutere con lei". Così sono tornato più volte, e più lo conoscevo, più lo trovavo avvincente⁴².

Fu appunto nel corso di una di queste interminabili discussioni che Solovine fece una proposta che Einstein accolse con grande entusiasmo: si trattava di leggere insieme qualche opera di un grande maestro, fosse essa un classico della scienza, della filosofia o della letteratura, e di intavolare la discussione sui problemi da essa sollevati. Alle sedute, che Einstein impose fossero tenute dopo aver con-

⁴² M. Solovine, *Introduction. A. Einstein, Lettres à Maurice Solovine*, Gauthier-Villars, Paris 1956, pp. VI-VII.

sumato insieme una ben modesta cena, si aggregò ben presto Conrad Habicht, che Albert aveva conosciuto a Schaffhouse, e che si era trasferito a Berna per terminare i propri studi matematici in vista dell'insegnamento al liceo. Nonostante le ristrettezze economiche, come sembra, Albert abbia addirittura sostenuto che sarebbe stato meglio suonare il violino nelle strade di Berna, il clima delle riunioni era animato da un incredibile ardore. "Proprio a noi" dice Solovine, "si applicavano bene le parole di Epicureo: *Che cosa bella la povertà gioiosa!*"⁴³.

In effetti, (...) ciò che dava un timbro particolare alla nostra accademia, è così che chiamavamo piacevolmente le nostre riunioni di ogni sera, era il desiderio di estendere e di approfondire le nostre conoscenze e i sentimenti di vivo affetto che provavamo l'uno per l'altro. Ho seguito queste sedute con un interesse appassionante e, ciò che è curioso, è che Einstein le ha seguite con un interesse non meno vivo del mio"⁴⁴.

Per render l'idea dell'attenzione e della dedizione con la quale Einstein si impegnava quando la discussione verteva su tematiche che maggiormente lo coinvolgevano, Solovine ricorda un episodio davvero comico che ebbe luogo il giorno del compleanno di Albert. Nel corso delle frequenti passeggiate sotto i caratteristici portici di Berna, durante le quali continuavano normalmente le discussioni, Solovine ebbe modo di vedere esposta, in una bella vetrina di delicatezze gastronomiche, una confezione di caviale. Ricordando la piacevolezza dell'alimento, che nella sua terra natale era accessibile a un prezzo modesto rispetto a quello proibitivo della vetrina bernese, ebbe l'idea di conferire con Habicht sulla possibilità, unendo gli sforzi finanziari, di offrire una porzione della prelibatezza ad Albert, che sapeva non averlo mai apprezzato. Ricorda Solovine:

Quando Einstein mangiava un piatto fuori dal comune, si estasiava ed impiegava gli epiteti più espressivi per caratterizzarlo. Gioivamo già all'idea di vederlo entusiasinarsi e di servirsi dei termini i più ricercati per esprimere la sua soddisfazione. Giunto il 14 marzo, siamo andati da lui per cenare insieme e, fingendo di mettere sul tavolo i salsicciotti e le altre parti del

⁴³ Ivi, p. VII.

⁴⁴ Ivi, p. X.

menu, ho disposto il caviale in tre piatti e poi mi sono avvicinato ad Einstein. Il caso volle che, quella sera, Einstein parlasse del principio d'inerzia di Galileo, e quando egli affrontava un problema, dimenticava completamente la terra, le sue miserie e le sue gioie. Ad un dato momento ci siamo messi a tavola; Einstein mandava giù il caviale, boccone dopo boccone, senza dire niente e continuando a parlare del principio d'inerzia. Noi ci guardammo, Habicht ed io, furtivamente stupiti, e quando Einstein ebbe finito di mangiare il caviale esclamai: "Ebbene, sapete che cosa avete appena mangiato?" "Cosa", disse, guardandomi con i suoi grandi occhi, "che cosa era?" "Che diavole, era il famoso caviale, "Era questo il caviale?"", disse tutto meravigliato. E dopo un minuto di silenzio aggiunse: "È lo stesso, si ha un bell'offrire agli zoticoni i piatti più squisiti, non sanno apprezzarli"⁴⁵.

Intanto, nell'ottobre del 1902 Hermann Einstein moriva a Milano. Pochi mesi dopo, il 6 gennaio 1903, Albert sposa civilmente Mileva a Berna: suoi testimoni di nozze sono Maurice Solovine e Conrad Habicht. Il matrimonio, precisa Solovine, "non portò alcun cambiamento nelle nostre riunioni. Mileva, intelligente e riservata, ci ascoltava attentamente, ma non interveniva mai nelle nostre discussioni"⁴⁶. Nel settembre dello stesso anno Lieserl viene registrata all'anagrafe, atto che ha fatto ipotizzare una sua eventuale adozione nel caso la nascita illegittima avesse avuto delle ripercussioni sull'assunzione in pianta stabile di Einstein all'Ufficio brevetti, cosa che avvenne di lì a poco. Purtroppo, sembra che la piccola, che si trovava con la madre a Budapest dai famigliari di lei, sia stata affetta, in quel periodo, da scarlattina. Dopo questo evento, Lieserl non viene più menzionata, ed è probabile che la bambina non abbia mai abitato con i genitori. In ogni caso, di lei si è persa ogni traccia. Mileva, intanto, è di nuovo incinta: il 14 maggio del 1904, a Berna, nasce un maschio, che si chiamerà Hans Albert⁴⁷.

Verso la metà del 1905, Habicht lascia Berna e Solovine, pochi mesi dopo, in novembre, si trasferisce a Lione; l'esperienza esaltante dell'Akademie Olympia, iniziata tre anni prima, cessa di esistere. "Ciò che mi ha sempre stupito", osserva Solovine, "è vedere più

⁴⁵ Ivi, pp. IX-X.

⁴⁶ Ivi, p. XII.

⁴⁷ Mileva darà un terzo figlio a Einstein, il 28 luglio 1910. Il bambino, chiamato Eduard, mostrerà fin dalla tenera infanzia gravi problemi psichici.

tardi Einstein, che era coperto di gloria e di onori, pensare alle nostre riunioni con emozione e una specie di nostalgia⁴⁸; era il sentimento che testimoniava il ricordo della libertà della ricerca e della scoperta condotte senza condizionamenti interni o esterni, solo per provare il piacere di pensare, e di sperare di cogliere un frammento di verità.

⁴⁸ Solovine, *op. cit.*, p. XIII.

ANNUS MIRABILIS

1. L'annuncio di una rivoluzione

L'espressione latina *annus mirabilis*⁴⁹ è stata spesso usata per indicare il 1666, anno nel corso del quale Isaac Newton consegnò le basi delle teorie fisiche e matematiche che rivoluzionarono la scienza del suo tempo e condizioneranno, con il calcolo infinitesimale, la teoria dei colori e la teoria della gravitazione, lo sviluppo della conoscenza scientifica fino al Novecento. Originariamente, tuttavia, l'espressione non aveva il benché minimo riferimento all'opera e alla figura del grande scienziato inglese. Si trattava di ben altra cosa! Precisamente e, se vogliamo, semplicemente, l'espressione era tratta dal titolo di un capolavoro con il quale il famoso poeta inglese John Dryden celebrava la vittoria della flotta navale di Sua Maestà britannica sugli olandesi, nonché la sopravvivenza di Londra al grande incendio. Il titolo completo della composizione poetica è infatti *Annus Mirabilis: The Years of Wonders, 1666*. Recentemente, la stessa espressione è stata utilizzata nei riguardi della produzione scientifica elaborata e ultimata da Einstein nel corso del 1905, un parallelismo felicemente colto, potremmo dire, dal momento che, come avremo modo di accertare, proprio in questo anno il ventiseienne fisico tedesco non solo porta a piena realizzazione l'opera newtoniana, ma pone altresì le basi per una rivoluzione che, a partire da quella data, percorrerà tutto il XX secolo per prolungarsi fino ai nostri giorni.

Del resto, lo stesso giovane diplomato e, da poco tempo, coniugato, era ben consapevole dell'importanza dei lavori che aveva portato e che era in procinto di portare a termine, come stanno a testimoniare due missive del periodo, inviate all'amico "accademico"

⁴⁹ Cfr. J. Stachel (a cura di), *Einstein's Miraculous Years. Five Papers that Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, Princeton 1998; trad. it. di E. Ioli, *L'anno memorabile di Einstein. I cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del Novecento*, Edizioni Dedalo, Bologna 2005, p. 21.

Conrad Habicht. Nella prima lettera, presumibilmente scritta tra il 18 e il 26 marzo del 1905, si legge:

Le prometto quattro articoli (...) il primo dei quali potrei inviarLe a breve, visto che riceverò prontamente le copie omaggio. Si occupa della radiazione e delle proprietà energetiche della luce, ed è molto rivoluzionario, come vedrà (...) Il secondo lavoro è una determinazione delle reali dimensioni degli atomi stabilite a partire dalla diffusione e dalla viscosità di soluzioni diluite di sostanze neutre. Il terzo dimostra che, assumendo la validità della teoria molecolare del calore, particelle in sospensione nei liquidi, dell'ordine di grandezza di 1/1000 di mm, devono già compiere un movimento disordinato osservabile, prodotto dall'agitazione termica; i fisiologi hanno infatti osservato i movimenti di piccoli corpi inanimati in sospensione, che sono stati da loro chiamati "moto molecolare browniano". Il quarto lavoro è attualmente soltanto un abbozzo, e tratta di un'elettrodinamica dei corpi in moto che utilizza una modifica della teoria dello spazio e del tempo; la parte puramente cinematica di questo lavoro la interesserà di sicuro⁵⁰.

Nella seconda lettera, presumibilmente scritta tra il 30 giugno e il 22 settembre del 1905, Einstein afferma:

Mi è venuta in mente un'ulteriore conseguenza del lavoro sull'elettrodinamica. Il principio di relatività, unito alle equazioni di Maxwell, prescrive che la massa di un corpo sia una misura diretta dell'energia contenuta in un corpo; la luce porta cioè con sé una massa. Nel caso del radio, dovrebbe aversi una sensibile diminuzione di massa. L'argomento è buffo e seducente, ma per quanto ne so, il Signore potrebbe riderci sopra e menarmi per il naso⁵¹.

Si tratta – nell'ordine con il quale lo stesso fisico tedesco ne dà notizia, e che peraltro corrisponde, fatta eccezione per il secondo lavoro, all'ordine cronologico di pubblicazione negli "Annalen der Physik" – delle seguenti memorie, che ci accingiamo ad analizzare facendo il più possibile riferimento al dettato del loro stesso autore.

⁵⁰ A. Einstein a C. Habicht, 18 maggio o 25 maggio 1905, in A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton, vol. 5, 1993, p. 31.

⁵¹ A. Einstein a C. Habicht, 30 giugno-22 settembre 1905, in *ivi*, p. 33.

2. I quanti di luce

Il primo lavoro del 1905 reca il titolo *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (*Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce*). Sarà proprio questo scritto, composto da una iniziale parte introduttiva e da nove brevi paragrafi, a ottenere il più alto riconoscimento da parte del mondo scientifico: il premio Nobel per la fisica per l'anno 1921.

La memoria prende avvio ponendo e richiamando l'attenzione su "una profonda differenza formale"⁵² tra i concetti con i quali i fisici trattano i gas e gli altri corpi ponderabili e i concetti espressi con la teoria elettromagnetica di Maxwell, che riguarda appunto i fenomeni di questo tipo nello spazio vuoto. Se, nel primo caso, lo stato di un corpo è determinato, lo si ritiene tale, dalla posizione e dalla velocità di un numero grandissimo, ma comunque finito, di atomi ed elettroni; nel secondo caso, per determinare lo stato elettromagnetico di un volume di spazio, si fa uso di funzioni spaziali continue, perché un numero finito di grandezze non ci consentirebbe di definire in modo compiuto lo stato considerato. Detto in altri termini, "secondo la teoria di Maxwell, in tutti i fenomeni puramente elettromagnetici, quindi anche nel caso della luce, l'energia deve essere considerata una funzione spaziale continua, mentre, secondo l'attuale concezione dei fisici, l'energia di un corpo ponderabile dovrebbe essere rappresentata da una somma estesa agli atomi e agli elettroni. L'energia di un corpo ponderabile non può essere suddivisa in parti arbitrariamente piccole, ma secondo la teoria di Maxwell (o, più in generale, secondo ogni teoria ondulatoria) l'energia di un raggio luminoso emesso da una sorgente puntiforme si distribuisce in modo continuo su un volume sempre più grande"⁵³.

Ora, continua Einstein dimostrando la cautela e l'equilibrio propri di chi è ben consapevole di essere sull'orlo di una svolta davvero "rivoluzionaria", su un fatto non vi è alcun dubbio: "La teoria ondulatoria della luce, che fa uso di funzioni spaziali continue, si è di-

⁵² A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, in "Annalen der Physik" (4) 17, 1905, trad. it. di E. Ioli, *Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce*, in Stachel, *op. cit.*, p. 187.

⁵³ *Ibid.*

mostrata eccellente per la descrizione dei fenomeni puramente ottici e non sarà probabilmente mai sostituita da un'altra teoria"⁵⁴. Ciò detto, occorre anche aggiungere quanto segue:

Si dovrebbe tener presente, tuttavia, che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi temporali e non a valori istantanei; e a dispetto della piena conferma sperimentale della teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, è concepibile che la teoria della luce, fondata su funzioni spaziali continue, porti a contraddizioni qualora venga applicata ai fenomeni di emissione e trasformazione della luce⁵⁵.

Dopo aver confermato la validità della teoria ondulatoria della luce, Einstein pone dunque sul tappeto del tavolo da gioco l'eventualità che questa stessa teoria non sia esente, in talune circostanze, da vere e proprie "contraddizioni". Ciò non significa, si badi, confutare, e dunque abbandonare il modello esplicativo ondulatorio, bensì ipotizzare, nel caso eccezionale del fenomeno elettromagnetico, una spiegazione altrettanto soddisfacente per quei fenomeni, come la radiazione di corpo nero, la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici mediante luce ultravioletta, che lo pongono in difficoltà, mentre appaiono del tutto comprensibili quando si assume una distribuzione spaziale non continua dell'energia luminosa. L'ipotesi che viene avanzata è allora la seguente:

Quando un raggio luminoso si propaga partendo da una sorgente puntiforme, l'energia non si distribuisce con continuità su volumi di spazi via via crescenti, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti di spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti o generati solo come unità intere⁵⁶.

Non è dunque un caso che il primo paragrafo di questa memoria "rivoluzionaria" sia dedicato a Planck e, per essere precisi, a una "difficoltà" che riguarderebbe la teoria da lui espressa circa la radiazione di corpo nero. Per mettere in evidenza questa "difficoltà", Einstein fa diretto riferimento a una formula particolarmente importante, quella che mette in relazione ρ , che è la funzione incognita, con l'energia media di un oscillatore. Questa formula aveva avu-

⁵⁴ Ivi, pp. 187-188.

⁵⁵ Ivi, p. 188.

⁵⁶ *Ibid.*

to un ruolo di primo piano nell'elaborazione di Planck, eccola:

$$\bar{E} = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} c.$$

Gli oscillatori hanno un solo grado di libertà, sicché alla luce del teorema di equipartizione dell'energia, che ci è noto, l'energia cinetica di questi oscillatori sarà

$$\frac{1}{2} \kappa T.$$

Ma l'energia potenziale media di un oscillatore lineare è uguale all'energia cinetica media; avremo così

$$\bar{E} = \kappa T, \quad \text{quindi} \quad \rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \kappa T.$$

Il risultato raggiunto non è altro che la nota formula di Rayleigh-Jeans. Orbene, la “difficoltà” annunciata sta tutta in questa formula. Secondo il fisico tedesco, queste “relazioni, che sono state trovate come condizioni di equilibrio dinamico, non soltanto non sono confermate dall'esperienza, ma implicano per di più che, nel nostro modello, una ripartizione precisa dell'energia fra etere e materia è fuori discussione”⁵⁷. Il fatto che non vi sia conferma sul piano sperimentale è già un elemento che certo, si converrà, non gioca a favore; ma c'è dell'altro: più è ampio il dominio dei risonatori, maggiore è l'energia totale di radiazione del volume di spazio sicché, con il modello adottato, l'integrale darebbe come risultato ∞ . Detto in altri termini, l'energia totale emessa da un corpo a qualsiasi temperatura dovrebbe essere infinita⁵⁸, dal momento che l'energia emessa in un dato intervallo di frequenza cresce indefinitamente all'aumentare della frequenza stessa; per questo, una precisa ripartizione, come dice il Nostro, “è fuori discussione”.

Il passo ulteriore che Einstein intende compiere (al paragrafo secondo), è quello che consiste nel mostrare che la determinazione del quanto elementare quale è stata offerta da Planck si rivela, in una certa misura, indipendente dalla teoria planckiana della radia-

⁵⁷ Ivi, p. 191.

⁵⁸ Cfr. *ibid.*

zione di corpo nero. In effetti, la formula di Rayleigh-Jeans può essere considerata come il caso limite di quella di Planck, ovvero per onde lunghe e alta densità di radiazione, insomma per valori elevati

di $\frac{T}{v}$. Naturalmente, in tal caso, la formula viene a incontrare quel-

la di Planck, che è correttamente aderente ai fatti, confermando così la validità della meccanica classica. Ma la questione qui è un'altra: la meccanica classica, infatti, cade in fallo allorché si registrano

bassi valori di $\frac{T}{v}$! Così, converrà considerare la radiazione di corpo

nero unita ai dati sperimentali senza alcun modello presupposto per l'emissione e la propagazione della radiazione. I successivi quattro paragrafi, dedicati appunto alla radiazione termica per bassi valori, saranno sviluppati, in parte, sulla base di una teoria generale valida, quella della termodinamica, per il resto, facendo riferimento a conoscenze empiriche sulla radiazione. Ci si potrebbe giustamente chiedere perché Einstein adotti proprio la termodinamica come teoria generale affidabile. La ragione è degna di nota. Poiché si prende in considerazione una regione ristretta e ben identificata,

quella appunto dove per $\frac{T}{v}$ si hanno bassi valori, conviene conside-

rare una formula espressa da Wien, che già abbiamo avuto modo di incontrare:

$$\rho = \alpha v^3 e^{-\beta v/T}$$

Ma Wien ci ha anche insegnato che la radiazione esercita una pressione su una parete che si ponga come ostacolo al suo percorso. Attraverso questa formula, Einstein può dimostrare il teorema per cui la radiazione termica v descritta da Wien, dal punto di vista termodinamico si comporta come se fosse composta di punti materiali di energia $h\nu$, ossia come se fosse composta di quanti di energia.

Poste le cose in questi termini, il fisico tedesco può avviarsi verso la conclusione della questione esaminata e sviluppare il suo "punto di vista euristico" nei riguardi della emissione e della trasformazione della luce, uno sviluppo che si sofferma anzitutto sulla regola di G.G. Stokes; in secondo luogo sulla generazione dei raggi catodici mediante illuminazione di corpi solidi, dove si offre una originale

spiegazione dell'effetto fotoelettrico; infine sulla ionizzazione dei gas mediante luce ultravioletta.

a) *La regola di Stokes*

Orbene, assumiamo che una luce monocromatica possa essere trasformata in luce di diversa frequenza attraverso fotoluminescenza, fenomeno per il quale certe sostanze, una volta sottoposte a illuminazione, riescono a emettere una luce propria diversa dalla luce che le colpisce. Si assuma anche che tanto la luce incidente quanto la luce

emessa siano costituite da quanti di energia di grandezza $\frac{R}{N}\beta\nu$, do-

ve ν è la frequenza corrispondente. La trasformazione in oggetto, secondo l'interpretazione di Einstein, sarebbe dovuta al fatto che ogni quanto di energia incidente di frequenza ν_1 viene assorbito e genera per se stesso un quanto di luce di frequenza ν_2 . L'assorbimento può, al contempo, originare l'emissione di quanti di luce di frequenza ν_3, ν_4 , eccetera, ma anche di energia di natura diversa, ad esempio calore. È opportuno precisare, dice il fisico tedesco, che “non ha alcuna importanza quali siano i processi intermedi che determinano questo risultato finale. Se la sostanza fotoluminescente non si può considerare una sorgente stabile di energia, allora, in base al principio di conservazione dell'energia, l'energia di un quanto emesso non può essere maggiore di quella del quanto di luce che l'ha prodotto”⁵⁹. Di conseguenza, otteniamo

$$\frac{R}{N}\beta\nu_2 \leq \frac{R}{N}\nu_1 \quad \text{ovvero } \nu_2 \leq \nu_1, \text{ cioè la nota formula di Stokes.}$$

L'interpretazione esposta richiede almeno due considerazioni. La prima considerazione è che “se l'illuminazione è debole, allora la quantità di luce emessa deve essere proporzionale all'intensità della luce incidente, poiché ogni quanto di energia incidente determinerà un processo elementare del tipo descritto sopra, indipendentemente dagli altri quanti di energia incidente. In particolare, per l'intensità della luce incidente non vi sarà limite inferiore al di sotto del quale la luce non sarebbe in grado di eccitare l'azione fluorescente⁶⁰”. La seconda considerazione è rivolta ai casi di deviazione

⁵⁹ Ivi, p. 201.

⁶⁰ Ivi, p. 200.

concepibili attraverso l'interpretazione esposta. Sono previsti due casi: un primo caso, quando il numero di quanti di energia per unità di volume che sono oggetto della trasformazione è così grande che un quanto di energia della luce emessa può ricevere la sua energia da diversi quanti di luce incidente; un secondo caso, quando la luce, incidente o emessa, non presenta la stessa distribuzione di energia di una radiazione di corpo nero nel dominio di validità della legge di Wien.

b) In merito alla generazione di raggi catodici attraverso l'illuminazione dei corpi solidi

Prima di affrontare la spiegazione einsteiniana, è opportuno prender atto di alcuni dati. La natura dell'effetto fotoelettrico, in realtà, era stata già dimostrata sin dal 1899. Nei primi mesi del 1888 il fisico italiano Augusto Righi fu colpito da un fatto davvero rivelatore: una lastra di materiale conduttore, investita da un raggio di luce ultravioletta, si caricava di elettricità positiva. Lo scienziato chiamò fotoelettrico questo fenomeno, e inizialmente ipotizzò che si trattasse di un semplice trasporto di elettricità operato dalla luce ultravioletta ma, dopo qualche tempo, contemporaneamente e indipendentemente da un altro ricercatore, W. Hallwachs, precisò che non di trasporto si trattava, bensì di produzione vera e propria di elettricità. Detto in altri termini, agendo sui metalli, la radiazione li elettrizza positivamente. L'interpretazione di Righi era la seguente: la radiazione ultravioletta stacca la molecola di aria a contatto col metallo; nel distacco, la carica positiva resta sul metallo mentre la carica negativa, rimasta sulla molecola, se ne va con questa seguendo le linee di forza del campo. Due risultati sembravano confortare questa interpretazione. Anzitutto, come rilevato anche da J. Elster e H. Geitel, oltre che dallo stesso Righi, un flusso di elettricità negativa abbandona l'elettrodo illuminato di luce ultravioletta. In secondo luogo, incoraggiato dal successo ottenuto con la ricerca sui raggi catodici, raggi X, J.J. Thomson rivolse l'attenzione al suddetto flusso. In base al procedimento seguito per i raggi catodici, posto che la corrente elettrica manifestata nel fenomeno fotoelettrico fosse costituita da particelle in moto, negativamente cariche, dal punto di vista teorico si sarebbe potuto stabilire il moto di una singola particella sottoposta all'azione del campo elettrico e di quello magnetico. In caso di verifica sperimentale si sarebbe potuto anche calcolare il rapporto e/m , quello cioè tra la carica e la massa di questa

particella. L'ipotesi fu in effetti confermata sul piano sperimentale, e anche i valori del rapporto tra elettrone e massa sembravano allinearsi. La conclusione di Thomson era semplice: i portatori di elettricità negativa sono della stessa natura di quelli che portano elettricità nel caso dei raggi catodici, insomma, sono elettroni. Potremmo dire che, curiosamente, il fenomeno fotoelettrico si manifestava come inverso rispetto a quello della produzione dei raggi X; così, se l'urto degli elettroni contro la materia produce una radiazione, l'urto di una radiazione contro la materia produce elettroni. Nel 1902 il fisico tedesco P. Lenard dimostrò sperimentalmente che la velocità di emissione degli elettroni non dipende affatto dall'intensità della luce incidente, ma soltanto dalla frequenza: la velocità di emissione cresce con la frequenza mentre con l'intensità di luce incidente cresce solo il numero degli elettroni. Peraltro, il fenomeno si verifica quando la radiazione incidente ha una frequenza che supera un certo limite, che varia con la natura del corpo investito dalla radiazione.

Orbene, in base alla teoria ondulatoria della luce, per la quale l'energia raggiante deve essere considerata come distribuita uniformemente nell'onda luminosa, tutti questi fatti restavano senza una spiegazione valida o comunque accettabile. In effetti, per il principio di conservazione dell'energia, nell'effetto fotoelettrico una parte di energia raggiante si trasforma in energia cinetica degli elettroni espulsi sicché, se la radiazione incidente è più ricca di energia, anche gli elettroni espulsi dovrebbero manifestare un surplus energetico. Perché mai, infine, l'energia assorbita dagli elettroni dovrebbe dipendere dalla frequenza?

Quello appena descritto era il quadro problematico che si presentava agli occhi del ventiseienne Einstein che, sulla scorta della sua tesi principale, afferma:

Secondo la concezione che vuole la luce incidente costituita da quanti di energia $\left(\frac{R}{N}\right)\beta\nu$, la produzione di raggi catodici da parte della luce può essere interpretata nel seguente modo. I quanti di energia penetrano lo strato superficiale del corpo, e la loro energia si trasforma, almeno in parte, in energia cinetica. L'interpretazione più semplice è che un quanto di luce trasferisca tutta la sua energia a un singolo elettrone; assumeremo che ciò possa accadere, senza tuttavia escludere la possibilità che alcuni

elettroni assorbono solo in parte l'energia dei quanti di luce. Un elettrone interno a un corpo e dotato di energia cinetica, una volta raggiunta la superficie avrà perso parte di tale energia. Inoltre, assumeremo che, per abbandonare il corpo, ogni elettrone debba compiere un certo lavoro P^{61} .

Gli elettroni che lasciano il corpo a velocità massima saranno dunque gli elettroni di superficie emessi normalmente a essa. L'energia cinetica di tali elettroni sarà:

$$\frac{R}{N}\beta v - P.$$

Posto che il corpo sia carico e al potenziale positivo Π , che sia circondato da conduttori a potenziale nullo, infine, che Π impedisca la perdita di elettricità da parte del corpo, avremo

$$\Pi e = \frac{R}{N}\beta v - P, \text{ dove } e \text{ è la carica dell'elettrone, ovvero}$$

$$\Pi E = R\beta v - P', \text{ dove } E \text{ è la carica di un grammoequivalente di}$$

uno ione monovalente e P' il potenziale di questa quantità di elettricità negativa rispetto al corpo.

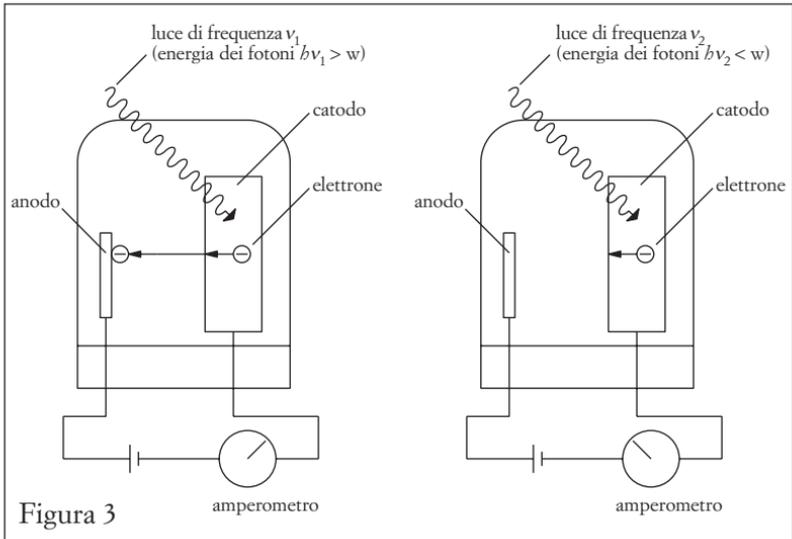
Il Nostro conclude in questi termini:

Questa concezione dell'effetto fotoelettrico non contraddice le sue proprietà osservate da Lenard. Se ogni quanto di energia della luce incidente, indipendentemente da tutti gli altri, trasferisce la propria energia agli elettroni, allora la distribuzione della velocità degli elettroni, cioè la qualità dei raggi catodici prodotti, sarà indipendente dall'intensità della luce incidente; d'altra parte, il numero di elettroni che abbandonano il corpo sarà, in circostanze altrimenti identiche, proporzionale all'intensità della luce incidente⁶².

Ai quanti di luce, nel 1923, Compton impose il nome di *fotoni*. Il fenomeno fotoelettrico può così essere rappresentato come in figura 3. La radiazione luminosa con frequenza ν è composta di fotoni di energia $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck. Affinché possa strappare un elettrone superficiale al metallo, l'energia del fotone

⁶¹ Ivi, pp. 202-203.

⁶² Ivi, p. 204.



deve essere maggiore di quella, W , che lega l'elettrone al metallo stesso; in tal caso, l'amperometro ci rivelerà un passaggio di corrente, come risulta dalla prima sequenza della figura. Se, al contrario, è l'energia del fotone a essere minore di W , non avremo effetto fotoelettrico e il nostro amperometro non rileverà, come nella seconda sequenza della figura, alcun passaggio di corrente.

c) Ionizzazione dei gas mediante luce ultravioletta

Come è noto, gli ioni sono atomi elettrizzati che nel loro moto trasportano la carica elettrica. L'assunto di partenza di Einstein è che nel caso specifico, ossia nella ionizzazione di un gas mediante luce ultravioletta, ciascun quanto di energia luminosa viene utilizzato per ionizzare un'unica molecola di gas. Posto ciò, ne consegue che il lavoro necessario per ionizzare una molecola di gas non può essere maggiore dell'energia del quanto di luce assorbito, capace di produrre questo effetto. Così, se J rappresenta l'energia teorica di ionizzazione avremo la relazione:

$$R\beta \nu \geq J$$

La seconda conseguenza rilevante, da sottoporre a controllo sperimentale, è che se ogni quanto di energia luminosa assorbito ionizza

una molecola, allora deve sussistere una precisa relazione tra la quantità di luce assorbita (L) e il numero di grammolecole di gas ionizzato (j). Si tratta della seguente relazione:

$$j = \frac{L}{R\beta v}.$$

3. La misura dell'atomo

Il secondo lavoro del 1905 annunciato nella missiva all'amico Habicht reca il titolo *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Una nuova determinazione delle dimensioni molecolari). Si tratta della dissertazione di dottorato che, completata il 30 aprile 1905 fu presentata all'Università di Zurigo il 20 luglio dello stesso anno. Poco dopo l'accettazione da parte dell'università, agli "Annalen der Physik" fu inviata, il 19 agosto, una versione leggermente diversa della stessa per la pubblicazione. Sul momento preciso in cui Einstein iniziò a lavorare alla dissertazione le notizie di cui disponiamo sono quasi nulle. Sappiamo che nel marzo del 1903 alcune idee portanti di questo lavoro erano già state elaborate; non c'è dubbio alcuno che l'argomento sia stato scelto dal candidato e che, rispetto alle altre problematiche di cui Albert si occupava, il metodo idrodinamico escogitato per la determinazione delle molecole era un argomento molto adatto e in sintonia con l'ambiente accademico di Zurigo, dove prevaleva in termini schiacciati l'orientamento di fisica sperimentale.

In effetti, come anticipavamo, rispetto al tentativo precedentemente abortito tre anni prima, in questa dissertazione il fisico tedesco mette insieme le tecniche dell'idrodinamica classica con le tecniche della teoria della diffusione con uno scopo ben preciso: dar vita a un nuovo metodo per determinare le dimensioni delle molecole e del numero di Avogadro: un metodo che il Nostro applicò a molecole di zucchero (il soluto) in soluzione. Naturalmente, a quel tempo si disponeva già di metodi atti alla determinazione delle dimensioni molecolari, benché sia doveroso precisare che, se da un lato la stima dei limiti superiori, quelli più vicini ai nostri strumenti, era dominio di studio ormai consolidato, dall'altro, i metodi più affidabili si affermeranno solo nella seconda metà dell'Ottocento assumendo come punto di riferimento specifico la teoria cinetica dei gas. Alla fine del secolo, la maggior parte dei metodi operativi e in

uso presentavano un accettabile accordo di massima sui valori, e in molti casi, il comportamento svolto dai liquidi assolve un ruolo importante anche se i risultati ottenuti risultano assai limitati sul piano della precisione.

Orbene, il metodo messo a punto da Einstein offre risultati che, proprio rispetto alla precisione, non hanno niente da invidiare a quelli ottenuti facendo leva sulla teoria cinetica dei gas. In effetti, se i metodi che pongono al loro fondamento la teoria cinetica dei gas, basati sulla capillarità, assumono implicitamente l'esistenza di forze molecolari, l'assunto iniziale del fisico tedesco è che l'idrodinamica classica può essere considerata come perfettamente idonea quando la si utilizzi per calcolare l'effetto delle molecole di soluto, rappresentate come sferette dure, sulla viscosità del solvente in una soluzione diluita. Con la sua procedura, Einstein è in grado di determinare le dimensioni molecolari di grandi molecole di soluto (zucchero) rispetto a quelle del solvente. Ma c'è di più. Con questa memoria, si risponde positivamente anche a una questione a lungo dibattuta sul piano della teoria delle soluzioni, ovvero se le molecole di solvente, nel caso del Nostro, l'acqua, sono legate alle molecole o agli ioni del soluto (lo zucchero). Come sappiamo, l'interesse principale del fisico tedesco era tuttavia ben più generale, si inquadrava nella piena consapevolezza che la precisa determinazione delle molecole avrebbe dato un forte contributo alla questione dell'esistenza dell'atomo, che culminerà con la spiegazione del moto browniano, e consentito una più accurata verifica della formula della radiazione di Planck, rispetto a quella ottenibile con misure compiute sulla radiazione stessa.

4. Sì, gli atomi esistono

La terza memoria del 1905 si intitola *Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (*Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*).

Introducendo i cinque brevi paragrafi che esauriscono questo lavoro, Einstein afferma:

In questo articolo si mostrerà che, in base alla teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi debbono compiere, in conseguenza

del moto di agitazione termica delle molecole, movimenti di ampiezza tale che li si può agevolmente osservare al microscopio⁶³.

Da ciò derivano due conclusioni, l'una particolare, l'altra, generale. La prima conclusione è relativa all'identificazione del moto che andiamo ricercando. Dice il fisico tedesco:

È possibile che i movimenti che qui discuteremo siano identici al cosiddetto "moto molecolare browniano"; tuttavia, i dati a mia disposizione riguardo a quest'ultimo sono così imprecisi che non ho potuto formarmi un'opinione in materia⁶⁴.

Il moto disordinato di particelle microscopiche sospese in un fluido era stato osservato assai prima che il botanico Robert Brown pubblicasse, nel 1828, i risultati delle sue osservazioni; tuttavia, Brown fu il primo a mettere in evidenza la persistenza, la non transitorietà di questo moto, e a escludere qualsiasi spiegazione del fenomeno che facesse ricorso a principi vitali. La seconda conclusione, generale, riguarda la validità, sul piano del fenomeno in discussione, della termodinamica classica e della teoria cinetico-molecolare del calore. In effetti,

se il moto discusso qui può essere di fatto osservato insieme alle leggi cui ci si aspetta che obbedisca, la termodinamica classica non può più essere considerata valida già per ragioni distinguibili al microscopio, e un'esatta determinazione delle reali dimensioni degli atomi diventa possibile. Viceversa, se la previsione di questo moto si dimostrasse errata, ciò fornirebbe un solido argomento contro la concezione cinetico-molecolare del calore⁶⁵.

Gli obiettivi che lo studio condotto dal ventiseienne fisico si propone di perseguire sono dunque due: il primo è quello di mettere in evidenza, di rilevare effettivamente delle fluttuazioni statistiche; il secondo consiste nel reperimento di elementi tali da rendere certa l'esistenza di atomi con dimensioni definite e finite. L'idea centrale che rende possibile il perseguimento degli obiettivi esplicitati è che le particelle in sospensione in un liquido, che sono suscet-

⁶³ A. Einstein, *Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, in "Annalen der Physik" (4) 17, 1905; trad. it. di E. Ioli, *Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*, in Stachel, *op. cit.*, p. 97.

⁶⁴ *Ibid.*

⁶⁵ *Ibid.*

tibili di osservazione al microscopio, danno luogo a un moto irregolare da imputare alla casualità con cui si ripercuotono gli urti di cui queste stesse particelle sono oggetto da parte delle molecole del liquido.

L'elemento indubbiamente fondamentale e significativo dell'ap-proccio proposto dal fisico tedesco riguarda la pressione osmotica che deve essere attribuita alle particelle in sospensione. Si tratta, infatti, di un elemento originale rispetto alle precedenti spiegazioni avanzate per render conto del moto browniano: anziché ricorrere al teorema di equipartizione dell'energia, il Nostro basa la propria analisi sulla pressione osmotica, assimilando il comportamento dell'insieme delle particelle in sospensione al comportamento di un soluto, ovviamente di un soluto non elettrolita perché altrimenti la dissociazione degli ioni complicherebbe il quadro.

Mettiamo il caso che il soluto sia contenuto in un volume che è separato dal solvente puro da una specie di parete o barriera con la proprietà di essere permeabile al solvente ma non al soluto. Ebbene, su questa parete si esercita una pressione che il chimico olandese J. van't Hoff denominò osmotica. Consideriamo allora il moto delle particelle di soluto sotto l'azione della pressione osmotica; potremo immediatamente affermare che se la densità della sospensione è disomogenea, anche la pressione sarà non omogenea.

Avremo così un processo di diffusione delle particelle di soluto. Ma il moto di queste particelle nel liquido dovrà fare i conti con una resistenza che dipende da un coefficiente di viscosità η , proprio del liquido. La quantità di sostanza che si diffonde in questo processo attraversa un piano di sezione unitaria che è perpendicolare alla direzione della diffusione. Il coefficiente di proporzionalità D viene così designato coefficiente di diffusione. Ora, se invece di considerare le molecole di soluto operiamo con particelle in sospensione, dovremo necessariamente concludere che, dal punto di vista della teoria termodinamica classica, non dovremmo trovare qualcosa di analogo alla pressione osmotica. Le cose stanno in modo diverso se le consideriamo con gli occhiali resi disponibili dalla teoria cinetico-molecolare del calore. Per quest'ultima, infatti, ciò che distingue una molecola in soluzione da un corpo in sospensione risiede solo nelle sue dimensioni, sicché non si vede perché un certo numero di particelle in sospensione non dovrebbero esercitare la pressione osmotica esercitata da uno stesso numero di molecole. Così, se si

adotta il caso della sospensione, l'equilibrio tra le due forze, cioè lo *status* di equilibrio dinamico, ci dà un'equazione che consente di stabilire il coefficiente di diffusione D . Tenuto conto che le particelle in sospensione possono essere considerate come piccole sfere di raggio r , avremo:

$$\frac{RT}{N} = \frac{1}{6\pi\eta r}$$

Come appare evidente, sin da questo momento entra in scena N , cioè il numero di Avogadro. Ma c'è dell'altro. Einstein ricava infatti anche l'espressione dello spostamento medio di una singola particella sospesa in un tempo t , ossia

$$\lambda = \sqrt{2D} \sqrt{t} \text{ sicché, sostituendo, si ottiene}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{RT}{N}} \frac{1}{3\pi\eta r} \sqrt{t}$$

Quest'ultimo risultato esprime la regolarità che ci aspettiamo di trovare per il moto browniano.

In precedenza, abbiamo avuto modo di registrare la stima di N ottenuta da Loschmidt. Attraverso questa stima e la relazione finale ottenuta sopra, è possibile controllare l'ipotesi che ritiene osservabile il moto casuale di particelle di dimensioni dell'ordine del millesimo di millimetro (μ). Se $r = 0,5$, per valori standard di R e η , a temperatura ambiente e per il tempo $t = 1$ s, avremo

$$\lambda \approx 0,8 \mu.$$

Infine, se si risolve la formula in N , avremo la determinazione del numero di Avogadro, quindi la possibilità di contare le molecole in una mole e, di conseguenza, di fissare la scala delle dimensioni atomiche e molecolari.

Lo studio einsteiniano sul moto browniano può a buon diritto essere considerato una delle maggiori espressioni della ricerca nell'ambito della teoria cinetica del calore, dal momento che si pone come uno dei suoi principali contributi. Non solo: alcune, tra le sue conseguenze, si riveleranno estremamente importanti per lo sviluppo della fisica del XX secolo, tanto sul terreno del consolidamento dello studio dei fenomeni di fluttuazione, che giungeranno a costituire

una nuova branca della fisica, quanto sull'affermazione decisiva della realtà dell'atomo, resa ancor più significativa dalle verifiche sperimentali delle deduzioni einsteiniane svolte con successo dal fisico francese J.-B. Perrin e da altri. Non da ultimo, è importante sottolineare che i metodi escogitati da Einstein nelle sue ricerche in questo ambito prepararono il terreno per lo sviluppo, a opera di Szilard e altri, della termodinamica statistica e di una teoria generale dei processi stocastici.

5. Il principio di relatività

La quarta memoria del 1905, quella che Einstein indica a Habicht come ancora in fase di elaborazione, come un abbozzo, reca il titolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sull'elettrodinamica dei corpi in moto)*⁶⁶.

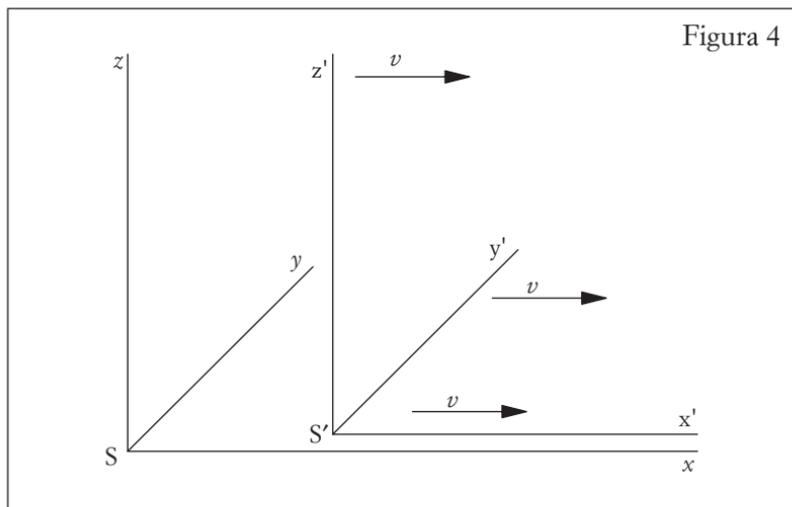
Seguendo passo dopo passo la problematica legata all'etere, un percorso che abbiamo volutamente intrapreso sulla base della stessa ricostruzione proposta da Einstein, abbiamo potuto mettere in evidenza le strategie e i fallimenti nel tentativo di svelare la natura e il comportamento della nozione in oggetto. Siamo ora nella condizione di andare al fondo della questione e comprendere pienamente in che modo e in quali termini il fisico tedesco si è posto di fronte al problema, risolvendolo. Dobbiamo in effetti domandarci: dove nasce, qual è l'origine delle difficoltà che abbiamo incontrato? La risposta non può che essere la seguente: la difficoltà risiede nel con-

⁶⁶ Come è stato ancora di recente messo in evidenza (cfr. Stachel, *op cit.*, p. 114), a rigore l'espressione "teoria della relatività", in uso nella discussione dei primi articoli di Einstein sull'argomento, deve essere considerata inopportuna o inadeguata perché anacronistica, cioè storicamente mal posta. Questo perché, in primo luogo, solo molto più tardi, rispetto alla formulazione della teoria, lo stesso fisico tedesco sostituirà questa espressione a quella, utilizzata fin dall'inizio, di "principio di relatività"; poi, in secondo luogo, perché l'espressione in oggetto si affermerà nel linguaggio corrente della fisica solo dopo il 1907, e non certo per iniziativa dello stesso Einstein. Nel 1906 Planck utilizzò il termine "*Relativtheorie*" per descrivere le equazioni del moto di Lorentz-Einstein per l'elettrone, espressione che resterà in uso per anni. Sembra che A.H. Bucherer sia stato il primo a servirsi del termine "*Relativitätstheorie*" (teoria della relatività), nel corso della discussione seguita a un seminario tenuto da Planck. Il termine venne ripreso da P. Ehrenfest in un articolo del 1907 e, in seguito a ciò utilizzato, ma in modo discontinuo, cioè intervallato con l'espressione originaria "*Relativitätsprinzip*" (principio di relatività), dallo stesso Einstein. Nel 1910, il matematico tedesco Felix Klein suggerì il termine "*Invariantentheorie*" (teoria degli invarianti), ma la proposta non ebbe seguito nell'ambiente dei fisici. Da parte sua, Einstein iniziò a parlare di "teoria della relatività ristretta o speciale", riferendosi alla memoria del 1905, per distinguerla da quella elaborata nel 1916, cioè la "teoria della relatività generale".

flitto, che scopriremo essere solo apparente, fra il principio di relatività e la teoria dell'elettrodinamica di Maxwell-Lorentz. Infatti, benché il principio di relatività affermi che tutti i sistemi di riferimento inerziali, cioè sistemi di coordinate animati da moto rettilineo e uniforme, sono equivalenti tra loro, la teoria di Maxwell-Lorentz implica l'esistenza surrettizia di un sistema inerziale privilegiato. Dice Einstein:

La teoria di Lorentz si trova in opposizione con l'immagine puramente meccanica alla quale i fisici speravano di ricondurre tutti i fenomeni dell'Universo. In effetti, mentre in Meccanica non esiste moto assoluto, ma soltanto moti di corpi relativamente ad altri, nella teoria di Lorentz c'è uno stato particolare che corrisponde fisicamente allo stato di riposo assoluto: è lo stato di un corpo non in moto rispetto all'etere⁶⁷.

Per essere ancora più espliciti, la situazione può essere descritta nei seguenti termini (fig. 4).



Le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di coordinate S, animato da un moto rettilineo uniforme, pos-

⁶⁷ Einstein, *Il principio di relatività...*, cit., p. 41.

sono essere messe in relazione a un secondo sistema di coordinate S' in traslazione uniforme rispetto al primo attraverso le equazioni

$$(1) \quad \begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Otterremo così delle relazioni in t' , x' , y' , z' , perfettamente identiche alle equazioni originarie in t , x , y , z . Ciò significa che le leggi del moto newtoniano si trasformano in leggi della stessa forma quando da un sistema di coordinate si passa a un secondo sistema di coordinate che, rispetto al primo, è animato da un moto rettilineo e uniforme. Come è agevole capire, è proprio questa la proprietà che noi esprimiamo allorché diciamo che nella meccanica classica è soddisfatto il principio di relatività. L'enunciato del principio di relatività è allora il seguente: “*Le leggi che reggono i fenomeni naturali sono indipendenti dallo stato di moto del sistema di coordinate rispetto al quale i fenomeni sono osservati, posto che questo sistema non sia animato da un moto accelerato*”⁶⁸.

Orbene, se adesso trasformiamo le equazioni fondamentali della teoria di Lorentz facendo uso delle equazioni (1), otterremo delle equazioni dove le grandezze x' , y' , z' , non sono più simmetriche e si è costretti a concludere con il Nostro che “la teoria di Lorentz, basata sull’ipotesi dell’etere, non ammette dunque il principio di relatività. Le difficoltà incontrate fin qui derivano principalmente da questo fatto; le ragioni profonde appariranno in seguito. Comunque sia, poiché nessun fatto sperimentale mette in fallo il principio detto, ammettere una teoria che non comporta il principio di relatività è tanto più fuori luogo”⁶⁹.

Le cose stanno allora in questi termini:

- a) se si ammette l’esistenza dell’etere, l’esperienza ci porta a considerare questo fantomatico mezzo come immobile;
- b) la teoria che si fonda sull’immobilità dell’etere, la teoria di Lorentz, sebbene riesca a prevedere i principali fatti sperimenta-

⁶⁸ Ivi, pp. 41-43.

⁶⁹ Ivi, p. 43.

li pecca gravemente su un fatto essenziale: non ammette il principio di relatività.

Viene allora spontaneo chiedersi: ma è davvero impossibile conciliare correttamente e legittimamente i fondamenti della teoria di Lorentz con il principio di relatività? La conciliazione, non solo possibile ma necessaria, può essere ottenuta, come stiamo per vedere, attraverso una serie di passaggi che implicano anzitutto una rinuncia, quella della stessa nozione di etere. Afferma infatti il fisico tedesco:

Il primo passo da fare, se si vuol tentare una conciliazione, è di rinunciare all'etere. In effetti, da una parte siamo stati obbligati ad ammettere l'immobilità dell'etere; dall'altra parte, il principio di relatività richiede che le leggi dei fenomeni naturali riferiti a un sistema di coordinate S' animato da un moto uniforme siano identiche alle leggi degli stessi fenomeni riferiti a un sistema S in riposo rispetto all'etere. Ora, non c'è ragione per ammettere l'immobilità dell'etere, che la teoria e l'esperienza richiedono, rispetto al sistema S' piuttosto che al sistema S ; questi due sistemi non possono essere distinti, ed è di conseguenza fuori luogo far svolgere ad uno di essi un ruolo particolare dicendo che è immobile rispetto all'etere. Se ne conclude che non si può giungere ad una teoria soddisfacente che rinunciando ad un mezzo che riempie tutto lo spazio⁷⁰.

Il secondo passo da fare consiste nella possibilità di conciliare il principio di relatività con una conseguenza fondamentale della teoria di Lorentz che riguarda la propagazione della luce nel vuoto. Einstein enuncia in questi termini tale conseguenza:

La propagazione di un raggio luminoso nel vuoto avviene sempre con la stessa velocità c , poiché questa velocità è indipendente dal moto del corpo che emette il raggio⁷¹.

Si tratta, come è facile capire, dell'invarianza della velocità della luce, c , nel vuoto, invarianza che, fin d'ora, verrà designata come "*principio della costanza della velocità della luce*"⁷². La conciliazione è necessaria perché nella teoria di Lorentz la costanza della velocità della luce c vale solo per un sistema che gode di un particolare stato di moto, cioè

⁷⁰ Ivi, pp. 43-45.

⁷¹ Ivi, p. 45.

⁷² *Ibid.*

quello di essere in riposo rispetto all'etere. Sicché, se vogliamo conservare il principio di relatività, dovremo ammettere che la costanza di c nel vuoto vale per ogni qualsivoglia sistema di riferimento dotato di moto rettilineo e uniforme, insomma per ogni sistema inerziale. Solo che, di primo acchito, questa generalizzazione sembra impossibile. Ed è facile rendersene conto. Torniamo ai nostri due sistemi di riferimento e prendiamo in considerazione un raggio di luce che rispetto a S , in quiete, si propaga con la velocità c . Vogliamo stabilire quale sarà la velocità di propagazione di questo raggio rispetto a S' , che sappiamo animato di moto rettilineo e uniforme rispetto a S . Semplice, si penserà. Sarà sufficiente applicare la regola di addizione delle velocità, la regola newtoniana del parallelogramma. Ne resteremmo delusi! Perché avremo un bel applicare la regola: come risultante troveremo sempre una velocità diversa da c ; il che significa che il principio della costanza della velocità della luce vale per S ma non per S' . Ecco allora che ci troviamo costretti, ancora una volta, a una rinuncia. Per l'esattezza, dovremo rinunciare alla tradizionale regola di addizione delle velocità e sostituirla con un'altra regola. Dice Einstein:

Per quanto ben fondata possa apparire a prima vista, questa regola nasconde almeno due ipotesi arbitrarie che di conseguenza, come stiamo per vedere, regnano su tutta la cinematica⁷³.

Queste due ipotesi rappresentano precisamente “le ragioni profonde” che ci facevano credere che, servendoci delle relazioni (1), si arrivava a denunciare l'incompatibilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività. Svelare, mettere a nudo la fallacia costituita dalle due ipotesi significherà così affermare quella incompatibilità come semplicemente apparente.

6. “Due ipotesi arbitrarie”

La prima “ipotesi arbitraria” riguarda la misura del tempo. Ora, per misurare il tempo, noi ci serviamo, banalmente, di orologi. Ma che cos'è un orologio? Per orologio, dice il fisico tedesco, “intenderemo ogni cosa che caratterizza un fenomeno che ripassa periodicamente negli stessi stati, e ciò in modo tale che siamo obbligati ad ammettere – in virtù del principio di ra-

⁷³ Ivi, p. 47.

gione sufficiente – che tutto ciò che accade all'epoca di un periodo dato sia identico a tutto ciò che accade all'epoca di un periodo qualsiasi⁷⁴. Se il nostro orologio è costituito da un meccanismo munito di lancette, segnare la posizione di queste ultime vuol dire, evidentemente, contare il numero di periodi trascorsi. Misurare l'intervallo di tempo che dura un fenomeno significherà allora, per definizione, contare il numero di periodi indicati dall'orologio dall'inizio sino alla fine del fenomeno. Ora, continua Einstein, “questa definizione ha un senso perfettamente chiaro finché l'orologio è sufficientemente vicino al luogo in cui accade il fenomeno affinché si possa osservare simultaneamente e l'orologio e il fenomeno. Si supponga, al contrario, che quest'ultimo abbia luogo in qualche parte lontano dall'orologio, non sarà più possibile far corrispondere immediatamente alle diverse fasi del fenomeno le diverse posizioni delle lancette dell'orologio. La definizione è allora insufficiente; bisogna completarla. Finora la si completava inconsciamente⁷⁵.”

Per superare la difficoltà, cioè per poter riconoscere il tempo in ciascun punto dello spazio, potremmo ben immaginare proprio quest'ultimo come interamente disseminato di un numero enorme di orologi tutti di costruzione identica. Posto ciò, se consideriamo dei punti A, B, C... ciascuno provvisto di un orologio e, con l'ausilio di coordinate indipendenti dal tempo, riferiti a un sistema di coordinate animato da un moto rettilineo e uniforme, saremo informati sul tempo ovunque ci saremo preoccupati di piazzare un orologio. Scegliendo un numero convenientemente grande di orologi, e tale da poter attribuire a ciascuno di essi un dominio assai ristretto, saremo in grado di precisare un istante qualunque in ogni luogo dello spazio con un'approssimazione grande quanto vorremo. Solo che, ancora una volta, dovremo constatare che una simile definizione del tempo non può essere fecondamente utilizzata dal punto di vista fisico. Ci siamo infatti dimenticati il più e il meglio: non abbiamo rimesso i nostri orologi all'ora attuale, sicché gli intervalli di tempo che scorrono durante un fenomeno che ha una certa estensione saranno evidentemente diversi a seconda

⁷⁴ Einstein precisa opportunamente: “Noi postuliamo perciò che due fenomeni identici hanno la stessa durata. L'orologio perfetto così definito gioca, per la misura del tempo, un ruolo analogo al corpo solido perfetto per la misura delle lunghezze” (*ibid.*, n. 7).

⁷⁵ Ivi, pp. 47-49.

che il fenomeno occupi i tali o i talaltri punti dello spazio. Detto in altri termini, non abbiamo sincronizzato i nostri orologi. Orbene, dice il fisico tedesco:

Per avere una definizione fisica completa del tempo bisogna fare un passo in più: bisogna dire in che modo tutti gli orologi sono stati regolati all'inizio delle esperienze. Noi procederemo come segue. Diamoci anzitutto un mezzo per inviare dei segnali sia da A in B che da B in A. Questo mezzo deve essere tale che non abbiamo alcuna ragione per credere che i fenomeni di trasmissione dei segnali nel senso AB differiscano in qualche cosa dai fenomeni di trasmissione dei segnali nel senso BA. In questo caso, è manifesto che non c'è che un solo modo di regolare l'orologio di B su quello di A in maniera che il segnale che va da A in B richieda tanto tempo – misurato con l'ausilio di detti orologi – quanto quello che va da B in A⁷⁶.

Così, se si indica con:

t_A	l'indicazione dell'orologio A	quando il segnale	AB parte da A
t_B	"	B	"
$t_{B'}$	"	B	"
$t_{A'}$	"	A	"
			BA arriva in A

dovremo regolare l'orologio posto in B su quello collocato in A in modo tale che:

$$t_B - t_A = t'_A - t'_B.$$

La scelta del segnale da utilizzare, onda sonora o raggio luminoso, è, rispetto ai fini che ci proponiamo di perseguire, di per sé indifferente: qualora ci trovassimo in presenza di risultati che non concordano, si dovrà comunque concludere che almeno uno dei due generi di segnali non soddisfa le condizioni necessarie e sufficienti dell'equivalenza dei cammini AB, BA. La nostra scelta, tuttavia, è a ben vedere agevolata dalle proprietà caratteristiche che abbiamo riconosciuto alla velocità della luce c , sicché si preferiranno quei segnali in cui vengono utilizzati dei segnali luminosi che si propagano nel vuoto; infatti, dal momento che la regolazione o sincronizzazione degli orologi implica l'equivalenza del cammino di andata con quello di ritorno, disporremo per definizione di questa equivalenza perché, in virtù del principio della costanza della velocità del-

⁷⁶ Ivi, p. 51.

la luce, nel vuoto quest'ultima si propaga sempre con velocità c . Siamo ora nella condizione di regolare i nostri orologi in modo che il tempo che un segnale luminoso impiega per andare da A in B sia identico a quello che lo stesso segnale impiega per andare da B in A: possediamo cioè un metodo ben definito, attraverso il quale giungere a poter stabilire tre nozioni fondamentali, quella di *tempo fisico*, quella di *evento elementare*, infine quella di *coordinata di tempo*. In effetti, se dopo aver regolato i due orologi tra di loro, che diremo allora *in fase*, a poco a poco regoliamo l'orologio B sull'orologio A, l'orologio C sull'orologio B e così via, avremo una serie di orologi tali che uno qualunque tra di essi è in fase con il precedente; di più, due orologi qualsiasi non consecutivi nella serie dovranno essere in fase in virtù del principio della costanza della velocità della luce c , sicché, dice Einstein, "l'insieme di tutti questi orologi in fase gli uni con gli altri è ciò che chiameremo *tempo fisico*"⁷⁷. Così, se per evento elementare intendiamo in prima battuta un evento supposto concentrato in un punto e di durata infinitamente piccola, e per coordinata di tempo di un evento elementare l'indicazione, allorché si produce l'evento, di un orologio posto infinitamente vicino al punto in cui ha luogo l'evento, concluderemo che "un evento elementare è perciò definito attraverso quattro coordinate: la coordinata di tempo e le tre coordinate che definiscono la posizione nello spazio in cui l'evento è supposto concentrato"⁷⁸. La definizione di tempo fisico che siamo giunti a determinare ci offre la preziosa opportunità di dare un senso definito alle nozioni di simultaneità e di non simultaneità di due eventi che accadono in luoghi lontani l'uno dall'altro, come del resto l'introduzione delle coordinate x, y, z , di un punto nello spazio dà un senso altrettanto definito della nozione di posizione. Infatti, dire che l'ascissa di un punto Q posto su un asse è x , vuol dire semplicemente che, servendosi di un regolo, riportando x volte sull'asse la lunghezza unità si giungerà necessariamente al punto Q. Sta bene, si dirà. Ci siamo costruiti una definizione di tempo che, dal punto di vista fisico, è corretta e pienamente soddisfacente; abbiamo anche definito che cosa dobbiamo intendere per evento elementare; tuttavia, si potrebbe obiettare, ancora non sappiamo, e anzi non riusciamo sinceramente a vedere, in che senso la nozione di tempo che

⁷⁷ Ivi, p. 53.

⁷⁸ *Ibid.*

presiede la regola di addizione delle velocità debba essere considerata “arbitraria”. È quanto stiamo per mostrare attraverso ciò che lo stesso Einstein considera “una osservazione importante”:

Per definire il tempo fisico rispetto a un sistema di assi, ci siamo serviti di *un gruppo di orologi in stato di riposo relativamente a questo sistema*. In base a questa definizione, le indicazioni di tempo o la constatazione della simultaneità di due eventi non avranno senso se il moto del gruppo di orologi o quello del sistema di assi non è conosciuto⁷⁹.

Per comprendere la portata di quanto appena affermato, converrà tornare ai nostri due sistemi inerziali S ed S', cioè animati di moto rettilineo e uniforme l'uno rispetto all'altro. Immaginiamo che tanto il sistema S quanto il sistema S' siano forniti di un gruppo di orologi a essi invariabilmente legati, visto che tutti gli orologi appartengono a un sistema in fase. Se le cose stanno in questi termini, le indicazioni che ci offrono gli orologi del gruppo legato al sistema S definiscono il tempo fisico rispetto a S, mentre le indicazioni che ci offrono gli orologi del gruppo legato al sistema S' definiscono il tempo fisico rispetto a S'. Ne viene che ogni evento elementare avrà necessariamente una coordinata di tempo t rispetto al sistema S e una coordinata di tempo t' rispetto al sistema S'. L'arbitrarietà della nozione di tempo, così come è venuta a caratterizzarsi a partire da Galilei e Newton, sta allora in ciò:

Noi non abbiamo il diritto di supporre a priori che si possano regolare gli orologi dei due gruppi in modo che le due coordinate del tempo dell'evento elementare siano le stesse; in altri termini, in modo che t sia uguale a t'. Supporlo significa fare un'ipotesi arbitraria. Fino ad ora questa ipotesi era introdotta in cinematica⁸⁰.

Non siamo legittimati o autorizzati, perché prescindendo dalla velocità si assume che gli intervalli di tempo permangono comunque uguali: di qui l'equazione $t' = t$, che intuitivamente ma altrettanto erroneamente ci gratifica, e che esprime la nozione di tempo assoluto e unico.

Veniamo adesso a illustrare la seconda “ipotesi arbitraria” su cui si fonda la regola classica del parallelogramma e, di conseguenza, l'intera cinematica galileiano-newtoniana; essa riguarda lo spazio o, me-

⁷⁹ Ivi, p. 55.

⁸⁰ Ivi, p. 57.

glio, la configurazione di un corpo in moto. Come al solito, consideriamo un sistema di coordinate S in moto rettilineo e uniforme rispetto al quale una sbarra di ferro AB si muove, nella direzione del proprio asse, con velocità v . Ci chiediamo: che cosa dobbiamo intendere con l'espressione "lunghezza della sbarra AB "? La richiesta, ne conveniamo, può immediatamente sembrare un po' bizzarra, perché siamo istintivamente portati a ritenere la questione talmente ovvia da non dover ricorrere a una definizione speciale. Vedremo, e ci convinceremo, che le cose non stanno in questo modo se, per giungere a determinare la lunghezza AB della nostra sbarra di ferro, ci serviremo di due diverse, ma entrambe legittime, procedure.

Un primo modo per giungere a stabilire la lunghezza AB consiste nel disporre di un osservatore munito di un regolo graduato. Facendo sì che l'osservatore raggiunga la velocità v con la quale si sposta la sbarra, ovvero si posizioni rispetto a quest'ultima in stato di riposo relativo, l'applicazione successiva del regolo graduato alla sbarra ci darà la misura della lunghezza AB . Il secondo modo per raggiungere il nostro obiettivo, la determinazione della lunghezza della sbarra, ci è offerto attraverso un gruppo di orologi in fase e in riposo rispetto al nostro sistema S . Gli orologi in fase, in effetti, ci permettono di individuare due punti P_1 e P_2 del sistema S dove, al tempo t , vengono a trovarsi i due estremi A e B della sbarra. Applicando il nostro regolo graduato sul segmento che unisce i due punti P_1 e P_2 considerati, otterremo la lunghezza AB della sbarra rispetto al sistema S . Orbene, possiamo pacificamente affermare che, nonostante le due legittime ma diverse procedure di misurazione, l'esito numerico sarà esattamente lo stesso? Per il Nostro, sicuramente e decisamente no:

Non è affatto detto *a priori* che queste due operazioni debbano necessariamente condurre alla stessa *espressione numerica* della lunghezza della sbarra. Tutto ciò che si può dedurre dal principio di relatività – e ciò si dimostra facilmente – è che i due metodi portano alla stessa espressione numerica della lunghezza solo se la sbarra AB è in riposo relativamente al sistema S . Ma non è in alcun modo possibile affermare che il secondo metodo dà una espressione numerica della lunghezza indipendente dalla velocità v della sbarra⁸¹.

⁸¹ Ivi, pp. 57-59.

La risposta non può che essere negativa, dal momento che, non tenendo conto ancora una volta della velocità, si assume che gli intervalli di lunghezza siano gli stessi per tutti gli osservatori. Così, se in generale

si determina la configurazione di un corpo in moto di traslazione uniforme rispetto a S in base ai metodi ordinari della geometria, attraverso regoli graduati o altri corpi solidi animati dallo stesso moto, i risultati delle misure saranno indipendenti dalla velocità v della traslazione; questi risultati ci danno ciò che chiameremo la *configurazione geometrica* del corpo. Se, al contrario, si individua sul sistema S la posizione di diversi punti del corpo ad un istante dato e si determina, con misure geometriche attraverso regoli graduati in riposo rispetto a S , la configurazione formata da questi punti, otteniamo come risultato ciò che chiameremo la *configurazione cinematica* del corpo rispetto a S . La seconda ipotesi fatta inconsciamente nella cinematica si esprime allora così: la configurazione cinematica e la configurazione geometrica sono identiche”⁸².

La regola di addizione delle velocità, o regola del parallelogramma, diretto responsabile della inconciliabilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività, si fonda dunque, come si è mostrato, su due ipotesi inaccettabili, perché arbitrarie, che dal punto di vista matematico assumono la forma delle seguenti equazioni:

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z.$$

7. Le equazioni di trasformazione di Lorentz

Il passo ulteriore che dobbiamo compiere, una volta accertata la necessità di abbandonare la cinematica ordinaria e le sue equazioni di trasformazione, sarà quello di fondare una nuova dottrina del moto indipendentemente dalle cause che lo producono, una nuova cinematica appunto, e, di conseguenza, giungere alla formulazione di nuove equazioni di trasformazione. Ebbene, dice Einstein, “mostreremo che prendendo come base:

- 1° *il principio di relatività,*
- 2° *il principio della costanza della velocità della luce,*

⁸² Ivi, p. 59.

si giunge a equazioni di trasformazione che consentono di constatare che la teoria di Lorentz è compatibile con il principio di relatività. Chiameremo *teoria della relatività* la teoria basata su questi principi⁸³.

Torniamo ai nostri due sistemi di coordinate S ed S', che considereremo equivalenti, cioè dove le lunghezze sono misurate con la stessa unità di misura e dove ciascuno dei due sistemi ha un gruppo di orologi che sono sincronizzati quando S ed S' sono in quiete l'uno rispetto all'altro. Per il principio di relatività le leggi della natura devono essere le medesime per S ed S', sia nel caso in cui essi siano in riposo relativo sia che presentino un moto traslatorio rettilineo e uniforme l'uno rispetto all'altro. È altresì essenziale che la velocità della luce nel vuoto sia espressa dallo stesso numero tanto in S quanto in S'.

Se t, x, y, z sono le coordinate rispetto a S di un evento elementare, e t', x', y', z' le coordinate rispetto a S' dello stesso evento elementare, le relazioni che legano questi due gruppi di coordinate daranno luogo al seguente sistema di equazioni di trasformazione:

$$(I) \quad \begin{cases} t' = \beta(t - v/c^2 x) \\ x' = \beta(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

$$\text{con } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Queste equazioni, introdotte per la prima volta sul piano dell'elettrodinamica da Lorentz, saranno indicate, afferma il Nostro, "come *trasformazione di Lorentz*"⁸⁴. Il fatto di aver raggiunto questo

⁸³ Ivi, p. 61.

⁸⁴ In realtà fu Poincaré, per primo, a indicare tale gruppo come equazioni di Lorentz. Per una semplice derivazione delle equazioni si veda A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Braunschweig, Vieweg 1917; trad. it. di B. Carmignani, *Relatività. Esposizione divulgativa*, Boringhieri, Torino 1967, pp. 68-70.

stesso formalismo deve essere considerato un primo importante risultato della nuova cinematica, rispetto alla teoria di Lorentz. Naturalmente, se si risolvono le equazioni rispetto a t, x, y, z , si otterranno delle equazioni della stessa forma, dove però le lettere accentate sono sostituite da lettere non accentate e dove a v si sostituisce $-v$; tutto ciò è diretta conseguenza del principio di relatività: S è, rispetto a S' , in moto con la velocità $-v$ parallelamente all'asse delle x e delle x' .

Poste le cose nei termini appena raggiunti, non resta che formulare una interpretazione fisica delle nuove equazioni di trasformazione.

8. Conseguenze fisiche

Per prima cosa, consideriamo un corpo, ad esempio la nostra sbarra di ferro AB di cui ci siamo in precedenza serviti, legata al sistema S' . Le coordinate di due punti della sbarra saranno x_1, y_1, z_1 , e x_2, y_2, z_2 . Ebbene, a ogni istante t del sistema S , tra queste coordinate avremo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x_2 - x_1 &= \sqrt{1 - v^2 / c^2} (x'_2 - x'_1) \\y_2 - y_1 &= y'_2 - y'_1 \\z_2 - z_1 &= z'_2 - z'_1\end{aligned}$$

Che cosa possiamo dedurre da queste equazioni? Per dirla con lo stesso Einstein, che “la configurazione cinematica di un corpo animato da una traslazione uniforme rispetto a un sistema di assi dipende dalla velocità v di traslazione. Inoltre, la configurazione cinematica non differisce dalla configurazione geometrica che per un

accorciamento nel rapporto $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ”⁸⁵. Si tratta, come è agevole

capire, della nota contrazione longitudinale delle lunghezze, che Lorentz e Fitzgerald formularono indipendentemente al fine di spiegare l'esito negativo dell'esperienza condotta da Michelson e Morley. Orbene, questa ipotesi si presenta ora come una legittima

⁸⁵ Ivi, p. 69.

conseguenza immediata dei principi fondamentali ammessi, ed è tale da ridimensionare drasticamente la nozione elementare di spazio, che ciascuno di noi si costruisce quasi inconsapevolmente. Le dimensioni spaziali vengono a dipendere direttamente dal sistema di riferimento scelto per la loro misura, non possono più essere affermate come qualcosa di assoluto.

In secondo luogo, sia H' un orologio in stato di riposo all'origine del nostro sistema S' . Immaginiamo che questo orologio abbia una caratteristica particolare rispetto a un qualsiasi altro orologio che utilizziamo per determinare il tempo fisico nei sistemi di coordinate S ed S' : la caratteristica di andare p_0 volte più veloce degli altri pendoli. Sicché, quando confronteremo i due orologi in stato di riposo relativo, l'orologio H' indicherà p_0 periodi quando l'altro orologio, il secondo, dà l'unità di tempo. Ora chiediamoci: quanti periodi indicherà H' nell'unità di tempo, se lo si considera non dal sistema S' ma dal sistema S ?

H' segnerà la fine di un periodo ai tempi:

$$t'_1 = \frac{1}{p_0}, \quad t'_2 = \frac{2}{p_0}, \quad t'_3 = \frac{3}{p_0}, \quad \dots \quad t'_n = \frac{n}{p_0}.$$

Dal momento che vogliamo determinare il tempo rispetto a S , la prima delle nuove equazioni di trasformazione (I) si scriverà:

$$t = \beta \left(t' - \frac{v}{c^2} x' \right),$$

e visto che H' resta all'origine di S' , avremo costantemente

$$x' = 0$$

da cui otterremo

$$t_n = \beta t'_n = \frac{\beta}{p_0}.$$

Visto dal sistema S , l'orologio H' indica perciò $p = \frac{p_0}{\beta} = p_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

periodi durante l'unità di tempo. Detto in altri termini, "un orologio animato da un moto uniforme di velocità v rispetto a un sistema

di riferimento va, osservato da questo sistema, 1: $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ meno ve-

loce di uno stesso orologio in riposo rispetto al sistema”⁸⁶. Siamo così di fronte alla seconda conseguenza, quella per certi aspetti più sconcertante, della nuova cinematica: la dilatazione del tempo e la conseguente dislocazione delle simultaneità, a seconda del sistema di riferimento dal quale viene considerato un evento elementare. Non solo, dunque, cade la nozione di spazio assoluto, ma la stessa nozione di tempo perde il suo carattere di unicità e assolutezza, così cara al senso comune, per diventare anch’essa semplicemente relativa al sistema di riferimento scelto.

In terzo luogo, consideriamo le equazioni del moto di un punto animato da moto rettilineo uniforme di velocità u , rispetto al sistema di riferimento S' . Si tratta delle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}x' &= u'_x t' \\y' &= u'_y t' \\z' &= u'_z t' .\end{aligned}$$

Attraverso le nostre nuove equazioni di trasformazione, possiamo sostituire x' , y' , z' , t' con il loro valore in funzione di x , y , z , t : otterremo x , y , z , in funzione di t e, di conseguenza, le componenti u_x , u_y , u_z della velocità u del nostro punto rispetto al sistema S . Questa operazione ci mette in grado di poter esprimere nella sua forma più generale il nuovo teorema di addizione delle velocità. In effetti, nel caso in cui la velocità u' ha la medesima direzione della velocità v' della traslazione di S' rispetto a S , troveremo:

$$u = \frac{v - u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}} .$$

Il nuovo teorema di addizione delle velocità ci dà l’opportunità di compiere due interessanti osservazioni. La prima è che con la composizione di due velocità entrambe inferiori a c , cioè la velocità della luce nel vuoto, come risultante della composizione avremo sem-

⁸⁶ Ivi, pp. 71-73.

pre una velocità inferiore a c . Infatti, se $v = c - \lambda$, $u = c - \mu$, dove λ e μ sono positivi e inferiori a c , avremo

$$u = c \frac{2c - \lambda - \mu}{2c - \lambda - \mu + \frac{\lambda\mu}{c}} < c.$$

Ciò significa che se si compone la velocità della luce c con un'altra velocità inferiore a c , otterremo sempre la velocità della luce.

La seconda osservazione è che non c'è alcun mezzo che possa essere in grado di inviare dei segnali che vanno a una velocità superiore a quella della luce. Torniamo per l'ultima volta a considerare la nostra sbarra di ferro animata da un moto rettilineo e uniforme lungo l'asse delle ascisse del sistema S , dunque con velocità $-v$ ($|v| < c$). Attraverso la sbarra, possiamo agevolmente inviare dei segnali che si propagheranno con la velocità u' rispetto alla sbarra stessa. Al punto $x = 0$ delle ascisse è collocato un osservatore A , al punto $x = x_1$ dello stesso asse è collocato un osservatore B . Entrambi gli osservatori sono in riposo sul sistema S . Ora, se attraverso la sbarra l'osservatore A invia un segnale all'osservatore B , questo segnale

verrà trasmesso con la velocità $\frac{v - u'}{1 - \frac{vu'}{c^2}}$ rispetto ai due osservatori.

Il tempo di trasmissione del segnale sarà quindi $T = x_1 \frac{1 - \frac{vu'}{c^2}}{v - u'}$, sic-

ché v può assumere ogni valore inferiore a c . Supponendo $u' > c$ avremo sempre la possibilità di scegliere v in modo tale che T sia negativo. Orbene, commenta Einstein, "dovrebbe esistere un fenomeno di trasmissione tale che il segnale giungerebbe alla meta prima di essere stato spedito: l'effetto precederebbe la causa. Sebbene questo risultato non sia logicamente inammissibile, esso contraddice troppo tutte le nostre conoscenze sperimentali perché non consideriamo come dimostrata l'impossibilità di avere $u' > c$ "⁸⁷.

Qui si esaurisce la trattazione cinematica, quella che il giovane Albert indicava come interessante da scandagliare all'amico Habicht, nella quarta memoria del 1905; ma, come sappiamo, essa

⁸⁷ Ivi, p. 77.

è dedicata all'elettrodinamica dei corpi in moto, versante al quale Einstein dedica la seconda parte di questo lavoro. In tale ambito, il Nostro assume anzitutto che le equazioni dell'elettrodinamica, operando con le leggi di trasformazione di Lorentz, sono valide nella stessa forma in due diversi e distinti sistemi inerziali. Si giunge così a stabilire le leggi di trasformazione per le componenti del campo elettrico e magnetico. Che la fase delle onde elettromagnetiche sia invariante attraverso le trasformazioni di Lorentz impone poi una correzione delle formule dell'effetto Doppler⁸⁸ e la considerazione dell'aberrazione⁸⁹. Nell'ultimo paragrafo, Einstein dedica l'attenzione alla dinamica di una particella carica, identificata con l'elettrone, giungendo a esprimere correttamente la formula dell'energia cinetica di un punto materiale di massa m .

9. Massa ed energia

La brevissima quinta memoria del 1905 è intitolata *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (*L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*). Sulla base del principio di relatività, delle equazioni di Maxwell e Hertz per lo spazio vuoto legate all'espressione maxwelliana per l'energia elettromagnetica dello spazio, il fisico tedesco rende esplicita una conseguenza già presente nella teoria della relatività ristretta, ossia che "la massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia"⁹⁰, la cui espressione matematica $E = mc^2$ è nota universalmente come "equazione di Einstein". Per avere una visione sufficientemente chiara del percorso che conduce al riconoscimento di questo risultato tanto fondamentale quanto tristemente famoso, perché associato

⁸⁸ Il fenomeno, che prende il nome dal fisico austriaco C.J. Doppler, è presente tanto in acustica quanto in ottica. Si tratta del fatto che una fonte luminosa o sonora nell'avvicinarsi a un osservatore in quiete presenta una frequenza più alta rispetto a quando la stessa fonte si allontana. Nel caso della luce, cioè di un fascio di raggi luminosi, se la fonte si allontana dall'osservatore si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il rosso; se la fonte si avvicina all'osservatore, si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il blu.

⁸⁹ Si tratta dell'apparente spostamento degli astri rispetto alle loro posizioni reali. Questo spostamento apparente è dovuto al ritardo con il quale l'osservatore percepisce la luce proveniente dagli astri medesimi. Il moto di un astro, come è rilevato dall'osservatore, risulta infatti della composizione dei movimenti della Terra e dell'astro e dipende dalla velocità della luce.

⁹⁰ A. Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, in "Annalen der Physik" (4) 18, 1905; trad. it. di E. Ioli, *L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*, in Stachel, *op. cit.*, p. 174.

agli eventi tremendi che ne determinarono la conferma sperimentale (ci riferiamo alle esplosioni nucleari che posero fine alla Seconda guerra mondiale) sono necessarie alcune considerazioni preliminari. Prima della formulazione della teoria della relatività, i fisici erano abituati a lavorare e a pensare, tra gli altri, con due fondamentali principi: il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione della massa, considerati completamente indipendenti l'uno dall'altro. Dopo la memoria del 1905, che abbiamo ripercorso nei suoi aspetti fondamentali, le cose non stanno più in quei termini: d'ora in avanti i due fondamentali principi di conservazione devono essere considerati come riuniti in un unico solidissimo principio.

Alla luce delle premesse sopra esposte consideriamo un corpo che si muove con velocità v e supponiamo che assorba, in quanto investito da una radiazione, una quantità di energia E_0 che tuttavia non ne altera la velocità. Ne consegue che il corpo in oggetto subisce un incremento della propria energia pari a

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

E_0 , naturalmente, rappresenta l'energia acquisita valutata da un sistema di coordinate di riferimento che si muove con il corpo stesso. Tenuto conto che l'energia cinetica, dopo la teoria della relatività

ristretta, non è più data dalla nota formula $\frac{1}{2}mv^2$, ma da $\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,

allora l'energia del nostro corpo sarà:

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ne consegue: in primo luogo, che il corpo in oggetto ha, possiamo dire, la stessa energia di un corpo di massa $m + E_0/c^2$ che si muove con

una velocità v ; in secondo luogo, che un corpo che assorbe una certa quantità di energia E_0 accresce la sua massa inerziale della quantità E_0/c^2 , sicché la massa inerziale non è una costante di un corpo, ma varia in relazione ai mutamenti energetici del corpo stesso; infine, la massa inerziale di un sistema di corpi può esser considerata come una misura dell'energia del sistema, sicché il principio di conservazione della massa di un sistema viene a identificarsi con il principio di conservazione dell'energia, e resta valido finché il sistema non riceve né emette energia. Quest'ultima deduzione apparirà più chiara se la formula che ci dà l'energia viene espressa come di seguito:

$$E = \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Non è difficile verificare che mc^2 non è altro che l'energia posseduta dal corpo considerato da un sistema di coordinate di riferimento che si muove con il corpo medesimo, prima che esso assorba l'energia E_0 .

ANNUS MIRABILIS

1. L'annuncio di una rivoluzione

L'espressione latina *annus mirabilis*⁴⁹ è stata spesso usata per indicare il 1666, anno nel corso del quale Isaac Newton consegnò le basi delle teorie fisiche e matematiche che rivoluzionarono la scienza del suo tempo e condizioneranno, con il calcolo infinitesimale, la teoria dei colori e la teoria della gravitazione, lo sviluppo della conoscenza scientifica fino al Novecento. Originariamente, tuttavia, l'espressione non aveva il benché minimo riferimento all'opera e alla figura del grande scienziato inglese. Si trattava di ben altra cosa! Precisamente e, se vogliamo, semplicemente, l'espressione era tratta dal titolo di un capolavoro con il quale il famoso poeta inglese John Dryden celebrava la vittoria della flotta navale di Sua Maestà britannica sugli olandesi, nonché la sopravvivenza di Londra al grande incendio. Il titolo completo della composizione poetica è infatti *Annus Mirabilis: The Years of Wonders, 1666*. Recentemente, la stessa espressione è stata utilizzata nei riguardi della produzione scientifica elaborata e ultimata da Einstein nel corso del 1905, un parallelismo felicemente colto, potremmo dire, dal momento che, come avremo modo di accertare, proprio in questo anno il ventiseienne fisico tedesco non solo porta a piena realizzazione l'opera newtoniana, ma pone altresì le basi per una rivoluzione che, a partire da quella data, percorrerà tutto il XX secolo per prolungarsi fino ai nostri giorni.

Del resto, lo stesso giovane diplomato e, da poco tempo, coniugato, era ben consapevole dell'importanza dei lavori che aveva portato e che era in procinto di portare a termine, come stanno a testimoniare due missive del periodo, inviate all'amico "accademico"

⁴⁹ Cfr. J. Stachel (a cura di), *Einstein's Miraculous Years. Five Papers that Changed the Face of Physics*, Princeton University Press, Princeton 1998; trad. it. di E. Ioli, *L'anno memorabile di Einstein. I cinque scritti che hanno rivoluzionato la fisica del Novecento*, Edizioni Dedalo, Bologna 2005, p. 21.

Conrad Habicht. Nella prima lettera, presumibilmente scritta tra il 18 e il 26 marzo del 1905, si legge:

Le prometto quattro articoli (...) il primo dei quali potrei inviarLe a breve, visto che riceverò prontamente le copie omaggio. Si occupa della radiazione e delle proprietà energetiche della luce, ed è molto rivoluzionario, come vedrà (...) Il secondo lavoro è una determinazione delle reali dimensioni degli atomi stabilite a partire dalla diffusione e dalla viscosità di soluzioni diluite di sostanze neutre. Il terzo dimostra che, assumendo la validità della teoria molecolare del calore, particelle in sospensione nei liquidi, dell'ordine di grandezza di 1/1000 di mm, devono già compiere un movimento disordinato osservabile, prodotto dall'agitazione termica; i fisiologi hanno infatti osservato i movimenti di piccoli corpi inanimati in sospensione, che sono stati da loro chiamati "moto molecolare browniano". Il quarto lavoro è attualmente soltanto un abbozzo, e tratta di un'elettrodinamica dei corpi in moto che utilizza una modifica della teoria dello spazio e del tempo; la parte puramente cinematica di questo lavoro la interesserà di sicuro⁵⁰.

Nella seconda lettera, presumibilmente scritta tra il 30 giugno e il 22 settembre del 1905, Einstein afferma:

Mi è venuta in mente un'ulteriore conseguenza del lavoro sull'elettrodinamica. Il principio di relatività, unito alle equazioni di Maxwell, prescrive che la massa di un corpo sia una misura diretta dell'energia contenuta in un corpo; la luce porta cioè con sé una massa. Nel caso del radio, dovrebbe aversi una sensibile diminuzione di massa. L'argomento è buffo e seducente, ma per quanto ne so, il Signore potrebbe riderci sopra e menarmi per il naso⁵¹.

Si tratta – nell'ordine con il quale lo stesso fisico tedesco ne dà notizia, e che peraltro corrisponde, fatta eccezione per il secondo lavoro, all'ordine cronologico di pubblicazione negli "Annalen der Physik" – delle seguenti memorie, che ci accingiamo ad analizzare facendo il più possibile riferimento al dettato del loro stesso autore.

⁵⁰ A. Einstein a C. Habicht, 18 maggio o 25 maggio 1905, in A. Einstein, *The Collected Papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, Princeton, vol. 5, 1993, p. 31.

⁵¹ A. Einstein a C. Habicht, 30 giugno-22 settembre 1905, in *ivi*, p. 33.

2. I quanti di luce

Il primo lavoro del 1905 reca il titolo *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (*Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce*). Sarà proprio questo scritto, composto da una iniziale parte introduttiva e da nove brevi paragrafi, a ottenere il più alto riconoscimento da parte del mondo scientifico: il premio Nobel per la fisica per l'anno 1921.

La memoria prende avvio ponendo e richiamando l'attenzione su "una profonda differenza formale"⁵² tra i concetti con i quali i fisici trattano i gas e gli altri corpi ponderabili e i concetti espressi con la teoria elettromagnetica di Maxwell, che riguarda appunto i fenomeni di questo tipo nello spazio vuoto. Se, nel primo caso, lo stato di un corpo è determinato, lo si ritiene tale, dalla posizione e dalla velocità di un numero grandissimo, ma comunque finito, di atomi ed elettroni; nel secondo caso, per determinare lo stato elettromagnetico di un volume di spazio, si fa uso di funzioni spaziali continue, perché un numero finito di grandezze non ci consentirebbe di definire in modo compiuto lo stato considerato. Detto in altri termini, "secondo la teoria di Maxwell, in tutti i fenomeni puramente elettromagnetici, quindi anche nel caso della luce, l'energia deve essere considerata una funzione spaziale continua, mentre, secondo l'attuale concezione dei fisici, l'energia di un corpo ponderabile dovrebbe essere rappresentata da una somma estesa agli atomi e agli elettroni. L'energia di un corpo ponderabile non può essere suddivisa in parti arbitrariamente piccole, ma secondo la teoria di Maxwell (o, più in generale, secondo ogni teoria ondulatoria) l'energia di un raggio luminoso emesso da una sorgente puntiforme si distribuisce in modo continuo su un volume sempre più grande"⁵³.

Ora, continua Einstein dimostrando la cautela e l'equilibrio propri di chi è ben consapevole di essere sull'orlo di una svolta davvero "rivoluzionaria", su un fatto non vi è alcun dubbio: "La teoria ondulatoria della luce, che fa uso di funzioni spaziali continue, si è di-

⁵² A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, in "Annalen der Physik" (4) 17, 1905, trad. it. di E. Ioli, *Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce*, in Stachel, *op. cit.*, p. 187.

⁵³ *Ibid.*

mostrata eccellente per la descrizione dei fenomeni puramente ottici e non sarà probabilmente mai sostituita da un'altra teoria"⁵⁴. Ciò detto, occorre anche aggiungere quanto segue:

Si dovrebbe tener presente, tuttavia, che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi temporali e non a valori istantanei; e a dispetto della piena conferma sperimentale della teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, è concepibile che la teoria della luce, fondata su funzioni spaziali continue, porti a contraddizioni qualora venga applicata ai fenomeni di emissione e trasformazione della luce⁵⁵.

Dopo aver confermato la validità della teoria ondulatoria della luce, Einstein pone dunque sul tappeto del tavolo da gioco l'eventualità che questa stessa teoria non sia esente, in talune circostanze, da vere e proprie "contraddizioni". Ciò non significa, si badi, confutare, e dunque abbandonare il modello esplicativo ondulatorio, bensì ipotizzare, nel caso eccezionale del fenomeno elettromagnetico, una spiegazione altrettanto soddisfacente per quei fenomeni, come la radiazione di corpo nero, la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici mediante luce ultravioletta, che lo pongono in difficoltà, mentre appaiono del tutto comprensibili quando si assume una distribuzione spaziale non continua dell'energia luminosa. L'ipotesi che viene avanzata è allora la seguente:

Quando un raggio luminoso si propaga partendo da una sorgente puntiforme, l'energia non si distribuisce con continuità su volumi di spazi via via crescenti, bensì consiste in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti di spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti o generati solo come unità intere⁵⁶.

Non è dunque un caso che il primo paragrafo di questa memoria "rivoluzionaria" sia dedicato a Planck e, per essere precisi, a una "difficoltà" che riguarderebbe la teoria da lui espressa circa la radiazione di corpo nero. Per mettere in evidenza questa "difficoltà", Einstein fa diretto riferimento a una formula particolarmente importante, quella che mette in relazione ρ , che è la funzione incognita, con l'energia media di un oscillatore. Questa formula aveva avu-

⁵⁴ Ivi, pp. 187-188.

⁵⁵ Ivi, p. 188.

⁵⁶ *Ibid.*

to un ruolo di primo piano nell'elaborazione di Planck, eccola:

$$\bar{E} = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} c.$$

Gli oscillatori hanno un solo grado di libertà, sicché alla luce del teorema di equipartizione dell'energia, che ci è noto, l'energia cinetica di questi oscillatori sarà

$$\frac{1}{2} \kappa T.$$

Ma l'energia potenziale media di un oscillatore lineare è uguale all'energia cinetica media; avremo così

$$\bar{E} = \kappa T, \quad \text{quindi} \quad \rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \kappa T.$$

Il risultato raggiunto non è altro che la nota formula di Rayleigh-Jeans. Orbene, la “difficoltà” annunciata sta tutta in questa formula. Secondo il fisico tedesco, queste “relazioni, che sono state trovate come condizioni di equilibrio dinamico, non soltanto non sono confermate dall'esperienza, ma implicano per di più che, nel nostro modello, una ripartizione precisa dell'energia fra etere e materia è fuori discussione”⁵⁷. Il fatto che non vi sia conferma sul piano sperimentale è già un elemento che certo, si converrà, non gioca a favore; ma c'è dell'altro: più è ampio il dominio dei risonatori, maggiore è l'energia totale di radiazione del volume di spazio sicché, con il modello adottato, l'integrale darebbe come risultato ∞ . Detto in altri termini, l'energia totale emessa da un corpo a qualsiasi temperatura dovrebbe essere infinita⁵⁸, dal momento che l'energia emessa in un dato intervallo di frequenza cresce indefinitamente all'aumentare della frequenza stessa; per questo, una precisa ripartizione, come dice il Nostro, “è fuori discussione”.

Il passo ulteriore che Einstein intende compiere (al paragrafo secondo), è quello che consiste nel mostrare che la determinazione del quanto elementare quale è stata offerta da Planck si rivela, in una certa misura, indipendente dalla teoria planckiana della radia-

⁵⁷ Ivi, p. 191.

⁵⁸ Cfr. *ibid.*

zione di corpo nero. In effetti, la formula di Rayleigh-Jeans può essere considerata come il caso limite di quella di Planck, ovvero per onde lunghe e alta densità di radiazione, insomma per valori elevati

di $\frac{T}{v}$. Naturalmente, in tal caso, la formula viene a incontrare quel-

la di Planck, che è correttamente aderente ai fatti, confermando così la validità della meccanica classica. Ma la questione qui è un'altra: la meccanica classica, infatti, cade in fallo allorché si registrano

bassi valori di $\frac{T}{v}$! Così, converrà considerare la radiazione di corpo

nero unita ai dati sperimentali senza alcun modello presupposto per l'emissione e la propagazione della radiazione. I successivi quattro paragrafi, dedicati appunto alla radiazione termica per bassi valori, saranno sviluppati, in parte, sulla base di una teoria generale valida, quella della termodinamica, per il resto, facendo riferimento a conoscenze empiriche sulla radiazione. Ci si potrebbe giustamente chiedere perché Einstein adotti proprio la termodinamica come teoria generale affidabile. La ragione è degna di nota. Poiché si prende in considerazione una regione ristretta e ben identificata,

quella appunto dove per $\frac{T}{v}$ si hanno bassi valori, conviene conside-

rare una formula espressa da Wien, che già abbiamo avuto modo di incontrare:

$$\rho = \alpha v^3 e^{-\beta v/T}$$

Ma Wien ci ha anche insegnato che la radiazione esercita una pressione su una parete che si ponga come ostacolo al suo percorso. Attraverso questa formula, Einstein può dimostrare il teorema per cui la radiazione termica v descritta da Wien, dal punto di vista termodinamico si comporta come se fosse composta di punti materiali di energia $h\nu$, ossia come se fosse composta di quanti di energia.

Poste le cose in questi termini, il fisico tedesco può avviarsi verso la conclusione della questione esaminata e sviluppare il suo "punto di vista euristico" nei riguardi della emissione e della trasformazione della luce, uno sviluppo che si sofferma anzitutto sulla regola di G.G. Stokes; in secondo luogo sulla generazione dei raggi catodici mediante illuminazione di corpi solidi, dove si offre una originale

spiegazione dell'effetto fotoelettrico; infine sulla ionizzazione dei gas mediante luce ultravioletta.

a) La regola di Stokes

Orbene, assumiamo che una luce monocromatica possa essere trasformata in luce di diversa frequenza attraverso fotoluminescenza, fenomeno per il quale certe sostanze, una volta sottoposte a illuminazione, riescono a emettere una luce propria diversa dalla luce che le colpisce. Si assuma anche che tanto la luce incidente quanto la luce

emessa siano costituite da quanti di energia di grandezza $\frac{R}{N}\beta\nu$, do-

ve ν è la frequenza corrispondente. La trasformazione in oggetto, secondo l'interpretazione di Einstein, sarebbe dovuta al fatto che ogni quanto di energia incidente di frequenza ν_1 viene assorbito e genera per se stesso un quanto di luce di frequenza ν_2 . L'assorbimento può, al contempo, originare l'emissione di quanti di luce di frequenza ν_3, ν_4 , eccetera, ma anche di energia di natura diversa, ad esempio calore. È opportuno precisare, dice il fisico tedesco, che “non ha alcuna importanza quali siano i processi intermedi che determinano questo risultato finale. Se la sostanza fotoluminescente non si può considerare una sorgente stabile di energia, allora, in base al principio di conservazione dell'energia, l'energia di un quanto emesso non può essere maggiore di quella del quanto di luce che l'ha prodotto”⁵⁹. Di conseguenza, otteniamo

$$\frac{R}{N}\beta\nu_2 \leq \frac{R}{N}\nu_1 \quad \text{ovvero } \nu_2 \leq \nu_1, \text{ cioè la nota formula di Stokes.}$$

L'interpretazione esposta richiede almeno due considerazioni. La prima considerazione è che “se l'illuminazione è debole, allora la quantità di luce emessa deve essere proporzionale all'intensità della luce incidente, poiché ogni quanto di energia incidente determinerà un processo elementare del tipo descritto sopra, indipendentemente dagli altri quanti di energia incidente. In particolare, per l'intensità della luce incidente non vi sarà limite inferiore al di sotto del quale la luce non sarebbe in grado di eccitare l'azione fluorescente⁶⁰”. La seconda considerazione è rivolta ai casi di deviazione

⁵⁹ Ivi, p. 201.

⁶⁰ Ivi, p. 200.

concepibili attraverso l'interpretazione esposta. Sono previsti due casi: un primo caso, quando il numero di quanti di energia per unità di volume che sono oggetto della trasformazione è così grande che un quanto di energia della luce emessa può ricevere la sua energia da diversi quanti di luce incidente; un secondo caso, quando la luce, incidente o emessa, non presenta la stessa distribuzione di energia di una radiazione di corpo nero nel dominio di validità della legge di Wien.

b) In merito alla generazione di raggi catodici attraverso l'illuminazione dei corpi solidi

Prima di affrontare la spiegazione einsteiniana, è opportuno prender atto di alcuni dati. La natura dell'effetto fotoelettrico, in realtà, era stata già dimostrata sin dal 1899. Nei primi mesi del 1888 il fisico italiano Augusto Righi fu colpito da un fatto davvero rivelatore: una lastra di materiale conduttore, investita da un raggio di luce ultravioletta, si caricava di elettricità positiva. Lo scienziato chiamò fotoelettrico questo fenomeno, e inizialmente ipotizzò che si trattasse di un semplice trasporto di elettricità operato dalla luce ultravioletta ma, dopo qualche tempo, contemporaneamente e indipendentemente da un altro ricercatore, W. Hallwachs, precisò che non di trasporto si trattava, bensì di produzione vera e propria di elettricità. Detto in altri termini, agendo sui metalli, la radiazione li elettrizza positivamente. L'interpretazione di Righi era la seguente: la radiazione ultravioletta stacca la molecola di aria a contatto col metallo; nel distacco, la carica positiva resta sul metallo mentre la carica negativa, rimasta sulla molecola, se ne va con questa seguendo le linee di forza del campo. Due risultati sembravano confortare questa interpretazione. Anzitutto, come rilevato anche da J. Elster e H. Geitel, oltre che dallo stesso Righi, un flusso di elettricità negativa abbandona l'elettrodo illuminato di luce ultravioletta. In secondo luogo, incoraggiato dal successo ottenuto con la ricerca sui raggi catodici, raggi X, J.J. Thomson rivolse l'attenzione al suddetto flusso. In base al procedimento seguito per i raggi catodici, posto che la corrente elettrica manifestata nel fenomeno fotoelettrico fosse costituita da particelle in moto, negativamente cariche, dal punto di vista teorico si sarebbe potuto stabilire il moto di una singola particella sottoposta all'azione del campo elettrico e di quello magnetico. In caso di verifica sperimentale si sarebbe potuto anche calcolare il rapporto e/m , quello cioè tra la carica e la massa di questa

particella. L'ipotesi fu in effetti confermata sul piano sperimentale, e anche i valori del rapporto tra elettrone e massa sembravano allinearsi. La conclusione di Thomson era semplice: i portatori di elettricità negativa sono della stessa natura di quelli che portano elettricità nel caso dei raggi catodici, insomma, sono elettroni. Potremmo dire che, curiosamente, il fenomeno fotoelettrico si manifestava come inverso rispetto a quello della produzione dei raggi X; così, se l'urto degli elettroni contro la materia produce una radiazione, l'urto di una radiazione contro la materia produce elettroni. Nel 1902 il fisico tedesco P. Lenard dimostrò sperimentalmente che la velocità di emissione degli elettroni non dipende affatto dall'intensità della luce incidente, ma soltanto dalla frequenza: la velocità di emissione cresce con la frequenza mentre con l'intensità di luce incidente cresce solo il numero degli elettroni. Peraltro, il fenomeno si verifica quando la radiazione incidente ha una frequenza che supera un certo limite, che varia con la natura del corpo investito dalla radiazione.

Orbene, in base alla teoria ondulatoria della luce, per la quale l'energia raggiante deve essere considerata come distribuita uniformemente nell'onda luminosa, tutti questi fatti restavano senza una spiegazione valida o comunque accettabile. In effetti, per il principio di conservazione dell'energia, nell'effetto fotoelettrico una parte di energia raggiante si trasforma in energia cinetica degli elettroni espulsi sicché, se la radiazione incidente è più ricca di energia, anche gli elettroni espulsi dovrebbero manifestare un surplus energetico. Perché mai, infine, l'energia assorbita dagli elettroni dovrebbe dipendere dalla frequenza?

Quello appena descritto era il quadro problematico che si presentava agli occhi del ventiseienne Einstein che, sulla scorta della sua tesi principale, afferma:

Secondo la concezione che vuole la luce incidente costituita da quanti di energia $\left(\frac{R}{N}\right)\beta\nu$, la produzione di raggi catodici da parte della luce può essere interpretata nel seguente modo. I quanti di energia penetrano lo strato superficiale del corpo, e la loro energia si trasforma, almeno in parte, in energia cinetica. L'interpretazione più semplice è che un quanto di luce trasferisca tutta la sua energia a un singolo elettrone; assumeremo che ciò possa accadere, senza tuttavia escludere la possibilità che alcuni

elettroni assorbono solo in parte l'energia dei quanti di luce. Un elettrone interno a un corpo e dotato di energia cinetica, una volta raggiunta la superficie avrà perso parte di tale energia. Inoltre, assumeremo che, per abbandonare il corpo, ogni elettrone debba compiere un certo lavoro P^{61} .

Gli elettroni che lasciano il corpo a velocità massima saranno dunque gli elettroni di superficie emessi normalmente a essa. L'energia cinetica di tali elettroni sarà:

$$\frac{R}{N}\beta v - P.$$

Posto che il corpo sia carico e al potenziale positivo Π , che sia circondato da conduttori a potenziale nullo, infine, che Π impedisca la perdita di elettricità da parte del corpo, avremo

$$\Pi e = \frac{R}{N}\beta v - P, \text{ dove } e \text{ è la carica dell'elettrone, ovvero}$$

$$\Pi E = R\beta v - P', \text{ dove } E \text{ è la carica di un grammoequivalente di}$$

uno ione monovalente e P' il potenziale di questa quantità di elettricità negativa rispetto al corpo.

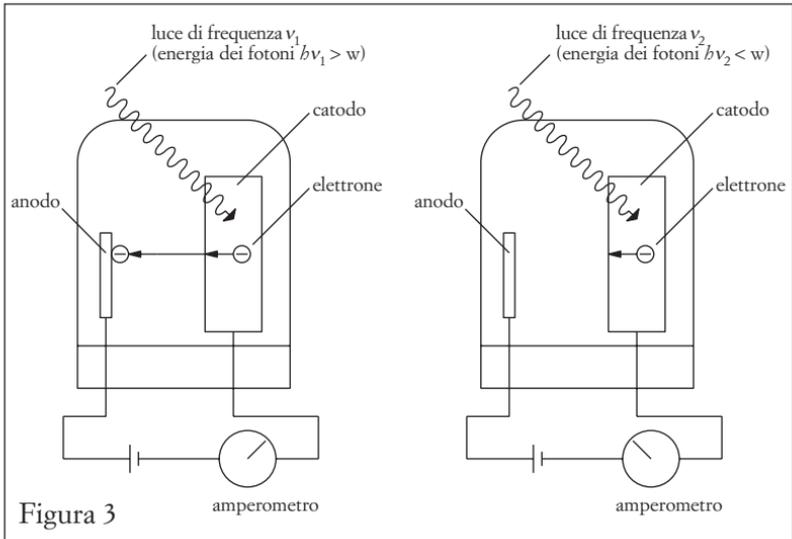
Il Nostro conclude in questi termini:

Questa concezione dell'effetto fotoelettrico non contraddice le sue proprietà osservate da Lenard. Se ogni quanto di energia della luce incidente, indipendentemente da tutti gli altri, trasferisce la propria energia agli elettroni, allora la distribuzione della velocità degli elettroni, cioè la qualità dei raggi catodici prodotti, sarà indipendente dall'intensità della luce incidente; d'altra parte, il numero di elettroni che abbandonano il corpo sarà, in circostanze altrimenti identiche, proporzionale all'intensità della luce incidente⁶².

Ai quanti di luce, nel 1923, Compton impose il nome di *fotoni*. Il fenomeno fotoelettrico può così essere rappresentato come in figura 3. La radiazione luminosa con frequenza ν è composta di fotoni di energia $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck. Affinché possa strappare un elettrone superficiale al metallo, l'energia del fotone

⁶¹ Ivi, pp. 202-203.

⁶² Ivi, p. 204.



deve essere maggiore di quella, W , che lega l'elettrone al metallo stesso; in tal caso, l'amperometro ci rivelerà un passaggio di corrente, come risulta dalla prima sequenza della figura. Se, al contrario, è l'energia del fotone a essere minore di W , non avremo effetto fotoelettrico e il nostro amperometro non rileverà, come nella seconda sequenza della figura, alcun passaggio di corrente.

c) Ionizzazione dei gas mediante luce ultravioletta

Come è noto, gli ioni sono atomi elettrizzati che nel loro moto trasportano la carica elettrica. L'assunto di partenza di Einstein è che nel caso specifico, ossia nella ionizzazione di un gas mediante luce ultravioletta, ciascun quanto di energia luminosa viene utilizzato per ionizzare un'unica molecola di gas. Posto ciò, ne consegue che il lavoro necessario per ionizzare una molecola di gas non può essere maggiore dell'energia del quanto di luce assorbito, capace di produrre questo effetto. Così, se J rappresenta l'energia teorica di ionizzazione avremo la relazione:

$$R\beta \nu \geq J$$

La seconda conseguenza rilevante, da sottoporre a controllo sperimentale, è che se ogni quanto di energia luminosa assorbito ionizza

una molecola, allora deve sussistere una precisa relazione tra la quantità di luce assorbita (L) e il numero di grammolecole di gas ionizzato (j). Si tratta della seguente relazione:

$$j = \frac{L}{R\beta v}.$$

3. La misura dell'atomo

Il secondo lavoro del 1905 annunciato nella missiva all'amico Habicht reca il titolo *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Una nuova determinazione delle dimensioni molecolari). Si tratta della dissertazione di dottorato che, completata il 30 aprile 1905 fu presentata all'Università di Zurigo il 20 luglio dello stesso anno. Poco dopo l'accettazione da parte dell'università, agli "Annalen der Physik" fu inviata, il 19 agosto, una versione leggermente diversa della stessa per la pubblicazione. Sul momento preciso in cui Einstein iniziò a lavorare alla dissertazione le notizie di cui disponiamo sono quasi nulle. Sappiamo che nel marzo del 1903 alcune idee portanti di questo lavoro erano già state elaborate; non c'è dubbio alcuno che l'argomento sia stato scelto dal candidato e che, rispetto alle altre problematiche di cui Albert si occupava, il metodo idrodinamico escogitato per la determinazione delle molecole era un argomento molto adatto e in sintonia con l'ambiente accademico di Zurigo, dove prevaleva in termini schiacciati l'orientamento di fisica sperimentale.

In effetti, come anticipavamo, rispetto al tentativo precedentemente abortito tre anni prima, in questa dissertazione il fisico tedesco mette insieme le tecniche dell'idrodinamica classica con le tecniche della teoria della diffusione con uno scopo ben preciso: dar vita a un nuovo metodo per determinare le dimensioni delle molecole e del numero di Avogadro: un metodo che il Nostro applicò a molecole di zucchero (il soluto) in soluzione. Naturalmente, a quel tempo si disponeva già di metodi atti alla determinazione delle dimensioni molecolari, benché sia doveroso precisare che, se da un lato la stima dei limiti superiori, quelli più vicini ai nostri strumenti, era dominio di studio ormai consolidato, dall'altro, i metodi più affidabili si affermeranno solo nella seconda metà dell'Ottocento assumendo come punto di riferimento specifico la teoria cinetica dei gas. Alla fine del secolo, la maggior parte dei metodi operativi e in

una molecola, allora deve sussistere una precisa relazione tra la quantità di luce assorbita (L) e il numero di grammolecole di gas ionizzato (j). Si tratta della seguente relazione:

$$j = \frac{L}{R\beta v}.$$

3. La misura dell'atomo

Il secondo lavoro del 1905 annunciato nella missiva all'amico Habicht reca il titolo *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Una nuova determinazione delle dimensioni molecolari). Si tratta della dissertazione di dottorato che, completata il 30 aprile 1905 fu presentata all'Università di Zurigo il 20 luglio dello stesso anno. Poco dopo l'accettazione da parte dell'università, agli "Annalen der Physik" fu inviata, il 19 agosto, una versione leggermente diversa della stessa per la pubblicazione. Sul momento preciso in cui Einstein iniziò a lavorare alla dissertazione le notizie di cui disponiamo sono quasi nulle. Sappiamo che nel marzo del 1903 alcune idee portanti di questo lavoro erano già state elaborate; non c'è dubbio alcuno che l'argomento sia stato scelto dal candidato e che, rispetto alle altre problematiche di cui Albert si occupava, il metodo idrodinamico escogitato per la determinazione delle molecole era un argomento molto adatto e in sintonia con l'ambiente accademico di Zurigo, dove prevaleva in termini schiacciati l'orientamento di fisica sperimentale.

In effetti, come anticipavamo, rispetto al tentativo precedentemente abortito tre anni prima, in questa dissertazione il fisico tedesco mette insieme le tecniche dell'idrodinamica classica con le tecniche della teoria della diffusione con uno scopo ben preciso: dar vita a un nuovo metodo per determinare le dimensioni delle molecole e del numero di Avogadro: un metodo che il Nostro applicò a molecole di zucchero (il soluto) in soluzione. Naturalmente, a quel tempo si disponeva già di metodi atti alla determinazione delle dimensioni molecolari, benché sia doveroso precisare che, se da un lato la stima dei limiti superiori, quelli più vicini ai nostri strumenti, era dominio di studio ormai consolidato, dall'altro, i metodi più affidabili si affermeranno solo nella seconda metà dell'Ottocento assumendo come punto di riferimento specifico la teoria cinetica dei gas. Alla fine del secolo, la maggior parte dei metodi operativi e in

uso presentavano un accettabile accordo di massima sui valori, e in molti casi, il comportamento svolto dai liquidi assolve un ruolo importante anche se i risultati ottenuti risultano assai limitati sul piano della precisione.

Orbene, il metodo messo a punto da Einstein offre risultati che, proprio rispetto alla precisione, non hanno niente da invidiare a quelli ottenuti facendo leva sulla teoria cinetica dei gas. In effetti, se i metodi che pongono al loro fondamento la teoria cinetica dei gas, basati sulla capillarità, assumono implicitamente l'esistenza di forze molecolari, l'assunto iniziale del fisico tedesco è che l'idrodinamica classica può essere considerata come perfettamente idonea quando la si utilizzi per calcolare l'effetto delle molecole di soluto, rappresentate come sferette dure, sulla viscosità del solvente in una soluzione diluita. Con la sua procedura, Einstein è in grado di determinare le dimensioni molecolari di grandi molecole di soluto (zucchero) rispetto a quelle del solvente. Ma c'è di più. Con questa memoria, si risponde positivamente anche a una questione a lungo dibattuta sul piano della teoria delle soluzioni, ovvero se le molecole di solvente, nel caso del Nostro, l'acqua, sono legate alle molecole o agli ioni del soluto (lo zucchero). Come sappiamo, l'interesse principale del fisico tedesco era tuttavia ben più generale, si inquadrava nella piena consapevolezza che la precisa determinazione delle molecole avrebbe dato un forte contributo alla questione dell'esistenza dell'atomo, che culminerà con la spiegazione del moto browniano, e consentito una più accurata verifica della formula della radiazione di Planck, rispetto a quella ottenibile con misure compiute sulla radiazione stessa.

4. Sì, gli atomi esistono

La terza memoria del 1905 si intitola *Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (*Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*).

Introducendo i cinque brevi paragrafi che esauriscono questo lavoro, Einstein afferma:

In questo articolo si mostrerà che, in base alla teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi debbono compiere, in conseguenza

uso presentavano un accettabile accordo di massima sui valori, e in molti casi, il comportamento svolto dai liquidi assolve un ruolo importante anche se i risultati ottenuti risultano assai limitati sul piano della precisione.

Orbene, il metodo messo a punto da Einstein offre risultati che, proprio rispetto alla precisione, non hanno niente da invidiare a quelli ottenuti facendo leva sulla teoria cinetica dei gas. In effetti, se i metodi che pongono al loro fondamento la teoria cinetica dei gas, basati sulla capillarità, assumono implicitamente l'esistenza di forze molecolari, l'assunto iniziale del fisico tedesco è che l'idrodinamica classica può essere considerata come perfettamente idonea quando la si utilizzi per calcolare l'effetto delle molecole di soluto, rappresentate come sferette dure, sulla viscosità del solvente in una soluzione diluita. Con la sua procedura, Einstein è in grado di determinare le dimensioni molecolari di grandi molecole di soluto (zucchero) rispetto a quelle del solvente. Ma c'è di più. Con questa memoria, si risponde positivamente anche a una questione a lungo dibattuta sul piano della teoria delle soluzioni, ovvero se le molecole di solvente, nel caso del Nostro, l'acqua, sono legate alle molecole o agli ioni del soluto (lo zucchero). Come sappiamo, l'interesse principale del fisico tedesco era tuttavia ben più generale, si inquadrava nella piena consapevolezza che la precisa determinazione delle molecole avrebbe dato un forte contributo alla questione dell'esistenza dell'atomo, che culminerà con la spiegazione del moto browniano, e consentito una più accurata verifica della formula della radiazione di Planck, rispetto a quella ottenibile con misure compiute sulla radiazione stessa.

4. Sì, gli atomi esistono

La terza memoria del 1905 si intitola *Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (*Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*).

Introducendo i cinque brevi paragrafi che esauriscono questo lavoro, Einstein afferma:

In questo articolo si mostrerà che, in base alla teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi debbono compiere, in conseguenza

del moto di agitazione termica delle molecole, movimenti di ampiezza tale che li si può agevolmente osservare al microscopio⁶³.

Da ciò derivano due conclusioni, l'una particolare, l'altra, generale. La prima conclusione è relativa all'identificazione del moto che andiamo ricercando. Dice il fisico tedesco:

È possibile che i movimenti che qui discuteremo siano identici al cosiddetto "moto molecolare browniano"; tuttavia, i dati a mia disposizione riguardo a quest'ultimo sono così imprecisi che non ho potuto formarmi un'opinione in materia⁶⁴.

Il moto disordinato di particelle microscopiche sospese in un fluido era stato osservato assai prima che il botanico Robert Brown pubblicasse, nel 1828, i risultati delle sue osservazioni; tuttavia, Brown fu il primo a mettere in evidenza la persistenza, la non transitorietà di questo moto, e a escludere qualsiasi spiegazione del fenomeno che facesse ricorso a principi vitali. La seconda conclusione, generale, riguarda la validità, sul piano del fenomeno in discussione, della termodinamica classica e della teoria cinetico-molecolare del calore. In effetti,

se il moto discusso qui può essere di fatto osservato insieme alle leggi cui ci si aspetta che obbedisca, la termodinamica classica non può più essere considerata valida già per ragioni distinguibili al microscopio, e un'esatta determinazione delle reali dimensioni degli atomi diventa possibile. Viceversa, se la previsione di questo moto si dimostrasse errata, ciò fornirebbe un solido argomento contro la concezione cinetico-molecolare del calore⁶⁵.

Gli obiettivi che lo studio condotto dal ventiseienne fisico si propone di perseguire sono dunque due: il primo è quello di mettere in evidenza, di rilevare effettivamente delle fluttuazioni statistiche; il secondo consiste nel reperimento di elementi tali da rendere certa l'esistenza di atomi con dimensioni definite e finite. L'idea centrale che rende possibile il perseguimento degli obiettivi esplicitati è che le particelle in sospensione in un liquido, che sono suscet-

⁶³ A. Einstein, *Die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, in "Annalen der Physik" (4) 17, 1905; trad. it. di E. Ioli, *Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*, in Stachel, *op. cit.*, p. 97.

⁶⁴ *Ibid.*

⁶⁵ *Ibid.*

tibili di osservazione al microscopio, danno luogo a un moto irregolare da imputare alla casualità con cui si ripercuotono gli urti di cui queste stesse particelle sono oggetto da parte delle molecole del liquido.

L'elemento indubbiamente fondamentale e significativo dell'approccio proposto dal fisico tedesco riguarda la pressione osmotica che deve essere attribuita alle particelle in sospensione. Si tratta, infatti, di un elemento originale rispetto alle precedenti spiegazioni avanzate per render conto del moto browniano: anziché ricorrere al teorema di equipartizione dell'energia, il Nostro basa la propria analisi sulla pressione osmotica, assimilando il comportamento dell'insieme delle particelle in sospensione al comportamento di un soluto, ovviamente di un soluto non elettrolita perché altrimenti la dissociazione degli ioni complicherebbe il quadro.

Mettiamo il caso che il soluto sia contenuto in un volume che è separato dal solvente puro da una specie di parete o barriera con la proprietà di essere permeabile al solvente ma non al soluto. Ebbene, su questa parete si esercita una pressione che il chimico olandese J. van't Hoff denominò osmotica. Consideriamo allora il moto delle particelle di soluto sotto l'azione della pressione osmotica; potremo immediatamente affermare che se la densità della sospensione è disomogenea, anche la pressione sarà non omogenea.

Avremo così un processo di diffusione delle particelle di soluto. Ma il moto di queste particelle nel liquido dovrà fare i conti con una resistenza che dipende da un coefficiente di viscosità η , proprio del liquido. La quantità di sostanza che si diffonde in questo processo attraversa un piano di sezione unitaria che è perpendicolare alla direzione della diffusione. Il coefficiente di proporzionalità D viene così designato coefficiente di diffusione. Ora, se invece di considerare le molecole di soluto operiamo con particelle in sospensione, dovremo necessariamente concludere che, dal punto di vista della teoria termodinamica classica, non dovremmo trovare qualcosa di analogo alla pressione osmotica. Le cose stanno in modo diverso se le consideriamo con gli occhiali resi disponibili dalla teoria cinetico-molecolare del calore. Per quest'ultima, infatti, ciò che distingue una molecola in soluzione da un corpo in sospensione risiede solo nelle sue dimensioni, sicché non si vede perché un certo numero di particelle in sospensione non dovrebbero esercitare la pressione osmotica esercitata da uno stesso numero di molecole. Così, se si

adotta il caso della sospensione, l'equilibrio tra le due forze, cioè lo *status* di equilibrio dinamico, ci dà un'equazione che consente di stabilire il coefficiente di diffusione D . Tenuto conto che le particelle in sospensione possono essere considerate come piccole sfere di raggio r , avremo:

$$\frac{RT}{N} = \frac{1}{6\pi\eta r}$$

Come appare evidente, sin da questo momento entra in scena N , cioè il numero di Avogadro. Ma c'è dell'altro. Einstein ricava infatti anche l'espressione dello spostamento medio di una singola particella sospesa in un tempo t , ossia

$$\lambda = \sqrt{2D} \sqrt{t} \text{ sicché, sostituendo, si ottiene}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{RT}{N}} \frac{1}{3\pi\eta r} \sqrt{t}$$

Quest'ultimo risultato esprime la regolarità che ci aspettiamo di trovare per il moto browniano.

In precedenza, abbiamo avuto modo di registrare la stima di N ottenuta da Loschmidt. Attraverso questa stima e la relazione finale ottenuta sopra, è possibile controllare l'ipotesi che ritiene osservabile il moto casuale di particelle di dimensioni dell'ordine del millesimo di millimetro (μ). Se $r = 0,5$, per valori standard di R e η , a temperatura ambiente e per il tempo $t = 1$ s, avremo

$$\lambda \approx 0,8 \mu.$$

Infine, se si risolve la formula in N , avremo la determinazione del numero di Avogadro, quindi la possibilità di contare le molecole in una mole e, di conseguenza, di fissare la scala delle dimensioni atomiche e molecolari.

Lo studio einsteiniano sul moto browniano può a buon diritto essere considerato una delle maggiori espressioni della ricerca nell'ambito della teoria cinetica del calore, dal momento che si pone come uno dei suoi principali contributi. Non solo: alcune, tra le sue conseguenze, si riveleranno estremamente importanti per lo sviluppo della fisica del XX secolo, tanto sul terreno del consolidamento dello studio dei fenomeni di fluttuazione, che giungeranno a costituire

una nuova branca della fisica, quanto sull'affermazione decisiva della realtà dell'atomo, resa ancor più significativa dalle verifiche sperimentali delle deduzioni einsteiniane svolte con successo dal fisico francese J.-B. Perrin e da altri. Non da ultimo, è importante sottolineare che i metodi escogitati da Einstein nelle sue ricerche in questo ambito prepararono il terreno per lo sviluppo, a opera di Szilard e altri, della termodinamica statistica e di una teoria generale dei processi stocastici.

5. Il principio di relatività

La quarta memoria del 1905, quella che Einstein indica a Habicht come ancora in fase di elaborazione, come un abbozzo, reca il titolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sull'elettrodinamica dei corpi in moto)*⁶⁶.

Seguendo passo dopo passo la problematica legata all'etere, un percorso che abbiamo volutamente intrapreso sulla base della stessa ricostruzione proposta da Einstein, abbiamo potuto mettere in evidenza le strategie e i fallimenti nel tentativo di svelare la natura e il comportamento della nozione in oggetto. Siamo ora nella condizione di andare al fondo della questione e comprendere pienamente in che modo e in quali termini il fisico tedesco si è posto di fronte al problema, risolvendolo. Dobbiamo in effetti domandarci: dove nasce, qual è l'origine delle difficoltà che abbiamo incontrato? La risposta non può che essere la seguente: la difficoltà risiede nel con-

⁶⁶ Come è stato ancora di recente messo in evidenza (cfr. Stachel, *op. cit.*, p. 114), a rigore l'espressione "teoria della relatività", in uso nella discussione dei primi articoli di Einstein sull'argomento, deve essere considerata inopportuna o inadeguata perché anacronistica, cioè storicamente mal posta. Questo perché, in primo luogo, solo molto più tardi, rispetto alla formulazione della teoria, lo stesso fisico tedesco sostituirà questa espressione a quella, utilizzata fin dall'inizio, di "principio di relatività"; poi, in secondo luogo, perché l'espressione in oggetto si affermerà nel linguaggio corrente della fisica solo dopo il 1907, e non certo per iniziativa dello stesso Einstein. Nel 1906 Planck utilizzò il termine "*Relativtheorie*" per descrivere le equazioni del moto di Lorentz-Einstein per l'eletttrone, espressione che resterà in uso per anni. Sembra che A.H. Bucherer sia stato il primo a servirsi del termine "*Relativitätstheorie*" (teoria della relatività), nel corso della discussione seguita a un seminario tenuto da Planck. Il termine venne ripreso da P. Ehrenfest in un articolo del 1907 e, in seguito a ciò utilizzato, ma in modo discontinuo, cioè intervallato con l'espressione originaria "*Relativitätsprinzip*" (principio di relatività), dallo stesso Einstein. Nel 1910, il matematico tedesco Felix Klein suggerì il termine "*Invariantentheorie*" (teoria degli invarianti), ma la proposta non ebbe seguito nell'ambiente dei fisici. Da parte sua, Einstein iniziò a parlare di "teoria della relatività ristretta o speciale", riferendosi alla memoria del 1905, per distinguerla da quella elaborata nel 1916, cioè la "teoria della relatività generale".

una nuova branca della fisica, quanto sull'affermazione decisiva della realtà dell'atomo, resa ancor più significativa dalle verifiche sperimentali delle deduzioni einsteiniane svolte con successo dal fisico francese J.-B. Perrin e da altri. Non da ultimo, è importante sottolineare che i metodi escogitati da Einstein nelle sue ricerche in questo ambito prepararono il terreno per lo sviluppo, a opera di Szilard e altri, della termodinamica statistica e di una teoria generale dei processi stocastici.

5. Il principio di relatività

La quarta memoria del 1905, quella che Einstein indica a Habicht come ancora in fase di elaborazione, come un abbozzo, reca il titolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper (Sull'elettrodinamica dei corpi in moto)*⁶⁶.

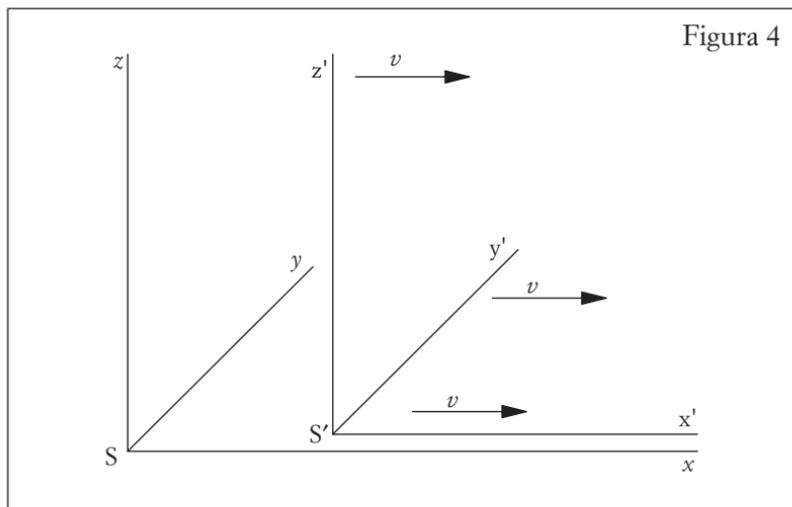
Seguendo passo dopo passo la problematica legata all'etere, un percorso che abbiamo volutamente intrapreso sulla base della stessa ricostruzione proposta da Einstein, abbiamo potuto mettere in evidenza le strategie e i fallimenti nel tentativo di svelare la natura e il comportamento della nozione in oggetto. Siamo ora nella condizione di andare al fondo della questione e comprendere pienamente in che modo e in quali termini il fisico tedesco si è posto di fronte al problema, risolvendolo. Dobbiamo in effetti domandarci: dove nasce, qual è l'origine delle difficoltà che abbiamo incontrato? La risposta non può che essere la seguente: la difficoltà risiede nel con-

⁶⁶ Come è stato ancora di recente messo in evidenza (cfr. Stachel, *op cit.*, p. 114), a rigore l'espressione "teoria della relatività", in uso nella discussione dei primi articoli di Einstein sull'argomento, deve essere considerata inopportuna o inadeguata perché anacronistica, cioè storicamente mal posta. Questo perché, in primo luogo, solo molto più tardi, rispetto alla formulazione della teoria, lo stesso fisico tedesco sostituirà questa espressione a quella, utilizzata fin dall'inizio, di "principio di relatività"; poi, in secondo luogo, perché l'espressione in oggetto si affermerà nel linguaggio corrente della fisica solo dopo il 1907, e non certo per iniziativa dello stesso Einstein. Nel 1906 Planck utilizzò il termine "*Relativtheorie*" per descrivere le equazioni del moto di Lorentz-Einstein per l'eletttrone, espressione che resterà in uso per anni. Sembra che A.H. Bucherer sia stato il primo a servirsi del termine "*Relativitätstheorie*" (teoria della relatività), nel corso della discussione seguita a un seminario tenuto da Planck. Il termine venne ripreso da P. Ehrenfest in un articolo del 1907 e, in seguito a ciò utilizzato, ma in modo discontinuo, cioè intervallato con l'espressione originaria "*Relativitätsprinzip*" (principio di relatività), dallo stesso Einstein. Nel 1910, il matematico tedesco Felix Klein suggerì il termine "*Invariantentheorie*" (teoria degli invarianti), ma la proposta non ebbe seguito nell'ambiente dei fisici. Da parte sua, Einstein iniziò a parlare di "teoria della relatività ristretta o speciale", riferendosi alla memoria del 1905, per distinguerla da quella elaborata nel 1916, cioè la "teoria della relatività generale".

flitto, che scopriremo essere solo apparente, fra il principio di relatività e la teoria dell'elettrodinamica di Maxwell-Lorentz. Infatti, benché il principio di relatività affermi che tutti i sistemi di riferimento inerziali, cioè sistemi di coordinate animati da moto rettilineo e uniforme, sono equivalenti tra loro, la teoria di Maxwell-Lorentz implica l'esistenza surrettizia di un sistema inerziale privilegiato. Dice Einstein:

La teoria di Lorentz si trova in opposizione con l'immagine puramente meccanica alla quale i fisici speravano di ricondurre tutti i fenomeni dell'Universo. In effetti, mentre in Meccanica non esiste moto assoluto, ma soltanto moti di corpi relativamente ad altri, nella teoria di Lorentz c'è uno stato particolare che corrisponde fisicamente allo stato di riposo assoluto: è lo stato di un corpo non in moto rispetto all'etere⁶⁷.

Per essere ancora più espliciti, la situazione può essere descritta nei seguenti termini (fig. 4).



Le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di coordinate S, animato da un moto rettilineo uniforme, pos-

⁶⁷ Einstein, *Il principio di relatività...*, cit., p. 41.

sono essere messe in relazione a un secondo sistema di coordinate S' in traslazione uniforme rispetto al primo attraverso le equazioni

$$(1) \quad \begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Otterremo così delle relazioni in t' , x' , y' , z' , perfettamente identiche alle equazioni originarie in t , x , y , z . Ciò significa che le leggi del moto newtoniano si trasformano in leggi della stessa forma quando da un sistema di coordinate si passa a un secondo sistema di coordinate che, rispetto al primo, è animato da un moto rettilineo e uniforme. Come è agevole capire, è proprio questa la proprietà che noi esprimiamo allorché diciamo che nella meccanica classica è soddisfatto il principio di relatività. L'enunciato del principio di relatività è allora il seguente: “*Le leggi che reggono i fenomeni naturali sono indipendenti dallo stato di moto del sistema di coordinate rispetto al quale i fenomeni sono osservati, posto che questo sistema non sia animato da un moto accelerato*”⁶⁸.

Orbene, se adesso trasformiamo le equazioni fondamentali della teoria di Lorentz facendo uso delle equazioni (1), otterremo delle equazioni dove le grandezze x' , y' , z' , non sono più simmetriche e si è costretti a concludere con il Nostro che “la teoria di Lorentz, basata sull'ipotesi dell'etere, non ammette dunque il principio di relatività. Le difficoltà incontrate fin qui derivano principalmente da questo fatto; le ragioni profonde appariranno in seguito. Comunque sia, poiché nessun fatto sperimentale mette in fallo il principio detto, ammettere una teoria che non comporta il principio di relatività è tanto più fuori luogo”⁶⁹.

Le cose stanno allora in questi termini:

- a) se si ammette l'esistenza dell'etere, l'esperienza ci porta a considerare questo fantomatico mezzo come immobile;
- b) la teoria che si fonda sull'immobilità dell'etere, la teoria di Lorentz, sebbene riesca a prevedere i principali fatti sperimenta-

⁶⁸ Ivi, pp. 41-43.

⁶⁹ Ivi, p. 43.

li pecca gravemente su un fatto essenziale: non ammette il principio di relatività.

Viene allora spontaneo chiedersi: ma è davvero impossibile conciliare correttamente e legittimamente i fondamenti della teoria di Lorentz con il principio di relatività? La conciliazione, non solo possibile ma necessaria, può essere ottenuta, come stiamo per vedere, attraverso una serie di passaggi che implicano anzitutto una rinuncia, quella della stessa nozione di etere. Afferma infatti il fisico tedesco:

Il primo passo da fare, se si vuol tentare una conciliazione, è di rinunciare all'etere. In effetti, da una parte siamo stati obbligati ad ammettere l'immobilità dell'etere; dall'altra parte, il principio di relatività richiede che le leggi dei fenomeni naturali riferiti a un sistema di coordinate S' animato da un moto uniforme siano identiche alle leggi degli stessi fenomeni riferiti a un sistema S in riposo rispetto all'etere. Ora, non c'è ragione per ammettere l'immobilità dell'etere, che la teoria e l'esperienza richiedono, rispetto al sistema S' piuttosto che al sistema S ; questi due sistemi non possono essere distinti, ed è di conseguenza fuori luogo far svolgere ad uno di essi un ruolo particolare dicendo che è immobile rispetto all'etere. Se ne conclude che non si può giungere ad una teoria soddisfacente che rinunciando ad un mezzo che riempie tutto lo spazio⁷⁰.

Il secondo passo da fare consiste nella possibilità di conciliare il principio di relatività con una conseguenza fondamentale della teoria di Lorentz che riguarda la propagazione della luce nel vuoto. Einstein enuncia in questi termini tale conseguenza:

*La propagazione di un raggio luminoso nel vuoto avviene sempre con la stessa velocità c , poiché questa velocità è indipendente dal moto del corpo che emette il raggio*⁷¹.

Si tratta, come è facile capire, dell'invarianza della velocità della luce, c , nel vuoto, invarianza che, fin d'ora, verrà designata come "*principio della costanza della velocità della luce*"⁷². La conciliazione è necessaria perché nella teoria di Lorentz la costanza della velocità della luce c vale solo per un sistema che gode di un particolare stato di moto, cioè

⁷⁰ Ivi, pp. 43-45.

⁷¹ Ivi, p. 45.

⁷² *Ibid.*

quello di essere in riposo rispetto all'etere. Sicché, se vogliamo conservare il principio di relatività, dovremo ammettere che la costanza di c nel vuoto vale per ogni qualsivoglia sistema di riferimento dotato di moto rettilineo e uniforme, insomma per ogni sistema inerziale. Solo che, di primo acchito, questa generalizzazione sembra impossibile. Ed è facile rendersene conto. Torniamo ai nostri due sistemi di riferimento e prendiamo in considerazione un raggio di luce che rispetto a S , in quiete, si propaga con la velocità c . Vogliamo stabilire quale sarà la velocità di propagazione di questo raggio rispetto a S' , che sappiamo animato di moto rettilineo e uniforme rispetto a S . Semplice, si penserà. Sarà sufficiente applicare la regola di addizione delle velocità, la regola newtoniana del parallelogramma. Ne resteremmo delusi! Perché avremo un bel applicare la regola: come risultante troveremo sempre una velocità diversa da c ; il che significa che il principio della costanza della velocità della luce vale per S ma non per S' . Ecco allora che ci troviamo costretti, ancora una volta, a una rinuncia. Per l'esattezza, dovremo rinunciare alla tradizionale regola di addizione delle velocità e sostituirla con un'altra regola. Dice Einstein:

Per quanto ben fondata possa apparire a prima vista, questa regola nasconde almeno due ipotesi arbitrarie che di conseguenza, come stiamo per vedere, regnano su tutta la cinematica⁷³.

Queste due ipotesi rappresentano precisamente “le ragioni profonde” che ci facevano credere che, servendoci delle relazioni (1), si arrivava a denunciare l'incompatibilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività. Svelare, mettere a nudo la fallacia costituita dalle due ipotesi significherà così affermare quella incompatibilità come semplicemente apparente.

6. “Due ipotesi arbitrarie”

La prima “ipotesi arbitraria” riguarda la misura del tempo. Ora, per misurare il tempo, noi ci serviamo, banalmente, di orologi. Ma che cos'è un orologio? Per orologio, dice il fisico tedesco, “intenderemo ogni cosa che caratterizza un fenomeno che ripassa periodicamente negli stessi stati, e ciò in modo tale che siamo obbligati ad ammettere – in virtù del principio di ra-

⁷³ Ivi, p. 47.

quello di essere in riposo rispetto all'etere. Sicché, se vogliamo conservare il principio di relatività, dovremo ammettere che la costanza di c nel vuoto vale per ogni qualsivoglia sistema di riferimento dotato di moto rettilineo e uniforme, insomma per ogni sistema inerziale. Solo che, di primo acchito, questa generalizzazione sembra impossibile. Ed è facile rendersene conto. Torniamo ai nostri due sistemi di riferimento e prendiamo in considerazione un raggio di luce che rispetto a S , in quiete, si propaga con la velocità c . Vogliamo stabilire quale sarà la velocità di propagazione di questo raggio rispetto a S' , che sappiamo animato di moto rettilineo e uniforme rispetto a S . Semplice, si penserà. Sarà sufficiente applicare la regola di addizione delle velocità, la regola newtoniana del parallelogramma. Ne resteremmo delusi! Perché avremo un bel applicare la regola: come risultante troveremo sempre una velocità diversa da c ; il che significa che il principio della costanza della velocità della luce vale per S ma non per S' . Ecco allora che ci troviamo costretti, ancora una volta, a una rinuncia. Per l'esattezza, dovremo rinunciare alla tradizionale regola di addizione delle velocità e sostituirla con un'altra regola. Dice Einstein:

Per quanto ben fondata possa apparire a prima vista, questa regola nasconde almeno due ipotesi arbitrarie che di conseguenza, come stiamo per vedere, regnano su tutta la cinematica⁷³.

Queste due ipotesi rappresentano precisamente “le ragioni profonde” che ci facevano credere che, servendoci delle relazioni (1), si arrivava a denunciare l'incompatibilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività. Svelare, mettere a nudo la fallacia costituita dalle due ipotesi significherà così affermare quella incompatibilità come semplicemente apparente.

6. “Due ipotesi arbitrarie”

La prima “ipotesi arbitraria” riguarda la misura del tempo. Ora, per misurare il tempo, noi ci serviamo, banalmente, di orologi. Ma che cos'è un orologio? Per orologio, dice il fisico tedesco, “intenderemo ogni cosa che caratterizza un fenomeno che ripassa periodicamente negli stessi stati, e ciò in modo tale che siamo obbligati ad ammettere – in virtù del principio di ra-

⁷³ Ivi, p. 47.

gione sufficiente – che tutto ciò che accade all'epoca di un periodo dato sia identico a tutto ciò che accade all'epoca di un periodo qualsiasi⁷⁴. Se il nostro orologio è costituito da un meccanismo munito di lancette, segnare la posizione di queste ultime vuol dire, evidentemente, contare il numero di periodi trascorsi. Misurare l'intervallo di tempo che dura un fenomeno significherà allora, per definizione, contare il numero di periodi indicati dall'orologio dall'inizio sino alla fine del fenomeno. Ora, continua Einstein, “questa definizione ha un senso perfettamente chiaro finché l'orologio è sufficientemente vicino al luogo in cui accade il fenomeno affinché si possa osservare simultaneamente e l'orologio e il fenomeno. Si supponga, al contrario, che quest'ultimo abbia luogo in qualche parte lontano dall'orologio, non sarà più possibile far corrispondere immediatamente alle diverse fasi del fenomeno le diverse posizioni delle lancette dell'orologio. La definizione è allora insufficiente; bisogna completarla. Finora la si completava inconsciamente⁷⁵.”

Per superare la difficoltà, cioè per poter riconoscere il tempo in ciascun punto dello spazio, potremmo ben immaginare proprio quest'ultimo come interamente disseminato di un numero enorme di orologi tutti di costruzione identica. Posto ciò, se consideriamo dei punti A, B, C... ciascuno provvisto di un orologio e, con l'ausilio di coordinate indipendenti dal tempo, riferiti a un sistema di coordinate animato da un moto rettilineo e uniforme, saremo informati sul tempo ovunque ci saremo preoccupati di piazzare un orologio. Scegliendo un numero convenientemente grande di orologi, e tale da poter attribuire a ciascuno di essi un dominio assai ristretto, saremo in grado di precisare un istante qualunque in ogni luogo dello spazio con un'approssimazione grande quanto vorremo. Solo che, ancora una volta, dovremo constatare che una simile definizione del tempo non può essere fecondamente utilizzata dal punto di vista fisico. Ci siamo infatti dimenticati il più e il meglio: non abbiamo rimesso i nostri orologi all'ora attuale, sicché gli intervalli di tempo che scorrono durante un fenomeno che ha una certa estensione saranno evidentemente diversi a seconda

⁷⁴ Einstein precisa opportunamente: “Noi postuliamo perciò che due fenomeni identici hanno la stessa durata. L'orologio perfetto così definito gioca, per la misura del tempo, un ruolo analogo al corpo solido perfetto per la misura delle lunghezze” (*ibid.*, n. 7).

⁷⁵ Ivi, pp. 47-49.

che il fenomeno occupi i tali o i talaltri punti dello spazio. Detto in altri termini, non abbiamo sincronizzato i nostri orologi. Orbene, dice il fisico tedesco:

Per avere una definizione fisica completa del tempo bisogna fare un passo in più: bisogna dire in che modo tutti gli orologi sono stati regolati all'inizio delle esperienze. Noi procederemo come segue. Diamoci anzitutto un mezzo per inviare dei segnali sia da A in B che da B in A. Questo mezzo deve essere tale che non abbiamo alcuna ragione per credere che i fenomeni di trasmissione dei segnali nel senso AB differiscano in qualche cosa dai fenomeni di trasmissione dei segnali nel senso BA. In questo caso, è manifesto che non c'è che un solo modo di regolare l'orologio di B su quello di A in maniera che il segnale che va da A in B richieda tanto tempo – misurato con l'ausilio di detti orologi – quanto quello che va da B in A⁷⁶.

Così, se si indica con:

t_A	l'indicazione dell'orologio A	quando il segnale	AB parte da A
t_B	"	B	"
$t_{B'}$	"	B	"
$t_{A'}$	"	A	"
			BA arriva in A

dovremo regolare l'orologio posto in B su quello collocato in A in modo tale che:

$$t_B - t_A = t'_A - t'_B.$$

La scelta del segnale da utilizzare, onda sonora o raggio luminoso, è, rispetto ai fini che ci proponiamo di perseguire, di per sé indifferente: qualora ci trovassimo in presenza di risultati che non concordano, si dovrà comunque concludere che almeno uno dei due generi di segnali non soddisfa le condizioni necessarie e sufficienti dell'equivalenza dei cammini AB, BA. La nostra scelta, tuttavia, è a ben vedere agevolata dalle proprietà caratteristiche che abbiamo riconosciuto alla velocità della luce c , sicché si preferiranno quei segnali in cui vengono utilizzati dei segnali luminosi che si propagano nel vuoto; infatti, dal momento che la regolazione o sincronizzazione degli orologi implica l'equivalenza del cammino di andata con quello di ritorno, disporremo per definizione di questa equivalenza perché, in virtù del principio della costanza della velocità del-

⁷⁶ Ivi, p. 51.

la luce, nel vuoto quest'ultima si propaga sempre con velocità c . Siamo ora nella condizione di regolare i nostri orologi in modo che il tempo che un segnale luminoso impiega per andare da A in B sia identico a quello che lo stesso segnale impiega per andare da B in A: possediamo cioè un metodo ben definito, attraverso il quale giungere a poter stabilire tre nozioni fondamentali, quella di *tempo fisico*, quella di *evento elementare*, infine quella di *coordinata di tempo*. In effetti, se dopo aver regolato i due orologi tra di loro, che diremo allora *in fase*, a poco a poco regoliamo l'orologio B sull'orologio A, l'orologio C sull'orologio B e così via, avremo una serie di orologi tali che uno qualunque tra di essi è in fase con il precedente; di più, due orologi qualsiasi non consecutivi nella serie dovranno essere in fase in virtù del principio della costanza della velocità della luce c , sicché, dice Einstein, "l'insieme di tutti questi orologi in fase gli uni con gli altri è ciò che chiameremo *tempo fisico*"⁷⁷. Così, se per evento elementare intendiamo in prima battuta un evento supposto concentrato in un punto e di durata infinitamente piccola, e per coordinata di tempo di un evento elementare l'indicazione, allorché si produce l'evento, di un orologio posto infinitamente vicino al punto in cui ha luogo l'evento, concluderemo che "un evento elementare è perciò definito attraverso quattro coordinate: la coordinata di tempo e le tre coordinate che definiscono la posizione nello spazio in cui l'evento è supposto concentrato"⁷⁸. La definizione di tempo fisico che siamo giunti a determinare ci offre la preziosa opportunità di dare un senso definito alle nozioni di simultaneità e di non simultaneità di due eventi che accadono in luoghi lontani l'uno dall'altro, come del resto l'introduzione delle coordinate x, y, z , di un punto nello spazio dà un senso altrettanto definito della nozione di posizione. Infatti, dire che l'ascissa di un punto Q posto su un asse è x , vuol dire semplicemente che, servendosi di un regolo, riportando x volte sull'asse la lunghezza unità si giungerà necessariamente al punto Q. Sta bene, si dirà. Ci siamo costruiti una definizione di tempo che, dal punto di vista fisico, è corretta e pienamente soddisfacente; abbiamo anche definito che cosa dobbiamo intendere per evento elementare; tuttavia, si potrebbe obiettare, ancora non sappiamo, e anzi non riusciamo sinceramente a vedere, in che senso la nozione di tempo che

⁷⁷ Ivi, p. 53.

⁷⁸ *Ibid.*

presiede la regola di addizione delle velocità debba essere considerata “arbitraria”. È quanto stiamo per mostrare attraverso ciò che lo stesso Einstein considera “una osservazione importante”:

Per definire il tempo fisico rispetto a un sistema di assi, ci siamo serviti di *un gruppo di orologi in stato di riposo relativamente a questo sistema*. In base a questa definizione, le indicazioni di tempo o la constatazione della simultaneità di due eventi non avranno senso se il moto del gruppo di orologi o quello del sistema di assi non è conosciuto⁷⁹.

Per comprendere la portata di quanto appena affermato, converrà tornare ai nostri due sistemi inerziali S ed S', cioè animati di moto rettilineo e uniforme l'uno rispetto all'altro. Immaginiamo che tanto il sistema S quanto il sistema S' siano forniti di un gruppo di orologi a essi invariabilmente legati, visto che tutti gli orologi appartengono a un sistema in fase. Se le cose stanno in questi termini, le indicazioni che ci offrono gli orologi del gruppo legato al sistema S definiscono il tempo fisico rispetto a S, mentre le indicazioni che ci offrono gli orologi del gruppo legato al sistema S' definiscono il tempo fisico rispetto a S'. Ne viene che ogni evento elementare avrà necessariamente una coordinata di tempo t rispetto al sistema S e una coordinata di tempo t' rispetto al sistema S'. L'arbitrarietà della nozione di tempo, così come è venuta a caratterizzarsi a partire da Galilei e Newton, sta allora in ciò:

Noi non abbiamo il diritto di supporre a priori che si possano regolare gli orologi dei due gruppi in modo che le due coordinate del tempo dell'evento elementare siano le stesse; in altri termini, in modo che t sia uguale a t'. Supporlo significa fare un'ipotesi arbitraria. Fino ad ora questa ipotesi era introdotta in cinematica⁸⁰.

Non siamo legittimati o autorizzati, perché prescindendo dalla velocità si assume che gli intervalli di tempo permangono comunque uguali: di qui l'equazione $t' = t$, che intuitivamente ma altrettanto erroneamente ci gratifica, e che esprime la nozione di tempo assoluto e unico.

Veniamo adesso a illustrare la seconda “ipotesi arbitraria” su cui si fonda la regola classica del parallelogramma e, di conseguenza, l'intera cinematica galileiano-newtoniana; essa riguarda lo spazio o, me-

⁷⁹ Ivi, p. 55.

⁸⁰ Ivi, p. 57.

glio, la configurazione di un corpo in moto. Come al solito, consideriamo un sistema di coordinate S in moto rettilineo e uniforme rispetto al quale una sbarra di ferro AB si muove, nella direzione del proprio asse, con velocità v . Ci chiediamo: che cosa dobbiamo intendere con l'espressione "lunghezza della sbarra AB "? La richiesta, ne conveniamo, può immediatamente sembrare un po' bizzarra, perché siamo istintivamente portati a ritenere la questione talmente ovvia da non dover ricorrere a una definizione speciale. Vedremo, e ci convinceremo, che le cose non stanno in questo modo se, per giungere a determinare la lunghezza AB della nostra sbarra di ferro, ci serviremo di due diverse, ma entrambe legittime, procedure.

Un primo modo per giungere a stabilire la lunghezza AB consiste nel disporre di un osservatore munito di un regolo graduato. Facendo sì che l'osservatore raggiunga la velocità v con la quale si sposta la sbarra, ovvero si posizioni rispetto a quest'ultima in stato di riposo relativo, l'applicazione successiva del regolo graduato alla sbarra ci darà la misura della lunghezza AB . Il secondo modo per raggiungere il nostro obiettivo, la determinazione della lunghezza della sbarra, ci è offerto attraverso un gruppo di orologi in fase e in riposo rispetto al nostro sistema S . Gli orologi in fase, in effetti, ci permettono di individuare due punti P_1 e P_2 del sistema S dove, al tempo t , vengono a trovarsi i due estremi A e B della sbarra. Applicando il nostro regolo graduato sul segmento che unisce i due punti P_1 e P_2 considerati, otterremo la lunghezza AB della sbarra rispetto al sistema S . Orbene, possiamo pacificamente affermare che, nonostante le due legittime ma diverse procedure di misurazione, l'esito numerico sarà esattamente lo stesso? Per il Nostro, sicuramente e decisamente no:

Non è affatto detto *a priori* che queste due operazioni debbano necessariamente condurre alla stessa *espressione numerica* della lunghezza della sbarra. Tutto ciò che si può dedurre dal principio di relatività – e ciò si dimostra facilmente – è che i due metodi portano alla stessa espressione numerica della lunghezza solo se la sbarra AB è in riposo relativamente al sistema S . Ma non è in alcun modo possibile affermare che il secondo metodo dà una espressione numerica della lunghezza indipendente dalla velocità v della sbarra⁸¹.

⁸¹ Ivi, pp. 57-59.

La risposta non può che essere negativa, dal momento che, non tenendo conto ancora una volta della velocità, si assume che gli intervalli di lunghezza siano gli stessi per tutti gli osservatori. Così, se in generale

si determina la configurazione di un corpo in moto di traslazione uniforme rispetto a S in base ai metodi ordinari della geometria, attraverso regoli graduati o altri corpi solidi animati dallo stesso moto, i risultati delle misure saranno indipendenti dalla velocità v della traslazione; questi risultati ci danno ciò che chiameremo la *configurazione geometrica* del corpo. Se, al contrario, si individua sul sistema S la posizione di diversi punti del corpo ad un istante dato e si determina, con misure geometriche attraverso regoli graduati in riposo rispetto a S , la configurazione formata da questi punti, otteniamo come risultato ciò che chiameremo la *configurazione cinematica* del corpo rispetto a S . La seconda ipotesi fatta inconsciamente nella cinematica si esprime allora così: la configurazione cinematica e la configurazione geometrica sono identiche”⁸².

La regola di addizione delle velocità, o regola del parallelogramma, diretto responsabile della inconciliabilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività, si fonda dunque, come si è mostrato, su due ipotesi inaccettabili, perché arbitrarie, che dal punto di vista matematico assumono la forma delle seguenti equazioni:

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z.$$

7. Le equazioni di trasformazione di Lorentz

Il passo ulteriore che dobbiamo compiere, una volta accertata la necessità di abbandonare la cinematica ordinaria e le sue equazioni di trasformazione, sarà quello di fondare una nuova dottrina del moto indipendentemente dalle cause che lo producono, una nuova cinematica appunto, e, di conseguenza, giungere alla formulazione di nuove equazioni di trasformazione. Ebbene, dice Einstein, “mostreremo che prendendo come base:

1° *il principio di relatività,*

2° *il principio della costanza della velocità della luce,*

⁸² Ivi, p. 59.

La risposta non può che essere negativa, dal momento che, non tenendo conto ancora una volta della velocità, si assume che gli intervalli di lunghezza siano gli stessi per tutti gli osservatori. Così, se in generale

si determina la configurazione di un corpo in moto di traslazione uniforme rispetto a S in base ai metodi ordinari della geometria, attraverso regoli graduati o altri corpi solidi animati dallo stesso moto, i risultati delle misure saranno indipendenti dalla velocità v della traslazione; questi risultati ci danno ciò che chiameremo la *configurazione geometrica* del corpo. Se, al contrario, si individua sul sistema S la posizione di diversi punti del corpo ad un istante dato e si determina, con misure geometriche attraverso regoli graduati in riposo rispetto a S , la configurazione formata da questi punti, otteniamo come risultato ciò che chiameremo la *configurazione cinematica* del corpo rispetto a S . La seconda ipotesi fatta inconsciamente nella cinematica si esprime allora così: la configurazione cinematica e la configurazione geometrica sono identiche”⁸².

La regola di addizione delle velocità, o regola del parallelogramma, diretto responsabile della inconciliabilità della teoria di Lorentz con il principio di relatività, si fonda dunque, come si è mostrato, su due ipotesi inaccettabili, perché arbitrarie, che dal punto di vista matematico assumono la forma delle seguenti equazioni:

$$t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z.$$

7. Le equazioni di trasformazione di Lorentz

Il passo ulteriore che dobbiamo compiere, una volta accertata la necessità di abbandonare la cinematica ordinaria e le sue equazioni di trasformazione, sarà quello di fondare una nuova dottrina del moto indipendentemente dalle cause che lo producono, una nuova cinematica appunto, e, di conseguenza, giungere alla formulazione di nuove equazioni di trasformazione. Ebbene, dice Einstein, “mostreremo che prendendo come base:

- 1° *il principio di relatività,*
- 2° *il principio della costanza della velocità della luce,*

⁸² Ivi, p. 59.

si giunge a equazioni di trasformazione che consentono di constatare che la teoria di Lorentz è compatibile con il principio di relatività. Chiameremo *teoria della relatività* la teoria basata su questi principi⁸³.

Torniamo ai nostri due sistemi di coordinate S ed S', che considereremo equivalenti, cioè dove le lunghezze sono misurate con la stessa unità di misura e dove ciascuno dei due sistemi ha un gruppo di orologi che sono sincronizzati quando S ed S' sono in quiete l'uno rispetto all'altro. Per il principio di relatività le leggi della natura devono essere le medesime per S ed S', sia nel caso in cui essi siano in riposo relativo sia che presentino un moto traslatorio rettilineo e uniforme l'uno rispetto all'altro. È altresì essenziale che la velocità della luce nel vuoto sia espressa dallo stesso numero tanto in S quanto in S'.

Se t, x, y, z sono le coordinate rispetto a S di un evento elementare, e t', x', y', z' le coordinate rispetto a S' dello stesso evento elementare, le relazioni che legano questi due gruppi di coordinate daranno luogo al seguente sistema di equazioni di trasformazione:

$$(I) \quad \begin{cases} t' = \beta(t - v/c^2 x) \\ x' = \beta(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

$$\text{con } \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Queste equazioni, introdotte per la prima volta sul piano dell'elettrodinamica da Lorentz, saranno indicate, afferma il Nostro, "come *trasformazione di Lorentz*"⁸⁴. Il fatto di aver raggiunto questo

⁸³ Ivi, p. 61.

⁸⁴ In realtà fu Poincaré, per primo, a indicare tale gruppo come equazioni di Lorentz. Per una semplice derivazione delle equazioni si veda A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Braunschweig, Vieweg 1917; trad. it. di B. Carmignani, *Relatività. Esposizione divulgativa*, Boringhieri, Torino 1967, pp. 68-70.

stesso formalismo deve essere considerato un primo importante risultato della nuova cinematica, rispetto alla teoria di Lorentz. Naturalmente, se si risolvono le equazioni rispetto a t, x, y, z , si otterranno delle equazioni della stessa forma, dove però le lettere accentate sono sostituite da lettere non accentate e dove a v si sostituisce $-v$; tutto ciò è diretta conseguenza del principio di relatività: S è, rispetto a S' , in moto con la velocità $-v$ parallelamente all'asse delle x e delle x' .

Poste le cose nei termini appena raggiunti, non resta che formulare una interpretazione fisica delle nuove equazioni di trasformazione.

8. Conseguenze fisiche

Per prima cosa, consideriamo un corpo, ad esempio la nostra sbarra di ferro AB di cui ci siamo in precedenza serviti, legata al sistema S' . Le coordinate di due punti della sbarra saranno x_1, y_1, z_1 , e x_2, y_2, z_2 . Ebbene, a ogni istante t del sistema S , tra queste coordinate avremo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x_2 - x_1 &= \sqrt{1 - v^2 / c^2} (x'_2 - x'_1) \\y_2 - y_1 &= y'_2 - y'_1 \\z_2 - z_1 &= z'_2 - z'_1\end{aligned}$$

Che cosa possiamo dedurre da queste equazioni? Per dirla con lo stesso Einstein, che “la configurazione cinematica di un corpo animato da una traslazione uniforme rispetto a un sistema di assi dipende dalla velocità v di traslazione. Inoltre, la configurazione cinematica non differisce dalla configurazione geometrica che per un

accorciamento nel rapporto $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ”⁸⁵. Si tratta, come è agevole

capire, della nota contrazione longitudinale delle lunghezze, che Lorentz e Fitzgerald formularono indipendentemente al fine di spiegare l'esito negativo dell'esperienza condotta da Michelson e Morley. Orbene, questa ipotesi si presenta ora come una legittima

⁸⁵ Ivi, p. 69.

stesso formalismo deve essere considerato un primo importante risultato della nuova cinematica, rispetto alla teoria di Lorentz. Naturalmente, se si risolvono le equazioni rispetto a t, x, y, z , si otterranno delle equazioni della stessa forma, dove però le lettere accentate sono sostituite da lettere non accentate e dove a v si sostituisce $-v$; tutto ciò è diretta conseguenza del principio di relatività: S è, rispetto a S' , in moto con la velocità $-v$ parallelamente all'asse delle x e delle x' .

Poste le cose nei termini appena raggiunti, non resta che formulare una interpretazione fisica delle nuove equazioni di trasformazione.

8. Conseguenze fisiche

Per prima cosa, consideriamo un corpo, ad esempio la nostra sbarra di ferro AB di cui ci siamo in precedenza serviti, legata al sistema S' . Le coordinate di due punti della sbarra saranno x_1, y_1, z_1 , e x_2, y_2, z_2 . Ebbene, a ogni istante t del sistema S , tra queste coordinate avremo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x_2 - x_1 &= \sqrt{1 - v^2 / c^2} (x'_2 - x'_1) \\y_2 - y_1 &= y'_2 - y'_1 \\z_2 - z_1 &= z'_2 - z'_1\end{aligned}$$

Che cosa possiamo dedurre da queste equazioni? Per dirla con lo stesso Einstein, che “la configurazione cinematica di un corpo animato da una traslazione uniforme rispetto a un sistema di assi dipende dalla velocità v di traslazione. Inoltre, la configurazione cinematica non differisce dalla configurazione geometrica che per un

accorciamento nel rapporto $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ”⁸⁵. Si tratta, come è agevole

capire, della nota contrazione longitudinale delle lunghezze, che Lorentz e Fitzgerald formularono indipendentemente al fine di spiegare l'esito negativo dell'esperienza condotta da Michelson e Morley. Orbene, questa ipotesi si presenta ora come una legittima

⁸⁵ Ivi, p. 69.

conseguenza immediata dei principi fondamentali ammessi, ed è tale da ridimensionare drasticamente la nozione elementare di spazio, che ciascuno di noi si costruisce quasi inconsapevolmente. Le dimensioni spaziali vengono a dipendere direttamente dal sistema di riferimento scelto per la loro misura, non possono più essere affermate come qualcosa di assoluto.

In secondo luogo, sia H' un orologio in stato di riposo all'origine del nostro sistema S' . Immaginiamo che questo orologio abbia una caratteristica particolare rispetto a un qualsiasi altro orologio che utilizziamo per determinare il tempo fisico nei sistemi di coordinate S ed S' : la caratteristica di andare p_0 volte più veloce degli altri pendoli. Sicché, quando confronteremo i due orologi in stato di riposo relativo, l'orologio H' indicherà p_0 periodi quando l'altro orologio, il secondo, dà l'unità di tempo. Ora chiediamoci: quanti periodi indicherà H' nell'unità di tempo, se lo si considera non dal sistema S' ma dal sistema S ?

H' segnerà la fine di un periodo ai tempi:

$$t'_1 = \frac{1}{p_0}, \quad t'_2 = \frac{2}{p_0}, \quad t'_3 = \frac{3}{p_0}, \quad \dots \quad t'_n = \frac{n}{p_0}.$$

Dal momento che vogliamo determinare il tempo rispetto a S , la prima delle nuove equazioni di trasformazione (I) si scriverà:

$$t = \beta \left(t' - \frac{v}{c^2} x' \right),$$

e visto che H' resta all'origine di S' , avremo costantemente

$$x' = 0$$

da cui otterremo

$$t_n = \beta t'_n = \frac{\beta}{p_0}.$$

Visto dal sistema S , l'orologio H' indica perciò $p = \frac{p_0}{\beta} = p_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

periodi durante l'unità di tempo. Detto in altri termini, "un orologio animato da un moto uniforme di velocità v rispetto a un sistema

di riferimento va, osservato da questo sistema, $1: \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ meno ve-

loce di uno stesso orologio in riposo rispetto al sistema”⁸⁶. Siamo così di fronte alla seconda conseguenza, quella per certi aspetti più sconcertante, della nuova cinematica: la dilatazione del tempo e la conseguente dislocazione delle simultaneità, a seconda del sistema di riferimento dal quale viene considerato un evento elementare. Non solo, dunque, cade la nozione di spazio assoluto, ma la stessa nozione di tempo perde il suo carattere di unicità e assolutezza, così cara al senso comune, per diventare anch’essa semplicemente relativa al sistema di riferimento scelto.

In terzo luogo, consideriamo le equazioni del moto di un punto animato da moto rettilineo uniforme di velocità u , rispetto al sistema di riferimento S' . Si tratta delle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}x' &= u'_x t' \\y' &= u'_y t' \\z' &= u'_z t'.\end{aligned}$$

Attraverso le nostre nuove equazioni di trasformazione, possiamo sostituire x' , y' , z' , t' con il loro valore in funzione di x , y , z , t : otterremo x , y , z , in funzione di t e, di conseguenza, le componenti u_x , u_y , u_z della velocità u del nostro punto rispetto al sistema S . Questa operazione ci mette in grado di poter esprimere nella sua forma più generale il nuovo teorema di addizione delle velocità. In effetti, nel caso in cui la velocità u' ha la medesima direzione della velocità v' della traslazione di S' rispetto a S , troveremo:

$$u = \frac{v - u'}{1 + \frac{vu'}{c^2}}.$$

Il nuovo teorema di addizione delle velocità ci dà l’opportunità di compiere due interessanti osservazioni. La prima è che con la composizione di due velocità entrambe inferiori a c , cioè la velocità della luce nel vuoto, come risultante della composizione avremo sem-

⁸⁶ Ivi, pp. 71-73.

pre una velocità inferiore a c . Infatti, se $v = c - \lambda$, $u = c - \mu$, dove λ e μ sono positivi e inferiori a c , avremo

$$u = c \frac{2c - \lambda - \mu}{2c - \lambda - \mu + \frac{\lambda\mu}{c}} < c.$$

Ciò significa che se si compone la velocità della luce c con un'altra velocità inferiore a c , otterremo sempre la velocità della luce.

La seconda osservazione è che non c'è alcun mezzo che possa essere in grado di inviare dei segnali che vanno a una velocità superiore a quella della luce. Torniamo per l'ultima volta a considerare la nostra sbarra di ferro animata da un moto rettilineo e uniforme lungo l'asse delle ascisse del sistema S , dunque con velocità $-v$ ($|v| < c$). Attraverso la sbarra, possiamo agevolmente inviare dei segnali che si propagheranno con la velocità u' rispetto alla sbarra stessa. Al punto $x = 0$ delle ascisse è collocato un osservatore A , al punto $x = x_1$ dello stesso asse è collocato un osservatore B . Entrambi gli osservatori sono in riposo sul sistema S . Ora, se attraverso la sbarra l'osservatore A invia un segnale all'osservatore B , questo segnale

verrà trasmesso con la velocità $\frac{v - u'}{1 - \frac{vu'}{c^2}}$ rispetto ai due osservatori.

Il tempo di trasmissione del segnale sarà quindi $T = x_1 \frac{1 - \frac{vu'}{c^2}}{v - u'}$, sic-

ché v può assumere ogni valore inferiore a c . Supponendo $u' > c$ avremo sempre la possibilità di scegliere v in modo tale che T sia negativo. Orbene, commenta Einstein, "dovrebbe esistere un fenomeno di trasmissione tale che il segnale giungerebbe alla meta prima di essere stato spedito: l'effetto precederebbe la causa. Sebbene questo risultato non sia logicamente inammissibile, esso contraddice troppo tutte le nostre conoscenze sperimentali perché non consideriamo come dimostrata l'impossibilità di avere $u' > c$ "⁸⁷.

Qui si esaurisce la trattazione cinematica, quella che il giovane Albert indicava come interessante da scandagliare all'amico Habicht, nella quarta memoria del 1905; ma, come sappiamo, essa

⁸⁷ Ivi, p. 77.

è dedicata all'elettrodinamica dei corpi in moto, versante al quale Einstein dedica la seconda parte di questo lavoro. In tale ambito, il Nostro assume anzitutto che le equazioni dell'elettrodinamica, operando con le leggi di trasformazione di Lorentz, sono valide nella stessa forma in due diversi e distinti sistemi inerziali. Si giunge così a stabilire le leggi di trasformazione per le componenti del campo elettrico e magnetico. Che la fase delle onde elettromagnetiche sia invariante attraverso le trasformazioni di Lorentz impone poi una correzione delle formule dell'effetto Doppler⁸⁸ e la considerazione dell'aberrazione⁸⁹. Nell'ultimo paragrafo, Einstein dedica l'attenzione alla dinamica di una particella carica, identificata con l'elettrone, giungendo a esprimere correttamente la formula dell'energia cinetica di un punto materiale di massa m .

9. Massa ed energia

La brevissima quinta memoria del 1905 è intitolata *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (*L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*). Sulla base del principio di relatività, delle equazioni di Maxwell e Hertz per lo spazio vuoto legate all'espressione maxwelliana per l'energia elettromagnetica dello spazio, il fisico tedesco rende esplicita una conseguenza già presente nella teoria della relatività ristretta, ossia che "la massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia"⁹⁰, la cui espressione matematica $E = mc^2$ è nota universalmente come "equazione di Einstein". Per avere una visione sufficientemente chiara del percorso che conduce al riconoscimento di questo risultato tanto fondamentale quanto tristemente famoso, perché associato

⁸⁸ Il fenomeno, che prende il nome dal fisico austriaco C.J. Doppler, è presente tanto in acustica quanto in ottica. Si tratta del fatto che una fonte luminosa o sonora nell'avvicinarsi a un osservatore in quiete presenta una frequenza più alta rispetto a quando la stessa fonte si allontana. Nel caso della luce, cioè di un fascio di raggi luminosi, se la fonte si allontana dall'osservatore si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il rosso; se la fonte si avvicina all'osservatore, si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il blu.

⁸⁹ Si tratta dell'apparente spostamento degli astri rispetto alle loro posizioni reali. Questo spostamento apparente è dovuto al ritardo con il quale l'osservatore percepisce la luce proveniente dagli astri medesimi. Il moto di un astro, come è rilevato dall'osservatore, risulta infatti della composizione dei movimenti della Terra e dell'astro e dipende dalla velocità della luce.

⁹⁰ A. Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, in "Annalen der Physik" (4) 18, 1905; trad. it. di E. Ioli, *L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*, in Stachel, *op. cit.*, p. 174.

è dedicata all'elettrodinamica dei corpi in moto, versante al quale Einstein dedica la seconda parte di questo lavoro. In tale ambito, il Nostro assume anzitutto che le equazioni dell'elettrodinamica, operando con le leggi di trasformazione di Lorentz, sono valide nella stessa forma in due diversi e distinti sistemi inerziali. Si giunge così a stabilire le leggi di trasformazione per le componenti del campo elettrico e magnetico. Che la fase delle onde elettromagnetiche sia invariante attraverso le trasformazioni di Lorentz impone poi una correzione delle formule dell'effetto Doppler⁸⁸ e la considerazione dell'aberrazione⁸⁹. Nell'ultimo paragrafo, Einstein dedica l'attenzione alla dinamica di una particella carica, identificata con l'elettrone, giungendo a esprimere correttamente la formula dell'energia cinetica di un punto materiale di massa m .

9. Massa ed energia

La brevissima quinta memoria del 1905 è intitolata *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (*L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*). Sulla base del principio di relatività, delle equazioni di Maxwell e Hertz per lo spazio vuoto legate all'espressione maxwelliana per l'energia elettromagnetica dello spazio, il fisico tedesco rende esplicita una conseguenza già presente nella teoria della relatività ristretta, ossia che "la massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia"⁹⁰, la cui espressione matematica $E = mc^2$ è nota universalmente come "equazione di Einstein". Per avere una visione sufficientemente chiara del percorso che conduce al riconoscimento di questo risultato tanto fondamentale quanto tristemente famoso, perché associato

⁸⁸ Il fenomeno, che prende il nome dal fisico austriaco C.J. Doppler, è presente tanto in acustica quanto in ottica. Si tratta del fatto che una fonte luminosa o sonora nell'avvicinarsi a un osservatore in quiete presenta una frequenza più alta rispetto a quando la stessa fonte si allontana. Nel caso della luce, cioè di un fascio di raggi luminosi, se la fonte si allontana dall'osservatore si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il rosso; se la fonte si avvicina all'osservatore, si avrà uno spostamento delle righe spettrali verso il blu.

⁸⁹ Si tratta dell'apparente spostamento degli astri rispetto alle loro posizioni reali. Questo spostamento apparente è dovuto al ritardo con il quale l'osservatore percepisce la luce proveniente dagli astri medesimi. Il moto di un astro, come è rilevato dall'osservatore, risulta infatti della composizione dei movimenti della Terra e dell'astro e dipende dalla velocità della luce.

⁹⁰ A. Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, in "Annalen der Physik" (4) 18, 1905; trad. it. di E. Ioli, *L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*, in Stachel, *op. cit.*, p. 174.

agli eventi tremendi che ne determinarono la conferma sperimentale (ci riferiamo alle esplosioni nucleari che posero fine alla Seconda guerra mondiale) sono necessarie alcune considerazioni preliminari. Prima della formulazione della teoria della relatività, i fisici erano abituati a lavorare e a pensare, tra gli altri, con due fondamentali principi: il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione della massa, considerati completamente indipendenti l'uno dall'altro. Dopo la memoria del 1905, che abbiamo ripercorso nei suoi aspetti fondamentali, le cose non stanno più in quei termini: d'ora in avanti i due fondamentali principi di conservazione devono essere considerati come riuniti in un unico solidissimo principio.

Alla luce delle premesse sopra esposte consideriamo un corpo che si muove con velocità v e supponiamo che assorba, in quanto investito da una radiazione, una quantità di energia E_0 che tuttavia non ne altera la velocità. Ne consegue che il corpo in oggetto subisce un incremento della propria energia pari a

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

E_0 , naturalmente, rappresenta l'energia acquisita valutata da un sistema di coordinate di riferimento che si muove con il corpo stesso. Tenuto conto che l'energia cinetica, dopo la teoria della relatività

ristretta, non è più data dalla nota formula $\frac{1}{2}mv^2$, ma da $\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,

allora l'energia del nostro corpo sarà:

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ne consegue: in primo luogo, che il corpo in oggetto ha, possiamo dire, la stessa energia di un corpo di massa $m + E_0/c^2$ che si muove con

una velocità v ; in secondo luogo, che un corpo che assorbe una certa quantità di energia E_0 accresce la sua massa inerziale della quantità E_0/c^2 , sicché la massa inerziale non è una costante di un corpo, ma varia in relazione ai mutamenti energetici del corpo stesso; infine, la massa inerziale di un sistema di corpi può esser considerata come una misura dell'energia del sistema, sicché il principio di conservazione della massa di un sistema viene a identificarsi con il principio di conservazione dell'energia, e resta valido finché il sistema non riceve né emette energia. Quest'ultima deduzione apparirà più chiara se la formula che ci dà l'energia viene espressa come di seguito:

$$E = \frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Non è difficile verificare che mc^2 non è altro che l'energia posseduta dal corpo considerato da un sistema di coordinate di riferimento che si muove con il corpo medesimo, prima che esso assorba l'energia E_0 .

LA TEORIA DELLA GRAVITAZIONE

1. Nuovi orizzonti

La pubblicazione degli scritti del 1905 e ciò che accadde dopo di essi ebbe un'influenza formidabile sui destini materiali di Einstein e sulla formazione della sua personalità più matura. Anzi tutto significarono l'accettazione di Albert da parte della comunità scientifica. Se pochi anni prima, appena laureato al Politecnico, ogni tentativo di seguire la strada della ricerca affiancando uno dei valenti professori che ne conoscevano i vizi e le virtù era miseramente caduto nel vuoto, già nel 1908 era *Privatdozent* a Berna e nel 1909, dal momento che si era liberato un posto per ciò che oggi potremmo chiamare professore associato o di seconda fascia, per distinguerlo dal docente ordinario, detentore vero e proprio di una cattedra, passa a Zurigo. Nel 1911 gli viene offerto l'ordinariato presso l'Università di lingua tedesca di Praga, dove resterà solo un anno e mezzo⁹¹. Nel gennaio del 1912 è oggetto di una proposta di sistemazione analoga, con scadenza decennale, all'Università di Zurigo. Albert accetta.

Altri, tuttavia, progettavano sulla sua vita. Planck e Nernst lo volevano a Berlino. Per raggiungere l'obiettivo, i due scienziati pensarono opportuno rendergli visita a Zurigo, nell'estate del 1913, muniti di pazienza e di argomenti davvero convincenti. Le condizioni che venivano offerte al giovane scienziato tedesco erano effettivamente molto allettanti, ma potevano essere inficiate da un'insidia intrinseca devastante. Ad appena trentasei anni di età, Einstein sarebbe stato eletto alla prestigiosa Accademia prussiana delle scien-

⁹¹ Intanto, il chimico fisico W.H. Nernst, che si era sempre interessato attivamente all'organizzazione della ricerca, sfruttando i suoi eccellenti rapporti con l'industriale belga Ernest Solvay, lo convinse a sponsorizzare, come diremmo oggi, una conferenza dove sarebbero convenuti tutti i fisici che si occupavano dei fenomeni quantici per fare il punto della situazione a dieci anni dal lavoro capitale di Max Planck. Einstein non solo vi fu invitato, ma ebbe anche l'incarico di relazionare sullo stato dei calori specifici.

ze, nomina che gli avrebbe valso, sul piano concreto, uno stipendio speciale. Non solo, sarebbe stato chiamato a guidare, come direttore, il settore scientifico dell'Istituto Kaiser Wilhelm che si stava erigendo, e, non avendo obblighi relativi all'insegnamento, avrebbe potuto dedicarsi interamente alla ricerca godendo della collaborazione dei migliori scienziati tedeschi del momento, se ne avesse richiesto l'apporto. Ciò che poteva compromettere irrimediabilmente tutta l'operazione consisteva in un adempimento formale, ma che Einstein considerava sostanziale: la cittadinanza tedesca. Le assicurazioni di Planck e Nernst su questo punto così dolente furono evidentemente convincenti, giacché Albert accettò di buon grado il trasferimento a Berlino⁹².

I rapporti con Mileva, nel frattempo, si erano irrimediabilmente deteriorati: ormai vigeva solo un sentimento di rispetto formale, e anche questo subordinato al fatto di evitare qualsiasi atto o atteggiamento sgradevole e tale da procurare perdite inopportune di tempo e di energie. La famiglia si trasferì comunque a Berlino nell'aprile del 1914, ma già nell'estate Mileva aveva pensato bene di tornarsene a Zurigo con i due figli. Era la fine, anche di fatto, del matrimonio, che infatti fu sciolto ufficialmente e consensualmente nel 1919, anno in cui Einstein avrebbe sposato la seconda cugina Elsa, divorziata con due figlie.

Già, il 1914! L'anno funesto che segnò l'inizio di quella che fu propriamente chiamata la Grande Guerra. Durante le prime fasi del conflitto, le più eminenti personalità della cultura tedesca redassero un vero e proprio documento, dove, tra le altre cose, si identificava la cultura germanica con il militarismo, si esaltava la profondità della scienza tedesca e si derideva, per la sua superficialità e leggerezza, quella francese e anglosassone. In un clima ormai arroventato, Einstein, che da anni era interamente preso dal problema della gravitazione, si diede attivamente daffare a sostegno di un'iniziativa tesa a contrastare la vergognosa e ignobile esaltazione della germanicità, o meglio, prussianità, avanzata da un collega che, con coraggio, preparava un *Manifesto agli europei* di palese ispirazione pacifista.

⁹² In realtà Einstein dovette in seguito cedere e riacquisire la cittadinanza tedesca, che abbandonerà di nuovo, e per sempre, nel 1933.

2. Preliminari

A una teoria che andasse oltre l'ambito inerziale proprio della memoria elaborata nel 1905 in termini di elettrodinamica dei corpi in moto, il fisico tedesco aveva iniziato a lavorare nel 1907; otto anni dopo, tra grandi difficoltà, l'obiettivo era raggiunto: nel 1916 entrava in scena, sul palcoscenico della scienza fisica, e non solo, la memoria intitolata *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* (*I fondamenti della teoria della relatività generale*), anch'essa pubblicata negli "Annalen der Physik".

A scanso di facili equivoci, che sono sempre in agguato quando ci si lasci andare alla tentazione della generalizzazione, quasi ciò stesse a significare estendere puramente e semplicemente dei domini di validità, Einstein mette subito in chiaro che con "l'espressione 'principio generale di relatività', vogliamo intendere la seguente affermazione: tutti i corpi di riferimento K, K' , eccetera sono equivalenti ai fini della descrizione dei fenomeni naturali (formulazione delle leggi generali della natura), qualunque possa essere il loro stato di moto. Prima però di procedere oltre, va sottolineato che questa formulazione dovrà venir sostituita da una più astratta"⁹³.

Focalizziamo dunque la nostra attenzione sul fatto che stiamo parlando di qualsiasi stato di moto: ci riferiamo cioè non solo al moto inerziale, rettilineo e uniforme. Immaginiamo allora di viaggiare, come passeggeri, a bordo di un'automobile lanciata a velocità costante e uniforme; come ben sappiamo, se il moto dell'auto è veramente uniforme, noi, all'interno, non percepiremo affatto questo moto e potremmo ben interpretare tutto quanto ci accade intorno come se la vettura fosse in quiete e fosse invece la strada sottostante a muoversi. All'improvviso, tuttavia, ci sentiamo irrimediabilmente spinti con violenza in avanti. Dopo un attimo di stordimento ci chiediamo, preoccupati, che cosa può essere accaduto. Non è difficile rispondere: l'automobile non corre più uniformemente lungo una retta e noi siamo stati oggetto di una brusca frenata da parte del guidatore, che ha decelerato il mezzo. Il nuovo stato di cose può persino farci balenare l'idea che quanto è accaduto ci impedisce di sostenere che le stesse leggi meccaniche sono valide rispetto alla nostra auto quando quest'ultima si muove con un moto diverso da quello uniforme, come invece lo erano in precedenza o, allo stesso

⁹³ Einstein, *Relatività...*, cit., p. 92.

modo, con la vettura in stato di quiete. Di certo, il principio galileiano di relatività non è più valido rispetto all'automobile che ha decelerato; anzi, proprio al contrario del principio generale di relatività, ci sembra di dover attribuire al moto non uniforme una specie di carattere assoluto, una realtà assoluta. Vedremo che le cose stanno in termini ben diversi.

3. Massa inerziale e massa gravitazionale

Tutte le volte che solleviamo un oggetto, ad esempio una palla, e poi lo lasciamo cadere, non stiamo certo a interrogarci sul perché esso cade verso il basso, a terra. Come abbiamo a suo tempo sottolineato con lo stesso Einstein, l'abitudine ci porta a dare per scontato l'esito e a rendere superflua la domanda, alla quale risponderemmo comunque prontamente dicendo che il fenomeno ha luogo perché l'oggetto, la nostra palla, è attratta dalla Terra. Naturalmente, un fisico che si trovasse casualmente al nostro fianco darebbe una risposta diversa, fondata sull'impossibilità di azioni a distanza. È infatti sempre necessario che tra la palla e la Terra intervenga un intermediario, così come accade tra una calamita e la limatura di ferro. Se in quest'ultimo caso si ha la presenza di un campo magnetico, nel primo vi sarà la presenza di un campo gravitazionale. L'azione esercitata dalla Terra sulla palla è chiaramente indiretta e, come l'esperienza ci insegna, diminuisce di intensità quanto più grande si fa la distanza tra l'oggetto e il nostro pianeta, secondo una legge ben determinata. Tuttavia, rispetto ai campi elettrico o magnetico, quello gravitazionale presenta una caratteristica peculiare, che è necessario esplicitare in modo da precisare anche gli ambiti di validità del nostro esempio. Afferma infatti il fisico tedesco: "I corpi che si muovono sotto l'unica influenza di un campo gravitazionale ricevono un'accelerazione che *non dipende minimamente né dalla materia né dallo stato fisico del corpo in questione*. Per esempio, un pezzo di piombo e un pezzo di legno cadono esattamente nello stesso modo in un campo gravitazionale (nel vuoto) quando li lasciamo cadere o da uno stato di quiete o con la stessa velocità iniziale"⁹⁴.

Detto in altri termini, per la seconda legge della dinamica newtoniana, $F = ma$, ossia, la forza è data dal prodotto della massa iner-

⁹⁴ Ivi, p. 94.

ziale m , che è una costante caratteristica del corpo accelerato, per l'accelerazione a . Ovvero

$$\text{forza} = \text{massa inerziale} \times \text{accelerazione.}$$

Ma se a causare l'accelerazione è la stessa gravitazione, allora dovremo scrivere

$$\text{forza} = \text{massa gravitazionale} \times \text{intensità del campo gravitazionale,}$$

dove la massa gravitazionale è anch'essa una costante caratteristica del corpo. Sicché l'accelerazione sarà data da:

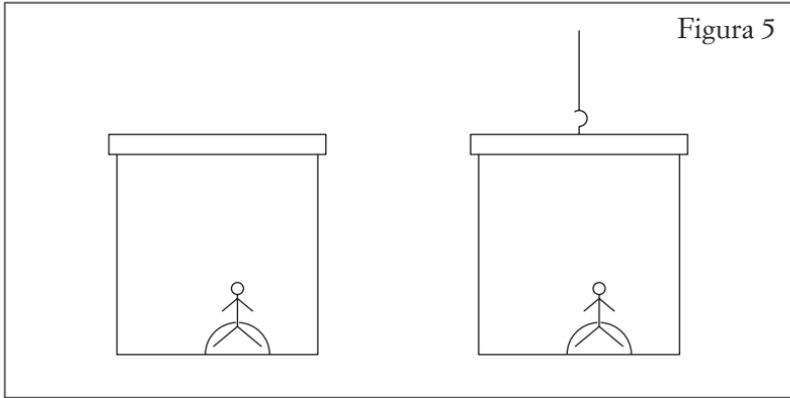
$$\text{accelerazione} = \frac{\text{massa gravitazionale}}{\text{massa inerziale}} \times \text{intensità del campo gravitazionale.}$$

Ora, come del resto l'esperienza ci insegna, noi sappiamo che per un campo gravitazionale dato, l'accelerazione è indipendente dalla natura e dallo stato dei corpi, è cioè sempre la stessa; ma allora il rapporto fra la massa gravitazionale e quella inerziale deve allo stesso modo valere per tutti i corpi, il che ci conduce alla legge secondo cui "la massa *gravitazionale* di un corpo è uguale alla sua massa *inerziale*"⁹⁵.

L'uguaglianza appena raggiunta e affermata avrà, come stiamo per accertare, un ruolo importante per la possibilità di poter affermare il postulato generale di relatività. Immaginiamo una larga porzione di spazio vuoto, così distante da una qualsiasi massa apprezzabile come tale tanto da rendere in via approssimata accettabili le condizioni richieste dal principio galileiano di relatività. Per questa parte di spazio potremo così scegliere un corpo di riferimento anch'esso galileiano, rispetto al quale i punti in quiete restano in quiete e quelli in movimento perseverano nel loro stato di moto uniforme. Come corpo di riferimento potremo scegliere una casa piuttosto spaziosa costituita da un unico vano, ermeticamente sigillata da un tetto piatto, come se fosse il coperchio di un'enorme scatola. All'interno dell'unico vano è posizionato un osservatore umano, debitamente attrezzato della necessaria strumentazione. Per il nostro osservatore non esiste alcuna gravitazione, sicché dovrà ancorarsi al pavimento

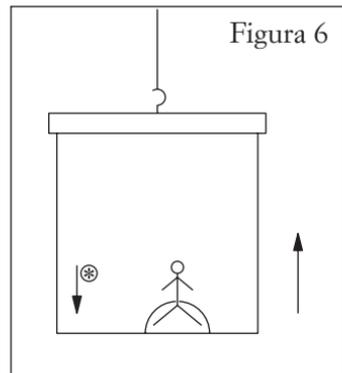
⁹⁵ Ivi, p. 95.

dal momento che il minimo urto con quest'ultimo lo farebbe salire lentamente verso quello che è il soffitto della stanza. Immaginiamo anche che al centro del tetto della casa sia predisposto un grosso e resistente gancio legato a un cavo altrettanto robusto e resistente e che dall'esterno, cioè nello spazio circostante, un individuo non ben identificato inizi a mettere in trazione la corda, ossia inizi a tirarla a sé con una forza costante (fig. 5).



La casa, e l'osservatore al suo interno, iniziano a muoversi verso l'alto con un moto uniformemente accelerato. Naturalmente, noi stiamo assistendo agli sviluppi appena descritti da una postazione di riferimento non trainata da alcuna forza. Cosa vedremo? Che con lo scorrere del tempo, il sistema casa-osservatore trascinati acquisirà una velocità dai valori enormi. E l'osservatore dentro la casa cosa penserà? Intanto, l'accelerazione subita dal sistema gli viene trasmessa dal pavimento e, se vi è ancorato in posizione eretta, avvertirà una forte pressione attraverso le gambe.

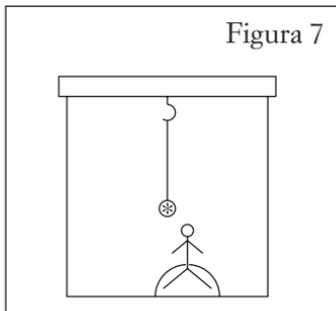
Immaginiamo adesso che il nostro osservatore lasci cadere un oggetto, ad esempio una pietra, che fino a quel momento aveva tenuto in mano (fig. 6).



L'accelerazione della casa non si trasmetterà più alla pietra: ormai svincolata dalla stretta dell'osservatore, quest'ultima si dirigerà verso il pavimento con un moto relativo accelerato, il che convincerà ancor più il nostro osservatore che, al di là della natura dell'oggetto utilizzato (una pietra o un pezzo di metallo), l'accelerazione che lo caratterizza sarà sempre la stessa. Insomma, il nostro osservatore giungerà alla conclusione di trovarsi, con la sua casa, in un campo gravitazionale costante nel tempo; e poiché non sa niente del gancio esterno, penserà che la casa è sospesa e immobile, impedendo che cada essa stessa nel campo gravitazionale. Come dovremo considerare le conclusioni tratte dal nostro osservatore: legittime o errate? A detta di Einstein, il suo modo di considerare gli eventi "non contrasta né con la ragione né con le leggi note della natura"⁹⁶. In altri termini, nonostante la nostra casa sia accelerata rispetto allo spazio galileiano, tuttavia, siamo nella felice condizione di poterla considerare come in quiete. Vi sono così buone ragioni a favore della possibilità di estendere il principio di relatività anche a corpi di riferimento accelerati gli uni rispetto agli altri. Se non valesse l'uguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale, l'osservatore non sarebbe in grado di interpretare il comportamento dei corpi esterni attraverso l'ipotesi di un campo gravitazionale, e non avrebbe neppure il diritto di supporre il suo corpo di riferimento in quiete.

Supponiamo, infine, che il nostro osservatore fissi una corda, in dotazione con altri strumenti, al centro di ciò che gli appare essere il soffitto della sua casa e che leghi la pietra in precedenza lasciata cadere all'altro estremo della corda. Quest'ultima, ovviamente, si tenderà in modo da pendere verticalmente verso il pavimento (fig. 7).

Se domandiamo al nostro osservatore così disponibile di darci una spiegazione, una ragione del fenomeno, cioè della tensione della corda, egli ci risponderà che la pietra, sospesa, subisce una forza verso il basso nel campo gravitazionale, forza che è tuttavia neutralizzata dalla tensione della corda.



⁹⁶ Ivi, p. 96.

La misura della tensione della corda, concluderà l'osservatore, è così determinata dalla massa gravitazionale della pietra. Ma un altro osservatore, libero da qualsivoglia vincolo, direbbe: la corda prende parte necessariamente al moto della casa e trasmette questo moto alla pietra appesa. La tensione della corda è tanto più grande quanto basta per produrre l'accelerazione del corpo, ciò che determina la misura della tensione e la massa inerziale della pietra.

La necessità della legge dell'uguaglianza tra la massa gravitazionale e la massa inerziale appena riaffermata mostra che "il principio generale di relatività ci pone in grado di derivare in maniera puramente teorica le proprietà del campo gravitazionale"⁹⁷. Ciò significa che possiamo conoscere il corso spazio-temporale di un qualsiasi processo naturale, così come esso si svolge nel dominio galileiano rispetto a un corpo di riferimento galileiano K . Con l'ausilio del calcolo, siamo in grado di stabilire quale apparenza viene ad assumere questo processo noto ma considerato da un corpo di riferimento K' rispetto a K . Di più: dal momento che esiste un campo gravitazionale rispetto a K' , quanto abbiamo affermato ci insegna anche in che modo il campo gravitazionale influenza il processo studiato.

Giungiamo in questo modo ad apprendere che un corpo in moto rettilineo e uniforme rispetto a K compie un moto accelerato e, in generale, curvo, rispetto al corpo di riferimento K' , ossia la nostra casa monovolume, per restare nella metafora usata in precedenza. Questa accelerazione o curvatura indica l'influenza della gravitazione sul corpo in moto da parte del campo gravitazionale vigente rispetto a K' .

Che il campo gravitazionale giochi questi scherzi sul moto dei corpi è cosa risaputa, ma per quanto riguarda la luce, rispetto a una vibrazione, un'onda elettromagnetica? La risposta, benché ciò possa lasciare perplessi o interdetti, è positiva: otterremo lo stesso risultato. Rispetto a K , che è il corpo di riferimento galileiano, il raggio di luce si propaga in linea retta con la velocità c , ma è agevole mostrare che lo stesso raggio di luce non si propaga più in linea retta rispetto alla nostra casa accelerata o, fuor di metafora, rispetto a K' . Potremo tranquillamente affermare che, in generale, un raggio di luce si propaga in linea curva allorché è in presenza di un campo gravitazionale.

⁹⁷ Ivi, p. 100.

Quest'ultimo risultato, che discende dal principio generale di relatività, è particolarmente rilevante per due motivi. In primo luogo, si tratta di un risultato che è suscettibile di conferma o smentita sperimentale. Sebbene l'incurvamento previsto dalla teoria della relatività generale sia assai piccolo, nei confronti dei campi gravitazionali di cui possiamo disporre, tuttavia, afferma il fisico tedesco, "valutato per i raggi che passano in prossimità del Sole, dev'essere di 1,7 secondi. Ciò dovrebbe rendersi manifesto nel modo seguente: le stelle fisse che sono visibili nelle vicinanze del sole e suscettibili di osservazioni durante un'eclisse totale di esso dovrebbero, in tali momenti, apparire più lontane dal sole di un angolo pari al valore sopra indicato, rispetto alla posizione che hanno per noi nel cielo quando il Sole è situato in un'altra parte del firmamento"⁹⁸. In secondo luogo, da questo stesso risultato si evince che per la teoria della relatività generale la legge della velocità della luce nel vuoto, afferma il Nostro, "non può pretendere alcuna validità illimitata. Una curvatura dei raggi di luce può infatti aver luogo soltanto quando la velocità di propagazione della luce varia con la posizione"⁹⁹. Ma se le cose stanno in questi termini, potremmo osservare con un certo giustificato sconforto, non significa far naufragare la teoria della relatività ristretta e, con essa, quella generale? Insomma, se l'invarianza di c nel vuoto costituisce uno dei due pilastri fondamentali della relatività ristretta, e se su quest'ultima affonda le proprie basi la relatività generale, l'eventualità che il principio della costanza della velocità della luce abbia una validità limitata non fa di fatto crollare l'intero edificio eretto con tanta fatica e genialità? Per non incorrere in scoramenti che solo in apparenza possono sembrare giustificati, dunque creare inutile e dannosa confusione, è lo stesso Einstein a tranquillizzarci:

In realtà non è così. Possiamo soltanto concludere che la teoria della relatività ristretta non può avere un dominio illimitato di validità; i suoi risultati sono validi soltanto finché possiamo trascurare le influenze dei campi gravitazionali sui fenomeni (per esempio sulla luce)¹⁰⁰.

Si tratta ora di accertare se la posizione einsteiniana è davvero valida e accettabile come tale. Per il momento, ciò che possiamo effetti-

⁹⁸ Ivi, p. 101.

⁹⁹ Ivi, p. 102.

¹⁰⁰ *Ibid.*

vamente affermare è che con il principio generale di relatività possiamo derivare teoricamente, cioè solo attraverso il calcolo, l'influenza di un campo di gravitazione sul corso di un processo naturale, le cui leggi sono conosciute in assenza di un campo di questo tipo. Non è poco. A questo risultato se ne aggiunge un altro che, potremmo dire, ci appare ancora molto più rilevante: la teoria della relatività generale, come vedremo, ci offre infatti anche la chiave per determinare le leggi dello stesso campo gravitazionale.

Orbene, sappiamo che ci sono dei domini spazio-temporali, i quali, con buona approssimazione, si comportano in modo galileiano con un'opportuna scelta del corpo di riferimento, domini dove insomma non vi sono campi gravitazionali. Consideriamo allora un dominio di questo genere rispetto a un corpo di riferimento K' comunque mosso; ebbene, relativamente a K' esiste un campo gravitazionale che varia rispetto allo spazio e al tempo. Va da sé che il carattere di questo campo gravitazionale dipenderà dal moto che anima il sistema K' . Dice allora il fisico tedesco:

Secondo la teoria della relatività generale, la legge generale del campo gravitazionale deve essere soddisfatta per tutti i campi gravitazionali così ottenibili. Sebbene non si possano affatto produrre in questo modo tutti i campi gravitazionali possiamo tuttavia coltivare la speranza di riuscire a derivare la legge generale della gravitazione da siffatti campi gravitazionali di tipo speciale¹⁰¹.

Raggiungere questa meta ha significato superare un ostacolo di grande difficoltà che, per essere affrontato, comporta un imprescindibile approfondimento della nostra concezione del continuo spazio-temporale: un approfondimento che s'impone direttamente all'attenzione appena ci si concentra sul comportamento degli orologi e dei regoli nei riguardi di un corpo in rotazione.

4. Come si comportano gli orologi e i regoli

Torniamo al nostro dominio spazio-temporale privo di campo gravitazionale rispetto a un sistema di riferimento S , di cui sceglieremo lo stato di moto. Rispetto al dominio considerato S , esso sarà un corpo o sistema di riferimento galileiano, sicché i risultati della teoria della relatività ristretta resteranno validi e legittimi ri-

¹⁰¹ Ivi, p. 103.

spetto a KS. Consideriamo ora lo stesso dominio riferito a S' , cioè a un secondo corpo di riferimento, che ruota uniformemente rispetto a S . Per rendere più semplice la spiegazione, si immagini S' come un disco circolare piatto che ruota uniformemente sul proprio piano intorno al suo centro (fig. 8).

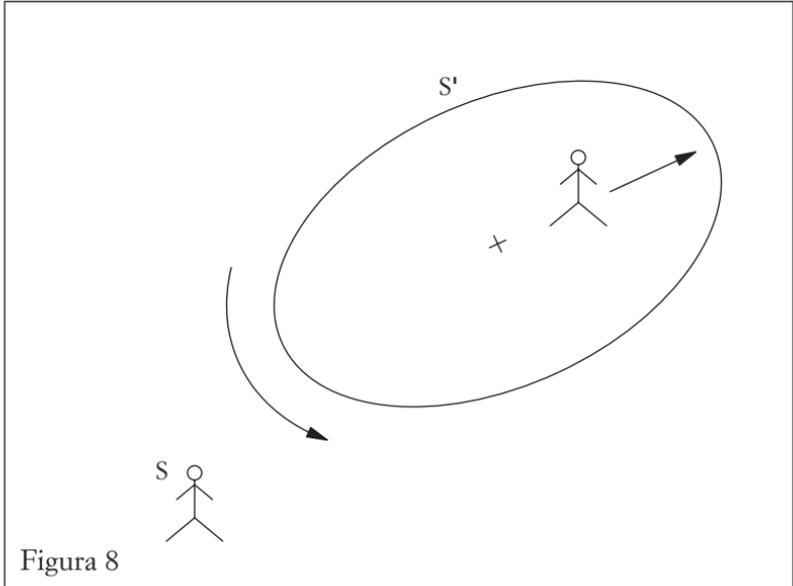


Figura 8

Orbene, un osservatore seduto su S' in posizione eccentrica, cioè spostata rispetto al centro del corpo di riferimento, avverte in modo distinto e ben identificabile una forza che, in direzione radiale lo spinge verso l'esterno, verso la periferia del disco. Come interpreterà questo fenomeno un secondo osservatore, completamente esterno ed estraneo al corpo di riferimento, e in quiete rispetto all'originario corpo di riferimento S ? Sicuramente come un effetto dell'inerzia, come una forza centrifuga. E cosa penserà, da parte sua, l'osservatore seduto, dunque interno al corpo di riferimento, su S' ? Anzitutto, potrà ben ritenere il suo disco un corpo di riferimento in quiete, ed è legittimato a farlo in base al principio generale di relatività. Posto ciò, penserà e valuterà la forza che avverte agente su di lui e non solo su di lui, ma anche su tutti i corpi che sono in quiete rispetto al disco, come un effetto del campo gravitazio-

nale, sebbene sia consapevole del fatto che tale campo è distribuito in modo diverso e non controllabile con la teoria newtoniana della gravitazione. Nel caso che qui ci interessa, in effetti, il campo gravitazionale perde qualsiasi consistenza, si annulla letteralmente al centro del disco, mentre cresce proporzionalmente alla distanza dal centro verso la periferia. Questo “dettaglio”, non turba né disturba per niente la fede del nostro osservatore nei confronti del principio generale di relatività, che anzi si appresta a compiere alcuni esperimenti per giungere a stabilire definizioni esatte dei dati temporali e spaziali rispetto alla sua posizione.

E, infatti, per prima cosa l'osservatore in S' sceglie la disposizione e colloca due orologi di identica costruzione: il primo orologio trova posto al centro del disco, il secondo nella sua parte periferica; ciò significa che i due orologi sono in quiete rispetto al disco medesimo. Quale ritmo dovremo attribuire ai due orologi se intendiamo considerarli da S , cioè dal riferimento galileiano non ruotante? Forse il medesimo ritmo, la stessa marcia cadenzata? Sicuramente no! Il motivo è semplice: visto da S , l'orologio posto al centro del disco non ha velocità, mentre quello sulla periferia, sul bordo del disco, in virtù della rotazione è in moto rispetto a S . Così, in base a quanto si è accertato circa il comportamento degli orologi nel contesto specifico della teoria della relatività ristretta, dovremo concludere che l'orologio periferico, considerato da S , ha un ritmo “permanentemente più lento”¹⁰² di quello dell'orologio collocato al centro del nostro disco. Un osservatore seduto a fianco dell'orologio centrale sul disco registrerebbe lo stesso effetto. Dice Einstein:

In ogni campo gravitazionale, un orologio camminerà con ritmi più o meno rapidi a seconda della posizione in cui l'orologio stesso è situato (in quiete). Per questa ragione non è possibile ottenere una definizione ragionevole del tempo servendosi di orologi collocati in quiete rispetto al corpo di riferimento¹⁰³.

La stessa difficoltà si incontra allorché s'intende offrire, per l'esempio in questione, una definizione accettabile delle coordinate spaziali. Il nostro osservatore, in questo caso, dispone adesso di un regolo graduato, supposto più corto rispetto al raggio del disco. Egli applicherà il suo strumento tangenzialmente alla periferia del

¹⁰² *Ivi*, p. 105.

¹⁰³ *Ibid.*

disco. Ebbene, cosa vedrà l'osservatore posto su S ? Si accorgerà che la lunghezza del regolo è minore di 1, dal momento che, per la teoria della relatività ristretta, i corpi in moto subiscono una contrazione nella direzione del moto. Ma se il nostro osservatore interno al corpo di riferimento S' applica il suo regolo nella direzione del raggio del disco, l'osservatore in S non risconterà alcuna contrazione. Con il fisico tedesco possiamo allora concludere nei seguenti termini.

Se l'osservatore misura con il proprio regolo dapprima la circonferenza e poi il diametro del disco, dividendo l'uno per l'altro egli non otterrà come quoziente il ben noto numero $\pi = 3,14 (\dots)$, ma un numero più grande, mentre naturalmente, per un disco in quiete rispetto a S quest'operazione dovrebbe dare esattamente π . Ciò dimostra che le proposizioni della geometria euclidea non possono risultare esattamente valide sul disco rotante, e neppure in generale in un campo gravitazionale, per lo meno se attribuiamo al regolo in tutte le posizioni e in ogni orientazione la lunghezza 1. Perde quindi il significato anche il concetto di retta. Non siamo perciò in grado di definire esattamente le coordinate x, y, z , rispetto al disco, per mezzo del metodo usato nella teoria della relatività ristretta. Finché tuttavia non siano state definite le coordinate e i tempi degli eventi, neanche le leggi naturali in cui figurano queste coordinate e questi tempi possono avere un significato esatto. In tal modo tutte le nostre conclusioni basate sulla relatività generale sembrerebbero messe in discussione¹⁰⁴.

Il condizionale è d'obbligo. Le cose non stanno, infatti, esattamente in questi termini, e ce ne renderemo facilmente conto operando quell'approfondimento che, come in precedenza annunciato, si rende ormai assolutamente indispensabile.

5. Il continuo

Per prima cosa dovremo riflettere attentamente sul significato delle nozioni di "continuo euclideo" e "continuo non euclideo". Einstein in merito si serve di un esempio tanto semplice quanto efficace: quello della tavola di marmo. Un oggetto quale una tavola di marmo è un continuo nel senso che a partire da un punto qualsiasi della sua superficie scelto a caso, possiamo giungere a un

¹⁰⁴ Ivi, p. 106.

altro punto qualsiasi passando sempre da un punto a un punto più vicino, senza dover compiere alcuna acrobazia. Oltre alla tavola avremo a disposizione un numero sufficientemente grande di regoli di eguale lunghezza, in ogni caso di dimensioni molto più piccole rispetto alla superficie di marmo. Disporremo quattro dei nostri regoli sulla tavola, in modo da costruire un quadrato al quale, ripetendo la procedura, ne aggiungeremo altri facendo bene attenzione che ciascun quadrato presenti un lato in comune con il suo precedente. L'operazione avrà termine allorché l'intera lastra di marmo sarà ricoperta in modo che ogni lato di un quadrato appartenga a due quadrati e ogni vertice a quattro quadrati. Per controllare che le figure siano tutte effettivamente rispondenti alle proprietà del quadrato utilizzeremo i restanti regoli, con i quali misureremo le diagonali. Se l'operazione si realizza potremo ben affermare, con il Nostro, che "i punti della lastra di marmo costituiscono un continuo euclideo rispetto al regolo che è stato usato come 'intervallo'. Scegliendo un vertice di un quadrato come 'origine', io posso caratterizzare qualunque altro vertice di uno dei nostri quadrati in riferimento a questa origine per mezzo di due numeri. Mi occorre soltanto indicare quanti regoli devo superare quando, partendo dall'origine, procedo verso 'destra' e poi 'verso l'alto' onde arrivare al vertice del quadrato preso in considerazione. Questi due numeri saranno allora le 'coordinate cartesiane' di questo vertice in riferimento al 'sistema di coordinate cartesiane' determinato dalla disposizione dei regoli"¹⁰⁵.

Ma immaginiamo il caso che, nel costruire il nostro continuo, qualcosa non vada per il verso giusto, ovvero subentrino delle circostanze che modificano l'esito della nostra costruzione. A un certo punto, infatti, ci accorgiamo, non senza una evidente preoccupazione, che i nostri regoli si dilatano man mano che, in proporzione, la temperatura aumenta a causa di un fuoco che brucia proprio sotto il centro stesso della tavola di marmo. Che cosa accade? Che mentre i regoli periferici possono ancora essere fatti coincidere con la lastra, quelli presenti nella zona centrale della tavola, dove più intensamente si fa sentire l'azione del fuoco sottostante, si dilatano, creando così un vero e proprio disordine nella costruzione

¹⁰⁵ Ivi, p. 108.

dei quadrati. La conseguenza è che, rispetto agli intervalli unitari (cioè i nostri regoli), la lastra non è più identificabile come un continuo cartesiano euclideo e non potremo più definire le coordinate cartesiane.

Prima di esser preda della inevitabile disperazione, è opportuno considerare un'ulteriore possibilità, una vera e propria via di uscita. Si tratta di assumere che tutti i regoli, di ogni specie e di qualsiasi materiale, si comportino nello stesso identico modo nei riguardi della temperatura, sicché un eventuale effetto di quest'ultima possa essere colto solo considerando il comportamento geometrico dei regoli. Posto ciò, potremo procedere assegnando la distanza 1 a due parti della lastra di marmo quando questi ultimi coincidono con le due estremità di uno dei regoli. Ovviamente dovremo rinunciare al metodo delle coordinate cartesiane e sostituirlo con un altro metodo che non presupponga la validità della geometria euclidea per i corpi rigidi.

Al grande matematico C.F. Gauss dobbiamo la creazione di una procedura in grado di poter risolvere il problema. Vediamo di cosa si tratta. Consideriamo ancora una volta il nostro tavolo di marmo. Sulla superficie della piastra potremo tracciare arbitrariamente delle curve che, con Einstein, denomineremo u e indicheremo con un numero (fig. 9).

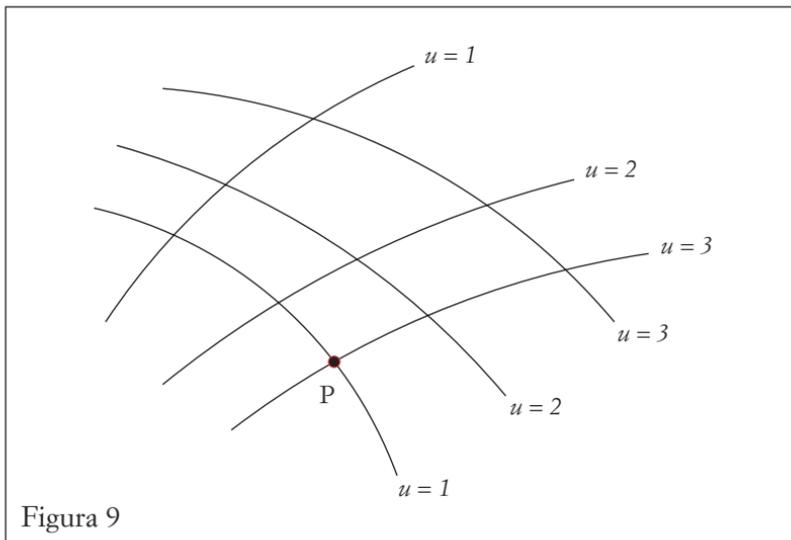


Figura 9

Tra $u = 1$ e $u = 2$ o tra $u = 2$ e $u = 3$ potremo ben immaginare tante altre curve quanti sono i numeri reali compresi tra 1 e 2 o 2 e 3. Tutto questo significa che, attraverso una infinità di curve, finiremo per giungere a coprire interamente tutta la superficie della lastra di marmo. Nel tracciare le curve dovremo solo avere l'accortezza di fare in modo che esse non si intersechino e che, per ogni punto della superficie, passi una e una sola curva. Possiamo tranquillamente affermare che ogni punto della nostra lastra di marmo avrà in tal modo un valore definito di u . Prendiamo adesso in considerazione la possibilità di tracciare arbitrariamente un secondo sistema di curve, che chiameremo v e indicheremo, come del resto si è fatto per il sistema precedente, con un numero. Non c'è dubbio che, una volta compiuta l'operazione, a ogni punto della superficie della lastra di marmo corrisponderà un valore u e un valore v . Ebbene, questi due punti sono, per l'appunto, le coordinate gaussiane della superficie considerata. Così, se il punto P ha le coordinate gaussiane $u = 3$, $v = 1$, a punti estremamente vicini, ad esempio P e P', corrisponderanno le coordinate:

$$P : u, v$$

$$P' : u + du, v + dv \text{ (dove } du \text{ e } dv \text{ sono numeri piccolissimi).}$$

Con d_s , indicheremo la distanza, anch'essa espressa da un numero estremamente piccolo. Avremo così:

$$d_s^2 = g_{11} du^2 + 2g_{12} du dv + g_{22} dv^2,$$

dove g_{11} , g_{12} , g_{22} sono grandezze che dipendono in modo definito da u e v e determinano il comportamento dei regoli rispetto alle u e alle v , quindi anche relativamente alla superficie del nostro tavolo. Come precisa il fisico tedesco, potremmo dire che "le coordinate gaussiane non sono altro che un'associazione fra due serie di numeri e i punti della superficie considerata di natura tale che a punti spazialmente vicini risultino associati valori numerici pochissimo differenti fra loro. Queste considerazioni sono innanzitutto valide per un continuo a due dimensioni"¹⁰⁶. In ogni caso, anche in presenza di più di

¹⁰⁶ Ivi, p. 111.

due dimensioni, ossia tre, quattro... dimensioni, il modello di Gauss resta perfettamente applicabile e affidabile. Prendiamo ad esempio il caso di un continuo a quattro dimensioni. Potremo rappresentarlo nel modo seguente. In ogni punto del continuo associeremo quattro numeri x_1, x_2, x_3, x_4 , che chiameremo coordinate. Ma sappiamo che a punti vicini corrispondono valori vicini delle coordinate. Così, se si associa una distanza d_S , misurabile e fisicamente definita, ai punti adiacenti P e P', allora otterremo la formula:

$d_S^2 = g_{11} dx_1^2 + 2g_{12} dx_1 dx_2 + \dots + g_{44} dx_4^2$, dove le g_{ij} hanno valori che variano con la posizione occupata nel dominio.

È opportuno tenere bene a mente che solo nel caso in cui il continuo considerato è euclideo potremo associare ai punti del continuo le coordinate x_1, \dots, x_n , e dunque poter correttamente scrivere:

$$d_S^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2.$$

In tal caso, nel continuo quadridimensionale sussistono relazioni che possono essere dette analoghe a quelle valide nelle nostre misure tridimensionali. L'espressione gaussiana del d_S è tuttavia possibile solo quando zone particolarmente piccole del continuo in questione possono essere viste e considerate come continui euclidei. Una zona di questo genere potrebbe, ad esempio, essere un particolare ambito della nostra lastra di marmo, ed esattamente quello in cui la temperatura è praticamente costante e dove, di conseguenza, il comportamento geometrico dei regoli è quasi euclideo. In definitiva, conclude Einstein,

il sistema di coordinate gaussiane è una generalizzazione logica del sistema di coordinate cartesiane. Esso risulta applicabile anche a continui non euclidei, ma solo quando, rispetto alla "misura" definita "distanza", piccole parti del continuo considerato si comportino in modo euclideo, con approssimazione tanto maggiore quanto più piccola è la parte del continuo sotto la nostra osservazione¹⁰⁷.

Siamo ora in grado di risolvere la difficoltà che in precedenza avevamo sollevato a proposito della costanza della velocità della luce c ;

¹⁰⁷ Ivi, p. 112.

prima di procedere fisseremo tuttavia l'attenzione sul continuo spazio-temporale della teoria della relatività ristretta, considerato come un continuo euclideo, ovvero ci soffermeremo doverosamente sull'opera svolta in tal senso dal matematico di origine lituana H. Minkowski, che fu insegnante del giovane Albert al Politecnico federale di Zurigo. Se, come sembra, Minkowski si era fatto un'impressione non certo lusinghiera di quello studente che raramente aveva avuto modo di riconoscere tra i frequentatori delle sue lezioni, la sua valutazione e considerazione della teoria elaborata nel 1905 sulla base del principio di relatività era ben altra.

6. Lo spazio-tempo della relatività ristretta

Nel 1908, in occasione di un congresso tenuto a Colonia, di fronte a un pubblico numeroso formato da matematici, fisici e filosofi, Minkowski pronunciò un intervento intitolato *Raum und Zeit* (*Spazio e tempo*) destinato a restare nella storia. Minkowski esordiva nei seguenti termini:

Signori! Le considerazioni che sono per esporvi sullo spazio e sul tempo, sono cresciute nel campo della fisica sperimentale; in ciò sta la loro forza. Esse hanno una tendenza radicale. Da quest'ora in poi lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, debbono piombar nelle tenebre e soltanto una specie di unione dei due deve serbare la sua individualità¹⁰⁸;

appunto, lo spazio-tempo o *continuum* spazio-temporale. A scanso di facili, ma pericolosi equivoci, Minkowski ha la premura di precisare:

Siano x, y, z , coordinate rettilinee per lo spazio, e t rappresenti il tempo. Oggetto della nostra osservazione sono sempre e soltanto, spazio e tempo insieme considerati. Non ha mai alcuno osservato un *luogo* se non ad un certo *tempo*, né un *tempo* se non in un luogo determinato. Io rispetto ancora il dogma che spazio e tempo hanno ciascuno una significazione propria indipendente. Un punto-spazio, in un punto-tempo, ossia un sistema di valori x, y, z, t , lo chiamo punto universale (*Weltpunkt*). La molteplicità di

¹⁰⁸ H. Minkowski, *Raum und Zeit*, in "Physikalischen Zeitschrift", 10, 1909; trad. it. di G. Gianfranceschi, *Spazio e tempo*, in "Il nuovo Cimento", LV, 11-12, 1909, p. 334. L'intervento fu pubblicato postumo l'anno seguente in seguito all'improvvisa quanto prematura scomparsa dell'autore.

tutti i sistemi immaginabili di valori x, y, z, t , si chiamerà universo (*Welt*). Io potrei con arditi tratti di gesso tracciar sulla tavola i 4 assi dell'universo. Ma già un asse è costituito da molecole vibranti, e compie il cammino della terra, dà quindi abbastanza da astrarre; l'astrazione un po' più grande legata col numero 4 non dà fastidio al matematico. Per non lasciar in nessuna parte un vuoto noioso ci figuriamo che in ogni tempo sia presente qualche cosa di osservabile. Per non dire materia o elettricità, per questo qualche cosa adopererò la parola sostanza¹⁰⁹.

Orbene, continua il noto matematico:

Volgiamo la nostra attenzione al punto sostanziale presente nel punto universale x, y, z, t , e ammettiamo di essere sempre in grado di riconoscere questo punto sostanziale in qualunque altro tempo. Ad un elemento di tempo dt corrispondano le variazioni dx, dy, dz , delle coordinate di spazio di questo punto sostanziale. Otteniamo allora come immagine, per così dire, del perpetuo corso di vita del punto sostanziale una curva nell'universo, una *linea universale* (*Weltlinie*) i cui punti si riferiscono univocamente al parametro $t - \infty$ a $+\infty$. Tutto l'universo risulta così scomposto in tali linee universali, e potrei senz'altro notare fin d'ora che, a mio parere, le leggi fisiche dovrebbero trovare la loro perfetta espressione come scambievoli relazioni fra queste *linee universali*. Mediante il concetto di spazio e tempo restano determinate le molteplicità $t = 0$ e le due facce $t > 0$ e $t < 0$ ¹¹⁰.

Posto ciò, Minkowski mette a confronto i due gruppi di trasformazione, quello galileiano-newtoniano e quello derivante dall'assunto della costanza della velocità della luce, ossia le ormai famose equazioni formulate da Lorentz ricavate per altra via, all'interno di un *corpus* teorico ben definito, da Einstein. L'esito è davvero rilevante: le nuove equazioni di trasformazione soddisfano alcune fondamentali condizioni e, non da ultimo, mostrano chiaramente il superamento delle diverse disarmonie o difficoltà incontrate con il vecchio gruppo. Vediamo, in ordine, di cosa si tratta.

Si considerino due punti nel continuo quadridimensionale o, detto in altri termini, due eventi. La loro reciproca posizione nel continuo quadridimensionale rispetto a un sistema di riferimento inerziale, cioè galileiano, è data attraverso le differenze dx, dy, dz delle coor-

¹⁰⁹ Ivi, pp. 335-336.

¹¹⁰ Ivi, p. 336.

dinate spaziali, e dalla differenza dt della coordinata temporale. Nei confronti di un secondo sistema di riferimento inerziale, supporremo che le analoghe differenze siano dx' , dy' , dz' , dt' . Ebbene, queste grandezze, dice Minkowski, soddisfano sempre la condizione secondo cui:

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2,$$

condizione che determina anche la validità delle leggi di trasformazione di Lorentz.

Ma possiamo anche esprimerci così come segue. La grandezza

$$d_s^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2,$$

grandezza che riguarda due punti o eventi del continuo spazio-temporale quadridimensionale, ha lo stesso valore per tutti i sistemi di riferimento galileiani. Ma c'è dell'altro. Se con la variabile immaginaria $\sqrt{-1} ct$ sostituiamo la variabile temporale reale t , potremo agevolmente sostituire x , y , z , $\sqrt{-1} ct$ con x_1 , x_2 , x_3 , x_4 . Poiché d_s non è che la distanza tra i due eventi o punti del continuo, avremo che

$$d_s^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

risulta indipendente dalla scelta del sistema di riferimento, con la possibilità di poter considerare il continuo spazio-temporale in accordo con la teoria della relatività ristretta come un continuo quadridimensionale euclideo.

Vediamo adesso in che senso le equazioni di trasformazione di Lorentz, così come espresse nella formulazione minkowskiana, si accordino perfettamente con la nuova concezione quadridimensionale. Per rendere più agevole la comprensione, limitatamente alla seconda conseguenza che deriva dal gruppo lorentziano, cioè la dilatazione del tempo, ci raffigureremo i fenomeni attraverso un diagramma che, in forma assai più semplificata, si ispira a quello costruito dallo stesso Minkowski, dal quale trae anche la sua identificazione.

Assumiamo di operare in un sistema inerziale S la cui origine O rappresenta l'evento considerato, ad esempio il moto di una particella (fig. 10). Per semplificare le cose opereremo con la sola coordinata spaziale e , naturalmente, con la coordinata del tempo t .

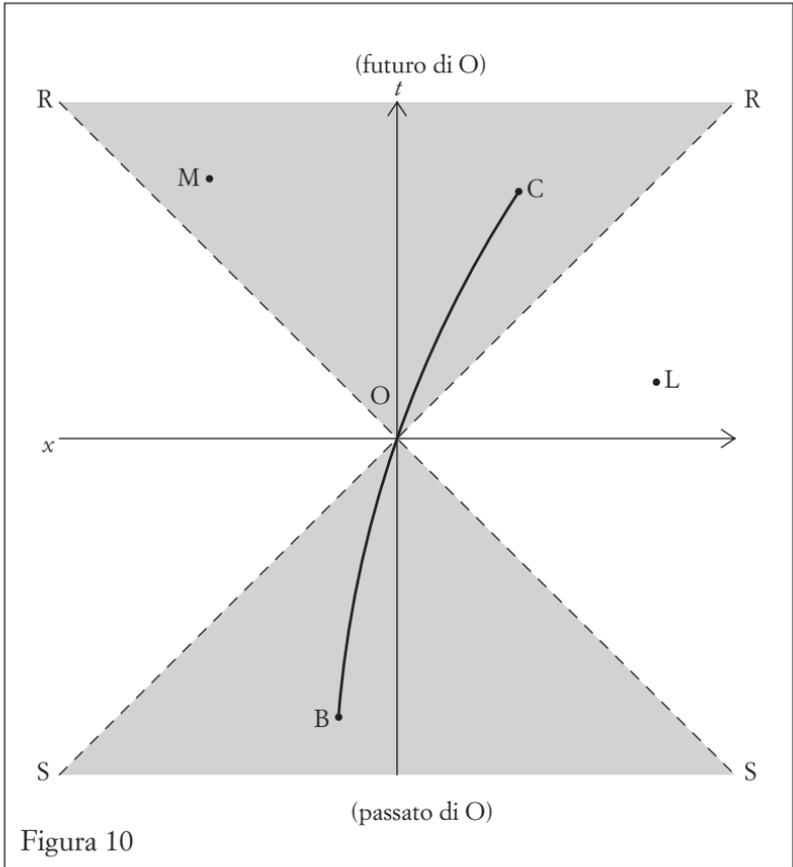


Figura 10

La curva OC è la traiettoria seguita dalla particella materiale che si trova qui e ora nella serie dei suoi stati successivi, insomma nella sua evoluzione. Di questa traiettoria o, per meglio dire, linea di universo, si è riportata anche la parte inferiore OB che rappresenterebbe ciò che noi immaginiamo possa essere stato il percorso seguito dalla particella prima di arrivare in O . Le due linee OR tratteggiate, le cui equazioni sono $x = \pm ct$, stanno a rappresentare tutti i punti dello spazio-tempo raggiunti da un raggio di luce emesso da O . Le rispettive linee inferiori tratteggiate SO rappresenteranno, evidentemente, tutti i punti dello spazio-tempo dai quali potrebbe essere emesso un raggio di luce che giunge qui e ora in O . Le due linee SOR delimitano quello che notoriamente e giustamente è denomi-

nato cono di luce¹¹¹ relativo a O , cioè la zona più scura del diagramma.

La parte superiore della figura, del cono di luce, sta a rappresentare il futuro di O , cioè l'insieme di tutti quegli eventi ai quali la nostra particella può essere presente; allo stesso modo, la parte inferiore della figura rappresenterà il passato di O , ovvero l'insieme di tutti gli eventi ai quali la nostra particella avrebbe potuto esser presente. Si capisce bene, di conseguenza, che la particella in oggetto, qui e ora in O , non può assolutamente partecipare, e neppure aver partecipato, a tutti quegli eventi che si verificano, o si sono verificati, al di fuori del cono di luce, cioè la zona più chiara della figura: per farlo dovrebbe essere animata da una velocità superiore a quella di c , cioè della luce. È il caso dell'evento L , che non può ricevere alcun segnale luminoso proveniente da O , e che, per converso, non può inviarne alcuno all'indirizzo di O : un evento come L , situato in questa zona, non è infatti causalmente connesso con O . Perché ciò possa avvenire, l'effetto dovrebbe precedere la causa.

Quanto appena affermato, è possibile verificarlo agevolmente una volta che ci si è collocati in un sistema inerziale S a cui appartengono, come precedentemente esplicitato, gli assi x , t , e l'origine O . Ma cosa accade, dal punto di vista dei tempi, nel momento in cui questi stessi eventi vengono considerati da un osservatore posto su un sistema S' che si muove di moto rettilineo e uniforme rispetto a S ? Ebbene, focalizziamo l'attenzione sul punto o evento M , che è compreso nel cono di luce di O e quindi, per quanto detto in precedenza, causalmente connesso con O . Rispetto al sistema di riferimento inerziale S , l'evento M accade dopo O e non sarà possibile rintracciare un sistema S' tale che O ed M appaiano contemporanei o, addirittura, invertiti, sicché M precederebbe O . Non riusciremo mai a raggiungere un simile obiettivo proprio perché non è possibile invertire la causa con l'effetto. Così, se O è la causa dell'evento M , allora O precederà M in qualsivoglia sistema inerziale. Le cose non stanno in questi stessi termini se prendiamo in considerazione il punto o evento L , che non è causalmente connesso con O . È ben vero che anche L , essendo posi-

¹¹¹ La denominazione si spiega facilmente se si pensa che l'aggiunta di una seconda dimensione spaziale al diagramma, cioè la dimensione y , comporterebbe la rotazione della figura intorno all'asse del tempo t , dando come risultato, appunto, un cono.

zionato sopra l'asse delle ascisse, presenta un t positivo, ossia accade dopo O nel sistema S ; ma attraverso il gruppo di trasformazioni di Lorentz possiamo trovare un sistema S' per il quale l'evento L è contemporaneo e perfino precedente l'evento O . Ciò significa che la relazione di successione di due punti o eventi che non sono legati dalla connessione di causa ed effetto, come per O e L , dipende dal sistema di riferimento scelto, e può essere addirittura invertita.

7. Il continuo non euclideo della relatività generale

La difficoltà, che ci ha costretti a un doveroso quanto necessario approfondimento, consisteva, è opportuno ricordarlo, nei seguenti due risultati:

- a) la teoria della relatività generale non può accettare la legge della costanza della velocità della luce giacché, quando si è in presenza di un campo gravitazionale, essa deve sempre dipendere dalle coordinate;
- b) la presenza di un campo gravitazionale invalida la definizione delle coordinate e del tempo che ci aveva condotto alla teoria della relatività ristretta.

Orbene, la considerazione di questi risultati, dice Einstein, ci porta

alla convinzione che, nell'ambito della relatività generale, il continuo spazio-temporale non può essere considerato come un continuo euclideo, poiché qui si presenta il caso generale, che abbiamo imparato a conoscere per il continuo bidimensionale costituito dalla lastra di marmo con variazioni locali di temperatura. Proprio come sarebbe stato impossibile in tale esempio costruire un sistema di coordinate cartesiane per mezzo di regoli uguali, così qui è impossibile costruire un sistema (corpo di riferimento) per mezzo di corpi rigidi e di orologi, in modo tale che i regoli-campione e gli orologi, disposti rigidamente gli uni rispetto agli altri, indichino direttamente la posizione e il tempo¹¹².

In che modo potremo dunque superare questo ostacolo davvero ingombrante e determinante? Semplicemente riferendo il continuo

¹¹² Einstein, *Relatività...*, cit., p. 115.

spazio-temporale quadridimensionale a un qualsiasi sistema di coordinate gaussiane: a ogni punto del continuo, cioè l'evento, corrisponderanno quattro numeri: x_1, x_2, x_3, x_4 , ossia le coordinate. Ma a queste coordinate non potremo assegnare un significato fisico diretto: esse ci servono semplicemente e solamente per poter assegnare un numero ai punti del continuo in modo definito, benché arbitrario. Si dirà: cosa significa dare a un evento certe particolari coordinate che, in se stesse, non hanno alcun significato, fisicamente parlando? La risposta del Nostro è chiara e precisa:

Ogni descrizione fisica si risolve in una serie di enunciati, ciascuno dei quali si riferisce alla coincidenza spazio-temporale di due eventi A e B. In termini di coordinate gaussiane, ogni enunciato siffatto si traduce nel fatto che i due eventi hanno le stesse quattro coordinate x_1, x_2, x_3, x_4 . In realtà, dunque, la descrizione del continuo spazio-temporale per mezzo di coordinate gaussiane sostituisce completamente la descrizione mediante un corpo di riferimento, senza presentare i difetti di quest'ultimo metodo di descrizione; essa non risulta vincolata al carattere euclideo del continuo che deve venir rappresentato¹¹³.

8. Il principio di relatività generale e il problema della gravitazione

Disponiamo ora di tutti gli elementi che ci consentono di giungere a dare una formulazione esatta del principio di relatività. Poiché, come appena accertato in via definitiva e generale, nella descrizione spazio-temporale non è possibile utilizzare sistemi di riferimento rigidi, come si è invece potuto fare in sede di teoria della relatività ristretta, al loro posto avremo il sistema delle coordinate gaussiane. Ne consegue che l'enunciato con il quale si è indicato il principio di relatività, dal quale ha preso avvio questa nostra disamina, dovrà essere sostituito. Non diremo più che "tutti i corpi di riferimento K, K', eccetera, sono equivalenti ai fini della descrizione dei fenomeni naturali (formulazione delle leggi generali della natura), qualunque possa essere il loro stato di moto", bensì, afferma Einstein:

Tutti i sistemi di coordinate gaussiane sono di principio equivalenti per la formulazione delle leggi generali della natura¹¹⁴.

¹¹³ Ivi, p. 116.

¹¹⁴ Ivi, p. 117.

Quanto detto può essere espresso anche con i seguenti termini:

Secondo la teoria della relatività ristretta, le equazioni che esprimono le leggi generali della natura si trasmutano in equazioni della stessa forma, quando sostituiamo le variabili spazio-temporali x, y, z, t , di un corpo di riferimento (galileiano) K , con le variabili spazio-temporali x', y', z', t' , di un nuovo corpo di riferimento K' , applicando la trasformazione di Lorentz. Secondo la teoria della relatività generale, invece, le equazioni debbono trasmutarsi in equazioni della stessa forma applicando sostituzioni arbitrarie delle variabili gaussiane x_1, x_2, x_3, x_4 ; ogni trasformazione infatti (non soltanto la trasformazione di Lorentz) corrisponde al passaggio da un sistema di coordinate gaussiane a un altro¹¹⁵.

La teoria della relatività ristretta considera domini galileiani, privi di campo gravitazionale. Il corpo di riferimento è allora un corpo rigido il cui stato di moto è scelto in modo tale che, rispetto a esso, la legge galileiana del moto rettilineo e uniforme di un punto materiale isolato è valida. Ma niente vieta che, agli stessi domini, possiamo comunque riferire corpi di riferimento non galileiani; in questo caso, rispetto a quei corpi, si ha la presenza di un campo gravitazionale di tipo particolare, speciale, potremmo dire. Ora, noi sappiamo che nei campi gravitazionali non esistono corpi rigidi che manifestano proprietà euclidee; per questo motivo nella relatività generale non ci si può servire della finzione costituita dal corpo rigido di riferimento né, ovviamente, della marcia degli orologi. Per questo motivo si ricorre a corpi di riferimento che non sono rigidi. Sono solamente questi corpi che, se considerati come tutto, si muovono in qualunque maniera, oltre a subire deformazioni arbitrarie durante il moto. Lo stesso dicasi per gli orologi atti alla definizione del tempo. Qui avremo a che fare con orologi i cui andamenti, la cui marcia, risponde a una legge di qualunque tipo, sebbene sempre irregolare. Questi orologi, ciascuno dei quali è ancorato in un punto di un corpo di riferimento non rigido, debbono soddisfare una precisa condizione: quella per cui gli orologi spazialmente vicini siano in grado di dare delle letture simultaneamente rilevabili che differiscono tra loro solo in maniera infinitesimale. Per avere un'idea circa la costituzione di questi corpi di riferimento non rigidi, che di

¹¹⁵ *Ibid.*

fatto equivalgono al sistema di coordinate gaussiane arbitrariamente scelto, Einstein utilizza un'immagine assai efficace, quella del "mollusco"¹¹⁶. In tal senso, potremo dire che "il principio generale di relatività richiede che tutti i molluschi possano venir usati come corpi di riferimento con eguali diritto e successo nella formulazione delle leggi generali della natura; le leggi stesse debbono essere del tutto indipendenti dalla scelta del mollusco"¹¹⁷.

Siamo ora giunti a un passaggio cruciale: la soluzione del problema della gravitazione. Consideriamo un dominio dove non è presente alcun campo di gravitazione rispetto a un sistema di riferimento K galileiano. Come si comportano regoli e orologi ci è noto dalla teoria della relatività ristretta, così come noto è il comportamento dei punti materiali isolati animati di moto rettilineo uniforme. Ora, a detto dominio, riferiamo un sistema di coordinate gaussiane arbitrariamente scelto o un "mollusco" come corpo di riferimento K' . Rispetto a K' esiste allora un campo gravitazionale G di carattere particolare. In effetti, con l'ausilio di una semplice trasformazione matematica calcoleremo, rispetto a K' , il comportamento di regoli, di orologi e di punti materiali che si muovono liberamente. Interpretaremo questo comportamento come quello di regoli, di orologi, di punti materiali sottoposti al campo di gravitazione G e ipotizzeremo che l'influenza del campo di gravitazione continui a esser tale anche quando il campo gravitazionale dominante non possa venir derivato, mediante una trasformazione di coordinate, dal caso speciale galileiano. Si tratterà, allora, di investigare il comportamento del campo gravitazionale G , che abbiamo derivato dal caso speciale galileiano con una trasformazione di coordinate, e nel formularlo con una legge che si riveli sempre valida al di là del "mollusco" scelto per descriverlo.

Per poter parlare legittimamente ed effettivamente di legge gravitazionale, occorre tuttavia compiere un ulteriore e definitivo passaggio. Avverte infatti il fisico tedesco:

Questa legge non è ancora la legge generale del campo gravitazionale, giacché il campo gravitazionale considerato è di tipo speciale. Per poter trovare la legge generale del campo di gravitazione dobbiamo ancora ottenere una generalizzazione della legge

¹¹⁶ Cfr. *ivi*, p. 118.

¹¹⁷ *Ivi*, p. 119.

trovata più sopra. Ciò tuttavia può venir raggiunto senza alcuna arbitrarietà, prendendo in considerazione i seguenti requisiti:

- a) la generalizzazione richiesta deve in ogni caso soddisfare il postulato generale della relatività;
- b) se nel dominio considerato è presente una materia qualsiasi allora, in virtù della sua azione eccitatrice di campo, ha importanza soltanto la sua massa inerziale e quindi... soltanto la sua energia;
- c) il campo gravitazionale e la materia, insieme considerati, debbono soddisfare il principio di conservazione dell'energia (e della quantità di moto).

Il principio generale di relatività ci permette infine di determinare l'influenza del campo gravitazionale sul corso di tutti quei processi che, nell'assenza di un tale campo, si svolgono secondo le note leggi¹¹⁸.

Le note caratteristiche della teoria della gravitazione derivata dal postulato generale di relatività sono allora le seguenti. Anzitutto, la bellezza della sua costruzione, che non trova eguali nella fisica fino a quel momento conosciuta. In secondo luogo, la teoria della gravitazione elimina completamente il difetto particolarmente fastidioso proprio della meccanica classica: quello di privilegiare un particolare sistema di riferimento. In terzo luogo, la teoria einsteiniana della gravitazione dà una effettiva interpretazione della legge empirica che istituisce l'uguaglianza tra la massa inerziale e la massa gravitazionale. Infine, la nuova teoria spiega due risultati dell'osservazione astronomica tra loro diversi, di fronte ai quali la meccanica classica ha mostrato tutta la sua impotenza. Siamo cioè di fronte a delle vere e proprie conferme empiriche.

Il primo importante risultato fattuale riguarda l'orbita di Mercurio, il pianeta del nostro sistema solare più vicino alla nostra stella. Secondo la teoria newtoniana, un pianeta compie un'ellisse nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole. Questa ellisse, tuttavia, conserverebbe la sua posizione, rispetto alle stelle fisse, se si trascura, appunto, il moto delle stesse stelle fisse e l'azione degli altri pianeti. Posta l'esattezza della costruzione di Newton, avremmo così che l'orbita del pianeta

¹¹⁸ Ivi, p. 120.

dovrebbe essere un'ellisse immobile rispetto alle stelle fisse. Ciò vale, come da conferma, per tutti i pianeti, tranne uno, Mercurio. L'ellisse corrispondente all'orbita di Mercurio, lo sappiamo da molto tempo, ruota nel piano dell'orbita e nel senso del moto di circonvoluzione. Il valore ottenuto per questo movimento rotatorio è di 43 secondi per secolo. La meccanica classica spiega ciò solo con ipotesi *ad hoc*, la cui probabilità è scarsa. Con la teoria della relatività generale, si badi bene, l'ellisse di ogni pianeta deve necessariamente ruotare nel modo indicato. Ciò è rilevato solo per Mercurio, con l'ammontare di 43 secondi per secolo, perché per gli altri pianeti la rotazione è estremamente piccola per poter essere apprezzata.

Il secondo risultato fattuale consiste nell'accertamento della deflessione, dell'incurvamento del raggio di luce a opera del campo gravitazionale derivante dalla presenza di una massa, quale ad esempio il nostro Sole. La previsione einsteiniana ebbe conferma nel 1919, anno in cui ben due diverse spedizioni di astronomi furono costituite per le osservazioni relative all'attesa eclissi di sole. Una spedizione ebbe come destinazione Sobral, in Brasile, sotto la direzione dell'astronomo A. Crommelin; la seconda spedizione, diretta da un altrettanto illustre astronomo, A. Eddington, approdò nell'isola di Principe, al largo della Guinea spagnola. Il calcolo di Einstein per la deflessione della luce non lasciava dubbi: la teoria prevedeva uno spostamento di 1,74 secondi di arco. Il gruppo di Crommelin trovò uno spostamento di 1,98, con un certo margine di errore; le osservazioni del gruppo di Eddington rilevarono uno spostamento di 1,61 secondi, con un margine di 0,3 secondi. Tenuto conto delle approssimazioni, i due valori rilevati sembravano dunque concordare. Einstein giunse a conoscenza dell'evento attraverso Lorentz, dal quale si era recato in visita a Leida. Da qualche tempo, infatti, circolavano voci insistenti circa un esperimento giunto a buon esito, ma le comunicazioni tra la Gran Bretagna e la Germania non erano certo facili a così poco tempo dalla cessazione del primo conflitto mondiale. Lorentz però, in Olanda, disponeva di qualche canale informale e aveva ricevuto la felice notizia. La conferma ufficiale e definitiva giunse il 6 novembre 1919. A quella data, il grande fisico teorico olandese inviò a Einstein un telegramma dove si comunicava l'evento. L'annuncio della conferma della previsione formulata attraverso la teoria della relatività generale, dato a Londra, rese il fisico tedesco lo scienziato più famoso al mondo: la sua vita non sarebbe stata più la stessa.

9. La costante cosmologica

Agli inizi del 1920 la madre di Albert, affetta da un cancro allo stomaco e ormai prossima alla morte, fu ospitata nell'appartamento berlinese del figlio in Haberlandstrasse 5, dove si spegnerà nel marzo dello stesso anno. Ormai all'apice della carriera, Einstein si era unito in seconde nozze con la cugina Elsa Einstein Löwenthal, accogliendo anche le due figlie di lei, Ilse, ventiduenne, e Margot, ventenne. Proprio in questo periodo Einstein inizia a essere oggetto di attacchi diretti in manifestazioni antisemite, mentre si fanno sempre più numerose le proteste, evidentemente un pretesto, indirizzate verso la teoria della relatività. Nonostante tutto, il fisico tedesco difende la Germania, ma al contempo si fa sempre più consistente il suo impegno in attività extrascientifiche.

Sul piano prettamente fisico, da diversi anni il Nostro si impegna assiduamente nel tentativo di mettere in luce tutte le conseguenze che possono scaturire dal capolavoro del 1916 benché, come vedremo in seguito, non trascuri le problematiche legate ai quanti. Del resto, la teoria della relatività generale è talmente ricca di implicazioni e di idee da poter, da sola, costituire ancora oggi l'ambito esclusivo cui dedicare un'intera vita di ricerca. Al riguardo, la memoria del 1917 *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* (*Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale*) è particolarmente importante perché, a buon diritto, può essere considerata come l'*incipit* della cosmologia moderna¹¹⁹.

La conoscenza che si aveva dell'Universo fisico all'epoca in cui Einstein scrisse il saggio appena citato può indubbiamente far sorridere, se paragonata a quella posseduta allo stato attuale; ma così stavano le cose. In generale, gli astronomi ritenevano che l'Universo fosse costituito interamente dalla nostra galassia. Solo dopo la fine del 1920 si

¹¹⁹ La cosmologia, in senso ampio e generale, è lo studio del cosmo, inteso come la globalità di ciò che ha o può avere un'esistenza fisica; una globalità che può essere descritta matematicamente, benché non osservabile. In senso stretto e tradizionale, la cosmologia è lo studio dello spazio, del tempo, e degli oggetti in essi contenuti; insomma, dell'Universo nella sua globalità, al fine di offrire un'interpretazione della sua struttura spaziale, della sua origine e della sua evoluzione. Alla fine del XX secolo, quando teorie cosmologiche molto accreditate fecero ritenere che l'Universo nel quale siamo confinati non sia che uno degli infiniti universi che scaturiscono all'infinito l'uno dall'altro, si fece pressante l'esigenza di riconsiderare i termini in gioco, ossia riservare quello di Universo al nostro dominio spazio-temporale in espansione, e cosmo, alla totalità dello spazio e del tempo che abbraccia l'insieme degli infiniti universi in espansione o, eventualmente, in collasso, con i quali non possiamo comunicare. Per questo, allo stato attuale, la cosmologia può essere considerata come lo studio dell'insieme di tutti gli universi possibili.

comprese, per merito dell'astronomo statunitense E. Hubble e di altri ricercatori, che la nostra galassia è una tra le tante e rappresenta una piccolissima porzione dell'Universo. Fin dove era potuto arrivare con la sua visione l'occhio freddo e preciso del telescopio, quel "senso superiore ed eccellente", per esprimerci con le stesse parole di Galileo, svelava una molteplicità enorme di sistemi stellari.

Einstein, ma non era l'unico, era convinto che l'Universo fosse statico. Che cosa vuol dire? Significa, semplicemente, ritenere che ciò che noi vediamo adesso attraverso le nostre sofisticate osservazioni è, nel suo insieme, esattamente coincidente con ciò che si è sempre osservato e, ovviamente, con ciò che si continuerà a osservare in futuro. Per esser ancora più chiari: considerare l'Universo staticamente non vuol dire affermare che le stelle non evolvono ma, semplicemente, che la distribuzione media della materia nell'insieme dell'Universo è statica.

Ora, una volta accettato l'assunto della staticità, occorre preoccuparsi di dare una soluzione accettabile a un problema di difficile soluzione, che a suo tempo aveva turbato il sonno dello stesso Newton. Vediamo di che cosa si tratta. Per il grande fisico inglese, la forza di gravità, la gravitazione, controlla interamente l'evoluzione dell'Universo nel suo insieme. Ma perché, ci si chiederà, proprio la gravitazione? Non è forse vero che proprio la gravità si presenta, tra le forze conosciute, come quella meno intensa? Certamente, si risponderà, ma si dovrà anche aggiungere una precisazione di portata cruciale: la gravità è la forza meno intensa quando si opera con masse di piccole dimensioni, quali quelle con cui abbiamo a che fare ordinariamente, che possiamo agevolmente misurare con i nostri strumenti; ma i pianeti e tutto il resto non possono essere considerati alla stregua di masse ordinarie. La Terra, per restare a casa nostra, ha una massa enorme e, dal momento che alla sua attrazione gravitazionale contribuiscono anche gli effetti di tutte le masse parziali che la compongono, l'influsso gravitazionale terrestre agisce anche su particelle il cui moto è determinato dalle leggi dell'elettromagnetismo. Del resto, è sufficiente dare un'occhiata alla formula

newtoniana della gravitazione universale, cioè $G \frac{mM}{d^2}$, per accertare tranquillamente il fatto che la gravitazione di tutte le masse dell'Universo influenza in modo decisivo le modalità dell'evoluzione di quest'ultimo.

Se la gravitazione ha un ruolo così determinante, ci veniamo a scontrare con la seguente difficoltà. Immaginiamo un Universo spazialmente finito i cui moti, ai quali la materia è soggetta, la costringano, per così dire, a rapprendersi in un tempo dato e in una certa porzione dello spazio. Dal momento in cui avrà iniziato a costituirsi, a questo piccolo addensato di materia se ne aggiungerà via via sempre di più finché l'intero Universo sarà condensato in un unico punto. Quanto abbiamo immaginato non ha un corrispettivo concreto, non c'è dubbio; ma la difficoltà teorica rimane. Come se ne esce? Per Newton, solo un Universo spazialmente infinito avrebbe risolto la questione. Si capisce bene perché. Se la materia fosse uniformemente distribuita in uno spazio infinito non ci sarebbe più la possibilità del formarsi di un nucleo che piano piano ingloberà tutta la materia, bensì l'eventualità di un numero sufficientemente grande di masse gigantesche sparse nello spazio infinito e immensamente distanti le une dalle altre. Non è forse questa la fotografia di ciò che osserviamo?

Con la teoria della gravitazione e l'assunto della staticità dell'Universo, Einstein si trovava di fronte alla stessa difficoltà alla quale Newton aveva risposto nei termini che abbiamo appena esposto. Non si deve peraltro dimenticare che per la teoria della relatività generale la gravitazione dipende direttamente dalla materia, cioè dalle masse, e lo stesso spazio-tempo ne fa le conseguenze, giacché la sua curvatura dipende proprio da questo. La soluzione escogitata da Einstein, nota come costante cosmologica, consiste, in buona sostanza, in un termine che viene aggiunto, senza che ne venga modificata irrimediabilmente la simmetria, alle equazioni della relatività generale. Questo termine introduce una realtà, una piccolissima forza repulsiva che così verrebbe a controbilanciare l'influsso gravitazionale; una forza comunque tale da evitare il collasso dell'Universo al quale la gravitazione finirebbe inevitabilmente per condurlo.

Intorno al 1929, il fisico tedesco iniziò a mostrare una sfiducia crescente nei riguardi della soluzione elaborata: del resto non gli si può dar torto, se si pensa che c'era chi, come il russo A.A. Friedmann, lavorando sulle originarie equazioni relativistiche individuò delle soluzioni che consentivano all'Universo di espandersi o contrarsi a seconda della quantità di materia in esso contenuta. Gli studi di Friedmann che, occorre precisarlo, non era un fisico in senso stretto, furono pubblicati su una rivista di lingua tedesca e non sfuggiro-

no a Einstein che, assai inspiegabilmente, inizialmente li considerò sbagliati. Solo dopo una diretta chiarificazione per via epistolare il fisico tedesco fu costretto a ritornare sulla sua valutazione, che stavolta riconobbe come errata. Ma allo studioso russo, il Nostro non concedeva nulla di più che l'attestazione di un lavoro corretto e chiarificatore. Einstein evitava così di andare al cuore della questione, perché le deduzioni di Friedmann offrono in effetti una visione dell'Universo diversa, in termini radicali, da quella einsteiniana: l'Universo evolve nel tempo espandendosi e contraendosi. Ma proprio per evitare questo esito, come sappiamo, Einstein era intervenuto sulle equazioni della relatività generale, sicché, concedendo la sola correttezza sul piano formale ai lavori di Friedmann, il fisico tedesco ne escludeva propriamente la loro adeguatezza al reale comportamento dell'Universo. D'altra parte, il modello dell'Universo in espansione non era certo una novità. L'astronomo olandese W. De Sitter ne aveva elaborato la concezione fin dal 1917. Nei suoi riguardi, Einstein non aveva sollevato alcuna perplessità o obiezione, benché avesse potuto averne tutto l'interesse sul piano esplicativo, di pura chiarificazione, tanto più necessario quanto più ci si rendeva conto che la costruzione di De Sitter implicava l'affermazione di una velocità della luce superiore a quella postulata dalla relatività come velocità limite: il moto espansivo dell'Universo supererebbe c . In verità, non c'è alcuna violazione del principio einsteiniano, per il semplice motivo che la relatività afferma semplicemente che non c'è alcuna cosa, e lo spazio non è una cosa ma un concetto, in grado di superare la velocità della luce; Einstein lo sapeva bene e, soprattutto, considerava questi modelli non reali.

La concezione di De Sitter gode ancora oggi di un certo riguardo, in particolare per due motivi. Anzitutto, perché numerosi ricercatori ritengono che immediatamente dopo la sua nascita l'Universo ha in breve ma effettivamente attraversato un periodo che presenta le caratteristiche messe in evidenza dall'astronomo olandese. In secondo luogo, perché il modello desitteriano implica una fondamentale previsione sperimentale. Si tratta di questo. Posto che l'Universo si espanda, e così facendo si allontani da noi, la luce delle stelle più lontane dovrà spostarsi verso l'estremità rossa dello spettro per l'azione di un effetto Doppler; lo spostamento verso il rosso dovrebbe infine risultare direttamente proporzionale alla distanza della stella o della galassia considerata.

L'occasione che rivoluzionò la nostra concezione e visione dell'Uni-

verso fu fornita, nel 1929, da Hubble. A quella data, ben pochi pensavano ancora che l'Universo fosse racchiuso negli angusti limiti della nostra galassia; e, del resto, Hubble aveva già misurato la distanza da numerose nebulose esterne alla Via Lattea. Ma riuscì a fare qualcosa di più, e di ancora più importante: verificò che lo spostamento verso il rosso della luce proveniente da una galassia cresce con l'aumentare della distanza che la separa da noi. La previsione di De Sitter era dunque di fatto confermata. Con i risultati del lavoro svolto dall'astronomo americano, non aveva più alcun senso continuare a mantenere la costante cosmologica, a suo tempo introdotta nella teoria della relatività generale dal suo stesso creatore; e infatti Einstein non si attardò a eliminare il termine in questione. Riteniamo tuttavia doveroso fare due considerazioni. La prima consiste nel fatto che lo spostamento verso il rosso può essere valutato come un'ulteriore conferma della validità della relatività generale. La seconda riguarda le nuove osservazioni che sono state realizzate alla fine degli anni Novanta del secolo appena trascorso attraverso il telescopio spaziale e la scoperta di un'energia oscura che farebbe accelerare l'espansione dell'Universo. Questi due fatti hanno riportato all'attenzione quella costante cosmologica prima introdotta, e poi ritirata da Einstein, dalle sue stesse equazioni.

LA TEORIA DELLA GRAVITAZIONE

1. Nuovi orizzonti

La pubblicazione degli scritti del 1905 e ciò che accadde dopo di essi ebbe un'influenza formidabile sui destini materiali di Einstein e sulla formazione della sua personalità più matura. Anzi tutto significarono l'accettazione di Albert da parte della comunità scientifica. Se pochi anni prima, appena laureato al Politecnico, ogni tentativo di seguire la strada della ricerca affiancando uno dei valenti professori che ne conoscevano i vizi e le virtù era miseramente caduto nel vuoto, già nel 1908 era *Privatdozent* a Berna e nel 1909, dal momento che si era liberato un posto per ciò che oggi potremmo chiamare professore associato o di seconda fascia, per distinguerlo dal docente ordinario, detentore vero e proprio di una cattedra, passa a Zurigo. Nel 1911 gli viene offerto l'ordinariato presso l'Università di lingua tedesca di Praga, dove resterà solo un anno e mezzo⁹¹. Nel gennaio del 1912 è oggetto di una proposta di sistemazione analoga, con scadenza decennale, all'Università di Zurigo. Albert accetta.

Altri, tuttavia, progettavano sulla sua vita. Planck e Nernst lo volevano a Berlino. Per raggiungere l'obiettivo, i due scienziati pensarono opportuno rendergli visita a Zurigo, nell'estate del 1913, muniti di pazienza e di argomenti davvero convincenti. Le condizioni che venivano offerte al giovane scienziato tedesco erano effettivamente molto allettanti, ma potevano essere inficiate da un'insidia intrinseca devastante. Ad appena trentasei anni di età, Einstein sarebbe stato eletto alla prestigiosa Accademia prussiana delle scien-

⁹¹ Intanto, il chimico fisico W.H. Nernst, che si era sempre interessato attivamente all'organizzazione della ricerca, sfruttando i suoi eccellenti rapporti con l'industriale belga Ernest Solvay, lo convinse a sponsorizzare, come diremmo oggi, una conferenza dove sarebbero convenuti tutti i fisici che si occupavano dei fenomeni quantici per fare il punto della situazione a dieci anni dal lavoro capitale di Max Planck. Einstein non solo vi fu invitato, ma ebbe anche l'incarico di relazionare sullo stato dei calori specifici.

ze, nomina che gli avrebbe valso, sul piano concreto, uno stipendio speciale. Non solo, sarebbe stato chiamato a guidare, come direttore, il settore scientifico dell'Istituto Kaiser Wilhelm che si stava erigendo, e, non avendo obblighi relativi all'insegnamento, avrebbe potuto dedicarsi interamente alla ricerca godendo della collaborazione dei migliori scienziati tedeschi del momento, se ne avesse richiesto l'apporto. Ciò che poteva compromettere irrimediabilmente tutta l'operazione consisteva in un adempimento formale, ma che Einstein considerava sostanziale: la cittadinanza tedesca. Le assicurazioni di Planck e Nernst su questo punto così dolente furono evidentemente convincenti, giacché Albert accettò di buon grado il trasferimento a Berlino⁹².

I rapporti con Mileva, nel frattempo, si erano irrimediabilmente deteriorati: ormai vigeva solo un sentimento di rispetto formale, e anche questo subordinato al fatto di evitare qualsiasi atto o atteggiamento sgradevole e tale da procurare perdite inopportune di tempo e di energie. La famiglia si trasferì comunque a Berlino nell'aprile del 1914, ma già nell'estate Mileva aveva pensato bene di tornarsene a Zurigo con i due figli. Era la fine, anche di fatto, del matrimonio, che infatti fu sciolto ufficialmente e consensualmente nel 1919, anno in cui Einstein avrebbe sposato la seconda cugina Elsa, divorziata con due figlie.

Già, il 1914! L'anno funesto che segnò l'inizio di quella che fu propriamente chiamata la Grande Guerra. Durante le prime fasi del conflitto, le più eminenti personalità della cultura tedesca redassero un vero e proprio documento, dove, tra le altre cose, si identificava la cultura germanica con il militarismo, si esaltava la profondità della scienza tedesca e si derideva, per la sua superficialità e leggerezza, quella francese e anglosassone. In un clima ormai arroventato, Einstein, che da anni era interamente preso dal problema della gravitazione, si diede attivamente daffare a sostegno di un'iniziativa tesa a contrastare la vergognosa e ignobile esaltazione della germanicità, o meglio, prussianità, avanzata da un collega che, con coraggio, preparava un *Manifesto agli europei* di palese ispirazione pacifista.

⁹² In realtà Einstein dovette in seguito cedere e riacquisire la cittadinanza tedesca, che abbandonerà di nuovo, e per sempre, nel 1933.

2. Preliminari

A una teoria che andasse oltre l'ambito inerziale proprio della memoria elaborata nel 1905 in termini di elettrodinamica dei corpi in moto, il fisico tedesco aveva iniziato a lavorare nel 1907; otto anni dopo, tra grandi difficoltà, l'obiettivo era raggiunto: nel 1916 entrava in scena, sul palcoscenico della scienza fisica, e non solo, la memoria intitolata *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* (*I fondamenti della teoria della relatività generale*), anch'essa pubblicata negli "Annalen der Physik".

A scanso di facili equivoci, che sono sempre in agguato quando ci si lasci andare alla tentazione della generalizzazione, quasi ciò stesse a significare estendere puramente e semplicemente dei domini di validità, Einstein mette subito in chiaro che con "l'espressione 'principio generale di relatività', vogliamo intendere la seguente affermazione: tutti i corpi di riferimento K, K' , eccetera sono equivalenti ai fini della descrizione dei fenomeni naturali (formulazione delle leggi generali della natura), qualunque possa essere il loro stato di moto. Prima però di procedere oltre, va sottolineato che questa formulazione dovrà venir sostituita da una più astratta"⁹³.

Focalizziamo dunque la nostra attenzione sul fatto che stiamo parlando di qualsiasi stato di moto: ci riferiamo cioè non solo al moto inerziale, rettilineo e uniforme. Immaginiamo allora di viaggiare, come passeggeri, a bordo di un'automobile lanciata a velocità costante e uniforme; come ben sappiamo, se il moto dell'auto è veramente uniforme, noi, all'interno, non percepiremo affatto questo moto e potremmo ben interpretare tutto quanto ci accade intorno come se la vettura fosse in quiete e fosse invece la strada sottostante a muoversi. All'improvviso, tuttavia, ci sentiamo irrimediabilmente spinti con violenza in avanti. Dopo un attimo di stordimento ci chiediamo, preoccupati, che cosa può essere accaduto. Non è difficile rispondere: l'automobile non corre più uniformemente lungo una retta e noi siamo stati oggetto di una brusca frenata da parte del guidatore, che ha decelerato il mezzo. Il nuovo stato di cose può persino farci balenare l'idea che quanto è accaduto ci impedisce di sostenere che le stesse leggi meccaniche sono valide rispetto alla nostra auto quando quest'ultima si muove con un moto diverso da quello uniforme, come invece lo erano in precedenza o, allo stesso

⁹³ Einstein, *Relatività...*, cit., p. 92.

modo, con la vettura in stato di quiete. Di certo, il principio galileiano di relatività non è più valido rispetto all'automobile che ha decelerato; anzi, proprio al contrario del principio generale di relatività, ci sembra di dover attribuire al moto non uniforme una specie di carattere assoluto, una realtà assoluta. Vedremo che le cose stanno in termini ben diversi.

3. Massa inerziale e massa gravitazionale

Tutte le volte che solleviamo un oggetto, ad esempio una palla, e poi lo lasciamo cadere, non stiamo certo a interrogarci sul perché esso cade verso il basso, a terra. Come abbiamo a suo tempo sottolineato con lo stesso Einstein, l'abitudine ci porta a dare per scontato l'esito e a rendere superflua la domanda, alla quale risponderemmo comunque prontamente dicendo che il fenomeno ha luogo perché l'oggetto, la nostra palla, è attratta dalla Terra. Naturalmente, un fisico che si trovasse casualmente al nostro fianco darebbe una risposta diversa, fondata sull'impossibilità di azioni a distanza. È infatti sempre necessario che tra la palla e la Terra intervenga un intermediario, così come accade tra una calamita e la limatura di ferro. Se in quest'ultimo caso si ha la presenza di un campo magnetico, nel primo vi sarà la presenza di un campo gravitazionale. L'azione esercitata dalla Terra sulla palla è chiaramente indiretta e, come l'esperienza ci insegna, diminuisce di intensità quanto più grande si fa la distanza tra l'oggetto e il nostro pianeta, secondo una legge ben determinata. Tuttavia, rispetto ai campi elettrico o magnetico, quello gravitazionale presenta una caratteristica peculiare, che è necessario esplicitare in modo da precisare anche gli ambiti di validità del nostro esempio. Afferma infatti il fisico tedesco: "I corpi che si muovono sotto l'unica influenza di un campo gravitazionale ricevono un'accelerazione che *non dipende minimamente né dalla materia né dallo stato fisico del corpo in questione*. Per esempio, un pezzo di piombo e un pezzo di legno cadono esattamente nello stesso modo in un campo gravitazionale (nel vuoto) quando li lasciamo cadere o da uno stato di quiete o con la stessa velocità iniziale"⁹⁴.

Detto in altri termini, per la seconda legge della dinamica newtoniana, $F = ma$, ossia, la forza è data dal prodotto della massa iner-

⁹⁴ Ivi, p. 94.

modo, con la vettura in stato di quiete. Di certo, il principio galileiano di relatività non è più valido rispetto all'automobile che ha decelerato; anzi, proprio al contrario del principio generale di relatività, ci sembra di dover attribuire al moto non uniforme una specie di carattere assoluto, una realtà assoluta. Vedremo che le cose stanno in termini ben diversi.

3. Massa inerziale e massa gravitazionale

Tutte le volte che solleviamo un oggetto, ad esempio una palla, e poi lo lasciamo cadere, non stiamo certo a interrogarci sul perché esso cade verso il basso, a terra. Come abbiamo a suo tempo sottolineato con lo stesso Einstein, l'abitudine ci porta a dare per scontato l'esito e a rendere superflua la domanda, alla quale risponderemmo comunque prontamente dicendo che il fenomeno ha luogo perché l'oggetto, la nostra palla, è attratta dalla Terra. Naturalmente, un fisico che si trovasse casualmente al nostro fianco darebbe una risposta diversa, fondata sull'impossibilità di azioni a distanza. È infatti sempre necessario che tra la palla e la Terra intervenga un intermediario, così come accade tra una calamita e la limatura di ferro. Se in quest'ultimo caso si ha la presenza di un campo magnetico, nel primo vi sarà la presenza di un campo gravitazionale. L'azione esercitata dalla Terra sulla palla è chiaramente indiretta e, come l'esperienza ci insegna, diminuisce di intensità quanto più grande si fa la distanza tra l'oggetto e il nostro pianeta, secondo una legge ben determinata. Tuttavia, rispetto ai campi elettrico o magnetico, quello gravitazionale presenta una caratteristica peculiare, che è necessario esplicitare in modo da precisare anche gli ambiti di validità del nostro esempio. Afferma infatti il fisico tedesco: "I corpi che si muovono sotto l'unica influenza di un campo gravitazionale ricevono un'accelerazione che *non dipende minimamente né dalla materia né dallo stato fisico del corpo in questione*. Per esempio, un pezzo di piombo e un pezzo di legno cadono esattamente nello stesso modo in un campo gravitazionale (nel vuoto) quando li lasciamo cadere o da uno stato di quiete o con la stessa velocità iniziale"⁹⁴.

Detto in altri termini, per la seconda legge della dinamica newtoniana, $F = ma$, ossia, la forza è data dal prodotto della massa iner-

⁹⁴ Ivi, p. 94.

ziale m , che è una costante caratteristica del corpo accelerato, per l'accelerazione a . Ovvero

$$\text{forza} = \text{massa inerziale} \times \text{accelerazione.}$$

Ma se a causare l'accelerazione è la stessa gravitazione, allora dovremo scrivere

$$\text{forza} = \text{massa gravitazionale} \times \text{intensità del campo gravitazionale,}$$

dove la massa gravitazionale è anch'essa una costante caratteristica del corpo. Sicché l'accelerazione sarà data da:

$$\text{accelerazione} = \frac{\text{massa gravitazionale}}{\text{massa inerziale}} \times \text{intensità del campo gravitazionale.}$$

Ora, come del resto l'esperienza ci insegna, noi sappiamo che per un campo gravitazionale dato, l'accelerazione è indipendente dalla natura e dallo stato dei corpi, è cioè sempre la stessa; ma allora il rapporto fra la massa gravitazionale e quella inerziale deve allo stesso modo valere per tutti i corpi, il che ci conduce alla legge secondo cui "la massa *gravitazionale* di un corpo è uguale alla sua massa *inerziale*"⁹⁵.

L'uguaglianza appena raggiunta e affermata avrà, come stiamo per accertare, un ruolo importante per la possibilità di poter affermare il postulato generale di relatività. Immaginiamo una larga porzione di spazio vuoto, così distante da una qualsiasi massa apprezzabile come tale tanto da rendere in via approssimata accettabili le condizioni richieste dal principio galileiano di relatività. Per questa parte di spazio potremo così scegliere un corpo di riferimento anch'esso galileiano, rispetto al quale i punti in quiete restano in quiete e quelli in movimento perseverano nel loro stato di moto uniforme. Come corpo di riferimento potremo scegliere una casa piuttosto spaziosa costituita da un unico vano, ermeticamente sigillata da un tetto piatto, come se fosse il coperchio di un'enorme scatola. All'interno dell'unico vano è posizionato un osservatore umano, debitamente attrezzato della necessaria strumentazione. Per il nostro osservatore non esiste alcuna gravitazione, sicché dovrà ancorarsi al pavimento

⁹⁵ Ivi, p. 95.

dal momento che il minimo urto con quest'ultimo lo farebbe salire lentamente verso quello che è il soffitto della stanza. Immaginiamo anche che al centro del tetto della casa sia predisposto un grosso e resistente gancio legato a un cavo altrettanto robusto e resistente e che dall'esterno, cioè nello spazio circostante, un individuo non ben identificato inizi a mettere in trazione la corda, ossia inizi a tirarla a sé con una forza costante (fig. 5).

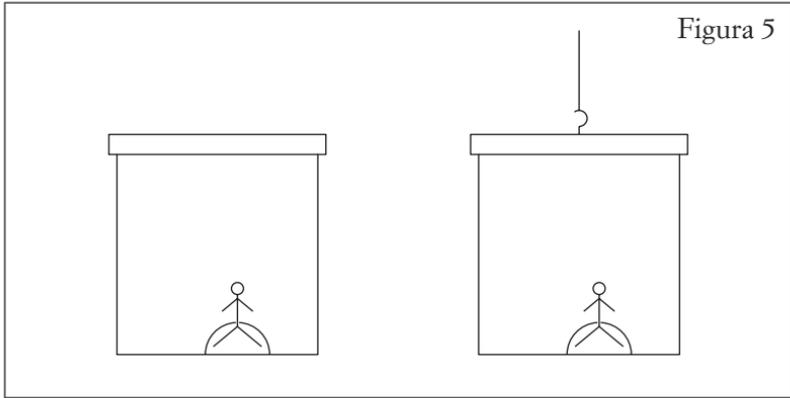


Figura 5

La casa, e l'osservatore al suo interno, iniziano a muoversi verso l'alto con un moto uniformemente accelerato. Naturalmente, noi stiamo assistendo agli sviluppi appena descritti da una postazione di riferimento non trainata da alcuna forza. Cosa vedremo? Che con lo scorrere del tempo, il sistema casa-osservatore trascinati acquisirà una velocità dai valori enormi. E l'osservatore dentro la casa cosa penserà? Intanto, l'accelerazione subita dal sistema gli viene trasmessa dal pavimento e, se vi è ancorato in posizione eretta, avvertirà una forte pressione attraverso le gambe.

Immaginiamo adesso che il nostro osservatore lasci cadere un oggetto, ad esempio una pietra, che fino a quel momento aveva tenuto in mano (fig. 6).

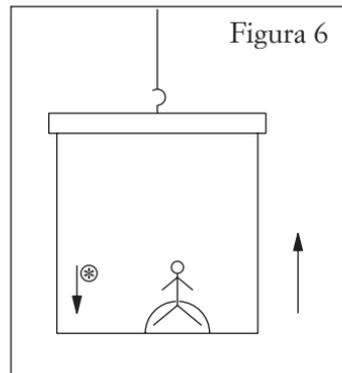
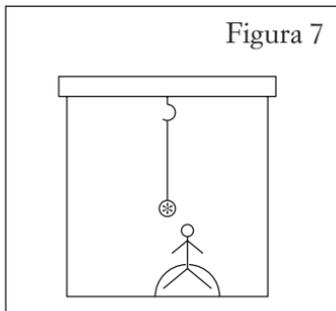


Figura 6

L'accelerazione della casa non si trasmetterà più alla pietra: ormai svincolata dalla stretta dell'osservatore, quest'ultima si dirigerà verso il pavimento con un moto relativo accelerato, il che convincerà ancor più il nostro osservatore che, al di là della natura dell'oggetto utilizzato (una pietra o un pezzo di metallo), l'accelerazione che lo caratterizza sarà sempre la stessa. Insomma, il nostro osservatore giungerà alla conclusione di trovarsi, con la sua casa, in un campo gravitazionale costante nel tempo; e poiché non sa niente del gancio esterno, penserà che la casa è sospesa e immobile, impedendo che cada essa stessa nel campo gravitazionale. Come dovremo considerare le conclusioni tratte dal nostro osservatore: legittime o errate? A detta di Einstein, il suo modo di considerare gli eventi "non contrasta né con la ragione né con le leggi note della natura"⁹⁶. In altri termini, nonostante la nostra casa sia accelerata rispetto allo spazio galileiano, tuttavia, siamo nella felice condizione di poterla considerare come in quiete. Vi sono così buone ragioni a favore della possibilità di estendere il principio di relatività anche a corpi di riferimento accelerati gli uni rispetto agli altri. Se non valesse l'uguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale, l'osservatore non sarebbe in grado di interpretare il comportamento dei corpi esterni attraverso l'ipotesi di un campo gravitazionale, e non avrebbe neppure il diritto di supporre il suo corpo di riferimento in quiete.

Supponiamo, infine, che il nostro osservatore fissi una corda, in dotazione con altri strumenti, al centro di ciò che gli appare essere il soffitto della sua casa e che leghi la pietra in precedenza lasciata cadere all'altro estremo della corda. Quest'ultima, ovviamente, si tenderà in modo da pendere verticalmente verso il pavimento (fig. 7).

Se domandiamo al nostro osservatore così disponibile di darci una spiegazione, una ragione del fenomeno, cioè della tensione della corda, egli ci risponderà che la pietra, sospesa, subisce una forza verso il basso nel campo gravitazionale, forza che è tuttavia neutralizzata dalla tensione della corda.



⁹⁶ Ivi, p. 96.

La misura della tensione della corda, concluderà l'osservatore, è così determinata dalla massa gravitazionale della pietra. Ma un altro osservatore, libero da qualsivoglia vincolo, direbbe: la corda prende parte necessariamente al moto della casa e trasmette questo moto alla pietra appesa. La tensione della corda è tanto più grande quanto basta per produrre l'accelerazione del corpo, ciò che determina la misura della tensione e la massa inerziale della pietra.

La necessità della legge dell'uguaglianza tra la massa gravitazionale e la massa inerziale appena riaffermata mostra che "il principio generale di relatività ci pone in grado di derivare in maniera puramente teorica le proprietà del campo gravitazionale"⁹⁷. Ciò significa che possiamo conoscere il corso spazio-temporale di un qualsiasi processo naturale, così come esso si svolge nel dominio galileiano rispetto a un corpo di riferimento galileiano K . Con l'ausilio del calcolo, siamo in grado di stabilire quale apparenza viene ad assumere questo processo noto ma considerato da un corpo di riferimento K' rispetto a K . Di più: dal momento che esiste un campo gravitazionale rispetto a K' , quanto abbiamo affermato ci insegna anche in che modo il campo gravitazionale influenza il processo studiato.

Giungiamo in questo modo ad apprendere che un corpo in moto rettilineo e uniforme rispetto a K compie un moto accelerato e, in generale, curvo, rispetto al corpo di riferimento K' , ossia la nostra casa monovolume, per restare nella metafora usata in precedenza. Questa accelerazione o curvatura indica l'influenza della gravitazione sul corpo in moto da parte del campo gravitazionale vigente rispetto a K' .

Che il campo gravitazionale giochi questi scherzi sul moto dei corpi è cosa risaputa, ma per quanto riguarda la luce, rispetto a una vibrazione, un'onda elettromagnetica? La risposta, benché ciò possa lasciare perplessi o interdetti, è positiva: otterremo lo stesso risultato. Rispetto a K , che è il corpo di riferimento galileiano, il raggio di luce si propaga in linea retta con la velocità c , ma è agevole mostrare che lo stesso raggio di luce non si propaga più in linea retta rispetto alla nostra casa accelerata o, fuor di metafora, rispetto a K' . Potremo tranquillamente affermare che, in generale, un raggio di luce si propaga in linea curva allorché è in presenza di un campo gravitazionale.

⁹⁷ Ivi, p. 100.

Quest'ultimo risultato, che discende dal principio generale di relatività, è particolarmente rilevante per due motivi. In primo luogo, si tratta di un risultato che è suscettibile di conferma o smentita sperimentale. Sebbene l'incurvamento previsto dalla teoria della relatività generale sia assai piccolo, nei confronti dei campi gravitazionali di cui possiamo disporre, tuttavia, afferma il fisico tedesco, "valutato per i raggi che passano in prossimità del Sole, dev'essere di 1,7 secondi. Ciò dovrebbe rendersi manifesto nel modo seguente: le stelle fisse che sono visibili nelle vicinanze del sole e suscettibili di osservazioni durante un'eclisse totale di esso dovrebbero, in tali momenti, apparire più lontane dal sole di un angolo pari al valore sopra indicato, rispetto alla posizione che hanno per noi nel cielo quando il Sole è situato in un'altra parte del firmamento"⁹⁸. In secondo luogo, da questo stesso risultato si evince che per la teoria della relatività generale la legge della velocità della luce nel vuoto, afferma il Nostro, "non può pretendere alcuna validità illimitata. Una curvatura dei raggi di luce può infatti aver luogo soltanto quando la velocità di propagazione della luce varia con la posizione"⁹⁹. Ma se le cose stanno in questi termini, potremmo osservare con un certo giustificato sconforto, non significa far naufragare la teoria della relatività ristretta e, con essa, quella generale? Insomma, se l'invarianza di c nel vuoto costituisce uno dei due pilastri fondamentali della relatività ristretta, e se su quest'ultima affonda le proprie basi la relatività generale, l'eventualità che il principio della costanza della velocità della luce abbia una validità limitata non fa di fatto crollare l'intero edificio eretto con tanta fatica e genialità? Per non incorrere in scoramenti che solo in apparenza possono sembrare giustificati, dunque creare inutile e dannosa confusione, è lo stesso Einstein a tranquillizzarci:

In realtà non è così. Possiamo soltanto concludere che la teoria della relatività ristretta non può avere un dominio illimitato di validità; i suoi risultati sono validi soltanto finché possiamo trascurare le influenze dei campi gravitazionali sui fenomeni (per esempio sulla luce)¹⁰⁰.

Si tratta ora di accertare se la posizione einsteiniana è davvero valida e accettabile come tale. Per il momento, ciò che possiamo effetti-

⁹⁸ Ivi, p. 101.

⁹⁹ Ivi, p. 102.

¹⁰⁰ *Ibid.*

vamente affermare è che con il principio generale di relatività possiamo derivare teoricamente, cioè solo attraverso il calcolo, l'influenza di un campo di gravitazione sul corso di un processo naturale, le cui leggi sono conosciute in assenza di un campo di questo tipo. Non è poco. A questo risultato se ne aggiunge un altro che, potremmo dire, ci appare ancora molto più rilevante: la teoria della relatività generale, come vedremo, ci offre infatti anche la chiave per determinare le leggi dello stesso campo gravitazionale.

Orbene, sappiamo che ci sono dei domini spazio-temporali, i quali, con buona approssimazione, si comportano in modo galileiano con un'opportuna scelta del corpo di riferimento, domini dove insomma non vi sono campi gravitazionali. Consideriamo allora un dominio di questo genere rispetto a un corpo di riferimento K' comunque mosso; ebbene, relativamente a K' esiste un campo gravitazionale che varia rispetto allo spazio e al tempo. Va da sé che il carattere di questo campo gravitazionale dipenderà dal moto che anima il sistema K' . Dice allora il fisico tedesco:

Secondo la teoria della relatività generale, la legge generale del campo gravitazionale deve essere soddisfatta per tutti i campi gravitazionali così ottenibili. Sebbene non si possano affatto produrre in questo modo tutti i campi gravitazionali possiamo tuttavia coltivare la speranza di riuscire a derivare la legge generale della gravitazione da siffatti campi gravitazionali di tipo speciale¹⁰¹.

Raggiungere questa meta ha significato superare un ostacolo di grande difficoltà che, per essere affrontato, comporta un imprescindibile approfondimento della nostra concezione del continuo spazio-temporale: un approfondimento che s'impone direttamente all'attenzione appena ci si concentra sul comportamento degli orologi e dei regoli nei riguardi di un corpo in rotazione.

4. Come si comportano gli orologi e i regoli

Torniamo al nostro dominio spazio-temporale privo di campo gravitazionale rispetto a un sistema di riferimento S , di cui sceglieremo lo stato di moto. Rispetto al dominio considerato S , esso sarà un corpo o sistema di riferimento galileiano, sicché i risultati della teoria della relatività ristretta resteranno validi e legittimi ri-

¹⁰¹ Ivi, p. 103.

vamente affermare è che con il principio generale di relatività possiamo derivare teoricamente, cioè solo attraverso il calcolo, l'influenza di un campo di gravitazione sul corso di un processo naturale, le cui leggi sono conosciute in assenza di un campo di questo tipo. Non è poco. A questo risultato se ne aggiunge un altro che, potremmo dire, ci appare ancora molto più rilevante: la teoria della relatività generale, come vedremo, ci offre infatti anche la chiave per determinare le leggi dello stesso campo gravitazionale.

Orbene, sappiamo che ci sono dei domini spazio-temporali, i quali, con buona approssimazione, si comportano in modo galileiano con un'opportuna scelta del corpo di riferimento, domini dove insomma non vi sono campi gravitazionali. Consideriamo allora un dominio di questo genere rispetto a un corpo di riferimento K' comunque mosso; ebbene, relativamente a K' esiste un campo gravitazionale che varia rispetto allo spazio e al tempo. Va da sé che il carattere di questo campo gravitazionale dipenderà dal moto che anima il sistema K' . Dice allora il fisico tedesco:

Secondo la teoria della relatività generale, la legge generale del campo gravitazionale deve essere soddisfatta per tutti i campi gravitazionali così ottenibili. Sebbene non si possano affatto produrre in questo modo tutti i campi gravitazionali possiamo tuttavia coltivare la speranza di riuscire a derivare la legge generale della gravitazione da siffatti campi gravitazionali di tipo speciale¹⁰¹.

Raggiungere questa meta ha significato superare un ostacolo di grande difficoltà che, per essere affrontato, comporta un imprescindibile approfondimento della nostra concezione del continuo spazio-temporale: un approfondimento che s'impone direttamente all'attenzione appena ci si concentra sul comportamento degli orologi e dei regoli nei riguardi di un corpo in rotazione.

4. Come si comportano gli orologi e i regoli

Torniamo al nostro dominio spazio-temporale privo di campo gravitazionale rispetto a un sistema di riferimento S , di cui sceglieremo lo stato di moto. Rispetto al dominio considerato S , esso sarà un corpo o sistema di riferimento galileiano, sicché i risultati della teoria della relatività ristretta resteranno validi e legittimi ri-

¹⁰¹ Ivi, p. 103.

spetto a KS. Consideriamo ora lo stesso dominio riferito a S' , cioè a un secondo corpo di riferimento, che ruota uniformemente rispetto a S . Per rendere più semplice la spiegazione, si immagini S' come un disco circolare piatto che ruota uniformemente sul proprio piano intorno al suo centro (fig. 8).

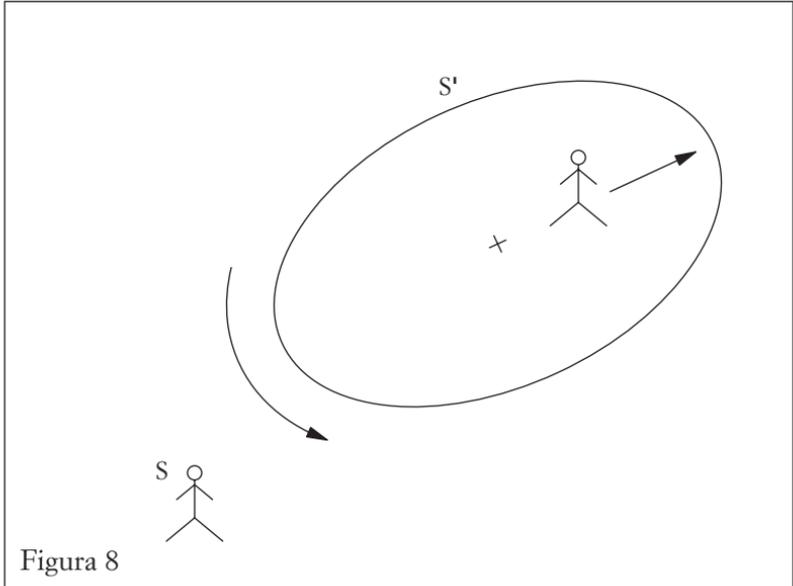


Figura 8

Orbene, un osservatore seduto su S' in posizione eccentrica, cioè spostata rispetto al centro del corpo di riferimento, avverte in modo distinto e ben identificabile una forza che, in direzione radiale lo spinge verso l'esterno, verso la periferia del disco. Come interpreterà questo fenomeno un secondo osservatore, completamente esterno ed estraneo al corpo di riferimento, e in quiete rispetto all'originario corpo di riferimento S ? Sicuramente come un effetto dell'inerzia, come una forza centrifuga. E cosa penserà, da parte sua, l'osservatore seduto, dunque interno al corpo di riferimento, su S' ? Anzitutto, potrà ben ritenere il suo disco un corpo di riferimento in quiete, ed è legittimato a farlo in base al principio generale di relatività. Posto ciò, penserà e valuterà la forza che avverte agente su di lui e non solo su di lui, ma anche su tutti i corpi che sono in quiete rispetto al disco, come un effetto del campo gravitazio-

nale, sebbene sia consapevole del fatto che tale campo è distribuito in modo diverso e non controllabile con la teoria newtoniana della gravitazione. Nel caso che qui ci interessa, in effetti, il campo gravitazionale perde qualsiasi consistenza, si annulla letteralmente al centro del disco, mentre cresce proporzionalmente alla distanza dal centro verso la periferia. Questo “dettaglio”, non turba né disturba per niente la fede del nostro osservatore nei confronti del principio generale di relatività, che anzi si appresta a compiere alcuni esperimenti per giungere a stabilire definizioni esatte dei dati temporali e spaziali rispetto alla sua posizione.

E, infatti, per prima cosa l'osservatore in S' sceglie la disposizione e colloca due orologi di identica costruzione: il primo orologio trova posto al centro del disco, il secondo nella sua parte periferica; ciò significa che i due orologi sono in quiete rispetto al disco medesimo. Quale ritmo dovremo attribuire ai due orologi se intendiamo considerarli da S, cioè dal riferimento galileiano non ruotante? Forse il medesimo ritmo, la stessa marcia cadenzata? Sicuramente no! Il motivo è semplice: visto da S, l'orologio posto al centro del disco non ha velocità, mentre quello sulla periferia, sul bordo del disco, in virtù della rotazione è in moto rispetto a S. Così, in base a quanto si è accertato circa il comportamento degli orologi nel contesto specifico della teoria della relatività ristretta, dovremo concludere che l'orologio periferico, considerato da S, ha un ritmo “permanentemente più lento”¹⁰² di quello dell'orologio collocato al centro del nostro disco. Un osservatore seduto a fianco dell'orologio centrale sul disco registrerebbe lo stesso effetto. Dice Einstein:

In ogni campo gravitazionale, un orologio camminerà con ritmi più o meno rapidi a seconda della posizione in cui l'orologio stesso è situato (in quiete). Per questa ragione non è possibile ottenere una definizione ragionevole del tempo servendosi di orologi collocati in quiete rispetto al corpo di riferimento¹⁰³.

La stessa difficoltà si incontra allorché s'intende offrire, per l'esempio in questione, una definizione accettabile delle coordinate spaziali. Il nostro osservatore, in questo caso, dispone adesso di un regolo graduato, supposto più corto rispetto al raggio del disco. Egli applicherà il suo strumento tangenzialmente alla periferia del

¹⁰² *Ivi*, p. 105.

¹⁰³ *Ibid.*

disco. Ebbene, cosa vedrà l'osservatore posto su S ? Si accorgerà che la lunghezza del regolo è minore di 1, dal momento che, per la teoria della relatività ristretta, i corpi in moto subiscono una contrazione nella direzione del moto. Ma se il nostro osservatore interno al corpo di riferimento S' applica il suo regolo nella direzione del raggio del disco, l'osservatore in S non risconterà alcuna contrazione. Con il fisico tedesco possiamo allora concludere nei seguenti termini.

Se l'osservatore misura con il proprio regolo dapprima la circonferenza e poi il diametro del disco, dividendo l'uno per l'altro egli non otterrà come quoziente il ben noto numero $\pi = 3,14 (\dots)$, ma un numero più grande, mentre naturalmente, per un disco in quiete rispetto a S quest'operazione dovrebbe dare esattamente π . Ciò dimostra che le proposizioni della geometria euclidea non possono risultare esattamente valide sul disco rotante, e neppure in generale in un campo gravitazionale, per lo meno se attribuiamo al regolo in tutte le posizioni e in ogni orientazione la lunghezza 1. Perde quindi il significato anche il concetto di retta. Non siamo perciò in grado di definire esattamente le coordinate x, y, z , rispetto al disco, per mezzo del metodo usato nella teoria della relatività ristretta. Finché tuttavia non siano state definite le coordinate e i tempi degli eventi, neanche le leggi naturali in cui figurano queste coordinate e questi tempi possono avere un significato esatto. In tal modo tutte le nostre conclusioni basate sulla relatività generale sembrerebbero messe in discussione¹⁰⁴.

Il condizionale è d'obbligo. Le cose non stanno, infatti, esattamente in questi termini, e ce ne renderemo facilmente conto operando quell'approfondimento che, come in precedenza annunciato, si rende ormai assolutamente indispensabile.

5. Il continuo

Per prima cosa dovremo riflettere attentamente sul significato delle nozioni di "continuo euclideo" e "continuo non euclideo". Einstein in merito si serve di un esempio tanto semplice quanto efficace: quello della tavola di marmo. Un oggetto quale una tavola di marmo è un continuo nel senso che a partire da un punto qualsiasi della sua superficie scelto a caso, possiamo giungere a un

¹⁰⁴ Ivi, p. 106.

disco. Ebbene, cosa vedrà l'osservatore posto su S ? Si accorgerà che la lunghezza del regolo è minore di 1, dal momento che, per la teoria della relatività ristretta, i corpi in moto subiscono una contrazione nella direzione del moto. Ma se il nostro osservatore interno al corpo di riferimento S' applica il suo regolo nella direzione del raggio del disco, l'osservatore in S non risconterà alcuna contrazione. Con il fisico tedesco possiamo allora concludere nei seguenti termini.

Se l'osservatore misura con il proprio regolo dapprima la circonferenza e poi il diametro del disco, dividendo l'uno per l'altro egli non otterrà come quoziente il ben noto numero $\pi = 3,14 (\dots)$, ma un numero più grande, mentre naturalmente, per un disco in quiete rispetto a S quest'operazione dovrebbe dare esattamente π . Ciò dimostra che le proposizioni della geometria euclidea non possono risultare esattamente valide sul disco rotante, e neppure in generale in un campo gravitazionale, per lo meno se attribuiamo al regolo in tutte le posizioni e in ogni orientazione la lunghezza 1. Perde quindi il significato anche il concetto di retta. Non siamo perciò in grado di definire esattamente le coordinate x, y, z , rispetto al disco, per mezzo del metodo usato nella teoria della relatività ristretta. Finché tuttavia non siano state definite le coordinate e i tempi degli eventi, neanche le leggi naturali in cui figurano queste coordinate e questi tempi possono avere un significato esatto. In tal modo tutte le nostre conclusioni basate sulla relatività generale sembrerebbero messe in discussione¹⁰⁴.

Il condizionale è d'obbligo. Le cose non stanno, infatti, esattamente in questi termini, e ce ne renderemo facilmente conto operando quell'approfondimento che, come in precedenza annunciato, si rende ormai assolutamente indispensabile.

5. Il continuo

Per prima cosa dovremo riflettere attentamente sul significato delle nozioni di "continuo euclideo" e "continuo non euclideo". Einstein in merito si serve di un esempio tanto semplice quanto efficace: quello della tavola di marmo. Un oggetto quale una tavola di marmo è un continuo nel senso che a partire da un punto qualsiasi della sua superficie scelto a caso, possiamo giungere a un

¹⁰⁴ Ivi, p. 106.

altro punto qualsiasi passando sempre da un punto a un punto più vicino, senza dover compiere alcuna acrobazia. Oltre alla tavola avremo a disposizione un numero sufficientemente grande di regoli di eguale lunghezza, in ogni caso di dimensioni molto più piccole rispetto alla superficie di marmo. Disporremo quattro dei nostri regoli sulla tavola, in modo da costruire un quadrato al quale, ripetendo la procedura, ne aggiungeremo altri facendo bene attenzione che ciascun quadrato presenti un lato in comune con il suo precedente. L'operazione avrà termine allorché l'intera lastra di marmo sarà ricoperta in modo che ogni lato di un quadrato appartenga a due quadrati e ogni vertice a quattro quadrati. Per controllare che le figure siano tutte effettivamente rispondenti alle proprietà del quadrato utilizzeremo i restanti regoli, con i quali misureremo le diagonali. Se l'operazione si realizza potremo ben affermare, con il Nostro, che "i punti della lastra di marmo costituiscono un continuo euclideo rispetto al regolo che è stato usato come 'intervallo'. Scegliendo un vertice di un quadrato come 'origine', io posso caratterizzare qualunque altro vertice di uno dei nostri quadrati in riferimento a questa origine per mezzo di due numeri. Mi occorre soltanto indicare quanti regoli devo superare quando, partendo dall'origine, procedo verso 'destra' e poi 'verso l'alto' onde arrivare al vertice del quadrato preso in considerazione. Questi due numeri saranno allora le 'coordinate cartesiane' di questo vertice in riferimento al 'sistema di coordinate cartesiane' determinato dalla disposizione dei regoli"¹⁰⁵.

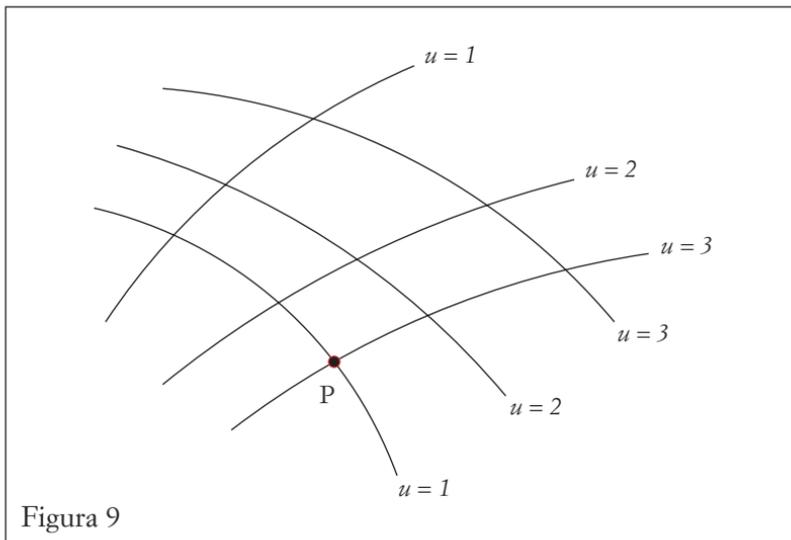
Ma immaginiamo il caso che, nel costruire il nostro continuo, qualcosa non vada per il verso giusto, ovvero subentrino delle circostanze che modificano l'esito della nostra costruzione. A un certo punto, infatti, ci accorgiamo, non senza una evidente preoccupazione, che i nostri regoli si dilatano man mano che, in proporzione, la temperatura aumenta a causa di un fuoco che brucia proprio sotto il centro stesso della tavola di marmo. Che cosa accade? Che mentre i regoli periferici possono ancora essere fatti coincidere con la lastra, quelli presenti nella zona centrale della tavola, dove più intensamente si fa sentire l'azione del fuoco sottostante, si dilatano, creando così un vero e proprio disordine nella costruzione

¹⁰⁵ Ivi, p. 108.

dei quadrati. La conseguenza è che, rispetto agli intervalli unitari (cioè i nostri regoli), la lastra non è più identificabile come un continuo cartesiano euclideo e non potremo più definire le coordinate cartesiane.

Prima di esser preda della inevitabile disperazione, è opportuno considerare un'ulteriore possibilità, una vera e propria via di uscita. Si tratta di assumere che tutti i regoli, di ogni specie e di qualsiasi materiale, si comportino nello stesso identico modo nei riguardi della temperatura, sicché un eventuale effetto di quest'ultima possa essere colto solo considerando il comportamento geometrico dei regoli. Posto ciò, potremo procedere assegnando la distanza 1 a due parti della lastra di marmo quando questi ultimi coincidono con le due estremità di uno dei regoli. Ovviamente dovremo rinunciare al metodo delle coordinate cartesiane e sostituirlo con un altro metodo che non presupponga la validità della geometria euclidea per i corpi rigidi.

Al grande matematico C.F. Gauss dobbiamo la creazione di una procedura in grado di poter risolvere il problema. Vediamo di cosa si tratta. Consideriamo ancora una volta il nostro tavolo di marmo. Sulla superficie della piastra potremo tracciare arbitrariamente delle curve che, con Einstein, denomineremo u e indicheremo con un numero (fig. 9).



Tra $u = 1$ e $u = 2$ o tra $u = 2$ e $u = 3$ potremo ben immaginare tante altre curve quanti sono i numeri reali compresi tra 1 e 2 o 2 e 3. Tutto questo significa che, attraverso una infinità di curve, finiremo per giungere a coprire interamente tutta la superficie della lastra di marmo. Nel tracciare le curve dovremo solo avere l'accortezza di fare in modo che esse non si intersechino e che, per ogni punto della superficie, passi una e una sola curva. Possiamo tranquillamente affermare che ogni punto della nostra lastra di marmo avrà in tal modo un valore definito di u . Prendiamo adesso in considerazione la possibilità di tracciare arbitrariamente un secondo sistema di curve, che chiameremo v e indicheremo, come del resto si è fatto per il sistema precedente, con un numero. Non c'è dubbio che, una volta compiuta l'operazione, a ogni punto della superficie della lastra di marmo corrisponderà un valore u e un valore v . Ebbene, questi due punti sono, per l'appunto, le coordinate gaussiane della superficie considerata. Così, se il punto P ha le coordinate gaussiane $u = 3$, $v = 1$, a punti estremamente vicini, ad esempio P e P', corrisponderanno le coordinate:

$$P : u, v$$

$$P' : u + du, v + dv \text{ (dove } du \text{ e } dv \text{ sono numeri piccolissimi).}$$

Con d_s , indicheremo la distanza, anch'essa espressa da un numero estremamente piccolo. Avremo così:

$$d_s^2 = g_{11} du^2 + 2g_{12} du dv + g_{22} dv^2,$$

dove g_{11} , g_{12} , g_{22} sono grandezze che dipendono in modo definito da u e v e determinano il comportamento dei regoli rispetto alle u e alle v , quindi anche relativamente alla superficie del nostro tavolo. Come precisa il fisico tedesco, potremmo dire che "le coordinate gaussiane non sono altro che un'associazione fra due serie di numeri e i punti della superficie considerata di natura tale che a punti spazialmente vicini risultino associati valori numerici pochissimo differenti fra loro. Queste considerazioni sono innanzitutto valide per un continuo a due dimensioni"¹⁰⁶. In ogni caso, anche in presenza di più di

¹⁰⁶ Ivi, p. 111.

due dimensioni, ossia tre, quattro... dimensioni, il modello di Gauss resta perfettamente applicabile e affidabile. Prendiamo ad esempio il caso di un continuo a quattro dimensioni. Potremo rappresentarlo nel modo seguente. In ogni punto del continuo associeremo quattro numeri x_1, x_2, x_3, x_4 , che chiameremo coordinate. Ma sappiamo che a punti vicini corrispondono valori vicini delle coordinate. Così, se si associa una distanza d_S , misurabile e fisicamente definita, ai punti adiacenti P e P', allora otterremo la formula:

$d_S^2 = g_{11} dx_1^2 + 2g_{12} dx_1 dx_2 + \dots + g_{44} dx_4^2$, dove le g_{ij} hanno valori che variano con la posizione occupata nel dominio.

È opportuno tenere bene a mente che solo nel caso in cui il continuo considerato è euclideo potremo associare ai punti del continuo le coordinate x_1, \dots, x_n , e dunque poter correttamente scrivere:

$$d_S^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2.$$

In tal caso, nel continuo quadridimensionale sussistono relazioni che possono essere dette analoghe a quelle valide nelle nostre misure tridimensionali. L'espressione gaussiana del d_S è tuttavia possibile solo quando zone particolarmente piccole del continuo in questione possono essere viste e considerate come continui euclidei. Una zona di questo genere potrebbe, ad esempio, essere un particolare ambito della nostra lastra di marmo, ed esattamente quello in cui la temperatura è praticamente costante e dove, di conseguenza, il comportamento geometrico dei regoli è quasi euclideo. In definitiva, conclude Einstein,

il sistema di coordinate gaussiane è una generalizzazione logica del sistema di coordinate cartesiane. Esso risulta applicabile anche a continui non euclidei, ma solo quando, rispetto alla "misura" definita "distanza", piccole parti del continuo considerato si comportino in modo euclideo, con approssimazione tanto maggiore quanto più piccola è la parte del continuo sotto la nostra osservazione¹⁰⁷.

Siamo ora in grado di risolvere la difficoltà che in precedenza avevamo sollevato a proposito della costanza della velocità della luce c ;

¹⁰⁷ Ivi, p. 112.

prima di procedere fisseremo tuttavia l'attenzione sul continuo spazio-temporale della teoria della relatività ristretta, considerato come un continuo euclideo, ovvero ci soffermeremo doverosamente sull'opera svolta in tal senso dal matematico di origine lituana H. Minkowski, che fu insegnante del giovane Albert al Politecnico federale di Zurigo. Se, come sembra, Minkowski si era fatto un'impressione non certo lusinghiera di quello studente che raramente aveva avuto modo di riconoscere tra i frequentatori delle sue lezioni, la sua valutazione e considerazione della teoria elaborata nel 1905 sulla base del principio di relatività era ben altra.

6. Lo spazio-tempo della relatività ristretta

Nel 1908, in occasione di un congresso tenuto a Colonia, di fronte a un pubblico numeroso formato da matematici, fisici e filosofi, Minkowski pronunciò un intervento intitolato *Raum und Zeit* (*Spazio e tempo*) destinato a restare nella storia. Minkowski esordiva nei seguenti termini:

Signori! Le considerazioni che sono per esporvi sullo spazio e sul tempo, sono cresciute nel campo della fisica sperimentale; in ciò sta la loro forza. Esse hanno una tendenza radicale. Da quest'ora in poi lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, debbono piombar nelle tenebre e soltanto una specie di unione dei due deve serbare la sua individualità¹⁰⁸;

appunto, lo spazio-tempo o *continuum* spazio-temporale. A scanso di facili, ma pericolosi equivoci, Minkowski ha la premura di precisare:

Siano x, y, z , coordinate rettilinee per lo spazio, e t rappresenti il tempo. Oggetto della nostra osservazione sono sempre e soltanto, spazio e tempo insieme considerati. Non ha mai alcuno osservato un *luogo* se non ad un certo *tempo*, né un *tempo* se non in un luogo determinato. Io rispetto ancora il dogma che spazio e tempo hanno ciascuno una significazione propria indipendente. Un punto-spazio, in un punto-tempo, ossia un sistema di valori x, y, z, t , lo chiamo punto universale (*Weltpunkt*). La molteplicità di

¹⁰⁸ H. Minkowski, *Raum und Zeit*, in "Physikalischen Zeitschrift", 10, 1909; trad. it. di G. Gianfranceschi, *Spazio e tempo*, in "Il nuovo Cimento", LV, 11-12, 1909, p. 334. L'intervento fu pubblicato postumo l'anno seguente in seguito all'improvvisa quanto prematura scomparsa dell'autore.

prima di procedere fisseremo tuttavia l'attenzione sul continuo spazio-temporale della teoria della relatività ristretta, considerato come un continuo euclideo, ovvero ci soffermeremo doverosamente sull'opera svolta in tal senso dal matematico di origine lituana H. Minkowski, che fu insegnante del giovane Albert al Politecnico federale di Zurigo. Se, come sembra, Minkowski si era fatto un'impressione non certo lusinghiera di quello studente che raramente aveva avuto modo di riconoscere tra i frequentatori delle sue lezioni, la sua valutazione e considerazione della teoria elaborata nel 1905 sulla base del principio di relatività era ben altra.

6. Lo spazio-tempo della relatività ristretta

Nel 1908, in occasione di un congresso tenuto a Colonia, di fronte a un pubblico numeroso formato da matematici, fisici e filosofi, Minkowski pronunciò un intervento intitolato *Raum und Zeit* (*Spazio e tempo*) destinato a restare nella storia. Minkowski esordiva nei seguenti termini:

Signori! Le considerazioni che sono per esporvi sullo spazio e sul tempo, sono cresciute nel campo della fisica sperimentale; in ciò sta la loro forza. Esse hanno una tendenza radicale. Da quest'ora in poi lo spazio in se stesso, e il tempo in se stesso, debbono piombar nelle tenebre e soltanto una specie di unione dei due deve serbare la sua individualità¹⁰⁸;

appunto, lo spazio-tempo o *continuum* spazio-temporale. A scanso di facili, ma pericolosi equivoci, Minkowski ha la premura di precisare:

Siano x, y, z , coordinate rettilinee per lo spazio, e t rappresenti il tempo. Oggetto della nostra osservazione sono sempre e soltanto, spazio e tempo insieme considerati. Non ha mai alcuno osservato un *luogo* se non ad un certo *tempo*, né un *tempo* se non in un luogo determinato. Io rispetto ancora il dogma che spazio e tempo hanno ciascuno una significazione propria indipendente. Un punto-spazio, in un punto-tempo, ossia un sistema di valori x, y, z, t , lo chiamo punto universale (*Weltpunkt*). La molteplicità di

¹⁰⁸ H. Minkowski, *Raum und Zeit*, in "Physikalischen Zeitschrift", 10, 1909; trad. it. di G. Gianfranceschi, *Spazio e tempo*, in "Il nuovo Cimento", LV, 11-12, 1909, p. 334. L'intervento fu pubblicato postumo l'anno seguente in seguito all'improvvisa quanto prematura scomparsa dell'autore.

tutti i sistemi immaginabili di valori x, y, z, t , si chiamerà universo (*Welt*). Io potrei con arditi tratti di gesso tracciar sulla tavola i 4 assi dell'universo. Ma già un asse è costituito da molecole vibranti, e compie il cammino della terra, dà quindi abbastanza da astrarre; l'astrazione un po' più grande legata col numero 4 non dà fastidio al matematico. Per non lasciar in nessuna parte un vuoto noioso ci figuriamo che in ogni tempo sia presente qualche cosa di osservabile. Per non dire materia o elettricità, per questo qualche cosa adopererò la parola sostanza¹⁰⁹.

Orbene, continua il noto matematico:

Volgiamo la nostra attenzione al punto sostanziale presente nel punto universale x, y, z, t , e ammettiamo di essere sempre in grado di riconoscere questo punto sostanziale in qualunque altro tempo. Ad un elemento di tempo dt corrispondano le variazioni dx, dy, dz , delle coordinate di spazio di questo punto sostanziale. Otteniamo allora come immagine, per così dire, del perpetuo corso di vita del punto sostanziale una curva nell'universo, una *linea universale* (*Weltlinie*) i cui punti si riferiscono univocamente al parametro $t - \infty$ a $+\infty$. Tutto l'universo risulta così scomposto in tali linee universali, e potrei senz'altro notare fin d'ora che, a mio parere, le leggi fisiche dovrebbero trovare la loro perfetta espressione come scambievoli relazioni fra queste *linee universali*. Mediante il concetto di spazio e tempo restano determinate le molteplicità $t = 0$ e le due facce $t > 0$ e $t < 0$ ¹¹⁰.

Posto ciò, Minkowski mette a confronto i due gruppi di trasformazione, quello galileiano-newtoniano e quello derivante dall'assunto della costanza della velocità della luce, ossia le ormai famose equazioni formulate da Lorentz ricavate per altra via, all'interno di un *corpus* teorico ben definito, da Einstein. L'esito è davvero rilevante: le nuove equazioni di trasformazione soddisfano alcune fondamentali condizioni e, non da ultimo, mostrano chiaramente il superamento delle diverse disarmonie o difficoltà incontrate con il vecchio gruppo. Vediamo, in ordine, di cosa si tratta.

Si considerino due punti nel continuo quadridimensionale o, detto in altri termini, due eventi. La loro reciproca posizione nel continuo quadridimensionale rispetto a un sistema di riferimento inerziale, cioè galileiano, è data attraverso le differenze dx, dy, dz delle coor-

¹⁰⁹ Ivi, pp. 335-336.

¹¹⁰ Ivi, p. 336.

dinate spaziali, e dalla differenza dt della coordinata temporale. Nei confronti di un secondo sistema di riferimento inerziale, supporremo che le analoghe differenze siano dx' , dy' , dz' , dt' . Ebbene, queste grandezze, dice Minkowski, soddisfano sempre la condizione secondo cui:

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2,$$

condizione che determina anche la validità delle leggi di trasformazione di Lorentz.

Ma possiamo anche esprimerci così come segue. La grandezza

$$d_s^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2,$$

grandezza che riguarda due punti o eventi del continuo spazio-temporale quadridimensionale, ha lo stesso valore per tutti i sistemi di riferimento galileiani. Ma c'è dell'altro. Se con la variabile immaginaria $\sqrt{-1} ct$ sostituiamo la variabile temporale reale t , potremo agevolmente sostituire $x, y, z, \sqrt{-1} ct$ con x_1, x_2, x_3, x_4 . Poiché d_s non è che la distanza tra i due eventi o punti del continuo, avremo che

$$d_s^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

risulta indipendente dalla scelta del sistema di riferimento, con la possibilità di poter considerare il continuo spazio-temporale in accordo con la teoria della relatività ristretta come un continuo quadridimensionale euclideo.

Vediamo adesso in che senso le equazioni di trasformazione di Lorentz, così come espresse nella formulazione minkowskiana, si accordino perfettamente con la nuova concezione quadridimensionale. Per rendere più agevole la comprensione, limitatamente alla seconda conseguenza che deriva dal gruppo lorentziano, cioè la dilatazione del tempo, ci raffigureremo i fenomeni attraverso un diagramma che, in forma assai più semplificata, si ispira a quello costruito dallo stesso Minkowski, dal quale trae anche la sua identificazione.

Assumiamo di operare in un sistema inerziale S la cui origine O rappresenta l'evento considerato, ad esempio il moto di una particella (fig. 10). Per semplificare le cose opereremo con la sola coordinata spaziale e , naturalmente, con la coordinata del tempo t .

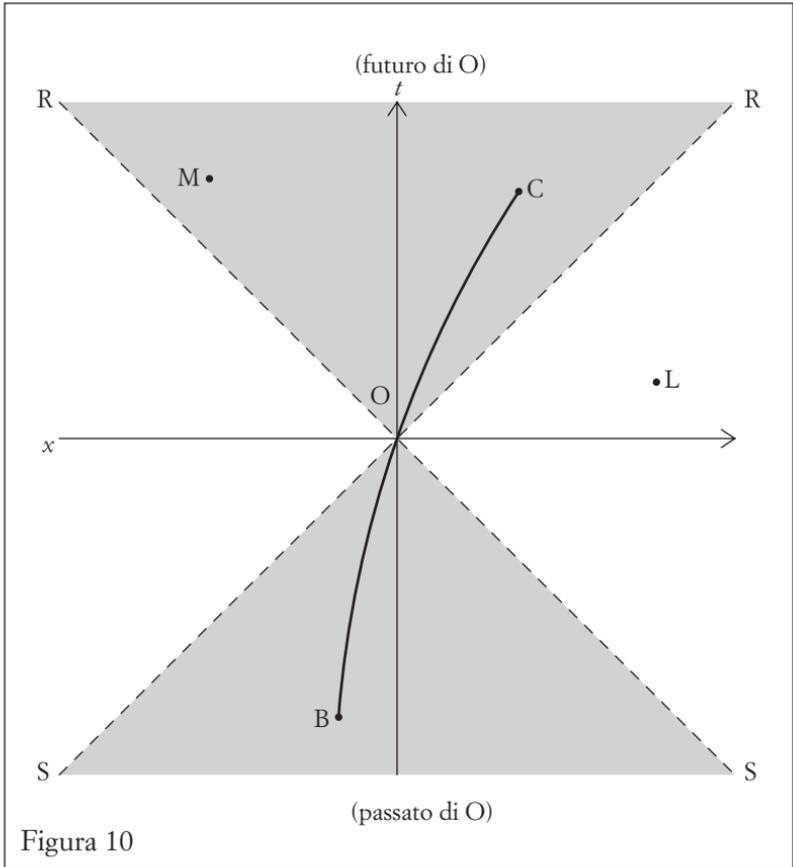


Figura 10

La curva OC è la traiettoria seguita dalla particella materiale che si trova qui e ora nella serie dei suoi stati successivi, insomma nella sua evoluzione. Di questa traiettoria o, per meglio dire, linea di universo, si è riportata anche la parte inferiore OB che rappresenterebbe ciò che noi immaginiamo possa essere stato il percorso seguito dalla particella prima di arrivare in O . Le due linee OR tratteggiate, le cui equazioni sono $x = \pm ct$, stanno a rappresentare tutti i punti dello spazio-tempo raggiunti da un raggio di luce emesso da O . Le rispettive linee inferiori tratteggiate SO rappresenteranno, evidentemente, tutti i punti dello spazio-tempo dai quali potrebbe essere emesso un raggio di luce che giunge qui e ora in O . Le due linee SOR delimitano quello che notoriamente e giustamente è denomi-

nato cono di luce¹¹¹ relativo a O, cioè la zona più scura del diagramma.

La parte superiore della figura, del cono di luce, sta a rappresentare il futuro di O, cioè l'insieme di tutti quegli eventi ai quali la nostra particella può essere presente; allo stesso modo, la parte inferiore della figura rappresenterà il passato di O, ovvero l'insieme di tutti gli eventi ai quali la nostra particella avrebbe potuto esser presente. Si capisce bene, di conseguenza, che la particella in oggetto, qui e ora in O, non può assolutamente partecipare, e neppure aver partecipato, a tutti quegli eventi che si verificano, o si sono verificati, al di fuori del cono di luce, cioè la zona più chiara della figura: per farlo dovrebbe essere animata da una velocità superiore a quella di c , cioè della luce. È il caso dell'evento L, che non può ricevere alcun segnale luminoso proveniente da O, e che, per converso, non può inviarne alcuno all'indirizzo di O: un evento come L, situato in questa zona, non è infatti causalmente connesso con O. Perché ciò possa avvenire, l'effetto dovrebbe precedere la causa.

Quanto appena affermato, è possibile verificarlo agevolmente una volta che ci si è collocati in un sistema inerziale S a cui appartengono, come precedentemente esplicitato, gli assi x , t , e l'origine O. Ma cosa accade, dal punto di vista dei tempi, nel momento in cui questi stessi eventi vengono considerati da un osservatore posto su un sistema S' che si muove di moto rettilineo e uniforme rispetto a S? Ebbene, focalizziamo l'attenzione sul punto o evento M, che è compreso nel cono di luce di O e quindi, per quanto detto in precedenza, causalmente connesso con O. Rispetto al sistema di riferimento inerziale S, l'evento M accade dopo O e non sarà possibile rintracciare un sistema S' tale che O ed M appaiano contemporanei o, addirittura, invertiti, sicché M precederebbe O. Non riusciremo mai a raggiungere un simile obiettivo proprio perché non è possibile invertire la causa con l'effetto. Così, se O è la causa dell'evento M, allora O precederà M in qualsivoglia sistema inerziale. Le cose non stanno in questi stessi termini se prendiamo in considerazione il punto o evento L, che non è causalmente connesso con O. È ben vero che anche L, essendo posi-

¹¹¹ La denominazione si spiega facilmente se si pensa che l'aggiunta di una seconda dimensione spaziale al diagramma, cioè la dimensione y , comporterebbe la rotazione della figura intorno all'asse del tempo t , dando come risultato, appunto, un cono.

zionato sopra l'asse delle ascisse, presenta un t positivo, ossia accade dopo O nel sistema S ; ma attraverso il gruppo di trasformazioni di Lorentz possiamo trovare un sistema S' per il quale l'evento L è contemporaneo e perfino precedente l'evento O . Ciò significa che la relazione di successione di due punti o eventi che non sono legati dalla connessione di causa ed effetto, come per O e L , dipende dal sistema di riferimento scelto, e può essere addirittura invertita.

7. Il continuo non euclideo della relatività generale

La difficoltà, che ci ha costretti a un doveroso quanto necessario approfondimento, consisteva, è opportuno ricordarlo, nei seguenti due risultati:

- a) la teoria della relatività generale non può accettare la legge della costanza della velocità della luce giacché, quando si è in presenza di un campo gravitazionale, essa deve sempre dipendere dalle coordinate;
- b) la presenza di un campo gravitazionale invalida la definizione delle coordinate e del tempo che ci aveva condotto alla teoria della relatività ristretta.

Orbene, la considerazione di questi risultati, dice Einstein, ci porta

alla convinzione che, nell'ambito della relatività generale, il continuo spazio-temporale non può essere considerato come un continuo euclideo, poiché qui si presenta il caso generale, che abbiamo imparato a conoscere per il continuo bidimensionale costituito dalla lastra di marmo con variazioni locali di temperatura. Proprio come sarebbe stato impossibile in tale esempio costruire un sistema di coordinate cartesiane per mezzo di regoli uguali, così qui è impossibile costruire un sistema (corpo di riferimento) per mezzo di corpi rigidi e di orologi, in modo tale che i regoli-campione e gli orologi, disposti rigidamente gli uni rispetto agli altri, indichino direttamente la posizione e il tempo¹¹².

In che modo potremo dunque superare questo ostacolo davvero ingombrante e determinante? Semplicemente riferendo il continuo

¹¹² Einstein, *Relatività...*, cit., p. 115.

zionato sopra l'asse delle ascisse, presenta un t positivo, ossia accade dopo O nel sistema S ; ma attraverso il gruppo di trasformazioni di Lorentz possiamo trovare un sistema S' per il quale l'evento L è contemporaneo e perfino precedente l'evento O . Ciò significa che la relazione di successione di due punti o eventi che non sono legati dalla connessione di causa ed effetto, come per O e L , dipende dal sistema di riferimento scelto, e può essere addirittura invertita.

7. Il continuo non euclideo della relatività generale

La difficoltà, che ci ha costretti a un doveroso quanto necessario approfondimento, consisteva, è opportuno ricordarlo, nei seguenti due risultati:

- a) la teoria della relatività generale non può accettare la legge della costanza della velocità della luce giacché, quando si è in presenza di un campo gravitazionale, essa deve sempre dipendere dalle coordinate;
- b) la presenza di un campo gravitazionale invalida la definizione delle coordinate e del tempo che ci aveva condotto alla teoria della relatività ristretta.

Orbene, la considerazione di questi risultati, dice Einstein, ci porta

alla convinzione che, nell'ambito della relatività generale, il continuo spazio-temporale non può essere considerato come un continuo euclideo, poiché qui si presenta il caso generale, che abbiamo imparato a conoscere per il continuo bidimensionale costituito dalla lastra di marmo con variazioni locali di temperatura. Proprio come sarebbe stato impossibile in tale esempio costruire un sistema di coordinate cartesiane per mezzo di regoli uguali, così qui è impossibile costruire un sistema (corpo di riferimento) per mezzo di corpi rigidi e di orologi, in modo tale che i regoli-campione e gli orologi, disposti rigidamente gli uni rispetto agli altri, indichino direttamente la posizione e il tempo¹¹².

In che modo potremo dunque superare questo ostacolo davvero ingombrante e determinante? Semplicemente riferendo il continuo

¹¹² Einstein, *Relatività...*, cit., p. 115.

spazio-temporale quadridimensionale a un qualsiasi sistema di coordinate gaussiane: a ogni punto del continuo, cioè l'evento, corrisponderanno quattro numeri: x_1, x_2, x_3, x_4 , ossia le coordinate. Ma a queste coordinate non potremo assegnare un significato fisico diretto: esse ci servono semplicemente e solamente per poter assegnare un numero ai punti del continuo in modo definito, benché arbitrario. Si dirà: cosa significa dare a un evento certe particolari coordinate che, in se stesse, non hanno alcun significato, fisicamente parlando? La risposta del Nostro è chiara e precisa:

Ogni descrizione fisica si risolve in una serie di enunciati, ciascuno dei quali si riferisce alla coincidenza spazio-temporale di due eventi A e B. In termini di coordinate gaussiane, ogni enunciato siffatto si traduce nel fatto che i due eventi hanno le stesse quattro coordinate x_1, x_2, x_3, x_4 . In realtà, dunque, la descrizione del continuo spazio-temporale per mezzo di coordinate gaussiane sostituisce completamente la descrizione mediante un corpo di riferimento, senza presentare i difetti di quest'ultimo metodo di descrizione; essa non risulta vincolata al carattere euclideo del continuo che deve venir rappresentato¹¹³.

8. Il principio di relatività generale e il problema della gravitazione

Disponiamo ora di tutti gli elementi che ci consentono di giungere a dare una formulazione esatta del principio di relatività. Poiché, come appena accertato in via definitiva e generale, nella descrizione spazio-temporale non è possibile utilizzare sistemi di riferimento rigidi, come si è invece potuto fare in sede di teoria della relatività ristretta, al loro posto avremo il sistema delle coordinate gaussiane. Ne consegue che l'enunciato con il quale si è indicato il principio di relatività, dal quale ha preso avvio questa nostra disamina, dovrà essere sostituito. Non diremo più che "tutti i corpi di riferimento K, K', eccetera, sono equivalenti ai fini della descrizione dei fenomeni naturali (formulazione delle leggi generali della natura), qualunque possa essere il loro stato di moto", bensì, afferma Einstein:

Tutti i sistemi di coordinate gaussiane sono di principio equivalenti per la formulazione delle leggi generali della natura¹¹⁴.

¹¹³ Ivi, p. 116.

¹¹⁴ Ivi, p. 117.

spazio-temporale quadridimensionale a un qualsiasi sistema di coordinate gaussiane: a ogni punto del continuo, cioè l'evento, corrisponderanno quattro numeri: x_1, x_2, x_3, x_4 , ossia le coordinate. Ma a queste coordinate non potremo assegnare un significato fisico diretto: esse ci servono semplicemente e solamente per poter assegnare un numero ai punti del continuo in modo definito, benché arbitrario. Si dirà: cosa significa dare a un evento certe particolari coordinate che, in se stesse, non hanno alcun significato, fisicamente parlando? La risposta del Nostro è chiara e precisa:

Ogni descrizione fisica si risolve in una serie di enunciati, ciascuno dei quali si riferisce alla coincidenza spazio-temporale di due eventi A e B. In termini di coordinate gaussiane, ogni enunciato siffatto si traduce nel fatto che i due eventi hanno le stesse quattro coordinate x_1, x_2, x_3, x_4 . In realtà, dunque, la descrizione del continuo spazio-temporale per mezzo di coordinate gaussiane sostituisce completamente la descrizione mediante un corpo di riferimento, senza presentare i difetti di quest'ultimo metodo di descrizione; essa non risulta vincolata al carattere euclideo del continuo che deve venir rappresentato¹¹³.

8. Il principio di relatività generale e il problema della gravitazione

Disponiamo ora di tutti gli elementi che ci consentono di giungere a dare una formulazione esatta del principio di relatività. Poiché, come appena accertato in via definitiva e generale, nella descrizione spazio-temporale non è possibile utilizzare sistemi di riferimento rigidi, come si è invece potuto fare in sede di teoria della relatività ristretta, al loro posto avremo il sistema delle coordinate gaussiane. Ne consegue che l'enunciato con il quale si è indicato il principio di relatività, dal quale ha preso avvio questa nostra disamina, dovrà essere sostituito. Non diremo più che "tutti i corpi di riferimento K, K', eccetera, sono equivalenti ai fini della descrizione dei fenomeni naturali (formulazione delle leggi generali della natura), qualunque possa essere il loro stato di moto", bensì, afferma Einstein:

Tutti i sistemi di coordinate gaussiane sono di principio equivalenti per la formulazione delle leggi generali della natura¹¹⁴.

¹¹³ Ivi, p. 116.

¹¹⁴ Ivi, p. 117.

Quanto detto può essere espresso anche con i seguenti termini:

Secondo la teoria della relatività ristretta, le equazioni che esprimono le leggi generali della natura si trasmutano in equazioni della stessa forma, quando sostituiamo le variabili spazio-temporali x, y, z, t , di un corpo di riferimento (galileiano) K , con le variabili spazio-temporali x', y', z', t' , di un nuovo corpo di riferimento K' , applicando la trasformazione di Lorentz. Secondo la teoria della relatività generale, invece, le equazioni debbono trasmutarsi in equazioni della stessa forma applicando sostituzioni arbitrarie delle variabili gaussiane x_1, x_2, x_3, x_4 ; ogni trasformazione infatti (non soltanto la trasformazione di Lorentz) corrisponde al passaggio da un sistema di coordinate gaussiane a un altro¹¹⁵.

La teoria della relatività ristretta considera domini galileiani, privi di campo gravitazionale. Il corpo di riferimento è allora un corpo rigido il cui stato di moto è scelto in modo tale che, rispetto a esso, la legge galileiana del moto rettilineo e uniforme di un punto materiale isolato è valida. Ma niente vieta che, agli stessi domini, possiamo comunque riferire corpi di riferimento non galileiani; in questo caso, rispetto a quei corpi, si ha la presenza di un campo gravitazionale di tipo particolare, speciale, potremmo dire. Ora, noi sappiamo che nei campi gravitazionali non esistono corpi rigidi che manifestano proprietà euclidee; per questo motivo nella relatività generale non ci si può servire della finzione costituita dal corpo rigido di riferimento né, ovviamente, della marcia degli orologi. Per questo motivo si ricorre a corpi di riferimento che non sono rigidi. Sono solamente questi corpi che, se considerati come tutto, si muovono in qualunque maniera, oltre a subire deformazioni arbitrarie durante il moto. Lo stesso dicasi per gli orologi atti alla definizione del tempo. Qui avremo a che fare con orologi i cui andamenti, la cui marcia, risponde a una legge di qualunque tipo, sebbene sempre irregolare. Questi orologi, ciascuno dei quali è ancorato in un punto di un corpo di riferimento non rigido, debbono soddisfare una precisa condizione: quella per cui gli orologi spazialmente vicini siano in grado di dare delle letture simultaneamente rilevabili che differiscono tra loro solo in maniera infinitesimale. Per avere un'idea circa la costituzione di questi corpi di riferimento non rigidi, che di

¹¹⁵ *Ibid.*

fatto equivalgono al sistema di coordinate gaussiane arbitrariamente scelto, Einstein utilizza un'immagine assai efficace, quella del "mollusco"¹¹⁶. In tal senso, potremo dire che "il principio generale di relatività richiede che tutti i molluschi possano venir usati come corpi di riferimento con eguali diritto e successo nella formulazione delle leggi generali della natura; le leggi stesse debbono essere del tutto indipendenti dalla scelta del mollusco"¹¹⁷.

Siamo ora giunti a un passaggio cruciale: la soluzione del problema della gravitazione. Consideriamo un dominio dove non è presente alcun campo di gravitazione rispetto a un sistema di riferimento K galileiano. Come si comportano regoli e orologi ci è noto dalla teoria della relatività ristretta, così come noto è il comportamento dei punti materiali isolati animati di moto rettilineo uniforme. Ora, a detto dominio, riferiamo un sistema di coordinate gaussiane arbitrariamente scelto o un "mollusco" come corpo di riferimento K' . Rispetto a K' esiste allora un campo gravitazionale G di carattere particolare. In effetti, con l'ausilio di una semplice trasformazione matematica calcoleremo, rispetto a K' , il comportamento di regoli, di orologi e di punti materiali che si muovono liberamente. Interpretaremo questo comportamento come quello di regoli, di orologi, di punti materiali sottoposti al campo di gravitazione G e ipotizzeremo che l'influenza del campo di gravitazione continui a esser tale anche quando il campo gravitazionale dominante non possa venir derivato, mediante una trasformazione di coordinate, dal caso speciale galileiano. Si tratterà, allora, di investigare il comportamento del campo gravitazionale G , che abbiamo derivato dal caso speciale galileiano con una trasformazione di coordinate, e nel formularlo con una legge che si riveli sempre valida al di là del "mollusco" scelto per descriverlo.

Per poter parlare legittimamente ed effettivamente di legge gravitazionale, occorre tuttavia compiere un ulteriore e definitivo passaggio. Avverte infatti il fisico tedesco:

Questa legge non è ancora la legge generale del campo gravitazionale, giacché il campo gravitazionale considerato è di tipo speciale. Per poter trovare la legge generale del campo di gravitazione dobbiamo ancora ottenere una generalizzazione della legge

¹¹⁶ Cfr. *ivi*, p. 118.

¹¹⁷ *Ivi*, p. 119.

trovata più sopra. Ciò tuttavia può venir raggiunto senza alcuna arbitrarietà, prendendo in considerazione i seguenti requisiti:

- a) la generalizzazione richiesta deve in ogni caso soddisfare il postulato generale della relatività;
- b) se nel dominio considerato è presente una materia qualsiasi allora, in virtù della sua azione eccitatrice di campo, ha importanza soltanto la sua massa inerziale e quindi... soltanto la sua energia;
- c) il campo gravitazionale e la materia, insieme considerati, debbono soddisfare il principio di conservazione dell'energia (e della quantità di moto).

Il principio generale di relatività ci permette infine di determinare l'influenza del campo gravitazionale sul corso di tutti quei processi che, nell'assenza di un tale campo, si svolgono secondo le note leggi¹¹⁸.

Le note caratteristiche della teoria della gravitazione derivata dal postulato generale di relatività sono allora le seguenti. Anzitutto, la bellezza della sua costruzione, che non trova eguali nella fisica fino a quel momento conosciuta. In secondo luogo, la teoria della gravitazione elimina completamente il difetto particolarmente fastidioso proprio della meccanica classica: quello di privilegiare un particolare sistema di riferimento. In terzo luogo, la teoria einsteiniana della gravitazione dà una effettiva interpretazione della legge empirica che istituisce l'uguaglianza tra la massa inerziale e la massa gravitazionale. Infine, la nuova teoria spiega due risultati dell'osservazione astronomica tra loro diversi, di fronte ai quali la meccanica classica ha mostrato tutta la sua impotenza. Siamo cioè di fronte a delle vere e proprie conferme empiriche.

Il primo importante risultato fattuale riguarda l'orbita di Mercurio, il pianeta del nostro sistema solare più vicino alla nostra stella. Secondo la teoria newtoniana, un pianeta compie un'ellisse nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole. Questa ellisse, tuttavia, conserverebbe la sua posizione, rispetto alle stelle fisse, se si trascura, appunto, il moto delle stesse stelle fisse e l'azione degli altri pianeti. Posta l'esattezza della costruzione di Newton, avremmo così che l'orbita del pianeta

¹¹⁸ Ivi, p. 120.

dovrebbe essere un'ellisse immobile rispetto alle stelle fisse. Ciò vale, come da conferma, per tutti i pianeti, tranne uno, Mercurio. L'ellisse corrispondente all'orbita di Mercurio, lo sappiamo da molto tempo, ruota nel piano dell'orbita e nel senso del moto di circonvoluzione. Il valore ottenuto per questo movimento rotatorio è di 43 secondi per secolo. La meccanica classica spiega ciò solo con ipotesi *ad hoc*, la cui probabilità è scarsa. Con la teoria della relatività generale, si badi bene, l'ellisse di ogni pianeta deve necessariamente ruotare nel modo indicato. Ciò è rilevato solo per Mercurio, con l'ammontare di 43 secondi per secolo, perché per gli altri pianeti la rotazione è estremamente piccola per poter essere apprezzata.

Il secondo risultato fattuale consiste nell'accertamento della deflessione, dell'incurvamento del raggio di luce a opera del campo gravitazionale derivante dalla presenza di una massa, quale ad esempio il nostro Sole. La previsione einsteiniana ebbe conferma nel 1919, anno in cui ben due diverse spedizioni di astronomi furono costituite per le osservazioni relative all'attesa eclissi di sole. Una spedizione ebbe come destinazione Sobral, in Brasile, sotto la direzione dell'astronomo A. Crommelin; la seconda spedizione, diretta da un altrettanto illustre astronomo, A. Eddington, approdò nell'isola di Principe, al largo della Guinea spagnola. Il calcolo di Einstein per la deflessione della luce non lasciava dubbi: la teoria prevedeva uno spostamento di 1,74 secondi di arco. Il gruppo di Crommelin trovò uno spostamento di 1,98, con un certo margine di errore; le osservazioni del gruppo di Eddington rilevarono uno spostamento di 1,61 secondi, con un margine di 0,3 secondi. Tenuto conto delle approssimazioni, i due valori rilevati sembravano dunque concordare. Einstein giunse a conoscenza dell'evento attraverso Lorentz, dal quale si era recato in visita a Leida. Da qualche tempo, infatti, circolavano voci insistenti circa un esperimento giunto a buon esito, ma le comunicazioni tra la Gran Bretagna e la Germania non erano certo facili a così poco tempo dalla cessazione del primo conflitto mondiale. Lorentz però, in Olanda, disponeva di qualche canale informale e aveva ricevuto la felice notizia. La conferma ufficiale e definitiva giunse il 6 novembre 1919. A quella data, il grande fisico teorico olandese inviò a Einstein un telegramma dove si comunicava l'evento. L'annuncio della conferma della previsione formulata attraverso la teoria della relatività generale, dato a Londra, rese il fisico tedesco lo scienziato più famoso al mondo: la sua vita non sarebbe stata più la stessa.

9. La costante cosmologica

Agli inizi del 1920 la madre di Albert, affetta da un cancro allo stomaco e ormai prossima alla morte, fu ospitata nell'appartamento berlinese del figlio in Haberlandstrasse 5, dove si spegnerà nel marzo dello stesso anno. Ormai all'apice della carriera, Einstein si era unito in seconde nozze con la cugina Elsa Einstein Löwenthal, accogliendo anche le due figlie di lei, Ilse, ventiduenne, e Margot, ventenne. Proprio in questo periodo Einstein inizia a essere oggetto di attacchi diretti in manifestazioni antisemite, mentre si fanno sempre più numerose le proteste, evidentemente un pretesto, indirizzate verso la teoria della relatività. Nonostante tutto, il fisico tedesco difende la Germania, ma al contempo si fa sempre più consistente il suo impegno in attività extrascientifiche.

Sul piano prettamente fisico, da diversi anni il Nostro si impegna assiduamente nel tentativo di mettere in luce tutte le conseguenze che possono scaturire dal capolavoro del 1916 benché, come vedremo in seguito, non trascuri le problematiche legate ai quanti. Del resto, la teoria della relatività generale è talmente ricca di implicazioni e di idee da poter, da sola, costituire ancora oggi l'ambito esclusivo cui dedicare un'intera vita di ricerca. Al riguardo, la memoria del 1917 *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* (*Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale*) è particolarmente importante perché, a buon diritto, può essere considerata come l'*incipit* della cosmologia moderna¹¹⁹.

La conoscenza che si aveva dell'Universo fisico all'epoca in cui Einstein scrisse il saggio appena citato può indubbiamente far sorridere, se paragonata a quella posseduta allo stato attuale; ma così stavano le cose. In generale, gli astronomi ritenevano che l'Universo fosse costituito interamente dalla nostra galassia. Solo dopo la fine del 1920 si

¹¹⁹ La cosmologia, in senso ampio e generale, è lo studio del cosmo, inteso come la globalità di ciò che ha o può avere un'esistenza fisica; una globalità che può essere descritta matematicamente, benché non osservabile. In senso stretto e tradizionale, la cosmologia è lo studio dello spazio, del tempo, e degli oggetti in essi contenuti; insomma, dell'Universo nella sua globalità, al fine di offrire un'interpretazione della sua struttura spaziale, della sua origine e della sua evoluzione. Alla fine del XX secolo, quando teorie cosmologiche molto accreditate fecero ritenere che l'Universo nel quale siamo confinati non sia che uno degli infiniti universi che scaturiscono all'infinito l'uno dall'altro, si fece pressante l'esigenza di riconsiderare i termini in gioco, ossia riservare quello di Universo al nostro dominio spazio-temporale in espansione, e cosmo, alla totalità dello spazio e del tempo che abbraccia l'insieme degli infiniti universi in espansione o, eventualmente, in collasso, con i quali non possiamo comunicare. Per questo, allo stato attuale, la cosmologia può essere considerata come lo studio dell'insieme di tutti gli universi possibili.

comprese, per merito dell'astronomo statunitense E. Hubble e di altri ricercatori, che la nostra galassia è una tra le tante e rappresenta una piccolissima porzione dell'Universo. Fin dove era potuto arrivare con la sua visione l'occhio freddo e preciso del telescopio, quel "senso superiore ed eccellente", per esprimerci con le stesse parole di Galileo, svelava una molteplicità enorme di sistemi stellari.

Einstein, ma non era l'unico, era convinto che l'Universo fosse statico. Che cosa vuol dire? Significa, semplicemente, ritenere che ciò che noi vediamo adesso attraverso le nostre sofisticate osservazioni è, nel suo insieme, esattamente coincidente con ciò che si è sempre osservato e, ovviamente, con ciò che si continuerà a osservare in futuro. Per esser ancora più chiari: considerare l'Universo staticamente non vuol dire affermare che le stelle non evolvono ma, semplicemente, che la distribuzione media della materia nell'insieme dell'Universo è statica.

Ora, una volta accettato l'assunto della staticità, occorre preoccuparsi di dare una soluzione accettabile a un problema di difficile soluzione, che a suo tempo aveva turbato il sonno dello stesso Newton. Vediamo di che cosa si tratta. Per il grande fisico inglese, la forza di gravità, la gravitazione, controlla interamente l'evoluzione dell'Universo nel suo insieme. Ma perché, ci si chiederà, proprio la gravitazione? Non è forse vero che proprio la gravità si presenta, tra le forze conosciute, come quella meno intensa? Certamente, si risponderà, ma si dovrà anche aggiungere una precisazione di portata cruciale: la gravità è la forza meno intensa quando si opera con masse di piccole dimensioni, quali quelle con cui abbiamo a che fare ordinariamente, che possiamo agevolmente misurare con i nostri strumenti; ma i pianeti e tutto il resto non possono essere considerati alla stregua di masse ordinarie. La Terra, per restare a casa nostra, ha una massa enorme e, dal momento che alla sua attrazione gravitazionale contribuiscono anche gli effetti di tutte le masse parziali che la compongono, l'influsso gravitazionale terrestre agisce anche su particelle il cui moto è determinato dalle leggi dell'elettromagnetismo. Del resto, è sufficiente dare un'occhiata alla formula

newtoniana della gravitazione universale, cioè $G \frac{mM}{d^2}$, per accertare tranquillamente il fatto che la gravitazione di tutte le masse dell'Universo influenza in modo decisivo le modalità dell'evoluzione di quest'ultimo.

Se la gravitazione ha un ruolo così determinante, ci veniamo a scontrare con la seguente difficoltà. Immaginiamo un Universo spazialmente finito i cui moti, ai quali la materia è soggetta, la costringano, per così dire, a rapprendersi in un tempo dato e in una certa porzione dello spazio. Dal momento in cui avrà iniziato a costituirsi, a questo piccolo addensato di materia se ne aggiungerà via via sempre di più finché l'intero Universo sarà condensato in un unico punto. Quanto abbiamo immaginato non ha un corrispettivo concreto, non c'è dubbio; ma la difficoltà teorica rimane. Come se ne esce? Per Newton, solo un Universo spazialmente infinito avrebbe risolto la questione. Si capisce bene perché. Se la materia fosse uniformemente distribuita in uno spazio infinito non ci sarebbe più la possibilità del formarsi di un nucleo che piano piano ingloberà tutta la materia, bensì l'eventualità di un numero sufficientemente grande di masse gigantesche sparse nello spazio infinito e immensamente distanti le une dalle altre. Non è forse questa la fotografia di ciò che osserviamo?

Con la teoria della gravitazione e l'assunto della staticità dell'Universo, Einstein si trovava di fronte alla stessa difficoltà alla quale Newton aveva risposto nei termini che abbiamo appena esposto. Non si deve peraltro dimenticare che per la teoria della relatività generale la gravitazione dipende direttamente dalla materia, cioè dalle masse, e lo stesso spazio-tempo ne fa le conseguenze, giacché la sua curvatura dipende proprio da questo. La soluzione escogitata da Einstein, nota come costante cosmologica, consiste, in buona sostanza, in un termine che viene aggiunto, senza che ne venga modificata irrimediabilmente la simmetria, alle equazioni della relatività generale. Questo termine introduce una realtà, una piccolissima forza repulsiva che così verrebbe a controbilanciare l'influsso gravitazionale; una forza comunque tale da evitare il collasso dell'Universo al quale la gravitazione finirebbe inevitabilmente per condurlo.

Intorno al 1929, il fisico tedesco iniziò a mostrare una sfiducia crescente nei riguardi della soluzione elaborata: del resto non gli si può dar torto, se si pensa che c'era chi, come il russo A.A. Friedmann, lavorando sulle originarie equazioni relativistiche individuò delle soluzioni che consentivano all'Universo di espandersi o contrarsi a seconda della quantità di materia in esso contenuta. Gli studi di Friedmann che, occorre precisarlo, non era un fisico in senso stretto, furono pubblicati su una rivista di lingua tedesca e non sfuggiro-

no a Einstein che, assai inspiegabilmente, inizialmente li considerò sbagliati. Solo dopo una diretta chiarificazione per via epistolare il fisico tedesco fu costretto a ritornare sulla sua valutazione, che stavolta riconobbe come errata. Ma allo studioso russo, il Nostro non concedeva nulla di più che l'attestazione di un lavoro corretto e chiarificatore. Einstein evitava così di andare al cuore della questione, perché le deduzioni di Friedmann offrono in effetti una visione dell'Universo diversa, in termini radicali, da quella einsteiniana: l'Universo evolve nel tempo espandendosi e contraendosi. Ma proprio per evitare questo esito, come sappiamo, Einstein era intervenuto sulle equazioni della relatività generale, sicché, concedendo la sola correttezza sul piano formale ai lavori di Friedmann, il fisico tedesco ne escludeva propriamente la loro adeguatezza al reale comportamento dell'Universo. D'altra parte, il modello dell'Universo in espansione non era certo una novità. L'astronomo olandese W. De Sitter ne aveva elaborato la concezione fin dal 1917. Nei suoi riguardi, Einstein non aveva sollevato alcuna perplessità o obiezione, benché avesse potuto averne tutto l'interesse sul piano esplicativo, di pura chiarificazione, tanto più necessario quanto più ci si rendeva conto che la costruzione di De Sitter implicava l'affermazione di una velocità della luce superiore a quella postulata dalla relatività come velocità limite: il moto espansivo dell'Universo supererebbe c . In verità, non c'è alcuna violazione del principio einsteiniano, per il semplice motivo che la relatività afferma semplicemente che non c'è alcuna cosa, e lo spazio non è una cosa ma un concetto, in grado di superare la velocità della luce; Einstein lo sapeva bene e, soprattutto, considerava questi modelli non reali.

La concezione di De Sitter gode ancora oggi di un certo riguardo, in particolare per due motivi. Anzitutto, perché numerosi ricercatori ritengono che immediatamente dopo la sua nascita l'Universo ha in breve ma effettivamente attraversato un periodo che presenta le caratteristiche messe in evidenza dall'astronomo olandese. In secondo luogo, perché il modello desitteriano implica una fondamentale previsione sperimentale. Si tratta di questo. Posto che l'Universo si espanda, e così facendo si allontani da noi, la luce delle stelle più lontane dovrà spostarsi verso l'estremità rossa dello spettro per l'azione di un effetto Doppler; lo spostamento verso il rosso dovrebbe infine risultare direttamente proporzionale alla distanza della stella o della galassia considerata.

L'occasione che rivoluzionò la nostra concezione e visione dell'Uni-

verso fu fornita, nel 1929, da Hubble. A quella data, ben pochi pensavano ancora che l'Universo fosse racchiuso negli angusti limiti della nostra galassia; e, del resto, Hubble aveva già misurato la distanza da numerose nebulose esterne alla Via Lattea. Ma riuscì a fare qualcosa di più, e di ancora più importante: verificò che lo spostamento verso il rosso della luce proveniente da una galassia cresce con l'aumentare della distanza che la separa da noi. La previsione di De Sitter era dunque di fatto confermata. Con i risultati del lavoro svolto dall'astronomo americano, non aveva più alcun senso continuare a mantenere la costante cosmologica, a suo tempo introdotta nella teoria della relatività generale dal suo stesso creatore; e infatti Einstein non si attardò a eliminare il termine in questione. Riteniamo tuttavia doveroso fare due considerazioni. La prima consiste nel fatto che lo spostamento verso il rosso può essere valutato come un'ulteriore conferma della validità della relatività generale. La seconda riguarda le nuove osservazioni che sono state realizzate alla fine degli anni Novanta del secolo appena trascorso attraverso il telescopio spaziale e la scoperta di un'energia oscura che farebbe accelerare l'espansione dell'Universo. Questi due fatti hanno riportato all'attenzione quella costante cosmologica prima introdotta, e poi ritirata da Einstein, dalle sue stesse equazioni.

DALLA RELATIVITÀ ALLA MECCANICA QUANTICA

1. Modelli atomici

Se allo scoccare del Novecento M. Planck aveva di fatto posto il fondamento della ricerca quantistica, dopo il 1905 la figura che più di ogni altra emergeva all'orizzonte della nuova frontiera speculativa era Albert Einstein che, subito dopo la memoria "rivoluzionaria", nel 1906 pubblicò un articolo sull'assorbimento del calore da parte dei solidi. L'attenzione e le energie che, di lì a poco, il giovane fisico tedesco dedicherà alla costruzione della teoria della relatività generale, non gli impedirono di ritornare, nei decenni successivi, sull'argomento tanto affascinante quanto problematico e travagliato dei quanti di luce: già nel 1917 elaborò infatti una memoria particolarmente importante intitolata *Quantentheorie der Strahlung* (*La teoria quantica della radiazione*).

Per ben comprendere l'intricata e sofferta marcia della ricerca sul versante delle nuove concezioni, e il ruolo in essa svolto dal Nostro, è necessario avere un quadro genetico di riferimento, che prende avvio dalla scoperta del nucleo atomico da parte del fisico sperimentale di origine neozelandese E. Rutherford.

Nei primi anni del Novecento la comunità dei fisici era, nella sua quasi totalità, propensa ad accettare il modello atomico proposto dal fisico britannico J.J. Thomson che, come ben sappiamo, aveva scoperto l'elettrone. Nella sua definitiva versione, l'atomo di Thomson conterrebbe numerosi elettroni, la cui carica negativa sarebbe comunque compensata; il problema era quello di determinare che cosa rende possibile il fatto che lo spazio, attraverso il quale si diffondono gli elettroni, si comporti come se fosse detentore di una carica positiva uguale alla carica negativa della somma di tutti gli elettroni, dunque in grado di equilibrare l'intero sistema. A questo modello, elaborato nel 1891, poco tempo dopo Lord Kelvin conferì un carattere meno oscuro. In effetti, nel 1901, Kelvin suppose anzitutto un fluido elettrico negativo costituito da elettroni che permeano liberamente

non solo lo spazio libero di atomi, ma addirittura l'atomo stesso. Con una seconda assunzione, Kelvin postulava un'attrazione tra l'atomo della materia ordinaria e un elettrone che sarebbe regolata dalla legge secondo cui mentre l'attrazione su un elettrone esterno è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due centri, quello dell'atomo e quello dell'elettrone, internamente l'attrazione dell'atomo nei riguardi dell'elettrone interno a esso è direttamente proporzionale alla distanza tra i rispettivi centri. Ciò consentiva non solo una distribuzione uniforme di elettricità positiva nello spazio occupato dall'atomo di materia ordinaria, ma anche la possibilità di distinguere due specie di elettricità: quella positiva, pensata come qualcosa di continuo, e quella negativa, vista come formata da grani. La materia ordinaria non elettrizzata è allora un insieme di atomi nel quale è presente un numero sufficiente di elettroni in grado di annullare le forze elettriche all'esterno. Il modello più semplice di atomo sarebbe così costituito da una distribuzione sferica uniforme di elettricità positiva con al centro un elettrone. La presenza di due o più elettroni genera sicuramente problemi di stabilità, ma Lord Kelvin non ritenne opportuno investigare ulteriormente la questione concludendo che, con buona probabilità, più elettroni si disporrebbero su superfici sferiche concentriche interne all'atomo, con moto rotatorio intorno al centro. Si poneva tuttavia, come è facile capire, una questione fondamentale: stando alla teoria elettromagnetica della luce, gli elettroni disposti nei termini appena espressi dovrebbero produrre sia onde elettromagnetiche sia un campo magnetico; ma in che modo si manifesterebbero questi due fenomeni? Fu Thomson che, per almeno una quindicina d'anni, aderì al modello che Kelvin aveva elaborato a partire dal suo iniziale progetto, si prese la briga di studiare, senza conseguire risultati apprezzabili, l'intera questione. Pur non superando il tribunale della critica e dell'esperimento, al modello concepito da Thomson deve essere riconosciuto in ogni caso il merito di aver tracciato una direzione assai precisa verso cui orientare gli sforzi, consentendo di mettere definitivamente a fuoco quelli che erano in realtà i veri problemi che richiedevano una celere quanto adeguata soluzione, ossia:

- a) numero e distribuzione degli elettroni rispetto alla massa dell'atomo;
- b) natura e distribuzione dell'elettricità positiva che compenserebbe la quantità totale negativa degli elettroni;
- c) natura e distribuzione della massa dell'atomo.

Si è visto che, come aveva lasciato intendere Lord Kelvin, all'interno dell'atomo dovrebbe trovar posto un nucleo centrale di elettricità positiva. Questo aspetto, al quale Thomson non dette rilievo, fu invece attentamente ripreso dal fisico giapponese H. Nagaoka nel 1904 in uno studio di particolare interesse¹²⁰. Sul modello di Saturno, si tentava di spiegare che il sistema atomico consiste di numerose particelle di massa uguale, disposte in cerchio a intervalli angolari uguali, che si respingono mutuamente con forze che devono essere considerate come inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra le particelle. Al centro del cerchio si troverebbe una particella più grossa che attira le altre, che formano un anello, secondo la stessa legge.

Nel 1908, E. Marsden, allievo di Rutherford, e H. Geiger, colui che avrebbe in seguito concepito il rivelatore ancora oggi in uso per misurare le radiazioni, iniziarono a studiare sperimentalmente il passaggio di particelle α attraverso sottili foglie di oro. L'esito dell'osservazione strumentale offriva i seguenti risultati: la grande maggioranza delle particelle attraversa la foglia di metallo quasi in linea retta, proseguendo poi il proprio percorso come se non incontrasse alcun ostacolo opposto dalla materia; nell'ordine di grandezza pari a 1 su 10.000, la particella α viene fortemente deviata con un angolo maggiore a 90° .

Si trattava, evidentemente, di un urto tra la particella α e gli atomi della materia attraversata. Soltanto che, sia il modello atomico di Thomson sia quello di Nagaoka imponevano un radicale mutamento della nozione di urto tra gli atomi rispetto alla concezione derivata dalla teoria cinetica dei gas: non si può più parlare semplicemente di urto in senso meccanico, immaginando gli atomi alla stregua di sferette elastiche, perché quando due atomi vengono a incontrarsi, sicché le cariche elettriche si avvicinano, si manifestano importanti forze repulsive che influenzano decisamente, modificandole, le traiettorie originarie. È ben vero che, in via approssimativa, ossia considerando il fatto che gli urti di cui si parla sono fittizi, è possibile considerare come equivalenti le variazioni del moto degli atomi rispetto alle variazioni che si registrerebbero su un piano meccanico; ma al di là di questo, il modello di Thomson non era in grado di dare una spiegazione accet-

¹²⁰ Si tratta della memoria *On a Dynamical System Illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radioactivity*, comparsa sulla rivista "The Nature" nel 1904.

tabile del fenomeno scoperto da Marsden e Geiger. Di tutto ciò si rese ben conto Rutherford: la deflessione rilevata per alcune particelle α doveva essere messa in conto a una deviazione brusca subita dalla particella nel passaggio attraverso l'intenso campo elettrico dell'atomo o, necessariamente, all'urto con lo stesso. Se le cose stavano in questi termini, era necessario supporre nell'atomo un nocciolo centrale, un nucleo, di dimensioni estremamente ridotte, carico positivamente e contenente la maggior parte della massa atomica. Tutto andava, insomma, nella direzione tracciata dal modello di Nagaoka visto che in esso la deflessione si spiega agevolmente.

In effetti, seguendo il modello, la particella α attraversa l'atmosfera elettronica di un atomo di una foglia d'oro, si avvicina al corpo centrale, ma la grande forza di Coulomb che si origina tra le due cariche positive la devia, costringendola a descrivere un'orbita a cometa. Il guaio è che lo stesso modello di Nagaoka presenta un grave inconveniente.

La difficoltà sta nel fatto che, a differenza del modello di Thomson, quello di Nagaoka non prevede la presenza di elettroni nelle zone più profonde dell'atomo, come invece l'emissione di particelle β dei materiali radioattivi sembrerebbe richiedere. Sulla necessità di ammettere l'esistenza di elettroni nel nucleo atomico insistette in modo particolare Marie Curie, che li chiamò essenziali (nucleari, solo in seguito), perché la loro fuga implicherebbe la distruzione dell'atomo, distinguendoli dagli elettroni periferici, che possono staccarsi dall'atomo stesso senza tuttavia procurare modifiche di natura chimica. Per almeno vent'anni si continuò a considerare gli elettroni come essi stessi facenti parte dell'edificio atomico, attribuendo a essi una funzione coagulante tra le cariche positive del nucleo che la forza coulombiana tende a separare.

L'atomo concepito da Rutherford sarebbe dunque diviso in due rigide regioni: l'una interna, il vero e proprio nucleo, l'altra esterna, il sistema elettronico. Due regioni separate da una frontiera invalicabile, tanto che se i costituenti del nucleo non possono passare nella regione del sistema elettronico, un elettrone periferico non può penetrare nella regione nucleare. E non c'è dubbio che il maggior merito della ricerca dello scienziato di origine neozelandese stia nell'aver intuito che i fenomeni radioattivi hanno sede nel nucleo atomico e, soprattutto, nell'aver continuato a lavorare in questa di-

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

la costante h di Planck eguale alla differenza dei valori E' e E'' dell'energia dell'atomo nei due stadi interessati al processo, in modo che si abbia $h\nu = E' - E''$ ¹²¹.

Come si evince dal dettato del fisico danese, l'elettrone che ruota intorno al nucleo, da un lato, rispetta le leggi della meccanica, ma dall'altro, dal momento che durante la rotazione non emette alcuna radiazione, contravviene ai dettami dell'elettromagnetismo. Attraverso la meccanica classica abbiamo ancora la possibilità di considerare l'equilibrio dinamico di un sistema in stato stazionario e, una volta conosciuto il raggio dell'orbita, calcolare la velocità, la frequenza, nonché l'energia potenziale e totale dell'elettrone ruotante. Ma, ed ecco il punto davvero saliente, l'elettrone può collocarsi e disporsi solamente su un'orbita dove la differenza di energia è un multiplo intero del quanto di azione h . Ciò significa che l'elettrone non può saltare su qualsiasi orbita ma, solo ed esclusivamente su orbite quantizzate. Ne deriva che ogni atomo può assumere una serie di stati stazionari corrispondenti alle orbite particolari in cui si trova effettivamente l'elettrone. Così, se l'atomo si trova sempre in uno stato stazionario, al quale corrisponde un dato valore energetico, a ogni atomo corrisponderà una successione di valori relativi ai diversi stati stazionari che esso potrà assumere.

A Bohr non sfuggì neppure il fatto che un simile sistema planetario quantizzato non può essere interamente assimilato a un sistema astronomico. Il motivo di ciò è molto semplice: le leggi di gravitazione ci permettono di studiare e di spiegare il moto dei pianeti con un'approssimazione piuttosto elevata, ma non ci permettono di prevedere le orbite degli stessi pianeti, che invece dipendono dalla storia del sistema planetario stesso. Di conseguenza, se in un sistema planetario le orbite restano costanti, in un sistema come quello elettronico sono destinate al cambiamento.

Una volta impostata la teoria su basi che, per buona parte, si richiamavano alla fisica classica, Bohr suppose che le orbite elettroniche avessero una conformazione perfettamente circolare, e riuscì a calcolare il raggio dell'orbita minore, indicata con I , che risultò uguale al raggio atomico come contemplato dalla teoria cinetica

¹²¹ N. Bohr, *Atomes et electron*, Rapport et discussion du Conseil de Physique tenue à Bruxelles du 1^{er} au 6 avril 1921, Paris 1923, p. 230.

dei gas. Il passo successivo fu quello di applicare l'apparato teorico messo a punto al più semplice modello atomico conosciuto in natura, cioè l'atomo di idrogeno, che appunto è costituito da un nucleo di massa I , da una carica positiva e da un solo elettrone, carica negativa, ruotante. Fu un vero e proprio successo. Se, da un lato, la teoria di Bohr offriva un'ulteriore conferma all'ipotesi che voleva l'atomo provvisto di un nucleo, dall'altro apriva le porte, consentendone di fatto l'inserimento nella stessa teoria atomica, all'ipotesi dei quanti. Le difficoltà si fecero però insormontabili allorché il fisico danese tentò audacemente di applicare la propria teoria a modelli atomici via via più complessi rispetto al modello iniziale. Non è inutile, bensì doveroso, precisare che all'epoca in cui Bohr costruì il suo modello teorico, cioè nel 1913, dal punto di vista prettamente tecnico, cioè matematico, si era in grado di quantizzare solo i moti che dipendevano da una singola variabile. Proprio per questo motivo, il fisico danese si era fatto carico della responsabilità di assumere che le orbite degli elettroni periferici fossero circolari, ben sapendo di essere in contrasto con la meccanica che voleva le orbite elettroniche disegnate come le ellissi di kepleriana memoria. Solo che per definire la posizione di un punto su un'ellisse servono due valori, sicché quantizzare orbite ellittiche significava poter essere capaci di quantizzare i moti definiti da due variabili.

Un tentativo nella direzione tesa a superare la difficoltà matematica fu percorso intorno al 1916 da Wilson e da Sommerfeld che elaborarono un metodo che, appunto, avrebbe dovuto rendere possibile la quantizzazione di sistemi definiti da più di una variabile. Sommerfeld applicò il metodo al modello atomico di Bohr, ma con scarsi risultati. Peraltro, Sommerfeld si rese conto che il fisico danese, rimanendo ancorato alla meccanica classica, aveva trascurato il fatto che la velocità prevista per l'elettrone era troppo alta sicché la sua massa, come la relatività insegnava, non poteva restare costante. Si rendevano dunque necessarie delle correzioni in senso relativistico. Ebbene, con l'inserimento della massa relativistica dell'elettrone, che appunto varia con la velocità, l'orbita elettronica risultava un'ellisse che ruota nel proprio piano intorno al fuoco occupato dal nucleo dell'atomo. Nonostante i correttivi apportati da Sommerfeld, il problema costituito dagli atomi con più elettroni periferici restava inalterato.

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

stein doveva fare i conti. Il meccanismo introdotto da Bohr per l'emissione e l'assorbimento della radiazione imponeva infatti, di nuovo, la questione di dedurre la formula della radiazione nera alla luce delle nuove ipotesi. Il Nostro aveva seguito con interesse gli sviluppi imposti dallo scienziato danese, e aveva recepito con un certo compiacimento il principio di corrispondenza che, sotto un certo angolo visuale, poteva essere considerato come il primo passo effettivamente mosso nella direzione dell'inserimento della teoria dei quanti nella meccanica classica. Non sorprende così che in *Quantentheorie der Strahlung* il fisico tedesco formuli una risoluzione del problema e applichi all'atomo di Bohr i concetti di probabilità della legge di disintegrazione radioattiva. Detto in altri termini, come ogni atomo radioattivo esplosa in un momento imprevedibile con un processo che appare casuale, allo stesso modo la transizione di un elettrone in un atomo è del tutto non prevedibile; per questo, il fenomeno deve essere studiato secondo leggi statistiche, che possono essere formulate sulla base di due assunzioni. Anzitutto si deve assumere che, di fronte a un campo di radiazioni, la possibilità di transizione di un elettrone, sia nel senso dell'emissione sia dell'assorbimento, nell'unità di tempo è proporzionale all'intensità della radiazione; in secondo luogo, si deve assumere che laddove non ci sono perturbazioni esterne si assiste a una transizione spontanea degli elettroni da stati di energia più elevata a stati energetici più bassi, con una probabilità proporzionale, nell'unità di tempo, al numero di atomi inizialmente allo stato eccitato. In questo modo, la legge di emissione radioattiva viene trasferita nel fenomeno della radiazione. Sulla base di quanto espresso e approfondendo la teoria del moto browniano, Einstein ottiene la formula di Planck per la radiazione di corpo nero e, nel discutere il problema dello scambio d'impulso tra il sistema atomico e la radiazione, conclude che per ogni processo elementare di radiazione deve essere

emesso un impulso di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione del tutto casuale.

Questo esito acuiva ulteriormente ed evidentemente il dualismo tra onda e corpuscolo, dal momento che una simile descrizione del processo di emissione esclude la possibilità stessa di onde sferiche. E infatti, con un certo non celato rammarico, Einstein afferma:

Non esiste emissione di radiazione per onde sferiche. Nel processo elementare di emissione la molecola subisce un contrac-

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributatogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

La possibilità di offrire una sintesi teorica è quanto de Broglie mise a punto in tre note presentate all'*Académie des Sciences* di Parigi. Con lo sguardo ben orientato alle concezioni relativistiche, il fisico francese ipotizza che a ogni particella di massa o energia m_0 si leghi un fenomeno ondulatorio di frequenza n_0 , sicché si avrà:

$$h\nu_0 = m m_0 c^2$$

dove h è la costante di Planck e c la velocità della luce al quadrato. Per esser più chiari, ogni particella di materia sarebbe sede, ma anche sorgente, di una vibrazione intrinseca con una frequenza data dalla relazione appena espressa. Così, se la particella è in moto, la concezione relativistica ci fa concludere che la vibrazione, per un osservatore fisso che si sposta con una velocità maggiore rispetto a quella posseduta dalla particella, appare un'onda. Posto ciò, De Broglie studia il moto uniforme di un elettrone in una traiettoria chiusa e giunge a dimostrare che traiettorie quantizzate della teoria di Bohr-Sommerfeld possono essere interpretate come un effetto di risonanza dell'onda di fase sulla lunghezza delle traiettorie chiuse. In questo modo, se l'elettrone si muove in una curva chiusa, l'onda deve seguirlo e dovrebbe formarsi una specie di anello continuo di onde, sicché la lunghezza dell'anello dovrà essere uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Le orbite stazionarie saranno allora quelle orbite che contengono precisamente 1, 2, 3... lunghezze d'onda associate all'elettrone ruotante. Il calcolo dava ragione a De Broglie: le orbite erano proprio quelle proposte da Bohr.

Questa concezione fu applicata dallo stesso fisico francese al caso dei fotoni. Assumendo che la distribuzione dei fotoni è determinata dalle onde, si avranno quindi regioni oscure dove le onde si sovrappongono, il fisico francese delineava una teoria dei fenomeni d'interferenza e diffusione della luce. Di qui alla legge di Planck per la radiazione di corpo nero il passo era breve, e anch'essa fu acquisita come risultato.

Le tre brevi note di de Broglie, debitamente interpretate, diedero vita nel 1924 alla sua dissertazione di dottorato, dissertazione dove, tra l'altro, si mostrava che le nuove acquisizioni teoriche conducevano a una spiegazione quantitativa dell'effetto Doppler, della riflessione su uno specchio mobile, della pressione delle radiazioni, giungendo a formule identiche a quelle ottenute dalla teoria ondulatoria.

6. Idee quantiche

I principi della meccanica ondulatoria non erano ancora sufficientemente noti quando si provò un'altra volta a superare le difficoltà teoriche nelle quali ci si dibatteva. Si tratta del tentativo promosso nel 1925 dal giovane fisico tedesco W. Heisenberg, che ben rapidamente si sviluppò attraverso i contributi di M. Born ed E.P. Jordan.

Scolaro di Sommerfeld, Heisenberg era molto sensibile alla direzione impressa alla ricerca da Bohr, tanto che aveva dedicato i suoi lavori al principio di corrispondenza. Non è dunque un caso che la teoria di Heisenberg si sviluppi, appunto, attraverso una serrata riflessione sul rapporto tra il principio di corrispondenza e l'atteggiamento che deve essere assunto nei riguardi dei problemi sollevati dalla scienza fisica. Questo atteggiamento può essere espresso nei seguenti termini: la costruzione di una teoria fisica comporta necessariamente l'eliminazione sistematica di tutte quelle grandezze che, nel dominio specifico entro il quale si opera, non sono o non possono essere accessibili per esperienza; insomma, non sono riducibili al dato empirico. La scienza ha a che fare solo con grandezze osservabili. Nelle elaborazioni teoriche espresse fino a quel momento erano state inserite traiettorie, posizioni, velocità di un elettrone; ma, si chiede ironicamente Heisenberg, qualcuno ha mai visto un elettrone? Dell'atomo, all'epoca, si conoscevano solo gli stati stazionari, le transizioni tra questi ultimi, l'energia emessa o assorbita nel corso delle transizioni: ogni teoria che seriamente avesse inteso esser tale, avrebbe così dovuto tener conto solo di queste grandezze. Il guaio era che le nozioni in grado di collegarsi con l'esperienza, a causa della discontinuità quantica non possono essere espresse con le note e correnti funzioni continue. Si rendeva necessario e indispensabile un nuovo formalismo, Heisenberg lo sapeva bene; non è anzi improbabile che proprio il principio di corrispondenza lo abbia ispirato nella creazione di un nuovo linguaggio. In effetti, la teoria classica esprime ogni grandezza legata a un sistema quantizzato con sviluppi in serie di Fourier ma, dal canto suo, la teoria dei quanti scompone la stessa grandezza in elementi che corrispondono alle transizioni atomiche. Alla luce del principio di corrispondenza, le due procedure dovranno perciò tendere asintoticamente a confondersi per un grandissimo numero di quanti. Heisenberg ebbe così l'idea di frammentare ogni grandezza per poi rappresentarla con

una tabella di numeri molto somigliante a ciò che matematicamente si dice matrice. Si trattava, a questo punto, di individuare le regole per il calcolo, cosa che Heisenberg fece puntualmente rinvenendole proprio nelle matrici matematiche, peraltro fino a quel momento inutilizzate in fisica. Si tratta di regole, è bene precisarlo e chiarirlo in vista di quanto si dirà in seguito, che sono diverse rispetto a quelle dell'algebra ordinaria. Un esempio di questa diversità ci è offerto dalla proprietà commutativa. In genere, il prodotto di una matrice per una seconda matrice non è uguale al prodotto della seconda matrice per la prima, ma dipende dall'ordine dei fattori. Si tratta di una caratteristica particolarmente rilevante perché ai numeri ordinari della meccanica classica, che rappresentano delle grandezze, si sostituiranno dei numeri quantici il cui prodotto non è commutativo. Nel suo schema, Heisenberg introdusse anche la costante di Planck in modo tale che nei fenomeni macroscopici, dove h è piccolo, il prodotto delle grandezze meccaniche è sempre permutabile. In questo modo si torna alla meccanica classica.

I risultati ottenuti dalla nuova teoria non potevano non suscitare entusiasmo, visto che si dava prova dell'esistenza degli stati stazionari a energia quantizzata, si calcolava il livello energetico dell'oscillatore lineare dell'atomo di idrogeno; non meno favore incontrava il rigore e la precisione del formalismo. Per converso, si avvertiva con preoccupazione la difficoltà dell'astrattezza peculiare della nuova teoria, che al concetto fisico aveva sostituito il simbolo matematico. Il lavoro di De Broglie aveva nel frattempo attirato l'attenzione di E. Schrödinger, in quegli anni docente a Zurigo. Intorno al 1926, Schrödinger giunse per primo a stabilire l'equazione esplicita delle onde della meccanica ondulatoria; da essa riuscì a dedurre un metodo rigoroso per lo studio dei problemi della quantizzazione. La particolarità di questa equazione sta nel fatto di annoverare tra i suoi coefficienti anche dei numeri immaginari.

Dal punto di vista della teoria classica, le equazioni di propagazione per le onde sono sempre reali e le eventuali e possibili sostituzioni con numeri complessi risultano sempre un artificio del calcolo. Nella funzione d'onda formulata da Schrödinger, e indicata dalla lettera greca ψ , i coefficienti immaginari sono ineliminabili, il che significa che sono connaturati al fenomeno che si vuol descrivere. Detto in termini se possibile ancor più chiari, se nella fisica classica le onde corrispondono alle vibrazioni di un mezzo la cui esistenza era reale, come nel caso dell'aria per le onde sonore, o semplice-

mente supposta, come nei casi dell'etere e della propagazione luminosa, l'onda della meccanica quantica non può essere considerata reale, ossia una realtà fisica che corrisponde alla vibrazione di qualche mezzo. Questa interpretazione, evidentemente, collima perfettamente con quanto aveva intuito de Broglie: a un'onda come quella associata, che non trasporta energia e che ha luogo in uno spazio rappresentativo pluridimensionale non è possibile riconoscere un'esistenza fisica, bensì un'esistenza fittizia. Si tratta, insomma, di un'onda fantasma.

È opportuno precisare che l'equazione di Schrödinger, originata in ambiente newtoniano, era valida, conseguentemente, per corpuscoli di piccola velocità. Si rendevano perciò necessarie le opportune modifiche relativistiche per le grandi velocità. A ciò trovò rimedio il britannico P.A.M. Dirac che, dopo aver dimostrato la necessità di una maggiore generalizzazione, dette vita a una teoria fisica ancor più astratta e insolita della meccanica ondulatoria e quantica. Da questa teoria emerge, peraltro naturalmente, l'ipotesi dell'elettrone ruotante, ossia il fatto che l'elettrone, paragonato a una piccola sfera elettrizzata, ruota attorno a uno dei suoi diametri mostrando così un momento meccanico e un momento magnetico propri, il cosiddetto *spin*¹²⁴. La teoria di Dirac conciliava così, armonicamente, la relatività, i quanti e lo *spin*.

In virtù del lavoro svolto, Schrödinger era in grado di affrontare il problema degli stati stazionari di un sistema quantizzato, oltre a calcolare i valori dell'energia, ottenendo per lo più i risultati già registrati dalla vecchia teoria dei quanti; e se, in molti casi, i valori ottenuti si mostravano diversi, tali valori erano tuttavia più vicini alla conferma sperimentale. Ebbene, la meccanica quantica di Heisenberg giungeva ai medesimi risultati. Di ciò, ovviamente, non si poteva non restare che stupiti. Ma la coincidenza aveva alle sue spalle una ragione profonda, che Schrödinger comprese subito: vi era una sostanziale identità tra la meccanica ondulatoria e la meccanica quantica; quest'ultima non sarebbe che la trascrizione matematica della prima, con il vantaggio di condurre spesso più rapidamente al risultato, ma con il limite di essere certamente meno intuibile e più complicata nel formalismo.

Orbene, elaborando la propria posizione, provando che anche la

¹²⁴ Dall'inglese *to spin* (girare). Che l'elettrone presentasse una simile caratteristica lo avevano sostenuto nel 1925 i fisici Uhlenbeck e Goudsmit.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

ni atomici non sono descrivibili *tout court* nella nostra lingua. Bisogna abituarsi all'idea di rinunciare al concetto di un punto materiale precisamente localizzato nello spazio e nel tempo. Alleggerita in questo modo da ogni inutile orpello, la fisica può dare di un corpuscolo o l'esatta posizione nello spazio, cui però fa seguito una completa indeterminazione nel tempo, o un'esatta posizione nel tempo alla quale segue, simmetricamente, un'altrettanto completa indeterminazione nello spazio. Volendo esser più precisi dovremmo anzi dire che la fisica può solo dirci, quando ciò è possibile, quale *probabilità* abbiamo di trovare, in un certo istante, l'ente che chiamiamo corpuscolo in un volume di spazio rappresentativo, che non necessariamente si identifica con lo spazio reale. I salti quantici impongono questa conseguenza.

Questa indeterminazione fu assunta da Heisenberg, con il plauso di Bohr, nel 1927. Il nuovo corso della scienza fisica sarebbe stato caratterizzato dal principio di indeterminazione del quale lo stesso Bohr offrì un'agevole spiegazione attraverso un esperimento mentale.

Poniamo il caso di voler determinare, in un certo preciso istante, la posizione e la quantità di moto di un elettrone. La procedura seguita consiste nell'illuminare l'elettrone con un fascio di fotoni. L'urto che ne consegue ci permette di stabilire la posizione dell'elettrone a meno di una lunghezza d'onda del fotone impiegato. Evidentemente, tutto questo ci suggerisce che sarà opportuno impiegare fotoni con una piccola lunghezza d'onda, sicché

di frequenza elevata, di alta energia $h\nu$ e di quantità di moto $\frac{h\nu}{c}$.

Solo che, in questo modo, il fotone altera ancor più la quantità di moto del nostro elettrone. Per poter localizzare precisamente l'elettrone, il fotone dovrebbe avere una frequenza infinita, col risultato che sarebbe infinita anche la sua quantità di moto: la quantità di moto dell'elettrone resterebbe di conseguenza indeterminata. Se, per converso, è la quantità di moto che ci interessa, allora sarà proprio la posizione dell'elettrone a rimanere indeterminata. Così, se Δq è l'incertezza nella determinazione della posizione, e Δp la rispettiva incertezza nella determinazione della quantità di moto, avremo sempre

$$\Delta q \Delta p \geq h.$$

Che le grandezze considerate siano q e p è irrilevante: potremmo assumere le grandezze E e t , cioè l'energia e il tempo, ma giungerem-

mo in ogni caso a una disuguaglianza analoga a quella espressa. Sono queste le famose relazioni d'indeterminazione o d'incertezza della meccanica quantica. Si faccia ora attenzione: quando si afferma che il principio fondamentale della meccanica quantica si basa sulla constatazione che ogni strumento o metodo di misura altera in modo imprevedibile la grandezza che si vuol misurare, non si intende semplicemente riaffermare che vi sarà sempre, qualunque sia la raffinatezza degli strumenti o delle procedure di misurazione, un ineliminabile margine di errore. Qui si sostiene, ancor più radicalmente, che non possiamo considerare nullo l'errore se non indichiamo, al contempo, qual è o potrebbe essere la procedura che ci porterebbe a una misura priva di errore. Ma, dal momento che una simile procedura non sussiste, siamo costretti a convenire che non vi è alcuna grandezza fisica che possa essere esattamente misurabile se non a svantaggio dell'assoluta indeterminazione di un'altra grandezza fisica a essa legata. Dice Heisenberg:

Quando non occorre che una precisione relativamente scarsa è certo possibile anche parlare del luogo e della velocità di un elettrone, e questa precisazione, se adottiamo come criterio gli oggetti della nostra vita quotidiana, è già straordinariamente grande. Se invece teniamo conto della piccolezza degli atomi, questa precisione è scarsa, e una legge naturale caratteristica di questo mondo in piccolo ci impedisce di conoscere il luogo e la velocità di una particella con la precisione che vogliamo. Si possono bensì eseguire esperimenti che ci permettano di stabilire con grande precisione il luogo di una particella, ma per compiere queste misurazioni, noi dobbiamo esporre la particella a una forte azione esterna, sì che ne segue una grande indeterminazione della sua velocità. La natura dunque si sottrae ad una precisa fissazione dei nostri concetti intuitivi, per l'inevitabile perturbazione che è collegata con ogni osservazione. Mentre in origine lo scopo di ogni indagine scientifica era quello di descrivere possibilmente la natura come essa sarebbe di per sé, vale a dire senza il nostro intervento e senza la nostra osservazione, ora noi comprendiamo che proprio questo scopo è irraggiungibile. Nella fisica atomica non è possibile astrarre in alcuna maniera dalle modificazioni che ogni osservazione produce nell'oggetto osservato¹²⁶.

¹²⁶ W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, Bollati Boringhieri, Torino 2000, pp. 97-98.

Com'è facile capire, sulla nozione di conoscenza scientifica della realtà così come essa è, viene a determinarsi una frattura estremamente profonda. Per Heisenberg, Bohr, Born, e la maggior parte dei fisici di quel periodo, e non solo, non ha alcun significato parlare di una realtà che è indipendente dall'osservatore. A questa posizione si opposero orgogliosamente i sostenitori della concezione classica a partire da Planck e, come vedremo, dallo stesso Einstein. Afferma infatti il padre della nozione di quanto di luce:

Il fondamento e la condizione preliminare di ogni scienza veramente fertile è l'ipotesi metafisica, certo non giustificabile per via puramente logica, ma che la logica non potrà nemmeno mai controbattere, dell'esistenza di un mondo esterno, a sé, completamente indipendente da noi, per quanto noi non ne possiamo avere conoscenza diretta che attraverso i nostri sensi. È come se noi potessimo osservare un oggetto soltanto per mezzo di occhiali il cui colore fosse un po' diverso da persona a persona. Non ci verrebbe certo in mente di attribuire ai nostri occhiali tutte le proprietà dell'immagine percepita, per quanto nel formare il nostro giudizio sull'oggetto, noi ci preoccupiamo di stabilire fino a che punto il colore con cui esso ci appare è prodotto dai nostri occhiali. Analogamente il pensiero scientifico esige per prima cosa che si riconosca e si esegua la distinzione tra il mondo esteriore e il mondo interiore. Le singole scienze non si sono mai preoccupate di giustificare questo salto nel trascendentale, ed hanno fatto bene. Se si fossero comportate altrimenti non avrebbero fatto così rapidi progressi; e poi, ciò che più importa, una confutazione non era e non sarà mai da temersi, perché questioni di tale genere non possono venire risolte col ragionamento¹²⁷.

A ben vedere, nell'atteggiamento filosofico assunto da Heisenberg e da Bohr è implicita una seconda, grave, conseguenza: la negazione del fondamentale principio di causalità. I motivi sono chiari. Chi investiga la natura, il fisico, ha sempre legato la nozione di causa con la possibilità di prevedere gli eventi futuri. Ora, il fatto che nessuna misura possa essere considerata esatta, nel senso che è stato in precedenza spiegato, implica che nessuna previsione calcolata in precedenza può concordare esattamente con il risultato della misura, sicché diventa impossibile prevedere esattamente un fenomeno

¹²⁷ M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, Torino 2002, p. 135.

fisico. La conclusione è che in natura non ci sono leggi rigorose, sottomesse a un principio di causalità ma solo regole con un altissimo grado di approssimazione, e per questo mai assolutamente certe. E ancora una volta Planck ribatterà:

Indubbiamente la legge causale non è dimostrabile per via logica, non è quindi né vera, né falsa; ma è un principio euristico, una guida, la guida più preziosa che noi possediamo se vogliamo orientarci nel groviglio degli eventi e conoscere la direzione in cui deve procedere la ricerca scientifica per giungere a risultati fecondi¹²⁸.

Di fronte alle relazioni di indeterminazione, Bohr espresse una sua particolare posizione che si sviluppa semplicemente a partire dall'interrogativo che, queste stesse relazioni, non possono non suscitare. Come mai, si chiese Bohr, se ci vogliamo rappresentare un ente come l'elettrone, il fotone, eccetera, possiamo impiegare tranquillamente, cioè senza timore di cadere in contraddizione, due modelli antitetici quali quello corpuscolare e quello ondulatorio? Una volta dimostrato, proprio in virtù delle relazioni d'indeterminazione, che non si dà contraddizione perché nel momento in cui si spinge a fondo la precisazione di un modello l'altro sfuma sempre più nell'indistinto e viceversa, sicché non sono mai entrambi presenti allo stesso grado di distinzione, la conclusione da trarre non può che essere la seguente. L'elettrone, o il fotone, hanno due aspetti che, se si presentassero contemporaneamente, si escluderebbero necessariamente; ma, dal momento che se si dà l'uno non si dà l'altro, pur escludendosi si completano, sono perciò due aspetti complementari. È questo il famoso *principio di complementarità*, destinato a divenire una delle caratteristiche fondamentali della nuova scienza fisica.

8. Onde di probabilità

La fisica classica aveva introdotto, nel dominio di studio dell'evoluzione dei gas, delle leggi probabilistiche, ossia delle leggi statistiche, come sintesi di leggi individuali e causali. L'atteggiamento della fisica quantica è, su questo piano, completamente diverso: non si dà alcuna enumerazione di casi singoli cui far seguire una legge statistica; quest'ultima è data immediatamente e si applica, si

¹²⁸ Ivi, p. 292.

badi bene, non a enti individuali, ad esempio alla velocità o posizione di una particella per predirne il percorso, ma ad aggregati o moltitudini. Così, quando una legge statistica viene applicata a un singolo individuo, le uniche predizioni che potremo fare circa il comportamento di quel dato individuo hanno solo il carattere della probabilità.

Orbene, sul piano della meccanica ondulatoria abbiamo precedentemente constatato che all'onda associata al corpuscolo non si riconosce alcuna esistenza o realtà fisica. Quale significato potremo allora attribuirle? Sappiamo che, dal punto di vista classico, l'energia luminosa si suppone segua una distribuzione spaziale che è proporzionale all'intensità dell'onda. Consideriamo ora la possibilità di inserire in questo contesto il concetto di fotone. L'introduzione del nuovo concetto implica che l'intensità dell'onda è, punto per punto, proporzionale al numero di fotoni che vi giungono. I dati sperimentali, sorprendentemente, mostrano però che nei fenomeni di interferenza con luci molto deboli i fotoni giungono al dispositivo dove avviene l'interferenza singolarmente, e non a fasci. La conclusione che allora si è costretti a trarre è che l'intensità dell'onda associata al fotone rappresenta, in ogni punto, la probabilità che l'elettrone vi si trovi. Lo stesso possiamo dire per quanto riguarda l'elettrone. Nel 1927, Bohr e Heisenberg chiamarono la funzione ψ onda di probabilità. A onor del vero, bisogna aggiungere che i due ammettevano l'esistenza del corpuscolo e dell'onda ψ , ma il corpuscolo non avrebbe né posizione, né velocità, né traiettoria determinate: esso può rivelarsi in una certa posizione o con una certa velocità solo nell'istante di una misura o di un'osservazione; l'onda ψ rappresenta allora la probabilità della presenza o della velocità in un certo punto dello spazio o in un certo istante del tempo. In definitiva, il corpuscolo non è più localizzato nello spazio e nel tempo, ma diviene un insieme di probabilità o potenzialità, mentre l'onda ψ non è che una rappresentazione di probabilità.

La posizione di Einstein sull'intera questione si afferma gradualmente come un dissidio profondo, insanabile, proprio perché radicato nella stessa possibilità che, come stiamo per mostrare, trasforma il nostro desiderio di conoscere in conoscenza scientifica.

DALLA RELATIVITÀ ALLA MECCANICA QUANTICA

1. Modelli atomici

Se allo scoccare del Novecento M. Planck aveva di fatto posto il fondamento della ricerca quantistica, dopo il 1905 la figura che più di ogni altra emergeva all'orizzonte della nuova frontiera speculativa era Albert Einstein che, subito dopo la memoria "rivoluzionaria", nel 1906 pubblicò un articolo sull'assorbimento del calore da parte dei solidi. L'attenzione e le energie che, di lì a poco, il giovane fisico tedesco dedicherà alla costruzione della teoria della relatività generale, non gli impedirono di ritornare, nei decenni successivi, sull'argomento tanto affascinante quanto problematico e travagliato dei quanti di luce: già nel 1917 elaborò infatti una memoria particolarmente importante intitolata *Quantentheorie der Strahlung* (*La teoria quantica della radiazione*).

Per ben comprendere l'intricata e sofferta marcia della ricerca sul versante delle nuove concezioni, e il ruolo in essa svolto dal Nostro, è necessario avere un quadro genetico di riferimento, che prende avvio dalla scoperta del nucleo atomico da parte del fisico sperimentale di origine neozelandese E. Rutherford.

Nei primi anni del Novecento la comunità dei fisici era, nella sua quasi totalità, propensa ad accettare il modello atomico proposto dal fisico britannico J.J. Thomson che, come ben sappiamo, aveva scoperto l'elettrone. Nella sua definitiva versione, l'atomo di Thomson conterrebbe numerosi elettroni, la cui carica negativa sarebbe comunque compensata; il problema era quello di determinare che cosa rende possibile il fatto che lo spazio, attraverso il quale si diffondono gli elettroni, si comporti come se fosse detentore di una carica positiva uguale alla carica negativa della somma di tutti gli elettroni, dunque in grado di equilibrare l'intero sistema. A questo modello, elaborato nel 1891, poco tempo dopo Lord Kelvin conferì un carattere meno oscuro. In effetti, nel 1901, Kelvin suppose anzitutto un fluido elettrico negativo costituito da elettroni che permeano liberamente

non solo lo spazio libero di atomi, ma addirittura l'atomo stesso. Con una seconda assunzione, Kelvin postulava un'attrazione tra l'atomo della materia ordinaria e un elettrone che sarebbe regolata dalla legge secondo cui mentre l'attrazione su un elettrone esterno è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due centri, quello dell'atomo e quello dell'elettrone, internamente l'attrazione dell'atomo nei riguardi dell'elettrone interno a esso è direttamente proporzionale alla distanza tra i rispettivi centri. Ciò consentiva non solo una distribuzione uniforme di elettricità positiva nello spazio occupato dall'atomo di materia ordinaria, ma anche la possibilità di distinguere due specie di elettricità: quella positiva, pensata come qualcosa di continuo, e quella negativa, vista come formata da grani. La materia ordinaria non elettrizzata è allora un insieme di atomi nel quale è presente un numero sufficiente di elettroni in grado di annullare le forze elettriche all'esterno. Il modello più semplice di atomo sarebbe così costituito da una distribuzione sferica uniforme di elettricità positiva con al centro un elettrone. La presenza di due o più elettroni genera sicuramente problemi di stabilità, ma Lord Kelvin non ritenne opportuno investigare ulteriormente la questione concludendo che, con buona probabilità, più elettroni si disporrebbero su superfici sferiche concentriche interne all'atomo, con moto rotatorio intorno al centro. Si poneva tuttavia, come è facile capire, una questione fondamentale: stando alla teoria elettromagnetica della luce, gli elettroni disposti nei termini appena espressi dovrebbero produrre sia onde elettromagnetiche sia un campo magnetico; ma in che modo si manifesterebbero questi due fenomeni? Fu Thomson che, per almeno una quindicina d'anni, aderì al modello che Kelvin aveva elaborato a partire dal suo iniziale progetto, si prese la briga di studiare, senza conseguire risultati apprezzabili, l'intera questione. Pur non superando il tribunale della critica e dell'esperimento, al modello concepito da Thomson deve essere riconosciuto in ogni caso il merito di aver tracciato una direzione assai precisa verso cui orientare gli sforzi, consentendo di mettere definitivamente a fuoco quelli che erano in realtà i veri problemi che richiedevano una celere quanto adeguata soluzione, ossia:

- a) numero e distribuzione degli elettroni rispetto alla massa dell'atomo;
- b) natura e distribuzione dell'elettricità positiva che compenserebbe la quantità totale negativa degli elettroni;
- c) natura e distribuzione della massa dell'atomo.

Si è visto che, come aveva lasciato intendere Lord Kelvin, all'interno dell'atomo dovrebbe trovar posto un nucleo centrale di elettricità positiva. Questo aspetto, al quale Thomson non dette rilievo, fu invece attentamente ripreso dal fisico giapponese H. Nagaoka nel 1904 in uno studio di particolare interesse¹²⁰. Sul modello di Saturno, si tentava di spiegare che il sistema atomico consiste di numerose particelle di massa uguale, disposte in cerchio a intervalli angolari uguali, che si respingono mutuamente con forze che devono essere considerate come inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra le particelle. Al centro del cerchio si troverebbe una particella più grossa che attira le altre, che formano un anello, secondo la stessa legge.

Nel 1908, E. Marsden, allievo di Rutherford, e H. Geiger, colui che avrebbe in seguito concepito il rivelatore ancora oggi in uso per misurare le radiazioni, iniziarono a studiare sperimentalmente il passaggio di particelle α attraverso sottili foglie di oro. L'esito dell'osservazione strumentale offriva i seguenti risultati: la grande maggioranza delle particelle attraversa la foglia di metallo quasi in linea retta, proseguendo poi il proprio percorso come se non incontrasse alcun ostacolo opposto dalla materia; nell'ordine di grandezza pari a 1 su 10.000, la particella α viene fortemente deviata con un angolo maggiore a 90° .

Si trattava, evidentemente, di un urto tra la particella α e gli atomi della materia attraversata. Soltanto che, sia il modello atomico di Thomson sia quello di Nagaoka imponevano un radicale mutamento della nozione di urto tra gli atomi rispetto alla concezione derivata dalla teoria cinetica dei gas: non si può più parlare semplicemente di urto in senso meccanico, immaginando gli atomi alla stregua di sferette elastiche, perché quando due atomi vengono a incontrarsi, sicché le cariche elettriche si avvicinano, si manifestano importanti forze repulsive che influenzano decisamente, modificandole, le traiettorie originarie. È ben vero che, in via approssimativa, ossia considerando il fatto che gli urti di cui si parla sono fittizi, è possibile considerare come equivalenti le variazioni del moto degli atomi rispetto alle variazioni che si registrerebbero su un piano meccanico; ma al di là di questo, il modello di Thomson non era in grado di dare una spiegazione accet-

¹²⁰ Si tratta della memoria *On a Dynamical System Illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radioactivity*, comparsa sulla rivista "The Nature" nel 1904.

tabile del fenomeno scoperto da Marsden e Geiger. Di tutto ciò si rese ben conto Rutherford: la deflessione rilevata per alcune particelle α doveva essere messa in conto a una deviazione brusca subita dalla particella nel passaggio attraverso l'intenso campo elettrico dell'atomo o, necessariamente, all'urto con lo stesso. Se le cose stavano in questi termini, era necessario supporre nell'atomo un nocciolo centrale, un nucleo, di dimensioni estremamente ridotte, carico positivamente e contenente la maggior parte della massa atomica. Tutto andava, insomma, nella direzione tracciata dal modello di Nagaoka visto che in esso la deflessione si spiega agevolmente.

In effetti, seguendo il modello, la particella α attraversa l'atmosfera elettronica di un atomo di una foglia d'oro, si avvicina al corpo centrale, ma la grande forza di Coulomb che si origina tra le due cariche positive la devia, costringendola a descrivere un'orbita a cometa. Il guaio è che lo stesso modello di Nagaoka presenta un grave inconveniente.

La difficoltà sta nel fatto che, a differenza del modello di Thomson, quello di Nagaoka non prevede la presenza di elettroni nelle zone più profonde dell'atomo, come invece l'emissione di particelle β dei materiali radioattivi sembrerebbe richiedere. Sulla necessità di ammettere l'esistenza di elettroni nel nucleo atomico insistette in modo particolare Marie Curie, che li chiamò essenziali (nucleari, solo in seguito), perché la loro fuga implicherebbe la distruzione dell'atomo, distinguendoli dagli elettroni periferici, che possono staccarsi dall'atomo stesso senza tuttavia procurare modifiche di natura chimica. Per almeno vent'anni si continuò a considerare gli elettroni come essi stessi facenti parte dell'edificio atomico, attribuendo a essi una funzione coagulante tra le cariche positive del nucleo che la forza coulombiana tende a separare.

L'atomo concepito da Rutherford sarebbe dunque diviso in due rigide regioni: l'una interna, il vero e proprio nucleo, l'altra esterna, il sistema elettronico. Due regioni separate da una frontiera invalicabile, tanto che se i costituenti del nucleo non possono passare nella regione del sistema elettronico, un elettrone periferico non può penetrare nella regione nucleare. E non c'è dubbio che il maggior merito della ricerca dello scienziato di origine neozelandese stia nell'aver intuito che i fenomeni radioattivi hanno sede nel nucleo atomico e, soprattutto, nell'aver continuato a lavorare in questa di-

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

la costante h di Planck eguale alla differenza dei valori E' e E'' dell'energia dell'atomo nei due stadi interessati al processo, in modo che si abbia $h\nu = E' - E''$ ¹²¹.

Come si evince dal dettato del fisico danese, l'elettrone che ruota intorno al nucleo, da un lato, rispetta le leggi della meccanica, ma dall'altro, dal momento che durante la rotazione non emette alcuna radiazione, contravviene ai dettami dell'elettromagnetismo. Attraverso la meccanica classica abbiamo ancora la possibilità di considerare l'equilibrio dinamico di un sistema in stato stazionario e, una volta conosciuto il raggio dell'orbita, calcolare la velocità, la frequenza, nonché l'energia potenziale e totale dell'elettrone ruotante. Ma, ed ecco il punto davvero saliente, l'elettrone può collocarsi e disporsi solamente su un'orbita dove la differenza di energia è un multiplo intero del quanto di azione h . Ciò significa che l'elettrone non può saltare su qualsiasi orbita ma, solo ed esclusivamente su orbite quantizzate. Ne deriva che ogni atomo può assumere una serie di stati stazionari corrispondenti alle orbite particolari in cui si trova effettivamente l'elettrone. Così, se l'atomo si trova sempre in uno stato stazionario, al quale corrisponde un dato valore energetico, a ogni atomo corrisponderà una successione di valori relativi ai diversi stati stazionari che esso potrà assumere.

A Bohr non sfuggì neppure il fatto che un simile sistema planetario quantizzato non può essere interamente assimilato a un sistema astronomico. Il motivo di ciò è molto semplice: le leggi di gravitazione ci permettono di studiare e di spiegare il moto dei pianeti con un'approssimazione piuttosto elevata, ma non ci permettono di prevedere le orbite degli stessi pianeti, che invece dipendono dalla storia del sistema planetario stesso. Di conseguenza, se in un sistema planetario le orbite restano costanti, in un sistema come quello elettronico sono destinate al cambiamento.

Una volta impostata la teoria su basi che, per buona parte, si richiamavano alla fisica classica, Bohr suppose che le orbite elettroniche avessero una conformazione perfettamente circolare, e riuscì a calcolare il raggio dell'orbita minore, indicata con I , che risultò uguale al raggio atomico come contemplato dalla teoria cinetica

¹²¹ N. Bohr, *Atomes et electron*, Rapport et discussion du Conseil de Physique tenue à Bruxelles du 1^{er} au 6 avril 1921, Paris 1923, p. 230.

dei gas. Il passo successivo fu quello di applicare l'apparato teorico messo a punto al più semplice modello atomico conosciuto in natura, cioè l'atomo di idrogeno, che appunto è costituito da un nucleo di massa I , da una carica positiva e da un solo elettrone, carica negativa, ruotante. Fu un vero e proprio successo. Se, da un lato, la teoria di Bohr offriva un'ulteriore conferma all'ipotesi che voleva l'atomo provvisto di un nucleo, dall'altro apriva le porte, consentendone di fatto l'inserimento nella stessa teoria atomica, all'ipotesi dei quanti. Le difficoltà si fecero però insormontabili allorché il fisico danese tentò audacemente di applicare la propria teoria a modelli atomici via via più complessi rispetto al modello iniziale. Non è inutile, bensì doveroso, precisare che all'epoca in cui Bohr costruì il suo modello teorico, cioè nel 1913, dal punto di vista prettamente tecnico, cioè matematico, si era in grado di quantizzare solo i moti che dipendevano da una singola variabile. Proprio per questo motivo, il fisico danese si era fatto carico della responsabilità di assumere che le orbite degli elettroni periferici fossero circolari, ben sapendo di essere in contrasto con la meccanica che voleva le orbite elettroniche disegnate come le ellissi di kepleriana memoria. Solo che per definire la posizione di un punto su un'ellisse servono due valori, sicché quantizzare orbite ellittiche significava poter essere capaci di quantizzare i moti definiti da due variabili.

Un tentativo nella direzione tesa a superare la difficoltà matematica fu percorso intorno al 1916 da Wilson e da Sommerfeld che elaborarono un metodo che, appunto, avrebbe dovuto rendere possibile la quantizzazione di sistemi definiti da più di una variabile. Sommerfeld applicò il metodo al modello atomico di Bohr, ma con scarsi risultati. Peraltro, Sommerfeld si rese conto che il fisico danese, rimanendo ancorato alla meccanica classica, aveva trascurato il fatto che la velocità prevista per l'elettrone era troppo alta sicché la sua massa, come la relatività insegnava, non poteva restare costante. Si rendevano dunque necessarie delle correzioni in senso relativistico. Ebbene, con l'inserimento della massa relativistica dell'elettrone, che appunto varia con la velocità, l'orbita elettronica risultava un'ellisse che ruota nel proprio piano intorno al fuoco occupato dal nucleo dell'atomo. Nonostante i correttivi apportati da Sommerfeld, il problema costituito dagli atomi con più elettroni periferici restava inalterato.

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

stein doveva fare i conti. Il meccanismo introdotto da Bohr per l'emissione e l'assorbimento della radiazione imponeva infatti, di nuovo, la questione di dedurre la formula della radiazione nera alla luce delle nuove ipotesi. Il Nostro aveva seguito con interesse gli sviluppi imposti dallo scienziato danese, e aveva recepito con un certo compiacimento il principio di corrispondenza che, sotto un certo angolo visuale, poteva essere considerato come il primo passo effettivamente mosso nella direzione dell'inserimento della teoria dei quanti nella meccanica classica. Non sorprende così che in *Quantentheorie der Strahlung* il fisico tedesco formuli una risoluzione del problema e applichi all'atomo di Bohr i concetti di probabilità della legge di disintegrazione radioattiva. Detto in altri termini, come ogni atomo radioattivo esplosa in un momento imprevedibile con un processo che appare casuale, allo stesso modo la transizione di un elettrone in un atomo è del tutto non prevedibile; per questo, il fenomeno deve essere studiato secondo leggi statistiche, che possono essere formulate sulla base di due assunzioni. Anzitutto si deve assumere che, di fronte a un campo di radiazioni, la possibilità di transizione di un elettrone, sia nel senso dell'emissione sia dell'assorbimento, nell'unità di tempo è proporzionale all'intensità della radiazione; in secondo luogo, si deve assumere che laddove non ci sono perturbazioni esterne si assiste a una transizione spontanea degli elettroni da stati di energia più elevata a stati energetici più bassi, con una probabilità proporzionale, nell'unità di tempo, al numero di atomi inizialmente allo stato eccitato. In questo modo, la legge di emissione radioattiva viene trasferita nel fenomeno della radiazione. Sulla base di quanto espresso e approfondendo la teoria del moto browniano, Einstein ottiene la formula di Planck per la radiazione di corpo nero e, nel discutere il problema dello scambio d'impulso tra il sistema atomico e la radiazione, conclude che per ogni processo elementare di radiazione deve essere

emesso un impulso di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione del tutto casuale.

Questo esito acuiva ulteriormente ed evidentemente il dualismo tra onda e corpuscolo, dal momento che una simile descrizione del processo di emissione esclude la possibilità stessa di onde sferiche. E infatti, con un certo non celato rammarico, Einstein afferma:

Non esiste emissione di radiazione per onde sferiche. Nel processo elementare di emissione la molecola subisce un contrac-

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributatogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributatogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

La possibilità di offrire una sintesi teorica è quanto de Broglie mise a punto in tre note presentate all'*Académie des Sciences* di Parigi. Con lo sguardo ben orientato alle concezioni relativistiche, il fisico francese ipotizza che a ogni particella di massa o energia m_0 si leghi un fenomeno ondulatorio di frequenza n_0 , sicché si avrà:

$$h\nu_0 = m m_0 c^2$$

dove h è la costante di Planck e c la velocità della luce al quadrato. Per esser più chiari, ogni particella di materia sarebbe sede, ma anche sorgente, di una vibrazione intrinseca con una frequenza data dalla relazione appena espressa. Così, se la particella è in moto, la concezione relativistica ci fa concludere che la vibrazione, per un osservatore fisso che si sposta con una velocità maggiore rispetto a quella posseduta dalla particella, appare un'onda. Posto ciò, De Broglie studia il moto uniforme di un elettrone in una traiettoria chiusa e giunge a dimostrare che traiettorie quantizzate della teoria di Bohr-Sommerfeld possono essere interpretate come un effetto di risonanza dell'onda di fase sulla lunghezza delle traiettorie chiuse. In questo modo, se l'elettrone si muove in una curva chiusa, l'onda deve seguirlo e dovrebbe formarsi una specie di anello continuo di onde, sicché la lunghezza dell'anello dovrà essere uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Le orbite stazionarie saranno allora quelle orbite che contengono precisamente 1, 2, 3... lunghezze d'onda associate all'elettrone ruotante. Il calcolo dava ragione a De Broglie: le orbite erano proprio quelle proposte da Bohr.

Questa concezione fu applicata dallo stesso fisico francese al caso dei fotoni. Assumendo che la distribuzione dei fotoni è determinata dalle onde, si avranno quindi regioni oscure dove le onde si sovrappongono, il fisico francese delineava una teoria dei fenomeni d'interferenza e diffusione della luce. Di qui alla legge di Planck per la radiazione di corpo nero il passo era breve, e anch'essa fu acquisita come risultato.

Le tre brevi note di de Broglie, debitamente interpretate, diedero vita nel 1924 alla sua dissertazione di dottorato, dissertazione dove, tra l'altro, si mostrava che le nuove acquisizioni teoriche conducevano a una spiegazione quantitativa dell'effetto Doppler, della riflessione su uno specchio mobile, della pressione delle radiazioni, giungendo a formule identiche a quelle ottenute dalla teoria ondulatoria.

6. Idee quantiche

I principi della meccanica ondulatoria non erano ancora sufficientemente noti quando si provò un'altra volta a superare le difficoltà teoriche nelle quali ci si dibatteva. Si tratta del tentativo promosso nel 1925 dal giovane fisico tedesco W. Heisenberg, che ben rapidamente si sviluppò attraverso i contributi di M. Born ed E.P. Jordan.

Scolaro di Sommerfeld, Heisenberg era molto sensibile alla direzione impressa alla ricerca da Bohr, tanto che aveva dedicato i suoi lavori al principio di corrispondenza. Non è dunque un caso che la teoria di Heisenberg si sviluppi, appunto, attraverso una serrata riflessione sul rapporto tra il principio di corrispondenza e l'atteggiamento che deve essere assunto nei riguardi dei problemi sollevati dalla scienza fisica. Questo atteggiamento può essere espresso nei seguenti termini: la costruzione di una teoria fisica comporta necessariamente l'eliminazione sistematica di tutte quelle grandezze che, nel dominio specifico entro il quale si opera, non sono o non possono essere accessibili per esperienza; insomma, non sono riducibili al dato empirico. La scienza ha a che fare solo con grandezze osservabili. Nelle elaborazioni teoriche espresse fino a quel momento erano state inserite traiettorie, posizioni, velocità di un elettrone; ma, si chiede ironicamente Heisenberg, qualcuno ha mai visto un elettrone? Dell'atomo, all'epoca, si conoscevano solo gli stati stazionari, le transizioni tra questi ultimi, l'energia emessa o assorbita nel corso delle transizioni: ogni teoria che seriamente avesse inteso esser tale, avrebbe così dovuto tener conto solo di queste grandezze. Il guaio era che le nozioni in grado di collegarsi con l'esperienza, a causa della discontinuità quantica non possono essere espresse con le note e correnti funzioni continue. Si rendeva necessario e indispensabile un nuovo formalismo, Heisenberg lo sapeva bene; non è anzi improbabile che proprio il principio di corrispondenza lo abbia ispirato nella creazione di un nuovo linguaggio. In effetti, la teoria classica esprime ogni grandezza legata a un sistema quantizzato con sviluppi in serie di Fourier ma, dal canto suo, la teoria dei quanti scompone la stessa grandezza in elementi che corrispondono alle transizioni atomiche. Alla luce del principio di corrispondenza, le due procedure dovranno perciò tendere asintoticamente a confondersi per un grandissimo numero di quanti. Heisenberg ebbe così l'idea di frammentare ogni grandezza per poi rappresentarla con

una tabella di numeri molto somigliante a ciò che matematicamente si dice matrice. Si trattava, a questo punto, di individuare le regole per il calcolo, cosa che Heisenberg fece puntualmente rinvenendole proprio nelle matrici matematiche, peraltro fino a quel momento inutilizzate in fisica. Si tratta di regole, è bene precisarlo e chiarirlo in vista di quanto si dirà in seguito, che sono diverse rispetto a quelle dell'algebra ordinaria. Un esempio di questa diversità ci è offerto dalla proprietà commutativa. In genere, il prodotto di una matrice per una seconda matrice non è uguale al prodotto della seconda matrice per la prima, ma dipende dall'ordine dei fattori. Si tratta di una caratteristica particolarmente rilevante perché ai numeri ordinari della meccanica classica, che rappresentano delle grandezze, si sostituiranno dei numeri quantici il cui prodotto non è commutativo. Nel suo schema, Heisenberg introdusse anche la costante di Planck in modo tale che nei fenomeni macroscopici, dove h è piccolo, il prodotto delle grandezze meccaniche è sempre permutabile. In questo modo si torna alla meccanica classica.

I risultati ottenuti dalla nuova teoria non potevano non suscitare entusiasmo, visto che si dava prova dell'esistenza degli stati stazionari a energia quantizzata, si calcolava il livello energetico dell'oscillatore lineare dell'atomo di idrogeno; non meno favore incontrava il rigore e la precisione del formalismo. Per converso, si avvertiva con preoccupazione la difficoltà dell'astrattezza peculiare della nuova teoria, che al concetto fisico aveva sostituito il simbolo matematico. Il lavoro di De Broglie aveva nel frattempo attirato l'attenzione di E. Schrödinger, in quegli anni docente a Zurigo. Intorno al 1926, Schrödinger giunse per primo a stabilire l'equazione esplicita delle onde della meccanica ondulatoria; da essa riuscì a dedurre un metodo rigoroso per lo studio dei problemi della quantizzazione. La particolarità di questa equazione sta nel fatto di annoverare tra i suoi coefficienti anche dei numeri immaginari.

Dal punto di vista della teoria classica, le equazioni di propagazione per le onde sono sempre reali e le eventuali e possibili sostituzioni con numeri complessi risultano sempre un artificio del calcolo. Nella funzione d'onda formulata da Schrödinger, e indicata dalla lettera greca ψ , i coefficienti immaginari sono ineliminabili, il che significa che sono connaturati al fenomeno che si vuol descrivere. Detto in termini se possibile ancor più chiari, se nella fisica classica le onde corrispondono alle vibrazioni di un mezzo la cui esistenza era reale, come nel caso dell'aria per le onde sonore, o semplice-

mente supposta, come nei casi dell'etere e della propagazione luminosa, l'onda della meccanica quantica non può essere considerata reale, ossia una realtà fisica che corrisponde alla vibrazione di qualche mezzo. Questa interpretazione, evidentemente, collima perfettamente con quanto aveva intuito de Broglie: a un'onda come quella associata, che non trasporta energia e che ha luogo in uno spazio rappresentativo pluridimensionale non è possibile riconoscere un'esistenza fisica, bensì un'esistenza fittizia. Si tratta, insomma, di un'onda fantasma.

È opportuno precisare che l'equazione di Schrödinger, originata in ambiente newtoniano, era valida, conseguentemente, per corpuscoli di piccola velocità. Si rendevano perciò necessarie le opportune modifiche relativistiche per le grandi velocità. A ciò trovò rimedio il britannico P.A.M. Dirac che, dopo aver dimostrato la necessità di una maggiore generalizzazione, dette vita a una teoria fisica ancor più astratta e insolita della meccanica ondulatoria e quantica. Da questa teoria emerge, peraltro naturalmente, l'ipotesi dell'elettrone ruotante, ossia il fatto che l'elettrone, paragonato a una piccola sfera elettrizzata, ruota attorno a uno dei suoi diametri mostrando così un momento meccanico e un momento magnetico propri, il cosiddetto *spin*¹²⁴. La teoria di Dirac conciliava così, armonicamente, la relatività, i quanti e lo *spin*.

In virtù del lavoro svolto, Schrödinger era in grado di affrontare il problema degli stati stazionari di un sistema quantizzato, oltre a calcolare i valori dell'energia, ottenendo per lo più i risultati già registrati dalla vecchia teoria dei quanti; e se, in molti casi, i valori ottenuti si mostravano diversi, tali valori erano tuttavia più vicini alla conferma sperimentale. Ebbene, la meccanica quantica di Heisenberg giungeva ai medesimi risultati. Di ciò, ovviamente, non si poteva non restare che stupiti. Ma la coincidenza aveva alle sue spalle una ragione profonda, che Schrödinger comprese subito: vi era una sostanziale identità tra la meccanica ondulatoria e la meccanica quantica; quest'ultima non sarebbe che la trascrizione matematica della prima, con il vantaggio di condurre spesso più rapidamente al risultato, ma con il limite di essere certamente meno intuibile e più complicata nel formalismo.

Orbene, elaborando la propria posizione, provando che anche la

¹²⁴ Dall'inglese *to spin* (girare). Che l'elettrone presentasse una simile caratteristica lo avevano sostenuto nel 1925 i fisici Uhlenbeck e Goudsmit.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

ni atomici non sono descrivibili *tout court* nella nostra lingua. Bisogna abituarsi all'idea di rinunciare al concetto di un punto materiale precisamente localizzato nello spazio e nel tempo. Alleggerita in questo modo da ogni inutile orpello, la fisica può dare di un corpuscolo o l'esatta posizione nello spazio, cui però fa seguito una completa indeterminazione nel tempo, o un'esatta posizione nel tempo alla quale segue, simmetricamente, un'altrettanto completa indeterminazione nello spazio. Volendo esser più precisi dovremmo anzi dire che la fisica può solo dirci, quando ciò è possibile, quale *probabilità* abbiamo di trovare, in un certo istante, l'ente che chiamiamo corpuscolo in un volume di spazio rappresentativo, che non necessariamente si identifica con lo spazio reale. I salti quantici impongono questa conseguenza.

Questa indeterminazione fu assunta da Heisenberg, con il plauso di Bohr, nel 1927. Il nuovo corso della scienza fisica sarebbe stato caratterizzato dal principio di indeterminazione del quale lo stesso Bohr offrì un'agevole spiegazione attraverso un esperimento mentale.

Poniamo il caso di voler determinare, in un certo preciso istante, la posizione e la quantità di moto di un elettrone. La procedura seguita consiste nell'illuminare l'elettrone con un fascio di fotoni. L'urto che ne consegue ci permette di stabilire la posizione dell'elettrone a meno di una lunghezza d'onda del fotone impiegato. Evidentemente, tutto questo ci suggerisce che sarà opportuno impiegare fotoni con una piccola lunghezza d'onda, sicché

di frequenza elevata, di alta energia $h\nu$ e di quantità di moto $\frac{h\nu}{c}$.

Solo che, in questo modo, il fotone altera ancor più la quantità di moto del nostro elettrone. Per poter localizzare precisamente l'elettrone, il fotone dovrebbe avere una frequenza infinita, col risultato che sarebbe infinita anche la sua quantità di moto: la quantità di moto dell'elettrone resterebbe di conseguenza indeterminata. Se, per converso, è la quantità di moto che ci interessa, allora sarà proprio la posizione dell'elettrone a rimanere indeterminata. Così, se Δq è l'incertezza nella determinazione della posizione, e Δp la rispettiva incertezza nella determinazione della quantità di moto, avremo sempre

$$\Delta q \Delta p \geq h.$$

Che le grandezze considerate siano q e p è irrilevante: potremmo assumere le grandezze E e t , cioè l'energia e il tempo, ma giungerem-

mo in ogni caso a una disuguaglianza analoga a quella espressa. Sono queste le famose relazioni d'indeterminazione o d'incertezza della meccanica quantica. Si faccia ora attenzione: quando si afferma che il principio fondamentale della meccanica quantica si basa sulla constatazione che ogni strumento o metodo di misura altera in modo imprevedibile la grandezza che si vuol misurare, non si intende semplicemente riaffermare che vi sarà sempre, qualunque sia la raffinatezza degli strumenti o delle procedure di misurazione, un ineliminabile margine di errore. Qui si sostiene, ancor più radicalmente, che non possiamo considerare nullo l'errore se non indichiamo, al contempo, qual è o potrebbe essere la procedura che ci porterebbe a una misura priva di errore. Ma, dal momento che una simile procedura non sussiste, siamo costretti a convenire che non vi è alcuna grandezza fisica che possa essere esattamente misurabile se non a svantaggio dell'assoluta indeterminazione di un'altra grandezza fisica a essa legata. Dice Heisenberg:

Quando non occorre che una precisione relativamente scarsa è certo possibile anche parlare del luogo e della velocità di un elettrone, e questa precisazione, se adottiamo come criterio gli oggetti della nostra vita quotidiana, è già straordinariamente grande. Se invece teniamo conto della piccolezza degli atomi, questa precisione è scarsa, e una legge naturale caratteristica di questo mondo in piccolo ci impedisce di conoscere il luogo e la velocità di una particella con la precisione che vogliamo. Si possono bensì eseguire esperimenti che ci permettano di stabilire con grande precisione il luogo di una particella, ma per compiere queste misurazioni, noi dobbiamo esporre la particella a una forte azione esterna, sì che ne segue una grande indeterminazione della sua velocità. La natura dunque si sottrae ad una precisa fissazione dei nostri concetti intuitivi, per l'inevitabile perturbazione che è collegata con ogni osservazione. Mentre in origine lo scopo di ogni indagine scientifica era quello di descrivere possibilmente la natura come essa sarebbe di per sé, vale a dire senza il nostro intervento e senza la nostra osservazione, ora noi comprendiamo che proprio questo scopo è irraggiungibile. Nella fisica atomica non è possibile astrarre in alcuna maniera dalle modificazioni che ogni osservazione produce nell'oggetto osservato¹²⁶.

¹²⁶ W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, Bollati Boringhieri, Torino 2000, pp. 97-98.

Com'è facile capire, sulla nozione di conoscenza scientifica della realtà così come essa è, viene a determinarsi una frattura estremamente profonda. Per Heisenberg, Bohr, Born, e la maggior parte dei fisici di quel periodo, e non solo, non ha alcun significato parlare di una realtà che è indipendente dall'osservatore. A questa posizione si opposero orgogliosamente i sostenitori della concezione classica a partire da Planck e, come vedremo, dallo stesso Einstein. Afferma infatti il padre della nozione di quanto di luce:

Il fondamento e la condizione preliminare di ogni scienza veramente fertile è l'ipotesi metafisica, certo non giustificabile per via puramente logica, ma che la logica non potrà nemmeno mai controbattere, dell'esistenza di un mondo esterno, a sé, completamente indipendente da noi, per quanto noi non ne possiamo avere conoscenza diretta che attraverso i nostri sensi. È come se noi potessimo osservare un oggetto soltanto per mezzo di occhiali il cui colore fosse un po' diverso da persona a persona. Non ci verrebbe certo in mente di attribuire ai nostri occhiali tutte le proprietà dell'immagine percepita, per quanto nel formare il nostro giudizio sull'oggetto, noi ci preoccupiamo di stabilire fino a che punto il colore con cui esso ci appare è prodotto dai nostri occhiali. Analogamente il pensiero scientifico esige per prima cosa che si riconosca e si esegua la distinzione tra il mondo esteriore e il mondo interiore. Le singole scienze non si sono mai preoccupate di giustificare questo salto nel trascendentale, ed hanno fatto bene. Se si fossero comportate altrimenti non avrebbero fatto così rapidi progressi; e poi, ciò che più importa, una confutazione non era e non sarà mai da temersi, perché questioni di tale genere non possono venire risolte col ragionamento¹²⁷.

A ben vedere, nell'atteggiamento filosofico assunto da Heisenberg e da Bohr è implicita una seconda, grave, conseguenza: la negazione del fondamentale principio di causalità. I motivi sono chiari. Chi investiga la natura, il fisico, ha sempre legato la nozione di causa con la possibilità di prevedere gli eventi futuri. Ora, il fatto che nessuna misura possa essere considerata esatta, nel senso che è stato in precedenza spiegato, implica che nessuna previsione calcolata in precedenza può concordare esattamente con il risultato della misura, sicché diventa impossibile prevedere esattamente un fenomeno

¹²⁷ M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, Torino 2002, p. 135.

fisico. La conclusione è che in natura non ci sono leggi rigorose, sottomesse a un principio di causalità ma solo regole con un altissimo grado di approssimazione, e per questo mai assolutamente certe. E ancora una volta Planck ribatterà:

Indubbiamente la legge causale non è dimostrabile per via logica, non è quindi né vera, né falsa; ma è un principio euristico, una guida, la guida più preziosa che noi possediamo se vogliamo orientarci nel groviglio degli eventi e conoscere la direzione in cui deve procedere la ricerca scientifica per giungere a risultati fecondi¹²⁸.

Di fronte alle relazioni di indeterminazione, Bohr espresse una sua particolare posizione che si sviluppa semplicemente a partire dall'interrogativo che, queste stesse relazioni, non possono non suscitare. Come mai, si chiese Bohr, se ci vogliamo rappresentare un ente come l'elettrone, il fotone, eccetera, possiamo impiegare tranquillamente, cioè senza timore di cadere in contraddizione, due modelli antitetici quali quello corpuscolare e quello ondulatorio? Una volta dimostrato, proprio in virtù delle relazioni d'indeterminazione, che non si dà contraddizione perché nel momento in cui si spinge a fondo la precisazione di un modello l'altro sfuma sempre più nell'indistinto e viceversa, sicché non sono mai entrambi presenti allo stesso grado di distinzione, la conclusione da trarre non può che essere la seguente. L'elettrone, o il fotone, hanno due aspetti che, se si presentassero contemporaneamente, si escluderebbero necessariamente; ma, dal momento che se si dà l'uno non si dà l'altro, pur escludendosi si completano, sono perciò due aspetti complementari. È questo il famoso *principio di complementarità*, destinato a divenire una delle caratteristiche fondamentali della nuova scienza fisica.

8. Onde di probabilità

La fisica classica aveva introdotto, nel dominio di studio dell'evoluzione dei gas, delle leggi probabilistiche, ossia delle leggi statistiche, come sintesi di leggi individuali e causali. L'atteggiamento della fisica quantica è, su questo piano, completamente diverso: non si dà alcuna enumerazione di casi singoli cui far seguire una legge statistica; quest'ultima è data immediatamente e si applica, si

¹²⁸ Ivi, p. 292.

TEORIA ED ESPERIENZA

1. La nozione di “trascendentale”

Per comprendere pienamente il dissenso che caratterizza la posizione di Einstein nei confronti della meccanica quantica consideriamo opportuno chiarire sin d'ora il significato di un termine il cui uso è spesso tanto inflazionato quanto improprio. Lo faremo prendendo ad esempio Immanuel Kant che, nel secondo paragrafo dell'“Introduzione alla logica trascendentale” della seconda edizione della *Critica della ragion pura*, afferma:

E qui faccio un'osservazione che concerne tutte le considerazioni successive e che sarà bene tener sempre innanzi agli occhi: e cioè che non bisogna chiamare trascendentale ogni conoscenza a priori, bensì solamente quella attraverso la quale conosciamo che e come alcune rappresentazioni (intuizioni o concetti) sono impiegate o sono possibili esclusivamente a priori (cioè la possibilità della conoscenza e il suo uso a priori). Pertanto né lo spazio né una sua qualsiasi determinazione geometrica a priori sono rappresentazioni trascendentali; lo sono invece soltanto la conoscenza dell'origine non empirica di queste rappresentazioni e la possibilità che tuttavia posseggono di riferirsi a priori agli oggetti dell'esperienza¹²⁹.

Come è stato giustamente osservato,

“trascendentale” non è quindi lo spazio considerato come forma *a priori*, né una possibile determinazione geometrica di esso (per esempio, lo spazio a una, due, tre... *n* dimensioni), ma il nostro “modo” di conoscerlo come “struttura” della conoscenza, ponendo il problema della sua natura, della sua origine, della sua funzione (come “struttura”) per quanto riguarda la conoscenza

¹²⁹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, in *Immanuel Kant Werkausgabe*, Hersg. von Wilhelm Weischedel, Zürich 1977, Bd. III; trad. it. a cura di P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino 1977, p. 29.

in generale e la conoscenza geometrica in particolare. Lo stesso discorso si può fare, secondo Kant, per tutte le altre “forme” o strutture del nostro conoscere, e in maniera particolare per le categorie dell’intelletto le quali, prese di per sé, sono sì *a priori* ma non *trascendentali*, perché trascendentale è solo il nostro modo di conoscere le stesse categorie e di conoscere per mezzo delle categorie. *A priori* e *trascendentale* vengono quindi a muoversi su *due piani* diversi, perché diversa è la loro funzione: conoscitiva e teoretica quella dell’*a priori*; filosofica e metateorica quella del *trascendentale*, che pur presupponendo l’*a priori* va di là da esso, giacché il suo scopo è quello di fondare, di legittimare, di giustificare quello che già c’è in maniera universale (c’è per tutti gli uomini) e necessaria (non può non esserci, perché altrimenti non avremmo conoscenza)¹³⁰.

Ben diversa è l’accezione kantiana del termine, offerta dai *Prolegomena* del 1783. Precisa infatti il filosofo di Königsberg:

La parola “trascendentale”, il cui significato in tanti modi da me spiegato non è stato neppure una volta capito dal recesente (tanto di sfuggita egli ha visto il tutto), non significa qualcosa che oltrepassa ogni esperienza, ma qualcosa che certo la precede (*a priori*) ma non è determinato a nulla più che a render possibile la conoscenza nell’esperienza. Quando questi concetti oltrepassano l’esperienza, allora si dice trascendente il loro uso, che ben si distingue da quello immanente, cioè limitato all’esperienza¹³¹.

Siamo di fronte a un’identificazione tra *a priori* e trascendentale. Per dirla con Francesco Barone.

È qui chiaro che “trascendentale” non è riferito alla conoscenza circa la possibilità e applicabilità *a priori* delle rappresentazioni, bensì alle rappresentazioni stesse per caratterizzarne l’apriorità (...) In quest’ultima accezione il termine viene sostantivato e si parla del trascendentale (o dell’*a priori*) riferendosi a quelle strutture della conoscenza (intuizioni o concetti) che non sono derivate dall’esperienza e che tuttavia la rendono possibile¹³².

¹³⁰ S. Marcucci, *Studi kantiani*, vol. III, Maria Pacini Fazzi, Lucca 1988, pp. 47-48.

¹³¹ I. Kant, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*, in *Immanuel Kant Werkausgabe...*, cit., Bd. V; trad. it. a cura di R. Assunto, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza*, Laterza, Roma-Bari 1979, p. 146, n. 1.

¹³² F. Barone, *Il trascendentalismo kantiano e l’epistemologia*, in “Filosofia”, XXIII, 3, 1972, p. 226.

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

secondo Einstein, sarebbe necessario attenuarne decisamente la rigidità con una nozione, come quella di convenzione, che consente una condizione più flessibile, meno vincolante e non ultimativa. Il commento espresso da Born di fronte alla confidenza del collega sembrerebbe così pienamente giustificato:

L'atteggiamento qui assunto da Einstein nei riguardi della filosofia di Kant implicava in definitiva un rifiuto. A quel tempo egli era strettamente empirista e seguace di Hume, ma in seguito cambiò: speculazioni e congetture prive di un solido fondamento empirico assunsero nel suo pensiero un'importanza sempre più grande¹³⁵.

Vi sono, a nostro avviso, serie ragioni per dubitare della fondatezza della valutazione espressa da Born. In linea di principio, pur concedendo che il fisico tedesco abbia avuto la forza di “non cadere nelle mani” del filosofo di Königsberg, da ciò non consegue affatto che il presunto rifiuto abbracci anche la problematica dell'*a priori*. Su base documentale è anzi possibile mostrare che tale problematica accompagna i nodi cruciali della riflessione einsteiniana dedicata alla teoria della relatività per proporsi poi chiaramente a partire dal 1919, cioè un anno dopo la lettura dei *Prolegomeni*, congiuntamente ai sempre più frequenti riferimenti diretti e indiretti a Kant. Che l'orizzonte sul quale viene a configurarsi passo dopo passo, rinuncia dopo rinuncia, la teoria della relatività ristretta sia quello illuminato dalla problematica dell'*a priori* o del trascendentale, risulterà chiaro non appena si sarà fatta mente locale a quanto è stato affermato a suo tempo nella sua sede opportuna, allorché abbiamo preso in esame le memorie fondamentali del 1905. Si ricorderà che Einstein era giunto a denunciare le due ipotesi arbitrarie, l'una relativa alla grandezza tempo, l'altra riguardante le grandezze spaziali, vero e proprio fondamento della regola classica di addi-

desunta sistematicamente da un principio comune, ossia dalla facoltà di *giudicare* (equivalente a quella di pensare); non è dunque ricavata rapsodicamente da una ricerca dei concetti puri, condotta ad arbitrio e della cui completezza numerica non è data certezza poiché si procede soltanto per intuizione, senza rendersi conto che, così facendo, non si è in grado di spiegare perché questi e non altri sono i concetti propri dell'intelletto puro. Andare alla ricerca di questi concetti fondamentali fu un progetto ben degno di quell'acuto pensatore che fu Aristotele; mancando di ogni principio, egli procedette però alla raccolta di essi come gli si andavano presentando” (*ibid.*). Così, precisa, “seguendo Aristotele, chiamiamo questi concetti categorie, poiché il nostro scopo, nella sua origine prima, fa tutt'uno col suo, benché ne diverga assai nell'esecuzione” (ivi, p. 145).

¹³⁵ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 12.

zione delle velocità. Queste due ipotesi erano responsabili del fatto che la teoria formulata da Lorentz sembrava dover essere considerata irrimediabilmente inconciliabile con il principio di relatività. In termini matematici, la prima ipotesi arbitraria risultava trascrivibile nell'equazione

$$t' = t.$$

La seconda ipotesi arbitraria, che consisteva nell'identificazione tra la configurazione cinematica di un corpo e la sua configurazione geometrica assumeva invece la forma:

$$x' = x - vt; y' = y; z' = z.$$

Se riuniamo insieme tutte queste uguaglianze, otterremo il gruppo di trasformazione di Galileo, ovvero le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di assi cartesiani animato da un moto rettilineo e uniforme:

$$\begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Chiediamoci adesso: che cosa significa, sul piano epistemologico, la denuncia einsteiniana formulata con un linguaggio inusuale per un fisico e che ricorda, non certo vagamente, quello critico proprio del filosofo di Königsberg? Risponderemo con le stesse parole con le quali il fisico tedesco si esprime nella lettera del 24 aprile 1920 a Maurice Solovine proprio a proposito della teoria della relatività.

Denunciare le due ipotesi arbitrarie significa, dice Einstein, affermare semplicemente il fatto che “non c'è in fisica nozione il cui impiego sia a priori necessario o giustificato. Una nozione acquista il suo diritto all'esistenza unicamente mediante la sua connessione chiara e univoca degli eventi, rispettivamente delle esperienze fisiche”¹³⁶. Sicché “di ogni nozione fisica deve esser data una definizione tale che si possa, in virtù di questa definizione, de-

¹³⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 19.

cidere in principio se essa si trova o non si trova adeguata al caso concreto”¹³⁷.

E cosa vuol dire tutto questo? Anzitutto, che non esistono nozioni definitive e assolute: nemmeno quelle di tempo e di spazio che, è importante sottolinearlo di nuovo, per Kant sono intuizioni pure e *a priori* (pure, perché non empiriche, *a priori*, perché precedono ogni esperienza e anzi la rendono possibile), mentre per Einstein sono invece semplicemente dei concetti¹³⁸. In secondo luogo, che l’esperienza fisica non si riduce alla semplice connessione dei dati che ci provengono dai sensi, ma si prospetta come un costruito.

Sul piano fisico, come ben sappiamo, il rigido divieto imposto dal fisico tedesco rappresenta la chiave di volta per risolvere il problema del rapporto tra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, considerato privo di ogni conciliazione fino a quel momento, giacché proprio attraverso l’analisi del tempo e dello spazio dal punto di vista fisico “risultò evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile. A essa si dà il nome di teoria della relatività ristretta”¹³⁹. Perché “risultò evidente”? Semplicemente perché se tempo e spazio non sono grandezze assolute non può nemmeno esserci una velocità infinita, come invece presuppone la regola del parallelogramma. Detto in altri termini, la velocità di propagazione della luce è una velocità finita e soprattutto costante nel vuoto, indipendente dal moto del corpo che la emette.

Veniamo adesso al breve articolo pubblicato da Einstein il 25 dicembre 1919. La sua importanza sta nel fatto che esso segna, come ci auguriamo di mostrare, una sottile ma decisa presa di posizione a favore dell’impostazione costruttivista del pensiero scientifico, a conferma di quanto affermato a proposito delle nozioni di spazio e di tempo.

Contrariamente a quanto si può pensare, osserva Einstein, lo statuto metodologico della fisica in quanto scienza empirica non si identifica né si esaurisce con il procedimento induttivo. Si badi bene: il fisico tedesco non sostiene che il metodo induttivo non ha alcun valore per la conoscenza scientifica, bensì che, considerando criticamente lo svi-

¹³⁷ *Ibid.*

¹³⁸ Cfr. Einstein, *Relatività...*, cit., p. 57.

¹³⁹ Ivi, pp. 57-58.

luppo storico della scienza, le procedure induttive si sono rivelate insoddisfacenti sul piano dei risultati. Afferma il Nostro: “I progressi veramente grandi della conoscenza della natura si sono avuti da una via quasi diametralmente opposta a quella dell’induzione”¹⁴⁰. Infatti,

se il ricercatore si avvicinasse alle cose senza una qualche idea preconcepita, come potrebbe egli cogliere dall’enorme quantità di una complicatissima esperienza quei fatti che sono abbastanza semplici da rendere palesi relazioni legiformi? Galilei non avrebbe mai potuto trovare la legge della caduta libera dei gravi senza l’idea preconcepita che i rapporti che troviamo di fatto sono complicati dagli effetti della resistenza dell’aria, e che quindi dobbiamo considerare cadute dei gravi in cui tale resistenza gioca un ruolo sostanzialmente nullo¹⁴¹.

La scarsa fecondità del metodo induttivo risiederebbe, dunque, nell’impossibilità di derivare direttamente elementi conoscitivi dalla base empirica e osservativa. Si pone così il delicato problema di definire la natura della impossibilità appena denunciata: si tratta di un’impossibilità logica o pragmatica? Se l’impossibilità è di natura pragmatica e determinata unicamente dall’incapacità manifesta di gestire una massa enorme di dati, ben si spiegano i pochi risultati perseguiti, come sostiene Einstein, attraverso il metodo induttivo. Il ricorso all’impostazione costruttivista, risponderebbe allora a necessità di ordine pratico e risiederebbe, in sostanza, nell’utilità di poter continuare l’attività di ricerca di connessione tra i dati empirici: un ricorso tattico e soprattutto debole; il fatto che attualmente siamo in grado, con l’ausilio di calcolatori estremamente sofisticati e potentissimi, di gestire e operare contemporaneamente miliardi di informazioni ogni secondo, lo dimostrerebbe. Al contrario, se l’impostazione sostenuta dal fisico tedesco trova la sua giustificazione in un’impossibilità di natura logica, nel senso forte della tesi humiana della non derivabilità o deducibilità dei concetti dal dato empirico, sicché l’induzione non ha valore dal punto di vista logico¹⁴², si capisce altrettanto bene la ragione della necessità di avvicinarsi alle cose disponendo di un elemento *a priori*, un’“idea preconcepita” avanzata dal ricercatore, ma

¹⁴⁰ A. Einstein, *Induktion und Deduktion in der Physik*, in “Berliner Tageblatt”, 25 Dezember 1919; trad. it., *Induzione e deduzione nella fisica*, in “Nuova civiltà delle macchine”, XIII, 1-2, 1995, p. 149.

¹⁴¹ *Ibid.*

¹⁴² Cfr. D. Hume, *Ricerche sull’intelletto umano e sui principi della morale*, Sez. IV, Parte prima, Laterza, Roma-Bari 1980, pp. 38-39 e pp. 52-53.

dovremmo riconoscere e denunciare la palese contraddizione in cui cadrebbe Einstein, dal momento che non si è più in grado di giustificare i successi scientifici che, sebbene in piccola parte, sono stati comunque ottenuti attraverso procedure induttive. Come si esce da questa situazione? L'unica via che intravediamo per superare lo scoglio, ed evitare così di ricorrere alla drammatica ipotesi di un Einstein schizofrenico, patologia che peraltro non gli fu mai diagnosticata, è quella di stabilire che cosa effettivamente intende il fisico tedesco con “metodo induttivo” nel contesto considerato, se cioè l'espressione si riferisce direttamente alla nozione puramente logica di inferenza induttiva o se, invece, l'accezione einsteiniana considera le procedure induttive nel senso della loro applicazione e complicazione nell'ambito del progressivo sviluppo scientifico.

Se questa è la direzione, nel percorrerla tornerà utile e vantaggioso guardare a chi questo percorso lo ha già compiuto, ossia a Ernst Mach e, precisamente, al capitolo intitolato “Deduzione e induzione dal punto di vista psicologico” dell'opera *Erkenntnis und Irrtum* pubblicata nel 1905. L'utilità del riferimento machiano sta nel fatto che lo scienziato austriaco riesce a dimostrare non solo che, sul piano teorico, “le regole della logica non possono avere il compito di aprire nuove fonti cognitive. Debbono servire, piuttosto, a saggiare la concordanza o la discordanza delle conoscenze ottenute da altre fonti, e nel secondo caso a indicare la necessità di istituire una concordanza piena”¹⁴³; ma soprattutto, dal punto di vista storico, che “l'operazione psichica che fa ottenere nuove conoscenze, per lo più designata col termine inadatto di ‘induzione’, non è un processo semplice, ma assai complicato. Anzitutto non è un processo logico, anche se può contenere processi logici come membri intermediari e ausiliari”¹⁴⁴.

¹⁴³ E. Mach, *Conoscenza ed errore. Abbozzi per una psicologia della ricerca*, Einaudi, Torino 1982, p. 297.

¹⁴⁴ Ivi, p. 312. Se la logica non apre alcun nuovo orizzonte cognitivo, “è ben strano, allora”, osserva Mach “che la maggior parte degli scienziati che si sono occupati dei metodi della ricerca continuano ad indicare nell'*induzione* lo strumento principale della ricerca, quasi che le scienze non abbiano altra occupazione che quella di ordinare in classi i fatti individuali a portata di mano. L'importanza di questa occupazione non va contestata, però non esaurisce il compito dello scienziato: egli deve prima di tutto individuare i caratteri dell'oggetto d'indagine e le loro connessioni, cosa molto più difficile del classificare ciò che è già noto. (...) Ora, questo processo non ha niente a che vedere con l'induzione. Ma se riflettiamo che l'osservazione o enumerazione di *molti* casi, che malgrado le variazioni concordano in certi caratteri, ci porta con maggior facilità a concepire *astrattamente* i caratteri *stabili*, che non la considerazione di *un solo* caso, per analogia questo processo ricorderà di fatto l'induzione. Per questo forse il termine si è conservato così a lungo” (ivi, p. 306).

Solo considerando il procedimento induttivo nel senso indicato da Mach si può legittimamente sostenere, come fa Einstein, che tutte le grandi scoperte della fisica hanno un carattere ipotetico e, conseguentemente, precisare che il ricercatore parte “sempre dai fatti, il cui nesso costituisce lo scopo dei suoi sforzi. Ma egli non perviene al suo sistema teorico per via metodica, induttiva; egli, piuttosto, si avvicina ai fatti tramite una scelta intuitiva tra teorie pensabili, basate su assiomi”¹⁴⁵. Ora, anche per Mach l’intuizione assolve un compito essenziale nell’acquisizione di nuove conoscenze, ne è anzi il “fondamento”, ma essa non si applica ai fatti favorendo einsteinianamente la scelta di un costrutto teorico; al contrario, l’intuizione machiana è sempre direttamente legata a *un* particolare dato dell’osservazione¹⁴⁶. Afferma Mach:

Per poter dire *che* un elemento dipende da uno o più altri, *come* si dispone la loro dipendenza reciproca, *che tipo* di dipendenza funzionale c’è, lo scienziato deve aggiungere del suo, al di là dell’osservazione immediata. Non si può pensare di poter ridurre tutto questo chiamandolo descrizione¹⁴⁷

giacché

il lavoro principale nel reperimento di nuove conoscenze spetta all’*astrazione* e all’*attività della fantasia*¹⁴⁸.

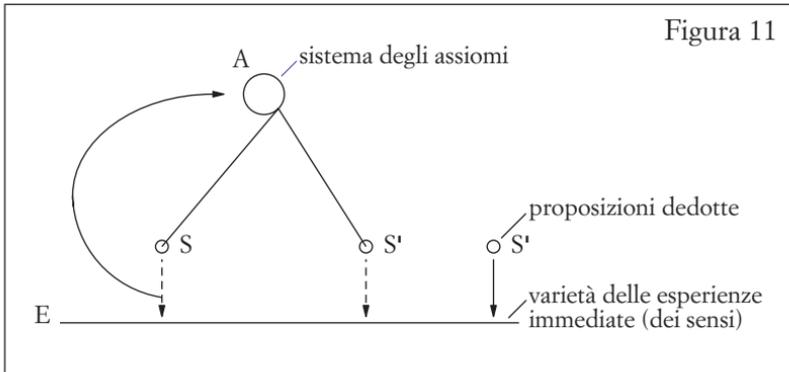
¹⁴⁵ Einstein, *Induzione e deduzione nella fisica*, cit., p. 149.

¹⁴⁶ Tutte le nuove conoscenze, dice Mach, “germinano sempre dall’osservazione, che può essere ‘esterna’, sensoriale, oppure ‘interna’, e allora riguarda le rappresentazioni. L’attenzione sottolinea ora questa ora quella connessione di elementi e la fissa in concetti: quando il dato che si reperisce viene mantenuto rispetto ad altri, e si dimostra sostenibile, c’è conoscenza, nel caso contrario errore. Il fondamento di ogni conoscenza dunque è l’intuizione, che può riferirsi sia al sentito sensorialmente, sia al rappresentato in modo puramente intuitivo, sia al potenzialmente intuitivo, concettuale ecc. (...) Sia che veniamo condotti a un nuovo dato effettivo della vita sensoriale o rappresentativa per puro caso fisico o psichico, o mediante estensione pianificata dell’esperienza, si tratta sempre di questo dato, da cui scaturisce ogni conoscenza” (Mach, *op. cit.*, p. 308).

¹⁴⁷ Ivi, pp. 309-310.

¹⁴⁸ Ivi, p. 312. Secondo Mach “lo scienziato esperto può astrarre per tentativi anche in modo intenzionale, con la piena consapevolezza di correre un rischio – a prescindere dalle circostanze accessorie. Allora l’idea più generale va saggiata – per quanto concerne la sua sostenibilità – con l’osservazione e l’esperimento. Ma poiché la rappresentazione del dato individuale viene plasmata ed estesa a idea più generale per tentativi, questa integrazione provvisoria dà un certo spazio all’arbitrio. Uno o più casi osservati possono offrire punti d’appoggio a una parte di questo processo di estensione del dato. Così Keplero può vedere che Marte si muove in un’orbita ovale, Galilei che la velocità di caduta aumenta con l’aumentare dello spazio (...); ma un’altra parte deve essere aggiunta per attività autonoma sulla base del patrimonio mentale accumulato. Così, quando Keplero suppone, per tentativi, che l’orbita di Marte sia un’ellisse, si tratta di una sua costruzione. Lo stesso vale per il presupposto galileiano della proporzionalità tra tempo e velocità della caduta” (ivi, p. 309).

Il processo che conduce il fisico teorico a nuove scoperte si articola per Einstein nei seguenti momenti, rappresentabili graficamente come in figura 11.



Una comprensione intuitiva dell'essenziale di un grosso complesso di fatti porta il ricercatore alla costituzione di un principio fondamentale ipotetico o di più principi di tal genere. Dal principio fondamentale (sistema di assiomi) egli deduce in via puramente logico-deduttiva le conseguenze nella maniera più completa possibile. Queste conseguenze derivabili dal principio fondamentale, spesso attraverso sviluppi e calcoli complicati, vengono poi poste a confronto con le esperienze e forniscono così un criterio per la giustificazione del principio fondamentale ammesso. Tale principio (assiomi) e le conseguenze formano insieme quella che si dice una "teoria"¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Siamo ora in condizione di comprendere che cosa il fisico tedesco intende dire quando afferma che i veri, grandi progressi della fisica hanno seguito una strada *non interamente* ma "quasi diametralmente opposta" all'induzione. Il "quasi" sta a significare che l'elaborazione dell'elemento teorico si è sviluppata, in questi casi, a partire dal *già noto*. Di qui la necessaria e storicamente adeguata distinzione di natura tra le teorie fisiche. Dice infatti Einstein nel 1934: "In fisica si possono distinguere teorie di natura diversa. La maggior parte sono teorie costruttive: per mezzo di un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi. È così che la teoria cinetica dei gas cerca di ricondurre i fenomeni meccanici, tecnici e di diffusione a movimenti di molecole, vale a dire a costruire partendo dall'ipotesi del movimento molecolare. Quando si dice che si è riusciti a comprendere un gruppo di fenomeni naturali, significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione. Ma accanto a questa classe importante di teorie ve n'è una seconda che invece del metodo sintetico impiega il metodo analitico. Qui il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di fenomeni

Il momento progettuale, costruttivo, creativo dell'indagine scientifica emerge così sulla base dell'insegnamento umano, di cui Kant fece per primo tesoro¹⁵⁰, della non diretta deducibilità del fattore teorico dal dato empirico, e mostra che Einstein non solo non ha abbandonato il concetto dell'*a priori* dopo la lettura "deliziosa" dei *Prolegomeni*, ma che anzi da essa trasse ben presto le dovute conseguenze. Certo, egli si guarda bene dall'affermare esplicitamente con Kant che "l'intelletto non attinge le sue leggi (*a priori*) dalla natura, ma le prescrive ad essa"¹⁵¹; ma, coerentemente, parla di "criterio di giustificazione", e la nozione di "giustificazione" è tipicamente kantiana. Detto in altri termini, l'accettare o meno una proposizione come dotata di significato dal punto di vista scientifico non è questione di fatto, ma di diritto: il principio o le ipotesi avanzate per render conto di una serie di fenomeni non è accettabile perché dai fenomeni esso trae origine e a essi ritorna per esser verificato, in quanto risulta fondato sulla sua propria base empirica; la validità del principio dipende anzitutto dalla sua legittimità, cioè dalla possibilità di essere sottoposto al vaglio dell'esperimento. Ne deriva che una teoria, osserva opportunamente il fisico tedesco, può

essere riconosciuta come sbagliata, quando c'è un errore logico nelle sue deduzioni, o come inesatta quando un fatto non si accorda con una delle sue conseguenze. Ma non si può mai dimostrare la verità di una teoria. Perché non si sa mai che anche nel futuro non si avrà un'esperienza che contraddica le sue conseguenze; e perché sono sempre pensabili altri sistemi teorici che siano in grado di connettere i medesimi fatti dati¹⁵².

Il 6 aprile 1922, in occasione dell'incontro a Parigi con i membri della *Société Française de Philosophie* sul tema della teoria della

naturali determinate empiricamente dalle quali derivano in seguito criteri matematicamente formulati, ai quali i fenomeni particolari o le loro immagini teoriche devono soddisfare. È così che la termodinamica, partendo dal risultato generale dell'esperienza secondo il quale il moto perpetuo è impossibile, cerca di determinare, per via analitica, le relazioni alle quali i fenomeni particolari devono uniformarsi. La teoria della relatività appartiene alla seconda categoria" (A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, Newton & Compton Editori, Roma 1975, pp. 84-85).

¹⁵⁰ Cfr. Kant, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica...*, cit., pp. 7-9.

¹⁵¹ Ivi, p. 82.

¹⁵² Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Einstein indica anche un criterio di scelta tra due teorie concorrenti quando, in chiusura, afferma che "se sono a disposizione due teorie entrambe compatibili con il materiale fattuale dato, allora non esiste alcun criterio per preferire l'una o l'altra che lo sguardo intuitivo del ricercatore. È così che si capisce come ricercatori acuti, che dominano teorie e fatti, possono tuttavia essere passionali sostenitori di teorie opposte" (*ibid.*).

relatività, Einstein torna sulla questione dell'*a priori* di Kant e critica severamente la figura del Mach “filosofo” in virtù della nozione di “sistema”, anch’essa tipica, benché non esclusiva, del criticismo kantiano. Non possiamo esser sorpresi di ciò! Dice Einstein:

Ciò che mi sembra essere la cosa più importante nella filosofia di Kant è che vi si parla di concetti *a priori* per edificare la scienza. Si possono opporre due punti di vista, l’apriorismo di Kant, per il quale taluni concetti preesistono nella nostra coscienza, e il convenzionalismo di Poincaré. Questi due punti di vista concordano su questo: che, per essere edificata, la scienza ha bisogno di concetti arbitrari; quanto a stabilire se questi concetti sono dati *a priori*, o sono delle convenzioni arbitrarie, io non posso dire niente¹⁵³.

È facile rilevare quanto questa dichiarazione richiami, rendendola al contempo più chiara, la confidenza fatta da Einstein a Born quattro anni prima. Ma, diversamente dal 1918, egli non afferma di non poter esser d’accordo con la dottrina kantiana: la questione non si pone nemmeno. È quindi significativo che, pur non entrando nel merito della “naturalità” o “convenzionalità” dell’*a priori*, il fisico tedesco suggerisca indirettamente il proprio punto di vista guardando, come annunciavamo, a Mach.

Il sistema di Mach (...) studia le relazioni che esistono tra i dati dell’esperienza; l’insieme di queste relazioni è, per Mach, la scienza. Questo è un punto di vista sbagliato; insomma, ciò che fa Mach è un catalogo e non un sistema. Tanto Mach fu un buon [fisico] meccanico, quanto fu un riprovevole filosofo. Quest’ottica limitata sulla scienza lo portò a rifiutare l’esistenza degli atomi. È probabile che, se Mach fosse tuttora vivente, cambierebbe opinione. Tengo tuttavia a dire che su questo punto, cioè che i concetti possono cambiare, io sono completamente d’accordo con Mach¹⁵⁴.

Se i “concetti possono cambiare” in virtù del divieto humiano e dell’insegnamento machiano, è evidente che non vi può essere un sistema categoriale esaustivo e immutabile, il che significa che la dottrina kantiana è, dal punto di vista einsteiniano, inaccettabile

¹⁵³ A. Einstein, *Comptes rendus des séances de la Société Française de Philosophie, séance du 6 avril 1922. La théorie de la relativité*, in “Bulletin de la Société Française de Philosophie”, XVII, 1922, pp. 101-102.

¹⁵⁴ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., pp. 111-112.

non tanto perché storicamente datata, quanto perché teoricamente viziata all'origine. Ciò che non deve essere accettato non risiede tanto nella pretesa definitività o esaustività dell'*a priori*, quanto, piuttosto, nella modalità attraverso la quale Kant sarebbe giunto ad affermarlo; il dissenso einsteiniano è insomma rivolto al fondamento che impone come conseguenze la staticità e la rigidità e, necessariamente, una diversa concezione della natura del pensiero.

Il riferimento a Hume, confidenzialmente manifestato a Born, si spinge del resto ben oltre le motivazioni di carattere estetico, peraltro condivise dallo stesso Kant; riguarda la risposta che quest'ultimo pensava di aver soddisfacentemente dato al problema sollevato dal filosofo di Edimburgo: quello della possibilità di inferire, a partire dall'esperienza, qualsiasi nozione che possa essere considerata certa ed evidente quanto lo sono i concetti della matematica e della geometria, a cominciare dalla connessione di causa ed effetto. Afferma infatti il Nostro: "Le idee si riferiscono alle esperienze dei sensi, ma non possono mai derivarne logicamente. Per questa ragione non ho mai potuto comprendere la questione dell'*a priori* nel senso di Kant"¹⁵⁵. Detto in altri termini, "non esistono categorie definitive nel senso di Kant"¹⁵⁶, né, conseguentemente, la possibilità di distinguere dei giudizi sintetici *a priori* da altri giudizi sintetici *a posteriori*. Osserva ancora Einstein:

Fermamente convinto che certi concetti fossero indispensabili, e che fossero proprio quelli che si erano dimostrati tali nella pratica, [Kant] li interpretò come le necessarie premesse di ogni tipo di speculazione, e li distinse dai concetti di origine empirica. Io sono convinto, invece, che questa distinzione sia erronea, cioè non ponga il problema nei suoi giusti termini¹⁵⁷.

Ed è per l'appunto questa "convinzione erronea" che spiega come e perché possa darsi una "meraviglia" anomala e fuorviante, come quella relativa alla seconda, cruciale, esperienza adolescenziale ricordata dal fisico tedesco, sulla quale abbiamo indirizzato inizialmente la nostra attenzione. Kant, conclude il Nostro,

¹⁵⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 93.

¹⁵⁶ Ivi, p. 39.

¹⁵⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 8-9.

fu portato fuori strada dalla falsa opinione – difficile da evitare ai suoi tempi – che la geometria euclidea fosse necessaria al pensiero e fornisse una conoscenza certa (cioè indipendente dall'esperienza sensoriale) sugli oggetti della percezione "esterna". Da questo errore facilmente comprensibile egli dedusse l'esistenza di giudizi sintetici a priori, prodotti dalla sola ragione, e suscettibili, per conseguenza di pretendere assoluta validità¹⁵⁸.

Siamo dunque autorizzati a concludere che il fisico tedesco ha ormai abbandonato ogni riferimento al pensiero kantiano e respinto la prospettiva del "trascendentale" elaborata nei *Prolegomeni*? Per niente: la critica rivolta all'epistemologia machiana indica, proprio al contrario, che Einstein non doveva aver dimenticato l'invito del filosofo di Königsberg a tener ben ferma la distinzione tra "giudizi di esperienza" e "giudizi di percezione"¹⁵⁹, dal momento che la nozione di "sistema" presuppone non solo un principio direttivo, un filo conduttore che funge da elemento unificante, ma anche la necessaria e fondamentale assunzione che ciò che noi chiamiamo mondo esterno, realtà, può essere, seppur indirettamente, conosciuto adeguatamente.

Così, se di Kant sono inaccettabili le premesse, di Hume devono essere rifiutate le conclusioni, ovvero lo scetticismo e il probabilismo. Non è infatti difficile mostrare che entrambi i contenuti delle due sconvolgenti esperienze giovanili rientrano a pieno titolo, e ciò sia detto anche per la seconda esperienza debitamente emendata, nella prospettiva del trascendentale proposta dal filosofo di Königsberg: un risultato decisivo, questo, dal momento che tali esperienze precorrono ciò che Einstein non esiterà a indicare come la propria professione di fede dal punto di vista epistemologico (di qui la loro crucialità) e, soprattutto, rivelano la comune natura controinduttiva della libertà e del pensiero.

Per quanto riguarda l'affermazione di una realtà oggettiva, assunzione che caratterizza il contenuto della prima esperienza e deter-

¹⁵⁸ Einstein, *Replica ai vari autori*, in AA.VV., *Albert Einstein scienziato e filosofo*, cit., p. 624.

¹⁵⁹ Cfr. Kant, *Prolegomeni*, cit., § 18, pp. 55-56. Al § 26 Kant afferma: "Al lettore, per lunga consuetudine abituato a ritenere l'esperienza una composizione puramente empirica di percezioni e perciò a non pensare affatto che essa va molto più lontano di queste, e cioè dà ai giudizi empirici una validità universale, e perciò ha bisogno di una pura unità intellettuale, la quale precede *a priori*, a tal lettore, adunque, raccomando di far bene attenzione su questa distinzione della esperienza da un semplice aggregato di percezioni" (ivi, p. 70).

mina la stessa possibilità della fisica come scienza¹⁶⁰, lo stesso Einstein confessa:

Io non sono cresciuto nella tradizione kantiana, ma sono arrivato a capire l'aspetto veramente valido che si può trovare nella dottrina di Kant accanto agli errori che oggi, cioè troppo tardi, sono considerati molto ovvi. Quest'aspetto è contenuto nella proposizione: "Il reale non ci è dato, ma ci è proposto (come un indovinello)". Ciò significa ovviamente: una costruzione concettuale è una cosa che serve ad afferrare le relazioni interpersonali, e la sua autorità sta soltanto nella convalidazione. Questa costruzione si riferisce precisamente al "reale" (per definizione), e ogni ulteriore questione sulla "natura del reale" appare vuota di senso¹⁶¹.

Rispetto alla possibilità del conseguimento di una conoscenza certa e completa dei dati dell'esperienza attraverso il pensiero, dunque l'edificazione della fisica come scienza mediante proposizioni *a priori*, il Nostro afferma:

L'atteggiamento teorico che noi difendiamo si distingue da quello di Kant solo in quanto noi non concepiamo le "categorie" come se fossero immutabili (condizionate dalla natura del pensiero), ma come se fossero (in senso logico) libere convenzioni. Esse si presentano come categorie *a priori* solo in quanto il pensare, senza fondarsi su categorie e concetti in generale, sarebbe impossibile come il respirare nel vuoto¹⁶².

¹⁶⁰ È importante precisare che se, dal punto di vista generale, per il fisico tedesco "la fede in un mondo esterno indipendente dall'individuo che lo esplora è alla base di ogni scienza della natura" (Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 72), dal punto di vista particolare e proprio, "i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia (...) la rappresentazione degli oggetti (corpi, campi, ecc.) stabilita dalla fisica aspirano a un'esistenza reale' indipendente dai soggetti della percezione; d'altra parte queste rappresentazioni sono messe in relazione nel modo più certo possibile con le impressioni sensoriali. Inoltre, è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamano un'esistenza singola autonoma in quanto 'collocati in regioni distinte dello spazio'. Fuori dell'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un 'essere così') dei singoli oggetti spazialmente separati – ipotesi che deriva in primo luogo dalla riflessione quotidiana – non sarebbe possibile un pensiero fisico nel senso per noi abituale; né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo" (Einstein, Born, *op. cit.*, p. 201).

¹⁶¹ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., pp. 625-626. E ancora: "Una delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità" (A. Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, Boringhieri, Torino, p. 39, cit., p. 39).

¹⁶² Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 619.

A priori e a posteriori, teoria ed esperienza vengono così a configurare un rapporto di pari dignità fra i due estremi, l'empirismo e il razionalismo, in virtù di quella prospettiva dell'*a priori* o del "trascendentale" che caratterizza la concezione einsteiniana della scienza fisica; una concezione che se da un lato, fondando il suo "credo epistemologico", giustifica l'atteggiamento duramente critico che il fisico tedesco adotterà nei riguardi della meccanica quantica, dall'altro, rende trasparente il ruolo che la riflessione filosofica è stata chiamata a svolgere nella sua propria esperienza scientifica.

Con sottile ironia e limpida coerenza, Einstein annuncia in sede autobiografica il contenuto della propria fede scientifica previa giustificazione della parentesi aperta a proposito dell'esposizione delle due esperienze giovanili di cui abbiamo definitivamente accertato la crucialità. "Visto che mi sono permesso una digressione abbastanza lunga da interrompere il mio necrologio (...) non mi farò più scrupolo di enunciare ora in alcune proposizioni il mio credo epistemologico, di cui ho già accennato qualcosa incidentalmente"¹⁶³. Anzitutto, la fondamentale e logicamente irriducibile distinzione tra il piano delle esperienze offerte dai sensi, *a posteriori*, e il piano del pensiero, *a priori*: "Io distinguo da una parte la totalità delle esperienze sensibili, e dall'altra la totalità dei concetti e delle proposizioni che sono enunciati nei libri"¹⁶⁴. Sul piano del pensiero, "il sistema dei concetti è una creazione dell'uomo, né più né meno delle regole della sintassi"¹⁶⁵, e poiché "i rapporti interni fra i diversi concetti e proposizioni sono di natura logica e il compito del pensiero logico è strettamente limitato a stabilire tutte le connessioni interne fra concetti e proposizioni secondo regole ben definite, che sono appunto quelle della logica"¹⁶⁶, ne deriva che "una proposizione è corretta se, entro un certo sistema logico, viene dedotta secondo le regole logiche accettate"¹⁶⁷. Non tutti i sistemi logici, sebbene arbitrari, sono tuttavia da considerarsi sullo stesso livello: due condizioni, completezza ed economicità, ne sanciscono la piena accettabilità. In primo luogo, sono preferibili i sistemi "intesi a permettere la coordinazione più completa e quanto più possibile certa (intuitiva) con la totalità dell'esperienza dei sensi"¹⁶⁸; in

¹⁶³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 7-8.

¹⁶⁴ *Ivi*, p. 8.

¹⁶⁵ *Ibid.*

¹⁶⁶ *Ibid.*

¹⁶⁷ *Ibid.*

¹⁶⁸ *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

disporre tutti gli elementi a nostra disposizione in modo che a un certo istante dato, segnato sull'orologio, l'otturatore apra la strada quel tanto che è necessario per lasciar passare un fotone e, immediatamente dopo, ripristini la condizione di chiusura. Ebbene, pesando il contenitore prima dell'emissione e dopo l'avvenuta emissione del fotone, saremo in grado di dedurre sia la massa del fotone fuggiasco sia la sua energia. In questo modo otterremo, senza relazioni di incertezza o di indeterminazione reciproca, l'esatta misura del tempo e dell'energia.

Il diabolico congegno messo a punto da Einstein turbò, con molta probabilità, il sonno di molti dei fisici presenti all'incontro; di certo non fece dormire Bohr, che non poteva accettare di lasciar cadere in così malo modo gli sforzi congiunti compiuti in quegli anni. Il mattino seguente, il fisico danese era pronto a sostenere la causa dell'indeterminismo, sicuro di poter scardinare la trappola einsteiniana. La chiave per risolvere il problema era semplice e, al contempo, terribilmente efficace. Bohr spiegò che la misurazione del peso del contenitore metallico implica un margine di incertezza. Se immaginiamo di compiere la misura attraverso una lancetta che indicherà un numero sul quadrante della nostra bilancia, proprio nella posizione della lancetta avremo sempre, coerentemente con le tesi di Heisenberg, un margine di inesattezza. Inoltre, possiamo addirittura stabilire con precisione questo margine se conveniamo di riconoscere alla bilancia una quantità di moto. Solo che, in tal caso, la bilancia si muove in un campo gravitazionale, quello terrestre, e poiché il tempo misurato dall'orologio dipende, come è noto, proprio dalla sua posizione nel campo di gravitazione, la determinazione del momento in cui l'otturatore lascia passare il fotone avrà necessariamente un margine di incertezza. La meccanica dei quanti era salva. Einstein incassò una tremenda sconfitta, tanto più pesante quanto più la vittoria, come emerse con chiarezza, era stata ottenuta proprio grazie alla sua più geniale conquista, la relatività generale.

Naturalmente il fisico tedesco non si arrese, e anzi perseverò fino alla fine sostenendo le proprie ragioni. Tanto che, dopo appena due anni di stabile e definitiva residenza negli Stati Uniti, dove occupava una cattedra presso l'Institute for Advanced of Science di Princeton, nella prima metà di marzo del 1935 inviò alla "Physical Review" un breve ma denso articolo scritto in collaborazione con Boris Podolski e Nathan Rosen intitolato *Can quantum-mechanical*

description of physical reality be considered complete? (*La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*). Dopo una breve sezione introduttiva dove vengono esposti i risultati raggiunti, lo scritto si preoccupa di delimitare con precisione l'ambito, l'oggetto sul quale focalizzare l'attenzione, attraverso una considerazione di carattere epistemologico. Premesso che "ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione fra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera"¹⁷³, sicché si presume che questi concetti corrispondano alla realtà obiettiva, ce ne diano una rappresentazione, occorre compiere una fondamentale distinzione sul piano della valutazione del successo o meno di una tale teoria. Ci si deve interrogare, da una parte, sulla correttezza della teoria, dall'altra, sulla sua completezza. Ora, "la correttezza della teoria è giudicata in base al grado di accordo fra le sue conclusioni e l'esperienza umana; questa esperienza, che sola ci consente di inferire alcunché sul reale, assume in fisica la forma di esperimenti e misure"¹⁷⁴. Sul piano della completezza, in una teoria esaustiva vi dovrà essere un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà.

Dal momento che è questo l'oggetto del nostro discorso, converrà intendersi e tentare una definizione del termine completezza. Dice Einstein:

Qualunque significato si attribuisca al termine "completo", sembra necessario, per la completezza di una teoria, che essa soddisfi alla condizione seguente: *ciascun elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*. Questa la chiameremo "condizione di completezza"¹⁷⁵.

Dare una risposta alla questione posta sarà così tanto più agevole, quanto più saremo in grado di indicare gli elementi della realtà fisica; ci serve insomma un criterio di realtà. Afferma allora il fisico tedesco:

Gli elementi della realtà fisica non possono essere determinati da considerazioni filosofiche a priori, ma debbono essere trovati ricorrendo ai risultati di esperimenti e di misure. Tuttavia, per i no-

¹⁷³ A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in "Physical Review" (2) 48, 1935; trad. it., *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 375.

¹⁷⁴ *Ibid.*

¹⁷⁵ *Ibid.*

stri scopi, non è necessario dare una definizione esauriente di realtà. Ci accontenteremo del criterio seguente che consideriamo ragionevole. *“Se si è in grado di prevedere con certezza (cioè con probabilità uguale a uno), il valore di una grandezza fisica senza perturbare in alcun modo un sistema, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica”*¹⁷⁶.

Va da sé che il criterio di realtà fisica appena enunciato non esaurisce tutti i modi di riconoscere una simile realtà; esso è tuttavia sufficiente e, in questa veste, si trova in accordo con l'idea classica e con quella quantica di realtà.

Una volta chiariti i termini della questione, si passa alla formulazione di un esperimento mentale che consiste nel prendere in considerazione la descrizione quantica di una particella con un solo grado di libertà. Si studierà il problema di compiere delle previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema che non ha in precedenza avuto interazioni con il primo sistema. Come è noto, dal punto di vista della meccanica quantica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell'una preclude la conoscenza dell'altra, sicché “o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalle funzioni d'onda della meccanica quantica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali”¹⁷⁷. Il concetto fondamentale, nella circostanza, è quello di stato, che si suppone completamente caratterizzato dalla funzione d'onda ψ , una funzione delle variabili scelte per descrivere il comportamento della particella. Si giunge allora a una situazione contraddittoria. Infatti: 1) da una parte, si dimostra che o la descrizione quantica data dalla funzione d'onda deve essere considerata incompleta, nel senso della condizione di completezza posta in precedenza, oppure che quando i corrispondenti non commutano, due grandezze non possono avere realtà simultaneamente; 2) dall'altra parte, nell'ipotesi che la funzione d'onda ψ offra effettivamente una descrizione completa della realtà fisica, si deduce che due grandezze fisiche con operatori che non commutano possono avere realtà simultaneamente. Ora, 1) non può essere vera; per esserlo dovrebbe essere completa, ma allora le due grandezze dovrebbero essere al contempo reali. Allo stesso modo, 2) non

¹⁷⁶ *Ibid.*

¹⁷⁷ *Ivi*, p. 374.

può essere vera perché, per esserlo, dovrebbe essere incompleta, sicché le due grandezze non potrebbero essere entrambe conosciute simultaneamente. Così, non solo la negazione del primo caso porta alla negazione del secondo, ma dovremo necessariamente concludere che “la descrizione della realtà fornita da una funzione d’onda non è completa”¹⁷⁸.

A questo nuovo contributo einsteiniano, di lì a poco indicato con la sigla EPR dalle iniziali dei cognomi degli autori, non vi furono inizialmente reazioni di un certo peso, se non due interventi di Bohr¹⁷⁹; nel replicare, il fisico danese considerò decisiva l’ambiguità che, a suo avviso, caratterizzerebbe il criterio di realtà scelto. La discussione sul testo che abbiamo esaminato resta comunque, tuttora, ambito di confronto e di scontro.

Nel 1949, rispondendo ai propri critici, il Nostro ribadiva la propria posizione nei seguenti termini.

A quanto pare, sono tutti dell’opinione che la relazione d’indeterminazione di Heisenberg (la cui rigorosità scientifica si considera giustamente, anche a mio parere, dimostrata in modo definitivo) determini nel senso suddetto il carattere di tutte le teorie fisiche pensabili e ragionevoli, costituendone un presupposto fondamentale. In ciò che segue, desidero esporre le ragioni che m’impediscono di allinearli con l’opinione di quasi tutti i fisici teorici contemporanei. Io sono, infatti, fermamente convinto che il carattere essenzialmente statistico della teoria quantistica contemporanea dev’essere attribuito unicamente al fatto che essa opera con una descrizione incompleta dei sistemi fisici¹⁸⁰.

Ciò non significa, si badi bene, annullare tutti i progressi compiuti, insomma, bocciare quanto di buono è stato fatto finora. Ben al contrario, riprende Einstein,

io riconosco pienamente l’importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici – cioè dovunque è possibile considerare l’interazione delle strutture e delle loro parti con sufficiente precisione, postulando un’energia potenziale fra i punti materiali – questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capa-

¹⁷⁸ *Ibid.*

¹⁷⁹ N. Bohr, *Quantum Mechanics and Physical Reality*, in “Nature”, CXXXVI, 1935, p. 65; Einstein, Podolski, Rosen, *op. cit.*, pp. 697-702.

¹⁸⁰ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 610.

ce, pur nel suo carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra fenomeni specificabili, in modo corrispondente alle previsioni della teoria: essa è finora la sola che unisca il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia in modo logicamente soddisfacente¹⁸¹.

Il punto dolente, infatti, è un altro. Dice Einstein:

Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica. Ogniquale volta il fisico moderno dalle simpatie positivistiche ode una simile formulazione, la sua reazione è un sorriso di compatimento. Egli dice fra sé: “Ecco qui la formulazione pura e semplice di un pregiudizio metafisico, vuoto di contenuto, e, peggio ancora, di un pregiudizio la cui confutazione costituisce il maggior risultato epistemologico ottenuto dai fisici nell’ultimo quarto di secolo. C’è forse un uomo che abbia mai percepito una ‘situazione reale’? Com’è possibile che una persona ragionevole possa ancora illudersi, al giorno d’oggi, di riuscire a confutare la parte più essenziale della nostra conoscenza e del nostro modo di pensare, risuscitando quest’ombra senza vita?”. Pazienza! Quella mia laconica definizione non voleva convincere nessuno; voleva semplicemente indicare il punto di riferimento¹⁸².

Quanto grande sia il valore che il fisico tedesco riconosce alla nozione di “reale”, nozione vitale per la possibilità stessa della scienza, lo si evince infine, ancora una volta, da uno dei suoi ultimi interventi critici rivolto all’indirizzo della meccanica quantica. Afferma il Nostro:

C’è qualcosa come lo “stato reale” di un sistema fisico, che esiste oggettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misura, e che, in linea di principio, può esser descritto attraverso i mezzi di espressione della fisica (...) Questa tesi che riguarda la realtà non ha il senso di un enunciato chiaro in sé a causa della sua natura “metafisica”; essa ha solo il carattere proprio di un programma¹⁸³.

¹⁸¹ Ivi, p. 611.

¹⁸² *Ibid.*

¹⁸³ A. Einstein, *Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux*, in AA.VV., *Louis de Broglie physiciens...*, cit., p. 7.

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ *Ivi*, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

vuto alla stessa circostanza, dato che il desiderio ardente di cogliere i principi aveva come conseguenza che la maggior parte del tempo fosse impiegata in sforzi infruttuosi”¹⁸⁸.

Ora, se è ben vero che la specificità dell’impegno scientifico rispondeva alle più intime aspettative dell’uomo Einstein – vi era dunque una necessità e un movente soggettivo –, lo è altrettanto che esso si calava in un contesto scientifico e culturale, oggettivo, che piegava provvisoriamente tale necessità alle più urgenti esigenze epistemologiche, le autorizzava e, in qualche modo, ne offriva anche in seguito piena legittimazione. Le autorizzava ben prima del 1924, allorché ventiquattrenne Einstein dà vita a Berna, come ben sappiamo, a quella *Akademie Olympia*, occasione di studio e riflessione critica che proprio sul terreno epistemologico si rivela momento fecondo sia intellettualmente sia esistenzialmente. “La fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo” testimonia Solovine “erano l’epoca eroica delle ricerche sui fondamenti e i principi della scienza, ed è questo che era la nostra costante preoccupazione”¹⁸⁹. Le legittimerà dopo il 1924, sulla base degli sconvolgenti sviluppi della meccanica quantica, a tal punto che il fisico tedesco, nel 1936, affronterà il problema dei rapporti tra scienza e filosofia nei seguenti termini.

Spesso si è detto, e certamente non senza una giustificazione, che l’uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Questa invero potrebbe essere la cosa migliore in un’epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari così ben fondate da essere inaccessibili al dubbio¹⁹⁰.

Malauguratamente, riprende il Nostro:

Non può essere la cosa migliore in un’epoca, in cui, come quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici. In un’epoca come la presente, in cui l’esperienza ci obbliga a cercare un nuovo più solido fondamento, il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo le considerazioni critiche dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov’è che la scarpa fa male¹⁹¹.

¹⁸⁸ *Ibid.*

¹⁸⁹ Einstein, *Introduction. Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. VIII.

¹⁹⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., pp. 36-37.

¹⁹¹ Ivi, p. 37.

Del resto, ben oltre l'urgenza e la straordinarietà che richiedono al fisico di indossare provvisoriamente le vesti del filosofo in generale e dell'epistemologo in specie, cioè di incrementare l'impegno sul piano speculativo rivolto a cogliere i principi e gli assiomi, anche in regime di piena ordinarietà difficilmente si potrà contestare il carattere speciale che determina la qualità del rapporto che lega la scienza e l'epistemologia. Per il fisico tedesco, infatti, "esse dipendono l'una dall'altra"¹⁹². Per evitare il rischio fatale di proporsi né più né meno che come una semplice esercitazione accademica che non morde il reale, l'epistemologia deve interagire con l'attività scientifica¹⁹³, ma al contempo guardarsi dal ridurre il dominio di riferimento della scienza e chiudere nella prigione di un sistema compiuto la ricerca del fisico. "Non appena l'epistemologo, nella sua ricerca di un sistema chiaro, riesce ad aprirsi la strada verso di esso" osserva Einstein, "è portato a interpretare il contenuto di pensiero della scienza secondo il suo sistema, e a rifiutare tutto ciò che al suo sistema non si adatta"¹⁹⁴. Da parte sua la scienza, per non degradare inevitabilmente verso la mera tecnica¹⁹⁵, non può considerare marginale l'efficacia e la necessità dell'apparato speculativo e sistematico; lo scienziato "accetta con riconoscenza l'analisi concettuale epistemologica; ma le condizioni esterne, che per lui sono date dai fatti dell'esperienza, non gli permettono di accettare condizioni troppo restrittive, nella costruzione del suo mondo concettuale, in base all'autorità di un sistema epistemologico"¹⁹⁶. Così, se l'epistemologo, dal suo punto di vista, è libero di apostrofare il fisico "come un opportunista senza scrupoli"¹⁹⁷, quest'ultimo, nel pieno esercizio della propria libertà, non può che vincolarsi al dato e al responso dell'esperienza, distinguendosi decisamente e radicalmente dal filosofo.

Che la riflessione filosofica di carattere epistemologico abbia avuto un ruolo esclusivo e decisivo nell'attività di ricerca portata avanti dal fisico tedesco è del resto confermato *a posteriori* dalle occasioni di dibattito che lo stesso Einstein ha ben voluto accettare e onorare; ci riferiamo in particolare alle accese polemiche sollevate in Francia

¹⁹² Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., p. 629.

¹⁹³ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁴ *Ibid.*

¹⁹⁵ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁶ Ivi, pp. 629-630.

¹⁹⁷ Ivi, p. 630.

dalla teoria della relatività, che coinvolsero intellettuali, scienziati e filosofi della statura di Henri Bergson¹⁹⁸. In tal senso consideriamo fuorviante sollevare l'interrogativo circa l'appartenenza o meno del fisico tedesco alla schiera dei filosofi, giacché un simile approccio conduce facilmente alla formulazione di valutazioni per un verso tendenzialmente elusive e sprezzanti, come nel caso di Abraham Pais, per l'altro, forzatamente entusiastiche, se non celebrative, come in quello di Leopold Infeld. Dice Pais: "Einstein amava la saggezza. Ma fu un filosofo? La risposta è una questione di gusti, più che di fatto. Personalmente ritengo che il meglio di sé non l'abbia dato alla filosofia, ma non polemizzerei a tutti i costi con chi sostenesse il contrario. È indubbio che l'interesse di Einstein per la filosofia fosse autentico, ma è altrettanto certo che lui per primo non si considerasse un filosofo"¹⁹⁹. Tuttavia, poco dopo, lo stesso Pais non ha difficoltà ad affermare: "Negli ultimi trent'anni della sua vita, però, egli smise di essere un 'opportunist senza scrupoli', per diventare con suo grave danno un filosofo"²⁰⁰. Secondo Leopold Infeld "Einstein non è considerato soltanto un grande fisico, ma anche un grande filosofo. Egli stesso si considerava un filosofo. Spesso mi diceva: 'Io sono più un filosofo che un fisico'"²⁰¹. Naturalmente il fisico tedesco non si identificava con la figura del filosofo tradizionale, ma si sarebbe collocato invece nella corrente di pensiero che nei primi decenni del Novecento si proponeva come neoempirismo o neopositivismo. Dice Infeld: "Per il positivista logico il filosofo, nel moderno significato della parola, è un uomo il cui interesse è rivolto ai fondamenti del nostro sapere, alla chiarificazione dei suoi concetti basilari. Solo in questo senso Einstein può essere chiamato un filosofo, e in questo senso egli è uno dei più grandi filosofi che ci siano mai stati"²⁰². Niente di più distante e di

¹⁹⁸ Sull'intera vicenda ci permettiamo di rinviare ai nostri lavori: H. Bergson, *Lettere a Albert Einstein*, introduzione, trascrizione, traduzione e note di A. Genovesi, in "Filosofia", XLIX, 1, 1998, pp. 3-41; A. Genovesi, *Il carteggio tra Albert Einstein ed Edouard Guillaume. "Tempo universale" e teoria della relatività ristretta nella filosofia francese contemporanea*, Franco Angeli, Milano 2000; A. Genovesi, *Bergson e Einstein. Dalla percezione della durata alla concezione del tempo*, Franco Angeli, Milano 2001.

¹⁹⁹ A. Pais, "Subtle is the Lord...". *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, New York 1982; trad. it. di L. Belloni e T. Cannillo, "Sottile è il Signore...". *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino 1986 p. 24.

²⁰⁰ Ivi, p. 25.

²⁰¹ L. Infeld, *Albert Einstein*, Charles Scribner's Sons, New York 1952; trad. it. di O. Nicotra, *Albert Einstein*, Einaudi, Torino 1998, p. 134.

²⁰² Ivi, p. 135.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarà questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

logna?”. All’udire ciò il genitore, persona poco incline allo spettacolo della natura e men che mai a intraprendere discussioni che non fossero saldamente ancorate all’evidenza dell’esperienza sensibile, dopo un sussulto di collera non poté che disperarsi mettendosi, come si suol dire, le mani nei capelli al pensiero degli enormi sacrifici sostenuti per elevare il prestigio sociale della famiglia; sacrifici il cui risultato, così a lui sembrava, si concretizzava in una domanda palesemente incomprensibile per l’ovvietà della risposta. Chissà quale sarebbe stata la reazione del poveretto sapendo che Albert Einstein, pressappoco nello stesso periodo si diletta a porre in modo analogo simili interrogativi a un giovane fisico, Abraham Pais, che ricorda così l’episodio: “Deve essere stato attorno al 1950. Camminavamo, io e Einstein, lungo la strada che dall’Institute for Advanced Study conduceva alla sua abitazione, quando si fermò. ‘Veramente è convinto’ mi chiese ‘che la Luna esiste solo se la si guarda?’”²⁰⁵.

Benché impiegasse la maggior parte del proprio tempo sul versante della problematica relativistica, la testimonianza di Pais conferma che anche dopo il 1935 Einstein non cessa di dedicare spazio e ironia all’assunto filosofico che, a suo avviso, starebbe al fondamento della meccanica quantica. Del resto, non poteva essere altrimenti. Bisogna considerare che, dopo la teoria della relatività generale, si poneva un problema particolarmente imbarazzante: con la teoria del 1916 la gravitazione era di fatto ridotta a una geometria, ed è evidente che ciò la poneva su un piano diverso rispetto a quello dell’elettromagnetismo. Il problema non era avvertito solo da Einstein; tanto è vero che già dal 1918 il matematico H. Weyl si era dato da fare per elaborare una teoria che unificasse la gravitazione e il magnetismo. Entrambi venivano ridotti a geometria. Ma Weyl non era il solo a cimentarsi nell’impresa. Un anno dopo, nel 1919, il matematico T. Kaluza, conterraneo e concittadino del grande Kant, riusciva a mostrare che la semplice aggiunta di un’ulteriore dimensione spaziale lasciava intatti i limiti entro i quali restava valida la geometria di Riemann. Il Nostro, naturalmente, era ben al corrente di questi sviluppi, che prese attentamente in esame. Pur riconoscendo il fascino della concezione elaborata da Weyl, Einstein si rese ben presto conto che in essa era presente una grave conseguenza che ne comprometteva decisamente l’accettazione. Dalla teoria di

²⁰⁵ Pais, *op. cit.*, p. 15.

Weyl conseguiva infatti che il ritmo con il quale marciano gli orologi verrebbe a dipendere dalle linee di universo percorse dagli stessi orologi nel passato. Un'eventualità, questa, esclusa dal fatto che le righe spettrali di ciascun elemento, che altro non sono se non la misura del ritmo atomico, sono rigidamente fissate, al di là della linea di universo che il singolo atomo abbia potuto seguire o potrà percorrere. La teoria avanzata da Kaluza era più intrigante, ma anche più inquietante: si sarebbe dovuta pensare una dimensione in più dello spazio-tempo, cioè $4 + 1$. Il fisico tedesco la prese in esame più volte e a distanza di anni, ma non la seguì. Del resto, già nel 1925, aveva avanzato il tentativo di una teoria unificata, ed era persino giunto a ottenere le equazioni della gravitazione e quelle di Maxwell. Fu questa prospettiva, quella dell'inserimento di un tensore non simmetrico, che il fisico di Ulm riprenderà dopo il 1945 e continuerà a occuparlo fino a pochi istanti prima della morte. Ma dietro, sullo sfondo dell'unificazione, c'era tuttavia qualcos'altro: l'esigenza di risolvere il dualismo onda-corpuscolo, al quale aveva a suo tempo conferito tanto rilievo oggettivo.

TEORIA ED ESPERIENZA

1. La nozione di “trascendentale”

Per comprendere pienamente il dissenso che caratterizza la posizione di Einstein nei confronti della meccanica quantica consideriamo opportuno chiarire sin d’ora il significato di un termine il cui uso è spesso tanto inflazionato quanto improprio. Lo faremo prendendo ad esempio Immanuel Kant che, nel secondo paragrafo dell’“Introduzione alla logica trascendentale” della seconda edizione della *Critica della ragion pura*, afferma:

E qui faccio un’osservazione che concerne tutte le considerazioni successive e che sarà bene tener sempre innanzi agli occhi: e cioè che non bisogna chiamare trascendentale ogni conoscenza a priori, bensì solamente quella attraverso la quale conosciamo che e come alcune rappresentazioni (intuizioni o concetti) sono impiegate o sono possibili esclusivamente a priori (cioè la possibilità della conoscenza e il suo uso a priori). Pertanto né lo spazio né una sua qualsiasi determinazione geometrica a priori sono rappresentazioni trascendentali; lo sono invece soltanto la conoscenza dell’origine non empirica di queste rappresentazioni e la possibilità che tuttavia posseggono di riferirsi a priori agli oggetti dell’esperienza¹²⁹.

Come è stato giustamente osservato,

“trascendentale” non è quindi lo spazio considerato come forma *a priori*, né una possibile determinazione geometrica di esso (per esempio, lo spazio a una, due, tre... *n* dimensioni), ma il nostro “modo” di conoscerlo come “struttura” della conoscenza, ponendo il problema della sua natura, della sua origine, della sua funzione (come “struttura”) per quanto riguarda la conoscenza

¹²⁹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, in *Immanuel Kant Werkausgabe*, Hersg. von Wilhelm Weischedel, Zürich 1977, Bd. III; trad. it. a cura di P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino 1977, p. 29.

in generale e la conoscenza geometrica in particolare. Lo stesso discorso si può fare, secondo Kant, per tutte le altre “forme” o strutture del nostro conoscere, e in maniera particolare per le categorie dell’intelletto le quali, prese di per sé, sono sì *a priori* ma non *trascendentali*, perché trascendentale è solo il nostro modo di conoscere le stesse categorie e di conoscere per mezzo delle categorie. *A priori* e *trascendentale* vengono quindi a muoversi su *due piani* diversi, perché diversa è la loro funzione: conoscitiva e teoretica quella dell’*a priori*; filosofica e metateorica quella del *trascendentale*, che pur presupponendo l’*a priori* va di là da esso, giacché il suo scopo è quello di fondare, di legittimare, di giustificare quello che già c’è in maniera universale (c’è per tutti gli uomini) e necessaria (non può non esserci, perché altrimenti non avremmo conoscenza)¹³⁰.

Ben diversa è l’accezione kantiana del termine, offerta dai *Prolegomena* del 1783. Precisa infatti il filosofo di Königsberg:

La parola “trascendentale”, il cui significato in tanti modi da me spiegato non è stato neppure una volta capito dal recesente (tanto di sfuggita egli ha visto il tutto), non significa qualcosa che oltrepassa ogni esperienza, ma qualcosa che certo la precede (*a priori*) ma non è determinato a nulla più che a render possibile la conoscenza nell’esperienza. Quando questi concetti oltrepassano l’esperienza, allora si dice trascendente il loro uso, che ben si distingue da quello immanente, cioè limitato all’esperienza¹³¹.

Siamo di fronte a un’identificazione tra *a priori* e trascendentale. Per dirla con Francesco Barone.

È qui chiaro che “trascendentale” non è riferito alla conoscenza circa la possibilità e applicabilità *a priori* delle rappresentazioni, bensì alle rappresentazioni stesse per caratterizzarne l’apriorità (...) In quest’ultima accezione il termine viene sostantivato e si parla del trascendentale (o dell’*a priori*) riferendosi a quelle strutture della conoscenza (intuizioni o concetti) che non sono derivate dall’esperienza e che tuttavia la rendono possibile¹³².

¹³⁰ S. Marcucci, *Studi kantiani*, vol. III, Maria Pacini Fazzi, Lucca 1988, pp. 47-48.

¹³¹ I. Kant, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*, in *Immanuel Kant Werkausgabe...*, cit., Bd. V; trad. it. a cura di R. Assunto, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza*, Laterza, Roma-Bari 1979, p. 146, n. 1.

¹³² F. Barone, *Il trascendentalismo kantiano e l’epistemologia*, in “Filosofia”, XXIII, 3, 1972, p. 226.

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

secondo Einstein, sarebbe necessario attenuarne decisamente la rigidità con una nozione, come quella di convenzione, che consente una condizione più flessibile, meno vincolante e non ultimativa. Il commento espresso da Born di fronte alla confidenza del collega sembrerebbe così pienamente giustificato:

L'atteggiamento qui assunto da Einstein nei riguardi della filosofia di Kant implicava in definitiva un rifiuto. A quel tempo egli era strettamente empirista e seguace di Hume, ma in seguito cambiò: speculazioni e congetture prive di un solido fondamento empirico assunsero nel suo pensiero un'importanza sempre più grande¹³⁵.

Vi sono, a nostro avviso, serie ragioni per dubitare della fondatezza della valutazione espressa da Born. In linea di principio, pur concedendo che il fisico tedesco abbia avuto la forza di “non cadere nelle mani” del filosofo di Königsberg, da ciò non consegue affatto che il presunto rifiuto abbracci anche la problematica dell'*a priori*. Su base documentale è anzi possibile mostrare che tale problematica accompagna i nodi cruciali della riflessione einsteiniana dedicata alla teoria della relatività per proporsi poi chiaramente a partire dal 1919, cioè un anno dopo la lettura dei *Prolegomeni*, congiuntamente ai sempre più frequenti riferimenti diretti e indiretti a Kant. Che l'orizzonte sul quale viene a configurarsi passo dopo passo, rinuncia dopo rinuncia, la teoria della relatività ristretta sia quello illuminato dalla problematica dell'*a priori* o del trascendentale, risulterà chiaro non appena si sarà fatta mente locale a quanto è stato affermato a suo tempo nella sua sede opportuna, allorché abbiamo preso in esame le memorie fondamentali del 1905. Si ricorderà che Einstein era giunto a denunciare le due ipotesi arbitrarie, l'una relativa alla grandezza tempo, l'altra riguardante le grandezze spaziali, vero e proprio fondamento della regola classica di addi-

desunta sistematicamente da un principio comune, ossia dalla facoltà di *giudicare* (equivalente a quella di pensare); non è dunque ricavata rapsodicamente da una ricerca dei concetti puri, condotta ad arbitrio e della cui completezza numerica non è data certezza poiché si procede soltanto per intuizione, senza rendersi conto che, così facendo, non si è in grado di spiegare perché questi e non altri sono i concetti propri dell'intelletto puro. Andare alla ricerca di questi concetti fondamentali fu un progetto ben degno di quell'acuto pensatore che fu Aristotele; mancando di ogni principio, egli procedette però alla raccolta di essi come gli si andavano presentando” (*ibid.*). Così, precisa, “seguendo Aristotele, chiamiamo questi concetti categorie, poiché il nostro scopo, nella sua origine prima, fa tutt'uno col suo, benché ne diverga assai nell'esecuzione” (ivi, p. 145).

¹³⁵ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 12.

zione delle velocità. Queste due ipotesi erano responsabili del fatto che la teoria formulata da Lorentz sembrava dover essere considerata irrimediabilmente inconciliabile con il principio di relatività. In termini matematici, la prima ipotesi arbitraria risultava trascrivibile nell'equazione

$$t' = t.$$

La seconda ipotesi arbitraria, che consisteva nell'identificazione tra la configurazione cinematica di un corpo e la sua configurazione geometrica assumeva invece la forma:

$$x' = x - vt; y' = y; z' = z.$$

Se riuniamo insieme tutte queste uguaglianze, otterremo il gruppo di trasformazione di Galileo, ovvero le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di assi cartesiani animato da un moto rettilineo e uniforme:

$$\begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Chiediamoci adesso: che cosa significa, sul piano epistemologico, la denuncia einsteiniana formulata con un linguaggio inusuale per un fisico e che ricorda, non certo vagamente, quello critico proprio del filosofo di Königsberg? Risponderemo con le stesse parole con le quali il fisico tedesco si esprime nella lettera del 24 aprile 1920 a Maurice Solovine proprio a proposito della teoria della relatività.

Denunciare le due ipotesi arbitrarie significa, dice Einstein, affermare semplicemente il fatto che “non c'è in fisica nozione il cui impiego sia a priori necessario o giustificato. Una nozione acquista il suo diritto all'esistenza unicamente mediante la sua connessione chiara e univoca degli eventi, rispettivamente delle esperienze fisiche”¹³⁶. Sicché “di ogni nozione fisica deve esser data una definizione tale che si possa, in virtù di questa definizione, de-

¹³⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 19.

cidere in principio se essa si trova o non si trova adeguata al caso concreto”¹³⁷.

E cosa vuol dire tutto questo? Anzitutto, che non esistono nozioni definitive e assolute: nemmeno quelle di tempo e di spazio che, è importante sottolinearlo di nuovo, per Kant sono intuizioni pure e *a priori* (pure, perché non empiriche, *a priori*, perché precedono ogni esperienza e anzi la rendono possibile), mentre per Einstein sono invece semplicemente dei concetti¹³⁸. In secondo luogo, che l’esperienza fisica non si riduce alla semplice connessione dei dati che ci provengono dai sensi, ma si prospetta come un costruito.

Sul piano fisico, come ben sappiamo, il rigido divieto imposto dal fisico tedesco rappresenta la chiave di volta per risolvere il problema del rapporto tra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, considerato privo di ogni conciliazione fino a quel momento, giacché proprio attraverso l’analisi del tempo e dello spazio dal punto di vista fisico “risultò evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile. A essa si dà il nome di teoria della relatività ristretta”¹³⁹. Perché “risultò evidente”? Semplicemente perché se tempo e spazio non sono grandezze assolute non può nemmeno esserci una velocità infinita, come invece presuppone la regola del parallelogramma. Detto in altri termini, la velocità di propagazione della luce è una velocità finita e soprattutto costante nel vuoto, indipendente dal moto del corpo che la emette.

Veniamo adesso al breve articolo pubblicato da Einstein il 25 dicembre 1919. La sua importanza sta nel fatto che esso segna, come ci auguriamo di mostrare, una sottile ma decisa presa di posizione a favore dell’impostazione costruttivista del pensiero scientifico, a conferma di quanto affermato a proposito delle nozioni di spazio e di tempo.

Contrariamente a quanto si può pensare, osserva Einstein, lo statuto metodologico della fisica in quanto scienza empirica non si identifica né si esaurisce con il procedimento induttivo. Si badi bene: il fisico tedesco non sostiene che il metodo induttivo non ha alcun valore per la conoscenza scientifica, bensì che, considerando criticamente lo svi-

¹³⁷ *Ibid.*

¹³⁸ Cfr. Einstein, *Relatività...*, cit., p. 57.

¹³⁹ *Ivi*, pp. 57-58.

luppo storico della scienza, le procedure induttive si sono rivelate insoddisfacenti sul piano dei risultati. Afferma il Nostro: “I progressi veramente grandi della conoscenza della natura si sono avuti da una via quasi diametralmente opposta a quella dell’induzione”¹⁴⁰. Infatti,

se il ricercatore si avvicinasse alle cose senza una qualche idea preconcepita, come potrebbe egli cogliere dall’enorme quantità di una complicatissima esperienza quei fatti che sono abbastanza semplici da rendere palesi relazioni legiformi? Galilei non avrebbe mai potuto trovare la legge della caduta libera dei gravi senza l’idea preconcepita che i rapporti che troviamo di fatto sono complicati dagli effetti della resistenza dell’aria, e che quindi dobbiamo considerare cadute dei gravi in cui tale resistenza gioca un ruolo sostanzialmente nullo¹⁴¹.

La scarsa fecondità del metodo induttivo risiederebbe, dunque, nell’impossibilità di derivare direttamente elementi conoscitivi dalla base empirica e osservativa. Si pone così il delicato problema di definire la natura della impossibilità appena denunciata: si tratta di un’impossibilità logica o pragmatica? Se l’impossibilità è di natura pragmatica e determinata unicamente dall’incapacità manifesta di gestire una massa enorme di dati, ben si spiegano i pochi risultati perseguiti, come sostiene Einstein, attraverso il metodo induttivo. Il ricorso all’impostazione costruttivista, risponderebbe allora a necessità di ordine pratico e risiederebbe, in sostanza, nell’utilità di poter continuare l’attività di ricerca di connessione tra i dati empirici: un ricorso tattico e soprattutto debole; il fatto che attualmente siamo in grado, con l’ausilio di calcolatori estremamente sofisticati e potentissimi, di gestire e operare contemporaneamente miliardi di informazioni ogni secondo, lo dimostrerebbe. Al contrario, se l’impostazione sostenuta dal fisico tedesco trova la sua giustificazione in un’impossibilità di natura logica, nel senso forte della tesi humiana della non derivabilità o deducibilità dei concetti dal dato empirico, sicché l’induzione non ha valore dal punto di vista logico¹⁴², si capisce altrettanto bene la ragione della necessità di avvicinarsi alle cose disponendo di un elemento *a priori*, un’“idea preconcepita” avanzata dal ricercatore, ma

¹⁴⁰ A. Einstein, *Induktion und Deduktion in der Physik*, in “Berliner Tageblatt”, 25 Dezember 1919; trad. it., *Induzione e deduzione nella fisica*, in “Nuova civiltà delle macchine”, XIII, 1-2, 1995, p. 149.

¹⁴¹ *Ibid.*

¹⁴² Cfr. D. Hume, *Ricerche sull’intelletto umano e sui principi della morale*, Sez. IV, Parte prima, Laterza, Roma-Bari 1980, pp. 38-39 e pp. 52-53.

dovremmo riconoscere e denunciare la palese contraddizione in cui cadrebbe Einstein, dal momento che non si è più in grado di giustificare i successi scientifici che, sebbene in piccola parte, sono stati comunque ottenuti attraverso procedure induttive. Come si esce da questa situazione? L'unica via che intravediamo per superare lo scoglio, ed evitare così di ricorrere alla drammatica ipotesi di un Einstein schizofrenico, patologia che peraltro non gli fu mai diagnosticata, è quella di stabilire che cosa effettivamente intende il fisico tedesco con “metodo induttivo” nel contesto considerato, se cioè l'espressione si riferisce direttamente alla nozione puramente logica di inferenza induttiva o se, invece, l'accezione einsteiniana considera le procedure induttive nel senso della loro applicazione e complicazione nell'ambito del progressivo sviluppo scientifico.

Se questa è la direzione, nel percorrerla tornerà utile e vantaggioso guardare a chi questo percorso lo ha già compiuto, ossia a Ernst Mach e, precisamente, al capitolo intitolato “Deduzione e induzione dal punto di vista psicologico” dell'opera *Erkenntnis und Irrtum* pubblicata nel 1905. L'utilità del riferimento machiano sta nel fatto che lo scienziato austriaco riesce a dimostrare non solo che, sul piano teorico, “le regole della logica non possono avere il compito di aprire nuove fonti cognitive. Debbono servire, piuttosto, a saggiare la concordanza o la discordanza delle conoscenze ottenute da altre fonti, e nel secondo caso a indicare la necessità di istituire una concordanza piena”¹⁴³; ma soprattutto, dal punto di vista storico, che “l'operazione psichica che fa ottenere nuove conoscenze, per lo più designata col termine inadatto di ‘induzione’, non è un processo semplice, ma assai complicato. Anzitutto non è un processo logico, anche se può contenere processi logici come membri intermediari e ausiliari”¹⁴⁴.

¹⁴³ E. Mach, *Conoscenza ed errore. Abbozzi per una psicologia della ricerca*, Einaudi, Torino 1982, p. 297.

¹⁴⁴ Ivi, p. 312. Se la logica non apre alcun nuovo orizzonte cognitivo, “è ben strano, allora”, osserva Mach “che la maggior parte degli scienziati che si sono occupati dei metodi della ricerca continuano ad indicare nell'*induzione* lo strumento principale della ricerca, quasi che le scienze non abbiano altra occupazione che quella di ordinare in classi i fatti individuali a portata di mano. L'importanza di questa occupazione non va contestata, però non esaurisce il compito dello scienziato: egli deve prima di tutto individuare i caratteri dell'oggetto d'indagine e le loro connessioni, cosa molto più difficile del classificare ciò che è già noto. (...) Ora, questo processo non ha niente a che vedere con l'induzione. Ma se riflettiamo che l'osservazione o enumerazione di *molti* casi, che malgrado le variazioni concordano in certi caratteri, ci porta con maggior facilità a concepire *astrattamente* i caratteri *stabili*, che non la considerazione di *un solo* caso, per analogia questo processo ricorderà di fatto l'induzione. Per questo forse il termine si è conservato così a lungo” (ivi, p. 306).

Solo considerando il procedimento induttivo nel senso indicato da Mach si può legittimamente sostenere, come fa Einstein, che tutte le grandi scoperte della fisica hanno un carattere ipotetico e, conseguentemente, precisare che il ricercatore parte “sempre dai fatti, il cui nesso costituisce lo scopo dei suoi sforzi. Ma egli non perviene al suo sistema teorico per via metodica, induttiva; egli, piuttosto, si avvicina ai fatti tramite una scelta intuitiva tra teorie pensabili, basate su assiomi”¹⁴⁵. Ora, anche per Mach l’intuizione assolve un compito essenziale nell’acquisizione di nuove conoscenze, ne è anzi il “fondamento”, ma essa non si applica ai fatti favorendo einsteinianamente la scelta di un costrutto teorico; al contrario, l’intuizione machiana è sempre direttamente legata a *un* particolare dato dell’osservazione¹⁴⁶. Afferma Mach:

Per poter dire *che* un elemento dipende da uno o più altri, *come* si dispone la loro dipendenza reciproca, *che tipo* di dipendenza funzionale c’è, lo scienziato deve aggiungere del suo, al di là dell’osservazione immediata. Non si può pensare di poter ridurre tutto questo chiamandolo descrizione¹⁴⁷

giacché

il lavoro principale nel reperimento di nuove conoscenze spetta all’*astrazione* e all’*attività della fantasia*¹⁴⁸.

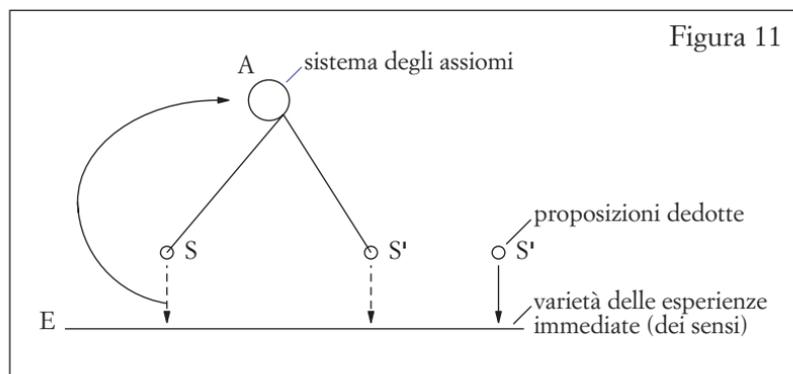
¹⁴⁵ Einstein, *Induzione e deduzione nella fisica*, cit., p. 149.

¹⁴⁶ Tutte le nuove conoscenze, dice Mach, “germinano sempre dall’osservazione, che può essere ‘esterna’, sensoriale, oppure ‘interna’, e allora riguarda le rappresentazioni. L’attenzione sottolinea ora questa ora quella connessione di elementi e la fissa in concetti: quando il dato che si reperisce viene mantenuto rispetto ad altri, e si dimostra sostenibile, c’è conoscenza, nel caso contrario errore. Il fondamento di ogni conoscenza dunque è l’intuizione, che può riferirsi sia al sentito sensorialmente, sia al rappresentato in modo puramente intuitivo, sia al potenzialmente intuitivo, concettuale ecc. (...) Sia che veniamo condotti a un nuovo dato effettivo della vita sensoriale o rappresentativa per puro caso fisico o psichico, o mediante estensione pianificata dell’esperienza, si tratta sempre di questo dato, da cui scaturisce ogni conoscenza” (Mach, *op. cit.*, p. 308).

¹⁴⁷ Ivi, pp. 309-310.

¹⁴⁸ Ivi, p. 312. Secondo Mach “lo scienziato esperto può astrarre per tentativi anche in modo intenzionale, con la piena consapevolezza di correre un rischio – a prescindere dalle circostanze accessorie. Allora l’idea più generale va saggiata – per quanto concerne la sua sostenibilità – con l’osservazione e l’esperimento. Ma poiché la rappresentazione del dato individuale viene plasmata ed estesa a idea più generale per tentativi, questa integrazione provvisoria dà un certo spazio all’arbitrio. Uno o più casi osservati possono offrire punti d’appoggio a una parte di questo processo di estensione del dato. Così Keplero può vedere che Marte si muove in un’orbita ovale, Galilei che la velocità di caduta aumenta con l’aumentare dello spazio (...); ma un’altra parte deve essere aggiunta per attività autonoma sulla base del patrimonio mentale accumulato. Così, quando Keplero suppone, per tentativi, che l’orbita di Marte sia un’ellisse, si tratta di una sua costruzione. Lo stesso vale per il presupposto galileiano della proporzionalità tra tempo e velocità della caduta” (ivi, p. 309).

Il processo che conduce il fisico teorico a nuove scoperte si articola per Einstein nei seguenti momenti, rappresentabili graficamente come in figura 11.



Una comprensione intuitiva dell'essenziale di un grosso complesso di fatti porta il ricercatore alla costituzione di un principio fondamentale ipotetico o di più principi di tal genere. Dal principio fondamentale (sistema di assiomi) egli deduce in via puramente logico-deduttiva le conseguenze nella maniera più completa possibile. Queste conseguenze derivabili dal principio fondamentale, spesso attraverso sviluppi e calcoli complicati, vengono poi poste a confronto con le esperienze e forniscono così un criterio per la giustificazione del principio fondamentale ammesso. Tale principio (assiomi) e le conseguenze formano insieme quella che si dice una "teoria"¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Siamo ora in condizione di comprendere che cosa il fisico tedesco intende dire quando afferma che i veri, grandi progressi della fisica hanno seguito una strada *non interamente* ma "quasi diametralmente opposta" all'induzione. Il "quasi" sta a significare che l'elaborazione dell'elemento teorico si è sviluppata, in questi casi, a partire dal *già noto*. Di qui la necessaria e storicamente adeguata distinzione di natura tra le teorie fisiche. Dice infatti Einstein nel 1934: "In fisica si possono distinguere teorie di natura diversa. La maggior parte sono teorie costruttive: per mezzo di un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi. È così che la teoria cinetica dei gas cerca di ricondurre i fenomeni meccanici, tecnici e di diffusione a movimenti di molecole, vale a dire a costruire partendo dall'ipotesi del movimento molecolare. Quando si dice che si è riusciti a comprendere un gruppo di fenomeni naturali, significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione. Ma accanto a questa classe importante di teorie ve n'è una seconda che invece del metodo sintetico impiega il metodo analitico. Qui il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di fenomeni

Il momento progettuale, costruttivo, creativo dell'indagine scientifica emerge così sulla base dell'insegnamento umano, di cui Kant fece per primo tesoro¹⁵⁰, della non diretta deducibilità del fattore teorico dal dato empirico, e mostra che Einstein non solo non ha abbandonato il concetto dell'*a priori* dopo la lettura "deliziosa" dei *Prolegomeni*, ma che anzi da essa trasse ben presto le dovute conseguenze. Certo, egli si guarda bene dall'affermare esplicitamente con Kant che "l'intelletto non attinge le sue leggi (*a priori*) dalla natura, ma le prescrive ad essa"¹⁵¹; ma, coerentemente, parla di "criterio di giustificazione", e la nozione di "giustificazione" è tipicamente kantiana. Detto in altri termini, l'accettare o meno una proposizione come dotata di significato dal punto di vista scientifico non è questione di fatto, ma di diritto: il principio o le ipotesi avanzate per render conto di una serie di fenomeni non è accettabile perché dai fenomeni esso trae origine e a essi ritorna per esser verificato, in quanto risulta fondato sulla sua propria base empirica; la validità del principio dipende anzitutto dalla sua legittimità, cioè dalla possibilità di essere sottoposto al vaglio dell'esperimento. Ne deriva che una teoria, osserva opportunamente il fisico tedesco, può

essere riconosciuta come sbagliata, quando c'è un errore logico nelle sue deduzioni, o come inesatta quando un fatto non si accorda con una delle sue conseguenze. Ma non si può mai dimostrare la verità di una teoria. Perché non si sa mai che anche nel futuro non si avrà un'esperienza che contraddica le sue conseguenze; e perché sono sempre pensabili altri sistemi teorici che siano in grado di connettere i medesimi fatti dati¹⁵².

Il 6 aprile 1922, in occasione dell'incontro a Parigi con i membri della *Société Française de Philosophie* sul tema della teoria della

naturali determinate empiricamente dalle quali derivano in seguito criteri matematicamente formulati, ai quali i fenomeni particolari o le loro immagini teoriche devono soddisfare. È così che la termodinamica, partendo dal risultato generale dell'esperienza secondo il quale il moto perpetuo è impossibile, cerca di determinare, per via analitica, le relazioni alle quali i fenomeni particolari devono uniformarsi. La teoria della relatività appartiene alla seconda categoria" (A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, Newton & Compton Editori, Roma 1975, pp. 84-85).

¹⁵⁰ Cfr. Kant, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica...*, cit., pp. 7-9.

¹⁵¹ Ivi, p. 82.

¹⁵² Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Einstein indica anche un criterio di scelta tra due teorie concorrenti quando, in chiusura, afferma che "se sono a disposizione due teorie entrambe compatibili con il materiale fattuale dato, allora non esiste alcun criterio per preferire l'una o l'altra che lo sguardo intuitivo del ricercatore. È così che si capisce come ricercatori acuti, che dominano teorie e fatti, possono tuttavia essere passionali sostenitori di teorie opposte" (*ibid.*).

relatività, Einstein torna sulla questione dell'*a priori* di Kant e critica severamente la figura del Mach “filosofo” in virtù della nozione di “sistema”, anch’essa tipica, benché non esclusiva, del criticismo kantiano. Non possiamo esser sorpresi di ciò! Dice Einstein:

Ciò che mi sembra essere la cosa più importante nella filosofia di Kant è che vi si parla di concetti *a priori* per edificare la scienza. Si possono opporre due punti di vista, l’apriorismo di Kant, per il quale taluni concetti preesistono nella nostra coscienza, e il convenzionalismo di Poincaré. Questi due punti di vista concordano su questo: che, per essere edificata, la scienza ha bisogno di concetti arbitrari; quanto a stabilire se questi concetti sono dati *a priori*, o sono delle convenzioni arbitrarie, io non posso dire niente¹⁵³.

È facile rilevare quanto questa dichiarazione richiami, rendendola al contempo più chiara, la confidenza fatta da Einstein a Born quattro anni prima. Ma, diversamente dal 1918, egli non afferma di non poter esser d’accordo con la dottrina kantiana: la questione non si pone nemmeno. È quindi significativo che, pur non entrando nel merito della “naturalità” o “convenzionalità” dell’*a priori*, il fisico tedesco suggerisca indirettamente il proprio punto di vista guardando, come annunciavamo, a Mach.

Il sistema di Mach (...) studia le relazioni che esistono tra i dati dell’esperienza; l’insieme di queste relazioni è, per Mach, la scienza. Questo è un punto di vista sbagliato; insomma, ciò che fa Mach è un catalogo e non un sistema. Tanto Mach fu un buon [fisico] meccanico, quanto fu un riprovevole filosofo. Quest’ottica limitata sulla scienza lo portò a rifiutare l’esistenza degli atomi. È probabile che, se Mach fosse tuttora vivente, cambierebbe opinione. Tengo tuttavia a dire che su questo punto, cioè che i concetti possono cambiare, io sono completamente d’accordo con Mach¹⁵⁴.

Se i “concetti possono cambiare” in virtù del divieto humiano e dell’insegnamento machiano, è evidente che non vi può essere un sistema categoriale esaustivo e immutabile, il che significa che la dottrina kantiana è, dal punto di vista einsteiniano, inaccettabile

¹⁵³ A. Einstein, *Comptes rendus des séances de la Société Française de Philosophie, séance du 6 avril 1922. La théorie de la relativité*, in “Bulletin de la Société Française de Philosophie”, XVII, 1922, pp. 101-102.

¹⁵⁴ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., pp. 111-112.

non tanto perché storicamente datata, quanto perché teoricamente viziata all'origine. Ciò che non deve essere accettato non risiede tanto nella pretesa definitività o esaustività dell'*a priori*, quanto, piuttosto, nella modalità attraverso la quale Kant sarebbe giunto ad affermarlo; il dissenso einsteiniano è insomma rivolto al fondamento che impone come conseguenze la staticità e la rigidità e, necessariamente, una diversa concezione della natura del pensiero.

Il riferimento a Hume, confidenzialmente manifestato a Born, si spinge del resto ben oltre le motivazioni di carattere estetico, peraltro condivise dallo stesso Kant; riguarda la risposta che quest'ultimo pensava di aver soddisfacentemente dato al problema sollevato dal filosofo di Edimburgo: quello della possibilità di inferire, a partire dall'esperienza, qualsiasi nozione che possa essere considerata certa ed evidente quanto lo sono i concetti della matematica e della geometria, a cominciare dalla connessione di causa ed effetto. Afferma infatti il Nostro: "Le idee si riferiscono alle esperienze dei sensi, ma non possono mai derivarne logicamente. Per questa ragione non ho mai potuto comprendere la questione dell'*a priori* nel senso di Kant"¹⁵⁵. Detto in altri termini, "non esistono categorie definitive nel senso di Kant"¹⁵⁶, né, conseguentemente, la possibilità di distinguere dei giudizi sintetici *a priori* da altri giudizi sintetici *a posteriori*. Osserva ancora Einstein:

Fermamente convinto che certi concetti fossero indispensabili, e che fossero proprio quelli che si erano dimostrati tali nella pratica, [Kant] li interpretò come le necessarie premesse di ogni tipo di speculazione, e li distinse dai concetti di origine empirica. Io sono convinto, invece, che questa distinzione sia erronea, cioè non ponga il problema nei suoi giusti termini¹⁵⁷.

Ed è per l'appunto questa "convinzione erronea" che spiega come e perché possa darsi una "meraviglia" anomala e fuorviante, come quella relativa alla seconda, cruciale, esperienza adolescenziale ricordata dal fisico tedesco, sulla quale abbiamo indirizzato inizialmente la nostra attenzione. Kant, conclude il Nostro,

¹⁵⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 93.

¹⁵⁶ Ivi, p. 39.

¹⁵⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 8-9.

fu portato fuori strada dalla falsa opinione – difficile da evitare ai suoi tempi – che la geometria euclidea fosse necessaria al pensiero e fornisse una conoscenza certa (cioè indipendente dall'esperienza sensoriale) sugli oggetti della percezione "esterna". Da questo errore facilmente comprensibile egli dedusse l'esistenza di giudizi sintetici a priori, prodotti dalla sola ragione, e suscettibili, per conseguenza di pretendere assoluta validità¹⁵⁸.

Siamo dunque autorizzati a concludere che il fisico tedesco ha ormai abbandonato ogni riferimento al pensiero kantiano e respinto la prospettiva del "trascendentale" elaborata nei *Prolegomeni*? Per niente: la critica rivolta all'epistemologia machiana indica, proprio al contrario, che Einstein non doveva aver dimenticato l'invito del filosofo di Königsberg a tener ben ferma la distinzione tra "giudizi di esperienza" e "giudizi di percezione"¹⁵⁹, dal momento che la nozione di "sistema" presuppone non solo un principio direttivo, un filo conduttore che funge da elemento unificante, ma anche la necessaria e fondamentale assunzione che ciò che noi chiamiamo mondo esterno, realtà, può essere, seppur indirettamente, conosciuto adeguatamente.

Così, se di Kant sono inaccettabili le premesse, di Hume devono essere rifiutate le conclusioni, ovvero lo scetticismo e il probabilismo. Non è infatti difficile mostrare che entrambi i contenuti delle due sconvolgenti esperienze giovanili rientrano a pieno titolo, e ciò sia detto anche per la seconda esperienza debitamente emendata, nella prospettiva del trascendentale proposta dal filosofo di Königsberg: un risultato decisivo, questo, dal momento che tali esperienze precorrono ciò che Einstein non esiterà a indicare come la propria professione di fede dal punto di vista epistemologico (di qui la loro crucialità) e, soprattutto, rivelano la comune natura controinduttiva della libertà e del pensiero.

Per quanto riguarda l'affermazione di una realtà oggettiva, assunzione che caratterizza il contenuto della prima esperienza e deter-

¹⁵⁸ Einstein, *Replica ai vari autori*, in AA.VV., *Albert Einstein scienziato e filosofo*, cit., p. 624.

¹⁵⁹ Cfr. Kant, *Prolegomeni*, cit., § 18, pp. 55-56. Al § 26 Kant afferma: "Al lettore, per lunga consuetudine abituato a ritenere l'esperienza una composizione puramente empirica di percezioni e perciò a non pensare affatto che essa va molto più lontano di queste, e cioè dà ai giudizi empirici una validità universale, e perciò ha bisogno di una pura unità intellettuale, la quale precede *a priori*, a tal lettore, adunque, raccomando di far bene attenzione su questa distinzione della esperienza da un semplice aggregato di percezioni" (ivi, p. 70).

mina la stessa possibilità della fisica come scienza¹⁶⁰, lo stesso Einstein confessa:

Io non sono cresciuto nella tradizione kantiana, ma sono arrivato a capire l'aspetto veramente valido che si può trovare nella dottrina di Kant accanto agli errori che oggi, cioè troppo tardi, sono considerati molto ovvi. Quest'aspetto è contenuto nella proposizione: "Il reale non ci è dato, ma ci è proposto (come un indovinello)". Ciò significa ovviamente: una costruzione concettuale è una cosa che serve ad afferrare le relazioni interpersonali, e la sua autorità sta soltanto nella convalidazione. Questa costruzione si riferisce precisamente al "reale" (per definizione), e ogni ulteriore questione sulla "natura del reale" appare vuota di senso¹⁶¹.

Rispetto alla possibilità del conseguimento di una conoscenza certa e completa dei dati dell'esperienza attraverso il pensiero, dunque l'edificazione della fisica come scienza mediante proposizioni *a priori*, il Nostro afferma:

L'atteggiamento teorico che noi difendiamo si distingue da quello di Kant solo in quanto noi non concepiamo le "categorie" come se fossero immutabili (condizionate dalla natura del pensiero), ma come se fossero (in senso logico) libere convenzioni. Esse si presentano come categorie *a priori* solo in quanto il pensare, senza fondarsi su categorie e concetti in generale, sarebbe impossibile come il respirare nel vuoto¹⁶².

¹⁶⁰ È importante precisare che se, dal punto di vista generale, per il fisico tedesco "la fede in un mondo esterno indipendente dall'individuo che lo esplora è alla base di ogni scienza della natura" (Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 72), dal punto di vista particolare e proprio, "i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia (...) la rappresentazione degli oggetti (corpi, campi, ecc.) stabilita dalla fisica aspirano a un'esistenza reale' indipendente dai soggetti della percezione; d'altra parte queste rappresentazioni sono messe in relazione nel modo più certo possibile con le impressioni sensoriali. Inoltre, è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamano un'esistenza singola autonoma in quanto 'collocati in regioni distinte dello spazio'. Fuori dell'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un 'essere così') dei singoli oggetti spazialmente separati – ipotesi che deriva in primo luogo dalla riflessione quotidiana – non sarebbe possibile un pensiero fisico nel senso per noi abituale; né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo" (Einstein, Born, *op. cit.*, p. 201).

¹⁶¹ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., pp. 625-626. E ancora: "Una delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità" (A. Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, Boringhieri, Torino, p. 39, cit., p. 39).

¹⁶² Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 619.

A priori e a posteriori, teoria ed esperienza vengono così a configurare un rapporto di pari dignità fra i due estremi, l'empirismo e il razionalismo, in virtù di quella prospettiva dell'*a priori* o del "trascendentale" che caratterizza la concezione einsteiniana della scienza fisica; una concezione che se da un lato, fondando il suo "credo epistemologico", giustifica l'atteggiamento duramente critico che il fisico tedesco adotterà nei riguardi della meccanica quantica, dall'altro, rende trasparente il ruolo che la riflessione filosofica è stata chiamata a svolgere nella sua propria esperienza scientifica.

Con sottile ironia e limpida coerenza, Einstein annuncia in sede autobiografica il contenuto della propria fede scientifica previa giustificazione della parentesi aperta a proposito dell'esposizione delle due esperienze giovanili di cui abbiamo definitivamente accertato la crucialità. "Visto che mi sono permesso una digressione abbastanza lunga da interrompere il mio necrologio (...) non mi farò più scrupolo di enunciare ora in alcune proposizioni il mio credo epistemologico, di cui ho già accennato qualcosa incidentalmente"¹⁶³. Anzitutto, la fondamentale e logicamente irriducibile distinzione tra il piano delle esperienze offerte dai sensi, *a posteriori*, e il piano del pensiero, *a priori*: "Io distinguo da una parte la totalità delle esperienze sensibili, e dall'altra la totalità dei concetti e delle proposizioni che sono enunciati nei libri"¹⁶⁴. Sul piano del pensiero, "il sistema dei concetti è una creazione dell'uomo, né più né meno delle regole della sintassi"¹⁶⁵, e poiché "i rapporti interni fra i diversi concetti e proposizioni sono di natura logica e il compito del pensiero logico è strettamente limitato a stabilire tutte le connessioni interne fra concetti e proposizioni secondo regole ben definite, che sono appunto quelle della logica"¹⁶⁶, ne deriva che "una proposizione è corretta se, entro un certo sistema logico, viene dedotta secondo le regole logiche accettate"¹⁶⁷. Non tutti i sistemi logici, sebbene arbitrari, sono tuttavia da considerarsi sullo stesso livello: due condizioni, completezza ed economicità, ne sanciscono la piena accettabilità. In primo luogo, sono preferibili i sistemi "intesi a permettere la coordinazione più completa e quanto più possibile certa (intuitiva) con la totalità dell'esperienza dei sensi"¹⁶⁸; in

¹⁶³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 7-8.

¹⁶⁴ *Ivi*, p. 8.

¹⁶⁵ *Ibid.*

¹⁶⁶ *Ibid.*

¹⁶⁷ *Ibid.*

¹⁶⁸ *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

disporre tutti gli elementi a nostra disposizione in modo che a un certo istante dato, segnato sull'orologio, l'otturatore apra la strada quel tanto che è necessario per lasciar passare un fotone e, immediatamente dopo, ripristini la condizione di chiusura. Ebbene, pesando il contenitore prima dell'emissione e dopo l'avvenuta emissione del fotone, saremo in grado di dedurre sia la massa del fotone fuggiasco sia la sua energia. In questo modo otterremo, senza relazioni di incertezza o di indeterminazione reciproca, l'esatta misura del tempo e dell'energia.

Il diabolico congegno messo a punto da Einstein turbò, con molta probabilità, il sonno di molti dei fisici presenti all'incontro; di certo non fece dormire Bohr, che non poteva accettare di lasciar cadere in così malo modo gli sforzi congiunti compiuti in quegli anni. Il mattino seguente, il fisico danese era pronto a sostenere la causa dell'indeterminismo, sicuro di poter scardinare la trappola einsteiniana. La chiave per risolvere il problema era semplice e, al contempo, terribilmente efficace. Bohr spiegò che la misurazione del peso del contenitore metallico implica un margine di incertezza. Se immaginiamo di compiere la misura attraverso una lancetta che indicherà un numero sul quadrante della nostra bilancia, proprio nella posizione della lancetta avremo sempre, coerentemente con le tesi di Heisenberg, un margine di inesattezza. Inoltre, possiamo addirittura stabilire con precisione questo margine se conveniamo di riconoscere alla bilancia una quantità di moto. Solo che, in tal caso, la bilancia si muove in un campo gravitazionale, quello terrestre, e poiché il tempo misurato dall'orologio dipende, come è noto, proprio dalla sua posizione nel campo di gravitazione, la determinazione del momento in cui l'otturatore lascia passare il fotone avrà necessariamente un margine di incertezza. La meccanica dei quanti era salva. Einstein incassò una tremenda sconfitta, tanto più pesante quanto più la vittoria, come emerse con chiarezza, era stata ottenuta proprio grazie alla sua più geniale conquista, la relatività generale.

Naturalmente il fisico tedesco non si arrese, e anzi perseverò fino alla fine sostenendo le proprie ragioni. Tanto che, dopo appena due anni di stabile e definitiva residenza negli Stati Uniti, dove occupava una cattedra presso l'Institute for Advanced of Science di Princeton, nella prima metà di marzo del 1935 inviò alla "Physical Review" un breve ma denso articolo scritto in collaborazione con Boris Podolski e Nathan Rosen intitolato *Can quantum-mechanical*

description of physical reality be considered complete? (*La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*). Dopo una breve sezione introduttiva dove vengono esposti i risultati raggiunti, lo scritto si preoccupa di delimitare con precisione l'ambito, l'oggetto sul quale focalizzare l'attenzione, attraverso una considerazione di carattere epistemologico. Premesso che "ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione fra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera"¹⁷³, sicché si presume che questi concetti corrispondano alla realtà obiettiva, ce ne diano una rappresentazione, occorre compiere una fondamentale distinzione sul piano della valutazione del successo o meno di una tale teoria. Ci si deve interrogare, da una parte, sulla correttezza della teoria, dall'altra, sulla sua completezza. Ora, "la correttezza della teoria è giudicata in base al grado di accordo fra le sue conclusioni e l'esperienza umana; questa esperienza, che sola ci consente di inferire alcunché sul reale, assume in fisica la forma di esperimenti e misure"¹⁷⁴. Sul piano della completezza, in una teoria esaustiva vi dovrà essere un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà.

Dal momento che è questo l'oggetto del nostro discorso, converrà intendersi e tentare una definizione del termine completezza. Dice Einstein:

Qualunque significato si attribuisca al termine "completo", sembra necessario, per la completezza di una teoria, che essa soddisfi alla condizione seguente: *ciascun elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*. Questa la chiameremo "condizione di completezza"¹⁷⁵.

Dare una risposta alla questione posta sarà così tanto più agevole, quanto più saremo in grado di indicare gli elementi della realtà fisica; ci serve insomma un criterio di realtà. Afferma allora il fisico tedesco:

Gli elementi della realtà fisica non possono essere determinati da considerazioni filosofiche a priori, ma debbono essere trovati ricorrendo ai risultati di esperimenti e di misure. Tuttavia, per i no-

¹⁷³ A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in "Physical Review" (2) 48, 1935; trad. it., *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 375.

¹⁷⁴ *Ibid.*

¹⁷⁵ *Ibid.*

stri scopi, non è necessario dare una definizione esauriente di realtà. Ci accontenteremo del criterio seguente che consideriamo ragionevole. *“Se si è in grado di prevedere con certezza (cioè con probabilità uguale a uno), il valore di una grandezza fisica senza perturbare in alcun modo un sistema, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica”*¹⁷⁶.

Va da sé che il criterio di realtà fisica appena enunciato non esaurisce tutti i modi di riconoscere una simile realtà; esso è tuttavia sufficiente e, in questa veste, si trova in accordo con l'idea classica e con quella quantica di realtà.

Una volta chiariti i termini della questione, si passa alla formulazione di un esperimento mentale che consiste nel prendere in considerazione la descrizione quantica di una particella con un solo grado di libertà. Si studierà il problema di compiere delle previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema che non ha in precedenza avuto interazioni con il primo sistema. Come è noto, dal punto di vista della meccanica quantica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell'una preclude la conoscenza dell'altra, sicché “o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalle funzioni d'onda della meccanica quantica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali”¹⁷⁷. Il concetto fondamentale, nella circostanza, è quello di stato, che si suppone completamente caratterizzato dalla funzione d'onda ψ , una funzione delle variabili scelte per descrivere il comportamento della particella. Si giunge allora a una situazione contraddittoria. Infatti: 1) da una parte, si dimostra che o la descrizione quantica data dalla funzione d'onda deve essere considerata incompleta, nel senso della condizione di completezza posta in precedenza, oppure che quando i corrispondenti non commutano, due grandezze non possono avere realtà simultaneamente; 2) dall'altra parte, nell'ipotesi che la funzione d'onda ψ offra effettivamente una descrizione completa della realtà fisica, si deduce che due grandezze fisiche con operatori che non commutano possono avere realtà simultaneamente. Ora, 1) non può essere vera; per esserlo dovrebbe essere completa, ma allora le due grandezze dovrebbero essere al contempo reali. Allo stesso modo, 2) non

¹⁷⁶ *Ibid.*

¹⁷⁷ *Ivi*, p. 374.

può essere vera perché, per esserlo, dovrebbe essere incompleta, sicché le due grandezze non potrebbero essere entrambe conosciute simultaneamente. Così, non solo la negazione del primo caso porta alla negazione del secondo, ma dovremo necessariamente concludere che “la descrizione della realtà fornita da una funzione d’onda non è completa”¹⁷⁸.

A questo nuovo contributo einsteiniano, di lì a poco indicato con la sigla EPR dalle iniziali dei cognomi degli autori, non vi furono inizialmente reazioni di un certo peso, se non due interventi di Bohr¹⁷⁹; nel replicare, il fisico danese considerò decisiva l’ambiguità che, a suo avviso, caratterizzerebbe il criterio di realtà scelto. La discussione sul testo che abbiamo esaminato resta comunque, tuttora, ambito di confronto e di scontro.

Nel 1949, rispondendo ai propri critici, il Nostro ribadiva la propria posizione nei seguenti termini.

A quanto pare, sono tutti dell’opinione che la relazione d’indeterminazione di Heisenberg (la cui rigorosità scientifica si considera giustamente, anche a mio parere, dimostrata in modo definitivo) determini nel senso suddetto il carattere di tutte le teorie fisiche pensabili e ragionevoli, costituendone un presupposto fondamentale. In ciò che segue, desidero esporre le ragioni che m’impediscono di allinearli con l’opinione di quasi tutti i fisici teorici contemporanei. Io sono, infatti, fermamente convinto che il carattere essenzialmente statistico della teoria quantistica contemporanea dev’essere attribuito unicamente al fatto che essa opera con una descrizione incompleta dei sistemi fisici¹⁸⁰.

Ciò non significa, si badi bene, annullare tutti i progressi compiuti, insomma, bocciare quanto di buono è stato fatto finora. Ben al contrario, riprende Einstein,

io riconosco pienamente l’importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici – cioè dovunque è possibile considerare l’interazione delle strutture e delle loro parti con sufficiente precisione, postulando un’energia potenziale fra i punti materiali – questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capa-

¹⁷⁸ *Ibid.*

¹⁷⁹ N. Bohr, *Quantum Mechanics and Physical Reality*, in “Nature”, CXXXVI, 1935, p. 65; Einstein, Podolski, Rosen, *op. cit.*, pp. 697-702.

¹⁸⁰ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 610.

ce, pur nel suo carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra fenomeni specificabili, in modo corrispondente alle previsioni della teoria: essa è finora la sola che unisca il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia in modo logicamente soddisfacente¹⁸¹.

Il punto dolente, infatti, è un altro. Dice Einstein:

Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica. Ogniquilvolta il fisico moderno dalle simpatie positivistiche ode una simile formulazione, la sua reazione è un sorriso di compatimento. Egli dice fra sé: “Ecco qui la formulazione pura e semplice di un pregiudizio metafisico, vuoto di contenuto, e, peggio ancora, di un pregiudizio la cui confutazione costituisce il maggior risultato epistemologico ottenuto dai fisici nell’ultimo quarto di secolo. C’è forse un uomo che abbia mai percepito una ‘situazione reale’? Com’è possibile che una persona ragionevole possa ancora illudersi, al giorno d’oggi, di riuscire a confutare la parte più essenziale della nostra conoscenza e del nostro modo di pensare, risuscitando quest’ombra senza vita?”. Pazienza! Quella mia laconica definizione non voleva convincere nessuno; voleva semplicemente indicare il punto di riferimento¹⁸².

Quanto grande sia il valore che il fisico tedesco riconosce alla nozione di “reale”, nozione vitale per la possibilità stessa della scienza, lo si evince infine, ancora una volta, da uno dei suoi ultimi interventi critici rivolto all’indirizzo della meccanica quantica. Afferma il Nostro:

C’è qualcosa come lo “stato reale” di un sistema fisico, che esiste oggettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misura, e che, in linea di principio, può esser descritto attraverso i mezzi di espressione della fisica (...) Questa tesi che riguarda la realtà non ha il senso di un enunciato chiaro in sé a causa della sua natura “metafisica”; essa ha solo il carattere proprio di un programma¹⁸³.

¹⁸¹ Ivi, p. 611.

¹⁸² *Ibid.*

¹⁸³ A. Einstein, *Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux*, in AA.VV., *Louis de Broglie physiciens...*, cit., p. 7.

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ Ivi, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ Ivi, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

vuto alla stessa circostanza, dato che il desiderio ardente di cogliere i principi aveva come conseguenza che la maggior parte del tempo fosse impiegata in sforzi infruttuosi”¹⁸⁸.

Ora, se è ben vero che la specificità dell’impegno scientifico rispondeva alle più intime aspettative dell’uomo Einstein – vi era dunque una necessità e un movente soggettivo –, lo è altrettanto che esso si calava in un contesto scientifico e culturale, oggettivo, che piegava provvisoriamente tale necessità alle più urgenti esigenze epistemologiche, le autorizzava e, in qualche modo, ne offriva anche in seguito piena legittimazione. Le autorizzava ben prima del 1924, allorché ventiquattrenne Einstein dà vita a Berna, come ben sappiamo, a quella *Akademie Olympia*, occasione di studio e riflessione critica che proprio sul terreno epistemologico si rivela momento fecondo sia intellettualmente sia esistenzialmente. “La fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo” testimonia Solovine “erano l’epoca eroica delle ricerche sui fondamenti e i principi della scienza, ed è questo che era la nostra costante preoccupazione”¹⁸⁹. Le legittimerà dopo il 1924, sulla base degli sconvolgenti sviluppi della meccanica quantica, a tal punto che il fisico tedesco, nel 1936, affronterà il problema dei rapporti tra scienza e filosofia nei seguenti termini.

Spesso si è detto, e certamente non senza una giustificazione, che l’uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Questa invero potrebbe essere la cosa migliore in un’epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari così ben fondate da essere inaccessibili al dubbio¹⁹⁰.

Malauguratamente, riprende il Nostro:

Non può essere la cosa migliore in un’epoca, in cui, come quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici. In un’epoca come la presente, in cui l’esperienza ci obbliga a cercare un nuovo più solido fondamento, il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo le considerazioni critiche dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov’è che la scarpa fa male¹⁹¹.

¹⁸⁸ *Ibid.*

¹⁸⁹ Einstein, *Introduction. Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. VIII.

¹⁹⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., pp. 36-37.

¹⁹¹ Ivi, p. 37.

Del resto, ben oltre l'urgenza e la straordinarietà che richiedono al fisico di indossare provvisoriamente le vesti del filosofo in generale e dell'epistemologo in specie, cioè di incrementare l'impegno sul piano speculativo rivolto a cogliere i principi e gli assiomi, anche in regime di piena ordinarietà difficilmente si potrà contestare il carattere speciale che determina la qualità del rapporto che lega la scienza e l'epistemologia. Per il fisico tedesco, infatti, "esse dipendono l'una dall'altra"¹⁹². Per evitare il rischio fatale di proporsi né più né meno che come una semplice esercitazione accademica che non morde il reale, l'epistemologia deve interagire con l'attività scientifica¹⁹³, ma al contempo guardarsi dal ridurre il dominio di riferimento della scienza e chiudere nella prigione di un sistema compiuto la ricerca del fisico. "Non appena l'epistemologo, nella sua ricerca di un sistema chiaro, riesce ad aprirsi la strada verso di esso" osserva Einstein, "è portato a interpretare il contenuto di pensiero della scienza secondo il suo sistema, e a rifiutare tutto ciò che al suo sistema non si adatta"¹⁹⁴. Da parte sua la scienza, per non degradare inevitabilmente verso la mera tecnica¹⁹⁵, non può considerare marginale l'efficacia e la necessità dell'apparato speculativo e sistematico; lo scienziato "accetta con riconoscenza l'analisi concettuale epistemologica; ma le condizioni esterne, che per lui sono date dai fatti dell'esperienza, non gli permettono di accettare condizioni troppo restrittive, nella costruzione del suo mondo concettuale, in base all'autorità di un sistema epistemologico"¹⁹⁶. Così, se l'epistemologo, dal suo punto di vista, è libero di apostrofare il fisico "come un opportunista senza scrupoli"¹⁹⁷, quest'ultimo, nel pieno esercizio della propria libertà, non può che vincolarsi al dato e al responso dell'esperienza, distinguendosi decisamente e radicalmente dal filosofo.

Che la riflessione filosofica di carattere epistemologico abbia avuto un ruolo esclusivo e decisivo nell'attività di ricerca portata avanti dal fisico tedesco è del resto confermato *a posteriori* dalle occasioni di dibattito che lo stesso Einstein ha ben voluto accettare e onorare; ci riferiamo in particolare alle accese polemiche sollevate in Francia

¹⁹² Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., p. 629.

¹⁹³ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁴ *Ibid.*

¹⁹⁵ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁶ Ivi, pp. 629-630.

¹⁹⁷ Ivi, p. 630.

dalla teoria della relatività, che coinvolsero intellettuali, scienziati e filosofi della statura di Henri Bergson¹⁹⁸. In tal senso consideriamo fuorviante sollevare l'interrogativo circa l'appartenenza o meno del fisico tedesco alla schiera dei filosofi, giacché un simile approccio conduce facilmente alla formulazione di valutazioni per un verso tendenzialmente elusive e sprezzanti, come nel caso di Abraham Pais, per l'altro, forzatamente entusiastiche, se non celebrative, come in quello di Leopold Infeld. Dice Pais: "Einstein amava la saggezza. Ma fu un filosofo? La risposta è una questione di gusti, più che di fatto. Personalmente ritengo che il meglio di sé non l'abbia dato alla filosofia, ma non polemizzerei a tutti i costi con chi sostenesse il contrario. È indubbio che l'interesse di Einstein per la filosofia fosse autentico, ma è altrettanto certo che lui per primo non si considerasse un filosofo"¹⁹⁹. Tuttavia, poco dopo, lo stesso Pais non ha difficoltà ad affermare: "Negli ultimi trent'anni della sua vita, però, egli smise di essere un 'opportunist senza scrupoli', per diventare con suo grave danno un filosofo"²⁰⁰. Secondo Leopold Infeld "Einstein non è considerato soltanto un grande fisico, ma anche un grande filosofo. Egli stesso si considerava un filosofo. Spesso mi diceva: 'Io sono più un filosofo che un fisico'"²⁰¹. Naturalmente il fisico tedesco non si identificava con la figura del filosofo tradizionale, ma si sarebbe collocato invece nella corrente di pensiero che nei primi decenni del Novecento si proponeva come neoempirismo o neopositivismo. Dice Infeld: "Per il positivista logico il filosofo, nel moderno significato della parola, è un uomo il cui interesse è rivolto ai fondamenti del nostro sapere, alla chiarificazione dei suoi concetti basilari. Solo in questo senso Einstein può essere chiamato un filosofo, e in questo senso egli è uno dei più grandi filosofi che ci siano mai stati"²⁰². Niente di più distante e di

¹⁹⁸ Sull'intera vicenda ci permettiamo di rinviare ai nostri lavori: H. Bergson, *Lettere a Albert Einstein*, introduzione, trascrizione, traduzione e note di A. Genovesi, in "Filosofia", XLIX, 1, 1998, pp. 3-41; A. Genovesi, *Il carteggio tra Albert Einstein ed Edouard Guillaume. "Tempo universale" e teoria della relatività ristretta nella filosofia francese contemporanea*, Franco Angeli, Milano 2000; A. Genovesi, *Bergson e Einstein. Dalla percezione della durata alla concezione del tempo*, Franco Angeli, Milano 2001.

¹⁹⁹ A. Pais, "Subtle is the Lord...". *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, New York 1982; trad. it. di L. Belloni e T. Cannillo, "Sottile è il Signore...". *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino 1986 p. 24.

²⁰⁰ Ivi, p. 25.

²⁰¹ L. Infeld, *Albert Einstein*, Charles Scribner's Sons, New York 1952; trad. it. di O. Nicotra, *Albert Einstein*, Einaudi, Torino 1998, p. 134.

²⁰² Ivi, p. 135.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarà questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarava questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

logna?”. All’udire ciò il genitore, persona poco incline allo spettacolo della natura e men che mai a intraprendere discussioni che non fossero saldamente ancorate all’evidenza dell’esperienza sensibile, dopo un sussulto di collera non poté che disperarsi mettendosi, come si suol dire, le mani nei capelli al pensiero degli enormi sacrifici sostenuti per elevare il prestigio sociale della famiglia; sacrifici il cui risultato, così a lui sembrava, si concretizzava in una domanda palesemente incomprensibile per l’ovvietà della risposta. Chissà quale sarebbe stata la reazione del poveretto sapendo che Albert Einstein, pressappoco nello stesso periodo si diletta a porre in modo analogo simili interrogativi a un giovane fisico, Abraham Pais, che ricorda così l’episodio: “Deve essere stato attorno al 1950. Camminavamo, io e Einstein, lungo la strada che dall’Institute for Advanced Study conduceva alla sua abitazione, quando si fermò. ‘Veramente è convinto’ mi chiese ‘che la Luna esiste solo se la si guarda?’”²⁰⁵.

Benché impiegasse la maggior parte del proprio tempo sul versante della problematica relativistica, la testimonianza di Pais conferma che anche dopo il 1935 Einstein non cessa di dedicare spazio e ironia all’assunto filosofico che, a suo avviso, starebbe al fondamento della meccanica quantica. Del resto, non poteva essere altrimenti. Bisogna considerare che, dopo la teoria della relatività generale, si poneva un problema particolarmente imbarazzante: con la teoria del 1916 la gravitazione era di fatto ridotta a una geometria, ed è evidente che ciò la poneva su un piano diverso rispetto a quello dell’elettromagnetismo. Il problema non era avvertito solo da Einstein; tanto è vero che già dal 1918 il matematico H. Weyl si era dato da fare per elaborare una teoria che unificasse la gravitazione e il magnetismo. Entrambi venivano ridotti a geometria. Ma Weyl non era il solo a cimentarsi nell’impresa. Un anno dopo, nel 1919, il matematico T. Kaluza, conterraneo e concittadino del grande Kant, riusciva a mostrare che la semplice aggiunta di un’ulteriore dimensione spaziale lasciava intatti i limiti entro i quali restava valida la geometria di Riemann. Il Nostro, naturalmente, era ben al corrente di questi sviluppi, che prese attentamente in esame. Pur riconoscendo il fascino della concezione elaborata da Weyl, Einstein si rese ben presto conto che in essa era presente una grave conseguenza che ne comprometteva decisamente l’accettazione. Dalla teoria di

²⁰⁵ Pais, *op. cit.*, p. 15.

Weyl conseguiva infatti che il ritmo con il quale marciano gli orologi verrebbe a dipendere dalle linee di universo percorse dagli stessi orologi nel passato. Un'eventualità, questa, esclusa dal fatto che le righe spettrali di ciascun elemento, che altro non sono se non la misura del ritmo atomico, sono rigidamente fissate, al di là della linea di universo che il singolo atomo abbia potuto seguire o potrà percorrere. La teoria avanzata da Kaluza era più intrigante, ma anche più inquietante: si sarebbe dovuta pensare una dimensione in più dello spazio-tempo, cioè $4 + 1$. Il fisico tedesco la prese in esame più volte e a distanza di anni, ma non la seguì. Del resto, già nel 1925, aveva avanzato il tentativo di una teoria unificata, ed era persino giunto a ottenere le equazioni della gravitazione e quelle di Maxwell. Fu questa prospettiva, quella dell'inserimento di un tensore non simmetrico, che il fisico di Ulm riprenderà dopo il 1945 e continuerà a occuparlo fino a pochi istanti prima della morte. Ma dietro, sullo sfondo dell'unificazione, c'era tuttavia qualcos'altro: l'esigenza di risolvere il dualismo onda-corpuscolo, al quale aveva a suo tempo conferito tanto rilievo oggettivo.

DALLA RELATIVITÀ ALLA MECCANICA QUANTICA

1. Modelli atomici

Se allo scoccare del Novecento M. Planck aveva di fatto posto il fondamento della ricerca quantistica, dopo il 1905 la figura che più di ogni altra emergeva all'orizzonte della nuova frontiera speculativa era Albert Einstein che, subito dopo la memoria "rivoluzionaria", nel 1906 pubblicò un articolo sull'assorbimento del calore da parte dei solidi. L'attenzione e le energie che, di lì a poco, il giovane fisico tedesco dedicherà alla costruzione della teoria della relatività generale, non gli impedirono di ritornare, nei decenni successivi, sull'argomento tanto affascinante quanto problematico e travagliato dei quanti di luce: già nel 1917 elaborò infatti una memoria particolarmente importante intitolata *Quantentheorie der Strahlung* (*La teoria quantica della radiazione*).

Per ben comprendere l'intricata e sofferta marcia della ricerca sul versante delle nuove concezioni, e il ruolo in essa svolto dal Nostro, è necessario avere un quadro genetico di riferimento, che prende avvio dalla scoperta del nucleo atomico da parte del fisico sperimentale di origine neozelandese E. Rutherford.

Nei primi anni del Novecento la comunità dei fisici era, nella sua quasi totalità, propensa ad accettare il modello atomico proposto dal fisico britannico J.J. Thomson che, come ben sappiamo, aveva scoperto l'elettrone. Nella sua definitiva versione, l'atomo di Thomson conterrebbe numerosi elettroni, la cui carica negativa sarebbe comunque compensata; il problema era quello di determinare che cosa rende possibile il fatto che lo spazio, attraverso il quale si diffondono gli elettroni, si comporti come se fosse detentore di una carica positiva uguale alla carica negativa della somma di tutti gli elettroni, dunque in grado di equilibrare l'intero sistema. A questo modello, elaborato nel 1891, poco tempo dopo Lord Kelvin conferì un carattere meno oscuro. In effetti, nel 1901, Kelvin suppose anzitutto un fluido elettrico negativo costituito da elettroni che permeano liberamente

non solo lo spazio libero di atomi, ma addirittura l'atomo stesso. Con una seconda assunzione, Kelvin postulava un'attrazione tra l'atomo della materia ordinaria e un elettrone che sarebbe regolata dalla legge secondo cui mentre l'attrazione su un elettrone esterno è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due centri, quello dell'atomo e quello dell'elettrone, internamente l'attrazione dell'atomo nei riguardi dell'elettrone interno a esso è direttamente proporzionale alla distanza tra i rispettivi centri. Ciò consentiva non solo una distribuzione uniforme di elettricità positiva nello spazio occupato dall'atomo di materia ordinaria, ma anche la possibilità di distinguere due specie di elettricità: quella positiva, pensata come qualcosa di continuo, e quella negativa, vista come formata da grani. La materia ordinaria non elettrizzata è allora un insieme di atomi nel quale è presente un numero sufficiente di elettroni in grado di annullare le forze elettriche all'esterno. Il modello più semplice di atomo sarebbe così costituito da una distribuzione sferica uniforme di elettricità positiva con al centro un elettrone. La presenza di due o più elettroni genera sicuramente problemi di stabilità, ma Lord Kelvin non ritenne opportuno investigare ulteriormente la questione concludendo che, con buona probabilità, più elettroni si disporrebbero su superfici sferiche concentriche interne all'atomo, con moto rotatorio intorno al centro. Si poneva tuttavia, come è facile capire, una questione fondamentale: stando alla teoria elettromagnetica della luce, gli elettroni disposti nei termini appena espressi dovrebbero produrre sia onde elettromagnetiche sia un campo magnetico; ma in che modo si manifesterebbero questi due fenomeni? Fu Thomson che, per almeno una quindicina d'anni, aderì al modello che Kelvin aveva elaborato a partire dal suo iniziale progetto, si prese la briga di studiare, senza conseguire risultati apprezzabili, l'intera questione. Pur non superando il tribunale della critica e dell'esperimento, al modello concepito da Thomson deve essere riconosciuto in ogni caso il merito di aver tracciato una direzione assai precisa verso cui orientare gli sforzi, consentendo di mettere definitivamente a fuoco quelli che erano in realtà i veri problemi che richiedevano una celere quanto adeguata soluzione, ossia:

- a) numero e distribuzione degli elettroni rispetto alla massa dell'atomo;
- b) natura e distribuzione dell'elettricità positiva che compenserebbe la quantità totale negativa degli elettroni;
- c) natura e distribuzione della massa dell'atomo.

Si è visto che, come aveva lasciato intendere Lord Kelvin, all'interno dell'atomo dovrebbe trovar posto un nucleo centrale di elettricità positiva. Questo aspetto, al quale Thomson non dette rilievo, fu invece attentamente ripreso dal fisico giapponese H. Nagaoka nel 1904 in uno studio di particolare interesse¹²⁰. Sul modello di Saturno, si tentava di spiegare che il sistema atomico consiste di numerose particelle di massa uguale, disposte in cerchio a intervalli angolari uguali, che si respingono mutuamente con forze che devono essere considerate come inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra le particelle. Al centro del cerchio si troverebbe una particella più grossa che attira le altre, che formano un anello, secondo la stessa legge.

Nel 1908, E. Marsden, allievo di Rutherford, e H. Geiger, colui che avrebbe in seguito concepito il rivelatore ancora oggi in uso per misurare le radiazioni, iniziarono a studiare sperimentalmente il passaggio di particelle α attraverso sottili foglie di oro. L'esito dell'osservazione strumentale offriva i seguenti risultati: la grande maggioranza delle particelle attraversa la foglia di metallo quasi in linea retta, proseguendo poi il proprio percorso come se non incontrasse alcun ostacolo opposto dalla materia; nell'ordine di grandezza pari a 1 su 10.000, la particella α viene fortemente deviata con un angolo maggiore a 90° .

Si trattava, evidentemente, di un urto tra la particella α e gli atomi della materia attraversata. Soltanto che, sia il modello atomico di Thomson sia quello di Nagaoka imponevano un radicale mutamento della nozione di urto tra gli atomi rispetto alla concezione derivata dalla teoria cinetica dei gas: non si può più parlare semplicemente di urto in senso meccanico, immaginando gli atomi alla stregua di sferette elastiche, perché quando due atomi vengono a incontrarsi, sicché le cariche elettriche si avvicinano, si manifestano importanti forze repulsive che influenzano decisamente, modificandole, le traiettorie originarie. È ben vero che, in via approssimativa, ossia considerando il fatto che gli urti di cui si parla sono fittizi, è possibile considerare come equivalenti le variazioni del moto degli atomi rispetto alle variazioni che si registrerebbero su un piano meccanico; ma al di là di questo, il modello di Thomson non era in grado di dare una spiegazione accet-

¹²⁰ Si tratta della memoria *On a Dynamical System Illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radioactivity*, comparsa sulla rivista "The Nature" nel 1904.

tabile del fenomeno scoperto da Marsden e Geiger. Di tutto ciò si rese ben conto Rutherford: la deflessione rilevata per alcune particelle α doveva essere messa in conto a una deviazione brusca subita dalla particella nel passaggio attraverso l'intenso campo elettrico dell'atomo o, necessariamente, all'urto con lo stesso. Se le cose stavano in questi termini, era necessario supporre nell'atomo un nocciolo centrale, un nucleo, di dimensioni estremamente ridotte, carico positivamente e contenente la maggior parte della massa atomica. Tutto andava, insomma, nella direzione tracciata dal modello di Nagaoka visto che in esso la deflessione si spiega agevolmente.

In effetti, seguendo il modello, la particella α attraversa l'atmosfera elettronica di un atomo di una foglia d'oro, si avvicina al corpo centrale, ma la grande forza di Coulomb che si origina tra le due cariche positive la devia, costringendola a descrivere un'orbita a cometa. Il guaio è che lo stesso modello di Nagaoka presenta un grave inconveniente.

La difficoltà sta nel fatto che, a differenza del modello di Thomson, quello di Nagaoka non prevede la presenza di elettroni nelle zone più profonde dell'atomo, come invece l'emissione di particelle β dei materiali radioattivi sembrerebbe richiedere. Sulla necessità di ammettere l'esistenza di elettroni nel nucleo atomico insistette in modo particolare Marie Curie, che li chiamò essenziali (nucleari, solo in seguito), perché la loro fuga implicherebbe la distruzione dell'atomo, distinguendoli dagli elettroni periferici, che possono staccarsi dall'atomo stesso senza tuttavia procurare modifiche di natura chimica. Per almeno vent'anni si continuò a considerare gli elettroni come essi stessi facenti parte dell'edificio atomico, attribuendo a essi una funzione coagulante tra le cariche positive del nucleo che la forza coulombiana tende a separare.

L'atomo concepito da Rutherford sarebbe dunque diviso in due rigide regioni: l'una interna, il vero e proprio nucleo, l'altra esterna, il sistema elettronico. Due regioni separate da una frontiera invalicabile, tanto che se i costituenti del nucleo non possono passare nella regione del sistema elettronico, un elettrone periferico non può penetrare nella regione nucleare. E non c'è dubbio che il maggior merito della ricerca dello scienziato di origine neozelandese stia nell'aver intuito che i fenomeni radioattivi hanno sede nel nucleo atomico e, soprattutto, nell'aver continuato a lavorare in questa di-

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

la costante h di Planck eguale alla differenza dei valori E' e E'' dell'energia dell'atomo nei due stadi interessati al processo, in modo che si abbia $h\nu = E' - E''$ ¹²¹.

Come si evince dal dettato del fisico danese, l'elettrone che ruota intorno al nucleo, da un lato, rispetta le leggi della meccanica, ma dall'altro, dal momento che durante la rotazione non emette alcuna radiazione, contravviene ai dettami dell'elettromagnetismo. Attraverso la meccanica classica abbiamo ancora la possibilità di considerare l'equilibrio dinamico di un sistema in stato stazionario e, una volta conosciuto il raggio dell'orbita, calcolare la velocità, la frequenza, nonché l'energia potenziale e totale dell'elettrone ruotante. Ma, ed ecco il punto davvero saliente, l'elettrone può collocarsi e disporsi solamente su un'orbita dove la differenza di energia è un multiplo intero del quanto di azione h . Ciò significa che l'elettrone non può saltare su qualsiasi orbita ma, solo ed esclusivamente su orbite quantizzate. Ne deriva che ogni atomo può assumere una serie di stati stazionari corrispondenti alle orbite particolari in cui si trova effettivamente l'elettrone. Così, se l'atomo si trova sempre in uno stato stazionario, al quale corrisponde un dato valore energetico, a ogni atomo corrisponderà una successione di valori relativi ai diversi stati stazionari che esso potrà assumere.

A Bohr non sfuggì neppure il fatto che un simile sistema planetario quantizzato non può essere interamente assimilato a un sistema astronomico. Il motivo di ciò è molto semplice: le leggi di gravitazione ci permettono di studiare e di spiegare il moto dei pianeti con un'approssimazione piuttosto elevata, ma non ci permettono di prevedere le orbite degli stessi pianeti, che invece dipendono dalla storia del sistema planetario stesso. Di conseguenza, se in un sistema planetario le orbite restano costanti, in un sistema come quello elettronico sono destinate al cambiamento.

Una volta impostata la teoria su basi che, per buona parte, si richiamavano alla fisica classica, Bohr suppose che le orbite elettroniche avessero una conformazione perfettamente circolare, e riuscì a calcolare il raggio dell'orbita minore, indicata con I , che risultò uguale al raggio atomico come contemplato dalla teoria cinetica

¹²¹ N. Bohr, *Atomes et electron*, Rapport et discussion du Conseil de Physique tenue à Bruxelles du 1^{er} au 6 avril 1921, Paris 1923, p. 230.

dei gas. Il passo successivo fu quello di applicare l'apparato teorico messo a punto al più semplice modello atomico conosciuto in natura, cioè l'atomo di idrogeno, che appunto è costituito da un nucleo di massa I , da una carica positiva e da un solo elettrone, carica negativa, ruotante. Fu un vero e proprio successo. Se, da un lato, la teoria di Bohr offriva un'ulteriore conferma all'ipotesi che voleva l'atomo provvisto di un nucleo, dall'altro apriva le porte, consentendone di fatto l'inserimento nella stessa teoria atomica, all'ipotesi dei quanti. Le difficoltà si fecero però insormontabili allorché il fisico danese tentò audacemente di applicare la propria teoria a modelli atomici via via più complessi rispetto al modello iniziale. Non è inutile, bensì doveroso, precisare che all'epoca in cui Bohr costruì il suo modello teorico, cioè nel 1913, dal punto di vista prettamente tecnico, cioè matematico, si era in grado di quantizzare solo i moti che dipendevano da una singola variabile. Proprio per questo motivo, il fisico danese si era fatto carico della responsabilità di assumere che le orbite degli elettroni periferici fossero circolari, ben sapendo di essere in contrasto con la meccanica che voleva le orbite elettroniche disegnate come le ellissi di kepleriana memoria. Solo che per definire la posizione di un punto su un'ellisse servono due valori, sicché quantizzare orbite ellittiche significava poter essere capaci di quantizzare i moti definiti da due variabili.

Un tentativo nella direzione tesa a superare la difficoltà matematica fu percorso intorno al 1916 da Wilson e da Sommerfeld che elaborarono un metodo che, appunto, avrebbe dovuto rendere possibile la quantizzazione di sistemi definiti da più di una variabile. Sommerfeld applicò il metodo al modello atomico di Bohr, ma con scarsi risultati. Peraltro, Sommerfeld si rese conto che il fisico danese, rimanendo ancorato alla meccanica classica, aveva trascurato il fatto che la velocità prevista per l'elettrone era troppo alta sicché la sua massa, come la relatività insegnava, non poteva restare costante. Si rendevano dunque necessarie delle correzioni in senso relativistico. Ebbene, con l'inserimento della massa relativistica dell'elettrone, che appunto varia con la velocità, l'orbita elettronica risultava un'ellisse che ruota nel proprio piano intorno al fuoco occupato dal nucleo dell'atomo. Nonostante i correttivi apportati da Sommerfeld, il problema costituito dagli atomi con più elettroni periferici restava inalterato.

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

stein doveva fare i conti. Il meccanismo introdotto da Bohr per l'emissione e l'assorbimento della radiazione imponeva infatti, di nuovo, la questione di dedurre la formula della radiazione nera alla luce delle nuove ipotesi. Il Nostro aveva seguito con interesse gli sviluppi imposti dallo scienziato danese, e aveva recepito con un certo compiacimento il principio di corrispondenza che, sotto un certo angolo visuale, poteva essere considerato come il primo passo effettivamente mosso nella direzione dell'inserimento della teoria dei quanti nella meccanica classica. Non sorprende così che in *Quantentheorie der Strahlung* il fisico tedesco formuli una risoluzione del problema e applichi all'atomo di Bohr i concetti di probabilità della legge di disintegrazione radioattiva. Detto in altri termini, come ogni atomo radioattivo esplosa in un momento imprevedibile con un processo che appare casuale, allo stesso modo la transizione di un elettrone in un atomo è del tutto non prevedibile; per questo, il fenomeno deve essere studiato secondo leggi statistiche, che possono essere formulate sulla base di due assunzioni. Anzitutto si deve assumere che, di fronte a un campo di radiazioni, la possibilità di transizione di un elettrone, sia nel senso dell'emissione sia dell'assorbimento, nell'unità di tempo è proporzionale all'intensità della radiazione; in secondo luogo, si deve assumere che laddove non ci sono perturbazioni esterne si assiste a una transizione spontanea degli elettroni da stati di energia più elevata a stati energetici più bassi, con una probabilità proporzionale, nell'unità di tempo, al numero di atomi inizialmente allo stato eccitato. In questo modo, la legge di emissione radioattiva viene trasferita nel fenomeno della radiazione. Sulla base di quanto espresso e approfondendo la teoria del moto browniano, Einstein ottiene la formula di Planck per la radiazione di corpo nero e, nel discutere il problema dello scambio d'impulso tra il sistema atomico e la radiazione, conclude che per ogni processo elementare di radiazione deve essere

emesso un impulso di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione del tutto casuale.

Questo esito acuiva ulteriormente ed evidentemente il dualismo tra onda e corpuscolo, dal momento che una simile descrizione del processo di emissione esclude la possibilità stessa di onde sferiche. E infatti, con un certo non celato rammarico, Einstein afferma:

Non esiste emissione di radiazione per onde sferiche. Nel processo elementare di emissione la molecola subisce un contrac-

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

La possibilità di offrire una sintesi teorica è quanto de Broglie mise a punto in tre note presentate all'*Académie des Sciences* di Parigi. Con lo sguardo ben orientato alle concezioni relativistiche, il fisico francese ipotizza che a ogni particella di massa o energia m_0 si leghi un fenomeno ondulatorio di frequenza n_0 , sicché si avrà:

$$h\nu_0 = m m_0 c^2$$

dove h è la costante di Planck e c la velocità della luce al quadrato. Per esser più chiari, ogni particella di materia sarebbe sede, ma anche sorgente, di una vibrazione intrinseca con una frequenza data dalla relazione appena espressa. Così, se la particella è in moto, la concezione relativistica ci fa concludere che la vibrazione, per un osservatore fisso che si sposta con una velocità maggiore rispetto a quella posseduta dalla particella, appare un'onda. Posto ciò, De Broglie studia il moto uniforme di un elettrone in una traiettoria chiusa e giunge a dimostrare che traiettorie quantizzate della teoria di Bohr-Sommerfeld possono essere interpretate come un effetto di risonanza dell'onda di fase sulla lunghezza delle traiettorie chiuse. In questo modo, se l'elettrone si muove in una curva chiusa, l'onda deve seguirlo e dovrebbe formarsi una specie di anello continuo di onde, sicché la lunghezza dell'anello dovrà essere uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Le orbite stazionarie saranno allora quelle orbite che contengono precisamente 1, 2, 3... lunghezze d'onda associate all'elettrone ruotante. Il calcolo dava ragione a De Broglie: le orbite erano proprio quelle proposte da Bohr.

Questa concezione fu applicata dallo stesso fisico francese al caso dei fotoni. Assumendo che la distribuzione dei fotoni è determinata dalle onde, si avranno quindi regioni oscure dove le onde si sovrappongono, il fisico francese delineava una teoria dei fenomeni d'interferenza e diffusione della luce. Di qui alla legge di Planck per la radiazione di corpo nero il passo era breve, e anch'essa fu acquisita come risultato.

Le tre brevi note di de Broglie, debitamente interpretate, diedero vita nel 1924 alla sua dissertazione di dottorato, dissertazione dove, tra l'altro, si mostrava che le nuove acquisizioni teoriche conducevano a una spiegazione quantitativa dell'effetto Doppler, della riflessione su uno specchio mobile, della pressione delle radiazioni, giungendo a formule identiche a quelle ottenute dalla teoria ondulatoria.

6. Idee quantiche

I principi della meccanica ondulatoria non erano ancora sufficientemente noti quando si provò un'altra volta a superare le difficoltà teoriche nelle quali ci si dibatteva. Si tratta del tentativo promosso nel 1925 dal giovane fisico tedesco W. Heisenberg, che ben rapidamente si sviluppò attraverso i contributi di M. Born ed E.P. Jordan.

Scolaro di Sommerfeld, Heisenberg era molto sensibile alla direzione impressa alla ricerca da Bohr, tanto che aveva dedicato i suoi lavori al principio di corrispondenza. Non è dunque un caso che la teoria di Heisenberg si sviluppi, appunto, attraverso una serrata riflessione sul rapporto tra il principio di corrispondenza e l'atteggiamento che deve essere assunto nei riguardi dei problemi sollevati dalla scienza fisica. Questo atteggiamento può essere espresso nei seguenti termini: la costruzione di una teoria fisica comporta necessariamente l'eliminazione sistematica di tutte quelle grandezze che, nel dominio specifico entro il quale si opera, non sono o non possono essere accessibili per esperienza; insomma, non sono ridicibili al dato empirico. La scienza ha a che fare solo con grandezze osservabili. Nelle elaborazioni teoriche espresse fino a quel momento erano state inserite traiettorie, posizioni, velocità di un elettrone; ma, si chiede ironicamente Heisenberg, qualcuno ha mai visto un elettrone? Dell'atomo, all'epoca, si conoscevano solo gli stati stazionari, le transizioni tra questi ultimi, l'energia emessa o assorbita nel corso delle transizioni: ogni teoria che seriamente avesse inteso esser tale, avrebbe così dovuto tener conto solo di queste grandezze. Il guaio era che le nozioni in grado di collegarsi con l'esperienza, a causa della discontinuità quantica non possono essere espresse con le note e correnti funzioni continue. Si rendeva necessario e indispensabile un nuovo formalismo, Heisenberg lo sapeva bene; non è anzi improbabile che proprio il principio di corrispondenza lo abbia ispirato nella creazione di un nuovo linguaggio. In effetti, la teoria classica esprime ogni grandezza legata a un sistema quantizzato con sviluppi in serie di Fourier ma, dal canto suo, la teoria dei quanti scompone la stessa grandezza in elementi che corrispondono alle transizioni atomiche. Alla luce del principio di corrispondenza, le due procedure dovranno perciò tendere asintoticamente a confondersi per un grandissimo numero di quanti. Heisenberg ebbe così l'idea di frammentare ogni grandezza per poi rappresentarla con

una tabella di numeri molto somigliante a ciò che matematicamente si dice matrice. Si trattava, a questo punto, di individuare le regole per il calcolo, cosa che Heisenberg fece puntualmente rinvenendole proprio nelle matrici matematiche, peraltro fino a quel momento inutilizzate in fisica. Si tratta di regole, è bene precisarlo e chiarirlo in vista di quanto si dirà in seguito, che sono diverse rispetto a quelle dell'algebra ordinaria. Un esempio di questa diversità ci è offerto dalla proprietà commutativa. In genere, il prodotto di una matrice per una seconda matrice non è uguale al prodotto della seconda matrice per la prima, ma dipende dall'ordine dei fattori. Si tratta di una caratteristica particolarmente rilevante perché ai numeri ordinari della meccanica classica, che rappresentano delle grandezze, si sostituiranno dei numeri quantici il cui prodotto non è commutativo. Nel suo schema, Heisenberg introdusse anche la costante di Planck in modo tale che nei fenomeni macroscopici, dove h è piccolo, il prodotto delle grandezze meccaniche è sempre permutabile. In questo modo si torna alla meccanica classica.

I risultati ottenuti dalla nuova teoria non potevano non suscitare entusiasmo, visto che si dava prova dell'esistenza degli stati stazionari a energia quantizzata, si calcolava il livello energetico dell'oscillatore lineare dell'atomo di idrogeno; non meno favore incontrava il rigore e la precisione del formalismo. Per converso, si avvertiva con preoccupazione la difficoltà dell'astrattezza peculiare della nuova teoria, che al concetto fisico aveva sostituito il simbolo matematico. Il lavoro di De Broglie aveva nel frattempo attirato l'attenzione di E. Schrödinger, in quegli anni docente a Zurigo. Intorno al 1926, Schrödinger giunse per primo a stabilire l'equazione esplicita delle onde della meccanica ondulatoria; da essa riuscì a dedurre un metodo rigoroso per lo studio dei problemi della quantizzazione. La particolarità di questa equazione sta nel fatto di annoverare tra i suoi coefficienti anche dei numeri immaginari.

Dal punto di vista della teoria classica, le equazioni di propagazione per le onde sono sempre reali e le eventuali e possibili sostituzioni con numeri complessi risultano sempre un artificio del calcolo. Nella funzione d'onda formulata da Schrödinger, e indicata dalla lettera greca ψ , i coefficienti immaginari sono ineliminabili, il che significa che sono connaturati al fenomeno che si vuol descrivere. Detto in termini se possibile ancor più chiari, se nella fisica classica le onde corrispondono alle vibrazioni di un mezzo la cui esistenza era reale, come nel caso dell'aria per le onde sonore, o semplice-

mente supposta, come nei casi dell'etere e della propagazione luminosa, l'onda della meccanica quantica non può essere considerata reale, ossia una realtà fisica che corrisponde alla vibrazione di qualche mezzo. Questa interpretazione, evidentemente, collima perfettamente con quanto aveva intuito de Broglie: a un'onda come quella associata, che non trasporta energia e che ha luogo in uno spazio rappresentativo pluridimensionale non è possibile riconoscere un'esistenza fisica, bensì un'esistenza fittizia. Si tratta, insomma, di un'onda fantasma.

È opportuno precisare che l'equazione di Schrödinger, originata in ambiente newtoniano, era valida, conseguentemente, per corpuscoli di piccola velocità. Si rendevano perciò necessarie le opportune modifiche relativistiche per le grandi velocità. A ciò trovò rimedio il britannico P.A.M. Dirac che, dopo aver dimostrato la necessità di una maggiore generalizzazione, dette vita a una teoria fisica ancor più astratta e insolita della meccanica ondulatoria e quantica. Da questa teoria emerge, peraltro naturalmente, l'ipotesi dell'elettrone ruotante, ossia il fatto che l'elettrone, paragonato a una piccola sfera elettrizzata, ruota attorno a uno dei suoi diametri mostrando così un momento meccanico e un momento magnetico propri, il cosiddetto *spin*¹²⁴. La teoria di Dirac conciliava così, armonicamente, la relatività, i quanti e lo *spin*.

In virtù del lavoro svolto, Schrödinger era in grado di affrontare il problema degli stati stazionari di un sistema quantizzato, oltre a calcolare i valori dell'energia, ottenendo per lo più i risultati già registrati dalla vecchia teoria dei quanti; e se, in molti casi, i valori ottenuti si mostravano diversi, tali valori erano tuttavia più vicini alla conferma sperimentale. Ebbene, la meccanica quantica di Heisenberg giungeva ai medesimi risultati. Di ciò, ovviamente, non si poteva non restare che stupiti. Ma la coincidenza aveva alle sue spalle una ragione profonda, che Schrödinger comprese subito: vi era una sostanziale identità tra la meccanica ondulatoria e la meccanica quantica; quest'ultima non sarebbe che la trascrizione matematica della prima, con il vantaggio di condurre spesso più rapidamente al risultato, ma con il limite di essere certamente meno intuibile e più complicata nel formalismo.

Orbene, elaborando la propria posizione, provando che anche la

¹²⁴ Dall'inglese *to spin* (girare). Che l'elettrone presentasse una simile caratteristica lo avevano sostenuto nel 1925 i fisici Uhlenbeck e Goudsmit.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

ni atomici non sono descrivibili *tout court* nella nostra lingua. Bisogna abituarsi all'idea di rinunciare al concetto di un punto materiale precisamente localizzato nello spazio e nel tempo. Alleggerita in questo modo da ogni inutile orpello, la fisica può dare di un corpuscolo o l'esatta posizione nello spazio, cui però fa seguito una completa indeterminazione nel tempo, o un'esatta posizione nel tempo alla quale segue, simmetricamente, un'altrettanto completa indeterminazione nello spazio. Volendo esser più precisi dovremmo anzi dire che la fisica può solo dirci, quando ciò è possibile, quale *probabilità* abbiamo di trovare, in un certo istante, l'ente che chiamiamo corpuscolo in un volume di spazio rappresentativo, che non necessariamente si identifica con lo spazio reale. I salti quantici impongono questa conseguenza.

Questa indeterminazione fu assunta da Heisenberg, con il plauso di Bohr, nel 1927. Il nuovo corso della scienza fisica sarebbe stato caratterizzato dal principio di indeterminazione del quale lo stesso Bohr offrì un'agevole spiegazione attraverso un esperimento mentale.

Poniamo il caso di voler determinare, in un certo preciso istante, la posizione e la quantità di moto di un elettrone. La procedura seguita consiste nell'illuminare l'elettrone con un fascio di fotoni. L'urto che ne consegue ci permette di stabilire la posizione dell'elettrone a meno di una lunghezza d'onda del fotone impiegato. Evidentemente, tutto questo ci suggerisce che sarà opportuno impiegare fotoni con una piccola lunghezza d'onda, sicché

di frequenza elevata, di alta energia $h\nu$ e di quantità di moto $\frac{h\nu}{c}$.

Solo che, in questo modo, il fotone altera ancor più la quantità di moto del nostro elettrone. Per poter localizzare precisamente l'elettrone, il fotone dovrebbe avere una frequenza infinita, col risultato che sarebbe infinita anche la sua quantità di moto: la quantità di moto dell'elettrone resterebbe di conseguenza indeterminata. Se, per converso, è la quantità di moto che ci interessa, allora sarà proprio la posizione dell'elettrone a rimanere indeterminata. Così, se Δq è l'incertezza nella determinazione della posizione, e Δp la rispettiva incertezza nella determinazione della quantità di moto, avremo sempre

$$\Delta q \Delta p \geq h.$$

Che le grandezze considerate siano q e p è irrilevante: potremmo assumere le grandezze E e t , cioè l'energia e il tempo, ma giungerem-

mo in ogni caso a una disuguaglianza analoga a quella espressa. Sono queste le famose relazioni d'indeterminazione o d'incertezza della meccanica quantica. Si faccia ora attenzione: quando si afferma che il principio fondamentale della meccanica quantica si basa sulla constatazione che ogni strumento o metodo di misura altera in modo imprevedibile la grandezza che si vuol misurare, non si intende semplicemente riaffermare che vi sarà sempre, qualunque sia la raffinatezza degli strumenti o delle procedure di misurazione, un ineliminabile margine di errore. Qui si sostiene, ancor più radicalmente, che non possiamo considerare nullo l'errore se non indichiamo, al contempo, qual è o potrebbe essere la procedura che ci porterebbe a una misura priva di errore. Ma, dal momento che una simile procedura non sussiste, siamo costretti a convenire che non vi è alcuna grandezza fisica che possa essere esattamente misurabile se non a svantaggio dell'assoluta indeterminazione di un'altra grandezza fisica a essa legata. Dice Heisenberg:

Quando non occorre che una precisione relativamente scarsa è certo possibile anche parlare del luogo e della velocità di un elettrone, e questa precisazione, se adottiamo come criterio gli oggetti della nostra vita quotidiana, è già straordinariamente grande. Se invece teniamo conto della piccolezza degli atomi, questa precisione è scarsa, e una legge naturale caratteristica di questo mondo in piccolo ci impedisce di conoscere il luogo e la velocità di una particella con la precisione che vogliamo. Si possono bensì eseguire esperimenti che ci permettano di stabilire con grande precisione il luogo di una particella, ma per compiere queste misurazioni, noi dobbiamo esporre la particella a una forte azione esterna, sì che ne segue una grande indeterminazione della sua velocità. La natura dunque si sottrae ad una precisa fissazione dei nostri concetti intuitivi, per l'inevitabile perturbazione che è collegata con ogni osservazione. Mentre in origine lo scopo di ogni indagine scientifica era quello di descrivere possibilmente la natura come essa sarebbe di per sé, vale a dire senza il nostro intervento e senza la nostra osservazione, ora noi comprendiamo che proprio questo scopo è irraggiungibile. Nella fisica atomica non è possibile astrarre in alcuna maniera dalle modificazioni che ogni osservazione produce nell'oggetto osservato¹²⁶.

¹²⁶ W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, Bollati Boringhieri, Torino 2000, pp. 97-98.

Com'è facile capire, sulla nozione di conoscenza scientifica della realtà così come essa è, viene a determinarsi una frattura estremamente profonda. Per Heisenberg, Bohr, Born, e la maggior parte dei fisici di quel periodo, e non solo, non ha alcun significato parlare di una realtà che è indipendente dall'osservatore. A questa posizione si opposero orgogliosamente i sostenitori della concezione classica a partire da Planck e, come vedremo, dallo stesso Einstein. Afferma infatti il padre della nozione di quanto di luce:

Il fondamento e la condizione preliminare di ogni scienza veramente fertile è l'ipotesi metafisica, certo non giustificabile per via puramente logica, ma che la logica non potrà nemmeno mai controbattere, dell'esistenza di un mondo esterno, a sé, completamente indipendente da noi, per quanto noi non ne possiamo avere conoscenza diretta che attraverso i nostri sensi. È come se noi potessimo osservare un oggetto soltanto per mezzo di occhiali il cui colore fosse un po' diverso da persona a persona. Non ci verrebbe certo in mente di attribuire ai nostri occhiali tutte le proprietà dell'immagine percepita, per quanto nel formare il nostro giudizio sull'oggetto, noi ci preoccupiamo di stabilire fino a che punto il colore con cui esso ci appare è prodotto dai nostri occhiali. Analogamente il pensiero scientifico esige per prima cosa che si riconosca e si esegua la distinzione tra il mondo esteriore e il mondo interiore. Le singole scienze non si sono mai preoccupate di giustificare questo salto nel trascendentale, ed hanno fatto bene. Se si fossero comportate altrimenti non avrebbero fatto così rapidi progressi; e poi, ciò che più importa, una confutazione non era e non sarà mai da temersi, perché questioni di tale genere non possono venire risolte col ragionamento¹²⁷.

A ben vedere, nell'atteggiamento filosofico assunto da Heisenberg e da Bohr è implicita una seconda, grave, conseguenza: la negazione del fondamentale principio di causalità. I motivi sono chiari. Chi investiga la natura, il fisico, ha sempre legato la nozione di causa con la possibilità di prevedere gli eventi futuri. Ora, il fatto che nessuna misura possa essere considerata esatta, nel senso che è stato in precedenza spiegato, implica che nessuna previsione calcolata in precedenza può concordare esattamente con il risultato della misura, sicché diventa impossibile prevedere esattamente un fenomeno

¹²⁷ M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, Torino 2002, p. 135.

fisico. La conclusione è che in natura non ci sono leggi rigorose, sottomesse a un principio di causalità ma solo regole con un altissimo grado di approssimazione, e per questo mai assolutamente certe. E ancora una volta Planck ribatterà:

Indubbiamente la legge causale non è dimostrabile per via logica, non è quindi né vera, né falsa; ma è un principio euristico, una guida, la guida più preziosa che noi possediamo se vogliamo orientarci nel groviglio degli eventi e conoscere la direzione in cui deve procedere la ricerca scientifica per giungere a risultati fecondi¹²⁸.

Di fronte alle relazioni di indeterminazione, Bohr espresse una sua particolare posizione che si sviluppa semplicemente a partire dall'interrogativo che, queste stesse relazioni, non possono non suscitare. Come mai, si chiese Bohr, se ci vogliamo rappresentare un ente come l'elettrone, il fotone, eccetera, possiamo impiegare tranquillamente, cioè senza timore di cadere in contraddizione, due modelli antitetici quali quello corpuscolare e quello ondulatorio? Una volta dimostrato, proprio in virtù delle relazioni d'indeterminazione, che non si dà contraddizione perché nel momento in cui si spinge a fondo la precisazione di un modello l'altro sfuma sempre più nell'indistinto e viceversa, sicché non sono mai entrambi presenti allo stesso grado di distinzione, la conclusione da trarre non può che essere la seguente. L'elettrone, o il fotone, hanno due aspetti che, se si presentassero contemporaneamente, si escluderebbero necessariamente; ma, dal momento che se si dà l'uno non si dà l'altro, pur escludendosi si completano, sono perciò due aspetti complementari. È questo il famoso *principio di complementarità*, destinato a divenire una delle caratteristiche fondamentali della nuova scienza fisica.

8. Onde di probabilità

La fisica classica aveva introdotto, nel dominio di studio dell'evoluzione dei gas, delle leggi probabilistiche, ossia delle leggi statistiche, come sintesi di leggi individuali e causali. L'atteggiamento della fisica quantica è, su questo piano, completamente diverso: non si dà alcuna enumerazione di casi singoli cui far seguire una legge statistica; quest'ultima è data immediatamente e si applica, si

¹²⁸ Ivi, p. 292.

badi bene, non a enti individuali, ad esempio alla velocità o posizione di una particella per predirne il percorso, ma ad aggregati o moltitudini. Così, quando una legge statistica viene applicata a un singolo individuo, le uniche predizioni che potremo fare circa il comportamento di quel dato individuo hanno solo il carattere della probabilità.

Orbene, sul piano della meccanica ondulatoria abbiamo precedentemente constatato che all'onda associata al corpuscolo non si riconosce alcuna esistenza o realtà fisica. Quale significato potremo allora attribuirle? Sappiamo che, dal punto di vista classico, l'energia luminosa si suppone segua una distribuzione spaziale che è proporzionale all'intensità dell'onda. Consideriamo ora la possibilità di inserire in questo contesto il concetto di fotone. L'introduzione del nuovo concetto implica che l'intensità dell'onda è, punto per punto, proporzionale al numero di fotoni che vi giungono. I dati sperimentali, sorprendentemente, mostrano però che nei fenomeni di interferenza con luci molto deboli i fotoni giungono al dispositivo dove avviene l'interferenza singolarmente, e non a fasci. La conclusione che allora si è costretti a trarre è che l'intensità dell'onda associata al fotone rappresenta, in ogni punto, la probabilità che l'elettrone vi si trovi. Lo stesso possiamo dire per quanto riguarda l'elettrone. Nel 1927, Bohr e Heisenberg chiamarono la funzione ψ onda di probabilità. A onor del vero, bisogna aggiungere che i due ammettevano l'esistenza del corpuscolo e dell'onda ψ , ma il corpuscolo non avrebbe né posizione, né velocità, né traiettoria determinate: esso può rivelarsi in una certa posizione o con una certa velocità solo nell'istante di una misura o di un'osservazione; l'onda ψ rappresenta allora la probabilità della presenza o della velocità in un certo punto dello spazio o in un certo istante del tempo. In definitiva, il corpuscolo non è più localizzato nello spazio e nel tempo, ma diviene un insieme di probabilità o potenzialità, mentre l'onda ψ non è che una rappresentazione di probabilità.

La posizione di Einstein sull'intera questione si afferma gradualmente come un dissidio profondo, insanabile, proprio perché radicato nella stessa possibilità che, come stiamo per mostrare, trasforma il nostro desiderio di conoscere in conoscenza scientifica.

DALLA RELATIVITÀ ALLA MECCANICA QUANTICA

1. Modelli atomici

Se allo scoccare del Novecento M. Planck aveva di fatto posto il fondamento della ricerca quantistica, dopo il 1905 la figura che più di ogni altra emergeva all'orizzonte della nuova frontiera speculativa era Albert Einstein che, subito dopo la memoria "rivoluzionaria", nel 1906 pubblicò un articolo sull'assorbimento del calore da parte dei solidi. L'attenzione e le energie che, di lì a poco, il giovane fisico tedesco dedicherà alla costruzione della teoria della relatività generale, non gli impedirono di ritornare, nei decenni successivi, sull'argomento tanto affascinante quanto problematico e travagliato dei quanti di luce: già nel 1917 elaborò infatti una memoria particolarmente importante intitolata *Quantentheorie der Strahlung* (*La teoria quantica della radiazione*).

Per ben comprendere l'intricata e sofferta marcia della ricerca sul versante delle nuove concezioni, e il ruolo in essa svolto dal Nostro, è necessario avere un quadro genetico di riferimento, che prende avvio dalla scoperta del nucleo atomico da parte del fisico sperimentale di origine neozelandese E. Rutherford.

Nei primi anni del Novecento la comunità dei fisici era, nella sua quasi totalità, propensa ad accettare il modello atomico proposto dal fisico britannico J.J. Thomson che, come ben sappiamo, aveva scoperto l'elettrone. Nella sua definitiva versione, l'atomo di Thomson conterrebbe numerosi elettroni, la cui carica negativa sarebbe comunque compensata; il problema era quello di determinare che cosa rende possibile il fatto che lo spazio, attraverso il quale si diffondono gli elettroni, si comporti come se fosse detentore di una carica positiva uguale alla carica negativa della somma di tutti gli elettroni, dunque in grado di equilibrare l'intero sistema. A questo modello, elaborato nel 1891, poco tempo dopo Lord Kelvin conferì un carattere meno oscuro. In effetti, nel 1901, Kelvin suppose anzitutto un fluido elettrico negativo costituito da elettroni che permeano liberamente

non solo lo spazio libero di atomi, ma addirittura l'atomo stesso. Con una seconda assunzione, Kelvin postulava un'attrazione tra l'atomo della materia ordinaria e un elettrone che sarebbe regolata dalla legge secondo cui mentre l'attrazione su un elettrone esterno è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due centri, quello dell'atomo e quello dell'elettrone, internamente l'attrazione dell'atomo nei riguardi dell'elettrone interno a esso è direttamente proporzionale alla distanza tra i rispettivi centri. Ciò consentiva non solo una distribuzione uniforme di elettricità positiva nello spazio occupato dall'atomo di materia ordinaria, ma anche la possibilità di distinguere due specie di elettricità: quella positiva, pensata come qualcosa di continuo, e quella negativa, vista come formata da grani. La materia ordinaria non elettrizzata è allora un insieme di atomi nel quale è presente un numero sufficiente di elettroni in grado di annullare le forze elettriche all'esterno. Il modello più semplice di atomo sarebbe così costituito da una distribuzione sferica uniforme di elettricità positiva con al centro un elettrone. La presenza di due o più elettroni genera sicuramente problemi di stabilità, ma Lord Kelvin non ritenne opportuno investigare ulteriormente la questione concludendo che, con buona probabilità, più elettroni si disporrebbero su superfici sferiche concentriche interne all'atomo, con moto rotatorio intorno al centro. Si poneva tuttavia, come è facile capire, una questione fondamentale: stando alla teoria elettromagnetica della luce, gli elettroni disposti nei termini appena espressi dovrebbero produrre sia onde elettromagnetiche sia un campo magnetico; ma in che modo si manifesterebbero questi due fenomeni? Fu Thomson che, per almeno una quindicina d'anni, aderì al modello che Kelvin aveva elaborato a partire dal suo iniziale progetto, si prese la briga di studiare, senza conseguire risultati apprezzabili, l'intera questione. Pur non superando il tribunale della critica e dell'esperimento, al modello concepito da Thomson deve essere riconosciuto in ogni caso il merito di aver tracciato una direzione assai precisa verso cui orientare gli sforzi, consentendo di mettere definitivamente a fuoco quelli che erano in realtà i veri problemi che richiedevano una celere quanto adeguata soluzione, ossia:

- a) numero e distribuzione degli elettroni rispetto alla massa dell'atomo;
- b) natura e distribuzione dell'elettricità positiva che compenserebbe la quantità totale negativa degli elettroni;
- c) natura e distribuzione della massa dell'atomo.

Si è visto che, come aveva lasciato intendere Lord Kelvin, all'interno dell'atomo dovrebbe trovar posto un nucleo centrale di elettricità positiva. Questo aspetto, al quale Thomson non dette rilievo, fu invece attentamente ripreso dal fisico giapponese H. Nagaoka nel 1904 in uno studio di particolare interesse¹²⁰. Sul modello di Saturno, si tentava di spiegare che il sistema atomico consiste di numerose particelle di massa uguale, disposte in cerchio a intervalli angolari uguali, che si respingono mutuamente con forze che devono essere considerate come inversamente proporzionali al quadrato della distanza tra le particelle. Al centro del cerchio si troverebbe una particella più grossa che attira le altre, che formano un anello, secondo la stessa legge.

Nel 1908, E. Marsden, allievo di Rutherford, e H. Geiger, colui che avrebbe in seguito concepito il rivelatore ancora oggi in uso per misurare le radiazioni, iniziarono a studiare sperimentalmente il passaggio di particelle α attraverso sottili foglie di oro. L'esito dell'osservazione strumentale offriva i seguenti risultati: la grande maggioranza delle particelle attraversa la foglia di metallo quasi in linea retta, proseguendo poi il proprio percorso come se non incontrasse alcun ostacolo opposto dalla materia; nell'ordine di grandezza pari a 1 su 10.000, la particella α viene fortemente deviata con un angolo maggiore a 90° .

Si trattava, evidentemente, di un urto tra la particella α e gli atomi della materia attraversata. Soltanto che, sia il modello atomico di Thomson sia quello di Nagaoka imponevano un radicale mutamento della nozione di urto tra gli atomi rispetto alla concezione derivata dalla teoria cinetica dei gas: non si può più parlare semplicemente di urto in senso meccanico, immaginando gli atomi alla stregua di sferette elastiche, perché quando due atomi vengono a incontrarsi, sicché le cariche elettriche si avvicinano, si manifestano importanti forze repulsive che influenzano decisamente, modificandole, le traiettorie originarie. È ben vero che, in via approssimativa, ossia considerando il fatto che gli urti di cui si parla sono fittizi, è possibile considerare come equivalenti le variazioni del moto degli atomi rispetto alle variazioni che si registrerebbero su un piano meccanico; ma al di là di questo, il modello di Thomson non era in grado di dare una spiegazione accet-

¹²⁰ Si tratta della memoria *On a Dynamical System Illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radioactivity*, comparsa sulla rivista "The Nature" nel 1904.

tabile del fenomeno scoperto da Marsden e Geiger. Di tutto ciò si rese ben conto Rutherford: la deflessione rilevata per alcune particelle α doveva essere messa in conto a una deviazione brusca subita dalla particella nel passaggio attraverso l'intenso campo elettrico dell'atomo o, necessariamente, all'urto con lo stesso. Se le cose stavano in questi termini, era necessario supporre nell'atomo un nocciolo centrale, un nucleo, di dimensioni estremamente ridotte, carico positivamente e contenente la maggior parte della massa atomica. Tutto andava, insomma, nella direzione tracciata dal modello di Nagaoka visto che in esso la deflessione si spiega agevolmente.

In effetti, seguendo il modello, la particella α attraversa l'atmosfera elettronica di un atomo di una foglia d'oro, si avvicina al corpo centrale, ma la grande forza di Coulomb che si origina tra le due cariche positive la devia, costringendola a descrivere un'orbita a cometa. Il guaio è che lo stesso modello di Nagaoka presenta un grave inconveniente.

La difficoltà sta nel fatto che, a differenza del modello di Thomson, quello di Nagaoka non prevede la presenza di elettroni nelle zone più profonde dell'atomo, come invece l'emissione di particelle β dei materiali radioattivi sembrerebbe richiedere. Sulla necessità di ammettere l'esistenza di elettroni nel nucleo atomico insistette in modo particolare Marie Curie, che li chiamò essenziali (nucleari, solo in seguito), perché la loro fuga implicherebbe la distruzione dell'atomo, distinguendoli dagli elettroni periferici, che possono staccarsi dall'atomo stesso senza tuttavia procurare modifiche di natura chimica. Per almeno vent'anni si continuò a considerare gli elettroni come essi stessi facenti parte dell'edificio atomico, attribuendo a essi una funzione coagulante tra le cariche positive del nucleo che la forza coulombiana tende a separare.

L'atomo concepito da Rutherford sarebbe dunque diviso in due rigide regioni: l'una interna, il vero e proprio nucleo, l'altra esterna, il sistema elettronico. Due regioni separate da una frontiera invalicabile, tanto che se i costituenti del nucleo non possono passare nella regione del sistema elettronico, un elettrone periferico non può penetrare nella regione nucleare. E non c'è dubbio che il maggior merito della ricerca dello scienziato di origine neozelandese stia nell'aver intuito che i fenomeni radioattivi hanno sede nel nucleo atomico e, soprattutto, nell'aver continuato a lavorare in questa di-

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

rezione, nonostante ciò fosse in aperto e palese contrasto con l'elettromagnetismo classico. Per quest'ultimo, in effetti, un elettrone ruotante emette continuamente un'onda elettromagnetica; ma l'emissione provoca, conseguentemente, una perdita continua di energia che costringe gradualmente l'elettrone ad avvicinarsi sempre più al nucleo fino a cadervi, neutralizzandolo o distruggendolo. Sicché, delle due l'una: o si rinuncia al modello per restare fedeli alla fisica classica, o si rinuncia a quest'ultima per avventurarsi nella ricerca di altri principi fisici in grado di giustificare il modello. *Tertium non datur!*

2. La teoria di Bohr

Per il secondo corno della divaricazione optò il fisico danese Niels Bohr. Ottenuto il dottorato in fisica presso l'Università di Copenaghen, Bohr si era trasferito in Inghilterra nel 1911 grazie al conseguimento di una sostanziosa borsa di studio. Inizialmente lavorò nel laboratorio di Thomson a Cambridge, ma l'anno successivo si trasferì al laboratorio di Rutherford, a Manchester. Dopo queste esperienze, tornato l'anno seguente in patria, Bohr intravvide la possibilità di salvare la stabilità dell'atomo planetario e, al contempo, di interpretare i fatti spettroscopici sulla base della teoria dei quanti che, come sappiamo, esclude che si dia un'emissione continua. Ecco come si esprime lo stesso Bohr a tal proposito:

Nella forma sotto la quale faremo uso in ciò che segue della teoria dei quanti, fonderemo le nostre considerazioni sul seguente postulato fondamentale: un sistema atomico che emette uno spettro formato di righe nitide può prendere un certo numero di stati distinti, che chiameremo stati stazionari; il sistema può esistere in un tale stato almeno durante qualche tempo, senza emettere radiazione, l'emissione avendo luogo solo attraverso un processo di transizione completa tra due stati stazionari, e allora la radiazione si compone sempre di un treno d'onde armoniche semplici. Nella teoria, la frequenza della radiazione emessa durante un processo di questa specie, non è determinata direttamente dal movimento degli elettroni nell'atomo, nella maniera che corrisponde alle idee della teoria classica dell'elettromagnetismo; la frequenza, invece, è semplicemente legata alla quantità totale di energia emessa durante il passaggio, essendo il prodotto della frequenza ν per

la costante h di Planck eguale alla differenza dei valori E' e E'' dell'energia dell'atomo nei due stadi interessati al processo, in modo che si abbia $h\nu = E' - E''$ ¹²¹.

Come si evince dal dettato del fisico danese, l'elettrone che ruota intorno al nucleo, da un lato, rispetta le leggi della meccanica, ma dall'altro, dal momento che durante la rotazione non emette alcuna radiazione, contravviene ai dettami dell'elettromagnetismo. Attraverso la meccanica classica abbiamo ancora la possibilità di considerare l'equilibrio dinamico di un sistema in stato stazionario e, una volta conosciuto il raggio dell'orbita, calcolare la velocità, la frequenza, nonché l'energia potenziale e totale dell'elettrone ruotante. Ma, ed ecco il punto davvero saliente, l'elettrone può collocarsi e disporsi solamente su un'orbita dove la differenza di energia è un multiplo intero del quanto di azione h . Ciò significa che l'elettrone non può saltare su qualsiasi orbita ma, solo ed esclusivamente su orbite quantizzate. Ne deriva che ogni atomo può assumere una serie di stati stazionari corrispondenti alle orbite particolari in cui si trova effettivamente l'elettrone. Così, se l'atomo si trova sempre in uno stato stazionario, al quale corrisponde un dato valore energetico, a ogni atomo corrisponderà una successione di valori relativi ai diversi stati stazionari che esso potrà assumere.

A Bohr non sfuggì neppure il fatto che un simile sistema planetario quantizzato non può essere interamente assimilato a un sistema astronomico. Il motivo di ciò è molto semplice: le leggi di gravitazione ci permettono di studiare e di spiegare il moto dei pianeti con un'approssimazione piuttosto elevata, ma non ci permettono di prevedere le orbite degli stessi pianeti, che invece dipendono dalla storia del sistema planetario stesso. Di conseguenza, se in un sistema planetario le orbite restano costanti, in un sistema come quello elettronico sono destinate al cambiamento.

Una volta impostata la teoria su basi che, per buona parte, si richiamavano alla fisica classica, Bohr suppose che le orbite elettroniche avessero una conformazione perfettamente circolare, e riuscì a calcolare il raggio dell'orbita minore, indicata con I , che risultò uguale al raggio atomico come contemplato dalla teoria cinetica

¹²¹ N. Bohr, *Atomes et electron*, Rapport et discussion du Conseil de Physique tenue à Bruxelles du 1^{er} au 6 avril 1921, Paris 1923, p. 230.

dei gas. Il passo successivo fu quello di applicare l'apparato teorico messo a punto al più semplice modello atomico conosciuto in natura, cioè l'atomo di idrogeno, che appunto è costituito da un nucleo di massa I , da una carica positiva e da un solo elettrone, carica negativa, ruotante. Fu un vero e proprio successo. Se, da un lato, la teoria di Bohr offriva un'ulteriore conferma all'ipotesi che voleva l'atomo provvisto di un nucleo, dall'altro apriva le porte, consentendone di fatto l'inserimento nella stessa teoria atomica, all'ipotesi dei quanti. Le difficoltà si fecero però insormontabili allorché il fisico danese tentò audacemente di applicare la propria teoria a modelli atomici via via più complessi rispetto al modello iniziale. Non è inutile, bensì doveroso, precisare che all'epoca in cui Bohr costruì il suo modello teorico, cioè nel 1913, dal punto di vista prettamente tecnico, cioè matematico, si era in grado di quantizzare solo i moti che dipendevano da una singola variabile. Proprio per questo motivo, il fisico danese si era fatto carico della responsabilità di assumere che le orbite degli elettroni periferici fossero circolari, ben sapendo di essere in contrasto con la meccanica che voleva le orbite elettroniche disegnate come le ellissi di kepleriana memoria. Solo che per definire la posizione di un punto su un'ellisse servono due valori, sicché quantizzare orbite ellittiche significava poter essere capaci di quantizzare i moti definiti da due variabili.

Un tentativo nella direzione tesa a superare la difficoltà matematica fu percorso intorno al 1916 da Wilson e da Sommerfeld che elaborarono un metodo che, appunto, avrebbe dovuto rendere possibile la quantizzazione di sistemi definiti da più di una variabile. Sommerfeld applicò il metodo al modello atomico di Bohr, ma con scarsi risultati. Peraltro, Sommerfeld si rese conto che il fisico danese, rimanendo ancorato alla meccanica classica, aveva trascurato il fatto che la velocità prevista per l'elettrone era troppo alta sicché la sua massa, come la relatività insegnava, non poteva restare costante. Si rendevano dunque necessarie delle correzioni in senso relativistico. Ebbene, con l'inserimento della massa relativistica dell'elettrone, che appunto varia con la velocità, l'orbita elettronica risultava un'ellisse che ruota nel proprio piano intorno al fuoco occupato dal nucleo dell'atomo. Nonostante i correttivi apportati da Sommerfeld, il problema costituito dagli atomi con più elettroni periferici restava inalterato.

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

3. Il principio di corrispondenza

Le critiche mosse alla teoria elaborata da Bohr, sebbene di carattere generale, erano assai gravi e, soprattutto, motivate. La teoria elettromagnetica classica offriva una descrizione esatta della radiazione: di un'onda monocromatica si dava sia la frequenza sia l'intensità e lo stato di polarizzazione. La teoria di Bohr si limitava solo a fornire i valori della frequenza. Di più, si palesava uno stridente contrasto perché se, da un lato, l'azione tra il nucleo era concepita con i canoni classici, dall'altro, sulla base della classicità si incuneava violentemente l'avanguardia quantica. La situazione era insomma la seguente: la meccanica classica non è in grado di dare una descrizione dei salti orbitali dell'elettrone, eppure quest'ultimo, negli stati stazionari, obbedisce alle regole classiche, anche se non irradia energia come richiesto dall'elettromagnetismo. Il verdetto critico non poteva che essere severo: la teoria di Bohr mostra una grave incongruenza perché trae linfa iniziale dal contesto classico e finisce per giungere a conclusioni evidentemente incompatibili con il contesto dal quale si origina. Il fisico era ben consapevole della situazione. In attesa di tempi migliori, cercò di limitare i danni con una mossa davvero geniale: l'introduzione di alcuni criteri orientativi per la ricerca che, non a caso, si riveleranno molto importanti per gli studi a seguire. Uno di questi criteri è il famoso principio euristico di corrispondenza, formulato nel 1918. Per il *principio di corrispondenza*, il concetto guida che deve presiedere l'elaborazione di una teoria è il seguente: a valori via via più elevati conferiti ai numeri dei quanti l'irraggiamento tende, in modo asintotico, all'irraggiamento che il sistema emetterebbe se esso seguisse i canoni classici. Per dirla in altro modo, quando il quanto d'azione tende a zero, e dunque la discontinuità tende a scomparire, le eventuali teorie fisiche avanzate devono avvicinarsi sempre più alle leggi classiche. Benché inesatta, la fisica classica continuava ad assolvere un ruolo nella ricerca delle leggi dell'universo quantico che si stava dischiudendo.

4. Il contributo di Einstein

Siamo ora nella condizione di riprendere il discorso iniziale, allorché davamo notizia della memoria einsteiniana dedicata alla teoria quantica della radiazione. Possiamo farlo solo ora, perché in possesso delle nozioni e della problematica con la quale Ein-

stein doveva fare i conti. Il meccanismo introdotto da Bohr per l'emissione e l'assorbimento della radiazione imponeva infatti, di nuovo, la questione di dedurre la formula della radiazione nera alla luce delle nuove ipotesi. Il Nostro aveva seguito con interesse gli sviluppi imposti dallo scienziato danese, e aveva recepito con un certo compiacimento il principio di corrispondenza che, sotto un certo angolo visuale, poteva essere considerato come il primo passo effettivamente mosso nella direzione dell'inserimento della teoria dei quanti nella meccanica classica. Non sorprende così che in *Quantentheorie der Strahlung* il fisico tedesco formuli una risoluzione del problema e applichi all'atomo di Bohr i concetti di probabilità della legge di disintegrazione radioattiva. Detto in altri termini, come ogni atomo radioattivo esplosa in un momento imprevedibile con un processo che appare casuale, allo stesso modo la transizione di un elettrone in un atomo è del tutto non prevedibile; per questo, il fenomeno deve essere studiato secondo leggi statistiche, che possono essere formulate sulla base di due assunzioni. Anzitutto si deve assumere che, di fronte a un campo di radiazioni, la possibilità di transizione di un elettrone, sia nel senso dell'emissione sia dell'assorbimento, nell'unità di tempo è proporzionale all'intensità della radiazione; in secondo luogo, si deve assumere che laddove non ci sono perturbazioni esterne si assiste a una transizione spontanea degli elettroni da stati di energia più elevata a stati energetici più bassi, con una probabilità proporzionale, nell'unità di tempo, al numero di atomi inizialmente allo stato eccitato. In questo modo, la legge di emissione radioattiva viene trasferita nel fenomeno della radiazione. Sulla base di quanto espresso e approfondendo la teoria del moto browniano, Einstein ottiene la formula di Planck per la radiazione di corpo nero e, nel discutere il problema dello scambio d'impulso tra il sistema atomico e la radiazione, conclude che per ogni processo elementare di radiazione deve essere

emesso un impulso di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione del tutto casuale.

Questo esito acuiva ulteriormente ed evidentemente il dualismo tra onda e corpuscolo, dal momento che una simile descrizione del processo di emissione esclude la possibilità stessa di onde sferiche. E infatti, con un certo non celato rammarico, Einstein afferma:

Non esiste emissione di radiazione per onde sferiche. Nel processo elementare di emissione la molecola subisce un contrac-

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributatogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

colpo di valore $\frac{h\nu}{c}$ in una direzione che, allo stato attuale del-

la teoria, è determinata solo dal “caso”. Queste proprietà dei processi elementari (...) fanno apparire quasi inevitabile la costituzione di una vera e propria teoria quantica della radiazione. La debolezza della teoria sta, da una parte, nel fatto che essa non ci porta più vicini a un collegamento con la teoria ondulatoria e, dall'altra, nel fatto che essa lascia al “caso” l'istante e la direzione dei processi elementari; ciò nonostante io nutro piena fiducia nell'attendibilità della strada intrapresa¹²².

5. La meccanica ondulatoria

Orbene, il primo passo verso quella che propriamente verrà designata come meccanica quantica si sviluppò per merito di un giovane fisico francese, Louis de Broglie. Rampollo di una facoltosa e aristocratica famiglia, Louis aveva iniziato i suoi primi lavori nel laboratorio privato del fratello, Maurice, dove si svolgeva la ricerca più avanzata del periodo, ossia quella circa gli spettri dei raggi X e l'effetto fotoelettrico. Questi studi avevano naturalmente condotto il fisico francese a riflettere attentamente sulla natura della luce e sui lavori di Einstein sui quanti di luce, fino al punto di maturare un quadro problematico originale e interessante sia per gli sviluppi futuri sia per la sua semplicità. Ecco come de Broglie si esprime alla conferenza Nobel, in occasione dell'altissimo riconoscimento tributatogli.

Da una parte, la teoria dei quanti di luce non può essere considerata soddisfacente, perché definisce l'energia di un corpuscolo di luce con la relazione $W = h\nu$, dove figura la frequenza ν . Ora, una teoria puramente corpuscolare non contiene alcun elemento che permetta di definire una frequenza. Non fosse che per questa ragione, nel caso della luce bisogna introdurre simultaneamente l'idea di corpuscolo e l'idea di periodicità. D'altra parte, la determinazione dei movimenti stabili degli elettroni nell'atomo fa intervenire numeri interi, e finora i soli fenomeni per i quali i numeri interi intervengono in fisica erano i fenomeni d'interferenza e quelli di vibrazione propria¹²³.

¹²² A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, in “Physikalische Gesellschaft”, 16, 1917; trad. it., *Teoria quantica della radiazione*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 359.

¹²³ L. de Broglie, *Conférence Nobel prononcée à Stockholm, le 12 décembre 1929*, in *Les prix Nobel en 1929*, Stockholm 1929, p. 4.

La possibilità di offrire una sintesi teorica è quanto de Broglie mise a punto in tre note presentate all'*Académie des Sciences* di Parigi. Con lo sguardo ben orientato alle concezioni relativistiche, il fisico francese ipotizza che a ogni particella di massa o energia m_0 si leghi un fenomeno ondulatorio di frequenza n_0 , sicché si avrà:

$$h\nu_0 = m m_0 c^2$$

dove h è la costante di Planck e c la velocità della luce al quadrato. Per esser più chiari, ogni particella di materia sarebbe sede, ma anche sorgente, di una vibrazione intrinseca con una frequenza data dalla relazione appena espressa. Così, se la particella è in moto, la concezione relativistica ci fa concludere che la vibrazione, per un osservatore fisso che si sposta con una velocità maggiore rispetto a quella posseduta dalla particella, appare un'onda. Posto ciò, De Broglie studia il moto uniforme di un elettrone in una traiettoria chiusa e giunge a dimostrare che traiettorie quantizzate della teoria di Bohr-Sommerfeld possono essere interpretate come un effetto di risonanza dell'onda di fase sulla lunghezza delle traiettorie chiuse. In questo modo, se l'elettrone si muove in una curva chiusa, l'onda deve seguirlo e dovrebbe formarsi una specie di anello continuo di onde, sicché la lunghezza dell'anello dovrà essere uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Le orbite stazionarie saranno allora quelle orbite che contengono precisamente 1, 2, 3... lunghezze d'onda associate all'elettrone ruotante. Il calcolo dava ragione a De Broglie: le orbite erano proprio quelle proposte da Bohr.

Questa concezione fu applicata dallo stesso fisico francese al caso dei fotoni. Assumendo che la distribuzione dei fotoni è determinata dalle onde, si avranno quindi regioni oscure dove le onde si sovrappongono, il fisico francese delineava una teoria dei fenomeni d'interferenza e diffusione della luce. Di qui alla legge di Planck per la radiazione di corpo nero il passo era breve, e anch'essa fu acquisita come risultato.

Le tre brevi note di de Broglie, debitamente interpretate, diedero vita nel 1924 alla sua dissertazione di dottorato, dissertazione dove, tra l'altro, si mostrava che le nuove acquisizioni teoriche conducevano a una spiegazione quantitativa dell'effetto Doppler, della riflessione su uno specchio mobile, della pressione delle radiazioni, giungendo a formule identiche a quelle ottenute dalla teoria ondulatoria.

6. Idee quantiche

I principi della meccanica ondulatoria non erano ancora sufficientemente noti quando si provò un'altra volta a superare le difficoltà teoriche nelle quali ci si dibatteva. Si tratta del tentativo promosso nel 1925 dal giovane fisico tedesco W. Heisenberg, che ben rapidamente si sviluppò attraverso i contributi di M. Born ed E.P. Jordan.

Scolaro di Sommerfeld, Heisenberg era molto sensibile alla direzione impressa alla ricerca da Bohr, tanto che aveva dedicato i suoi lavori al principio di corrispondenza. Non è dunque un caso che la teoria di Heisenberg si sviluppi, appunto, attraverso una serrata riflessione sul rapporto tra il principio di corrispondenza e l'atteggiamento che deve essere assunto nei riguardi dei problemi sollevati dalla scienza fisica. Questo atteggiamento può essere espresso nei seguenti termini: la costruzione di una teoria fisica comporta necessariamente l'eliminazione sistematica di tutte quelle grandezze che, nel dominio specifico entro il quale si opera, non sono o non possono essere accessibili per esperienza; insomma, non sono riducibili al dato empirico. La scienza ha a che fare solo con grandezze osservabili. Nelle elaborazioni teoriche espresse fino a quel momento erano state inserite traiettorie, posizioni, velocità di un elettrone; ma, si chiede ironicamente Heisenberg, qualcuno ha mai visto un elettrone? Dell'atomo, all'epoca, si conoscevano solo gli stati stazionari, le transizioni tra questi ultimi, l'energia emessa o assorbita nel corso delle transizioni: ogni teoria che seriamente avesse inteso esser tale, avrebbe così dovuto tener conto solo di queste grandezze. Il guaio era che le nozioni in grado di collegarsi con l'esperienza, a causa della discontinuità quantica non possono essere espresse con le note e correnti funzioni continue. Si rendeva necessario e indispensabile un nuovo formalismo, Heisenberg lo sapeva bene; non è anzi improbabile che proprio il principio di corrispondenza lo abbia ispirato nella creazione di un nuovo linguaggio. In effetti, la teoria classica esprime ogni grandezza legata a un sistema quantizzato con sviluppi in serie di Fourier ma, dal canto suo, la teoria dei quanti scompone la stessa grandezza in elementi che corrispondono alle transizioni atomiche. Alla luce del principio di corrispondenza, le due procedure dovranno perciò tendere asintoticamente a confondersi per un grandissimo numero di quanti. Heisenberg ebbe così l'idea di frammentare ogni grandezza per poi rappresentarla con

una tabella di numeri molto somigliante a ciò che matematicamente si dice matrice. Si trattava, a questo punto, di individuare le regole per il calcolo, cosa che Heisenberg fece puntualmente rinvenendole proprio nelle matrici matematiche, peraltro fino a quel momento inutilizzate in fisica. Si tratta di regole, è bene precisarlo e chiarirlo in vista di quanto si dirà in seguito, che sono diverse rispetto a quelle dell'algebra ordinaria. Un esempio di questa diversità ci è offerto dalla proprietà commutativa. In genere, il prodotto di una matrice per una seconda matrice non è uguale al prodotto della seconda matrice per la prima, ma dipende dall'ordine dei fattori. Si tratta di una caratteristica particolarmente rilevante perché ai numeri ordinari della meccanica classica, che rappresentano delle grandezze, si sostituiranno dei numeri quantici il cui prodotto non è commutativo. Nel suo schema, Heisenberg introdusse anche la costante di Planck in modo tale che nei fenomeni macroscopici, dove h è piccolo, il prodotto delle grandezze meccaniche è sempre permutabile. In questo modo si torna alla meccanica classica.

I risultati ottenuti dalla nuova teoria non potevano non suscitare entusiasmo, visto che si dava prova dell'esistenza degli stati stazionari a energia quantizzata, si calcolava il livello energetico dell'oscillatore lineare dell'atomo di idrogeno; non meno favore incontrava il rigore e la precisione del formalismo. Per converso, si avvertiva con preoccupazione la difficoltà dell'astrattezza peculiare della nuova teoria, che al concetto fisico aveva sostituito il simbolo matematico. Il lavoro di De Broglie aveva nel frattempo attirato l'attenzione di E. Schrödinger, in quegli anni docente a Zurigo. Intorno al 1926, Schrödinger giunse per primo a stabilire l'equazione esplicita delle onde della meccanica ondulatoria; da essa riuscì a dedurre un metodo rigoroso per lo studio dei problemi della quantizzazione. La particolarità di questa equazione sta nel fatto di annoverare tra i suoi coefficienti anche dei numeri immaginari.

Dal punto di vista della teoria classica, le equazioni di propagazione per le onde sono sempre reali e le eventuali e possibili sostituzioni con numeri complessi risultano sempre un artificio del calcolo. Nella funzione d'onda formulata da Schrödinger, e indicata dalla lettera greca ψ , i coefficienti immaginari sono ineliminabili, il che significa che sono connaturati al fenomeno che si vuol descrivere. Detto in termini se possibile ancor più chiari, se nella fisica classica le onde corrispondono alle vibrazioni di un mezzo la cui esistenza era reale, come nel caso dell'aria per le onde sonore, o semplice-

mente supposta, come nei casi dell'etere e della propagazione luminosa, l'onda della meccanica quantica non può essere considerata reale, ossia una realtà fisica che corrisponde alla vibrazione di qualche mezzo. Questa interpretazione, evidentemente, collima perfettamente con quanto aveva intuito de Broglie: a un'onda come quella associata, che non trasporta energia e che ha luogo in uno spazio rappresentativo pluridimensionale non è possibile riconoscere un'esistenza fisica, bensì un'esistenza fittizia. Si tratta, insomma, di un'onda fantasma.

È opportuno precisare che l'equazione di Schrödinger, originata in ambiente newtoniano, era valida, conseguentemente, per corpuscoli di piccola velocità. Si rendevano perciò necessarie le opportune modifiche relativistiche per le grandi velocità. A ciò trovò rimedio il britannico P.A.M. Dirac che, dopo aver dimostrato la necessità di una maggiore generalizzazione, dette vita a una teoria fisica ancor più astratta e insolita della meccanica ondulatoria e quantica. Da questa teoria emerge, peraltro naturalmente, l'ipotesi dell'elettrone ruotante, ossia il fatto che l'elettrone, paragonato a una piccola sfera elettrizzata, ruota attorno a uno dei suoi diametri mostrando così un momento meccanico e un momento magnetico propri, il cosiddetto *spin*¹²⁴. La teoria di Dirac conciliava così, armonicamente, la relatività, i quanti e lo *spin*.

In virtù del lavoro svolto, Schrödinger era in grado di affrontare il problema degli stati stazionari di un sistema quantizzato, oltre a calcolare i valori dell'energia, ottenendo per lo più i risultati già registrati dalla vecchia teoria dei quanti; e se, in molti casi, i valori ottenuti si mostravano diversi, tali valori erano tuttavia più vicini alla conferma sperimentale. Ebbene, la meccanica quantica di Heisenberg giungeva ai medesimi risultati. Di ciò, ovviamente, non si poteva non restare che stupiti. Ma la coincidenza aveva alle sue spalle una ragione profonda, che Schrödinger comprese subito: vi era una sostanziale identità tra la meccanica ondulatoria e la meccanica quantica; quest'ultima non sarebbe che la trascrizione matematica della prima, con il vantaggio di condurre spesso più rapidamente al risultato, ma con il limite di essere certamente meno intuibile e più complicata nel formalismo.

Orbene, elaborando la propria posizione, provando che anche la

¹²⁴ Dall'inglese *to spin* (girare). Che l'elettrone presentasse una simile caratteristica lo avevano sostenuto nel 1925 i fisici Uhlenbeck e Goudsmit.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

materia presenta un aspetto ondulatorio, De Broglie aveva in un certo qual modo esteso, potremmo dire, il contrasto tra onda e corpuscolo. Tuttavia, il fisico francese intendeva effettivamente superare il dualismo attraverso una teoria sintetica che fosse in grado di mantenere gli aspetti tradizionali per le nozioni di onda e di corpuscolo e giungesse a considerare quest'ultimo come una sorta di singolarità dell'onda. Sebbene lo stesso Schrödinger fosse a pieno titolo inserito nella tradizione classica e determinista, la sua soluzione della dualità onda-corpuscolo fu assai più radicale, e diversa, rispetto a quella di De Broglie: solo le onde potrebbero rivendicare una realtà fisica. I corpuscoli, da parte loro, non sarebbero dotati di esistenza oggettiva, ma sarebbero apparenze del fenomeno della propagazione luminosa, dei piccoli treni d'ombra. Quest'interpretazione non ebbe grande seguito; anzi, De Broglie e lo stesso Einstein la rifiutarono sulla base del fatto che i pacchetti d'onda tendono a sparpagliarsi nello spazio, sicché non possono rappresentare il corpuscolo, che preserva propriamente una prolungata stabilità. In sua difesa Schrödinger fece notare che "la cosa che si è sempre chiamata particella e che è ancora, per la forza dell'abitudine, chiamata con un nome di questo genere, non è certamente un'entità individualmente identificabile, qualunque cosa possa essere"¹²⁵. E aggiungeva che converrebbe riconsiderare un'interpretazione come quella sotto accusa, meno ingenua e più sofisticata, ma non per questo meno accettabile e condivisibile dalla nostra mentalità.

7. Il principio di indeterminazione

Si è già accennato all'atteggiamento di fondo assunto da Heisenberg fin dal 1925: la fisica dovrebbe rinunciare all'indagine esplicativa e all'elaborazione di modelli. Niente di nuovo sotto il sole, potremmo dire, sul piano filosofico. Come ci si era opposti alla teoria atomica della materia, considerandola una concezione troppo ingenua, quasi rozza, così ora, in un periodo di evidente difficoltà, si dichiara che la crisi della fisica sta nell'ingenua rappresentazione dell'elettrone come un punto materiale, un corpuscolo, appunto, della meccanica classica. Ebbene, Heisenberg pensò di superare il dissidio tra onda e corpuscolo osservando che, consenzienti o meno, i fenome-

¹²⁵ E. Schrödinger, *The Meaning of Wave Mechanics*, in AA.VV., *Louis de Broglie: physicien et penseur*, Albin Michel, Paris 1953, p. 24.

ni atomici non sono descrivibili *tout court* nella nostra lingua. Bisogna abituarsi all'idea di rinunciare al concetto di un punto materiale precisamente localizzato nello spazio e nel tempo. Alleggerita in questo modo da ogni inutile orpello, la fisica può dare di un corpuscolo o l'esatta posizione nello spazio, cui però fa seguito una completa indeterminazione nel tempo, o un'esatta posizione nel tempo alla quale segue, simmetricamente, un'altrettanto completa indeterminazione nello spazio. Volendo esser più precisi dovremmo anzi dire che la fisica può solo dirci, quando ciò è possibile, quale *probabilità* abbiamo di trovare, in un certo istante, l'ente che chiamiamo corpuscolo in un volume di spazio rappresentativo, che non necessariamente si identifica con lo spazio reale. I salti quantici impongono questa conseguenza.

Questa indeterminazione fu assunta da Heisenberg, con il plauso di Bohr, nel 1927. Il nuovo corso della scienza fisica sarebbe stato caratterizzato dal principio di indeterminazione del quale lo stesso Bohr offrì un'agevole spiegazione attraverso un esperimento mentale.

Poniamo il caso di voler determinare, in un certo preciso istante, la posizione e la quantità di moto di un elettrone. La procedura seguita consiste nell'illuminare l'elettrone con un fascio di fotoni. L'urto che ne consegue ci permette di stabilire la posizione dell'elettrone a meno di una lunghezza d'onda del fotone impiegato. Evidentemente, tutto questo ci suggerisce che sarà opportuno impiegare fotoni con una piccola lunghezza d'onda, sicché

di frequenza elevata, di alta energia $h\nu$ e di quantità di moto $\frac{h\nu}{c}$.

Solo che, in questo modo, il fotone altera ancor più la quantità di moto del nostro elettrone. Per poter localizzare precisamente l'elettrone, il fotone dovrebbe avere una frequenza infinita, col risultato che sarebbe infinita anche la sua quantità di moto: la quantità di moto dell'elettrone resterebbe di conseguenza indeterminata. Se, per converso, è la quantità di moto che ci interessa, allora sarà proprio la posizione dell'elettrone a rimanere indeterminata. Così, se Δq è l'incertezza nella determinazione della posizione, e Δp la rispettiva incertezza nella determinazione della quantità di moto, avremo sempre

$$\Delta q \Delta p \geq h.$$

Che le grandezze considerate siano q e p è irrilevante: potremmo assumere le grandezze E e t , cioè l'energia e il tempo, ma giungerem-

mo in ogni caso a una disuguaglianza analoga a quella espressa. Sono queste le famose relazioni d'indeterminazione o d'incertezza della meccanica quantica. Si faccia ora attenzione: quando si afferma che il principio fondamentale della meccanica quantica si basa sulla constatazione che ogni strumento o metodo di misura altera in modo imprevedibile la grandezza che si vuol misurare, non si intende semplicemente riaffermare che vi sarà sempre, qualunque sia la raffinatezza degli strumenti o delle procedure di misurazione, un ineliminabile margine di errore. Qui si sostiene, ancor più radicalmente, che non possiamo considerare nullo l'errore se non indichiamo, al contempo, qual è o potrebbe essere la procedura che ci porterebbe a una misura priva di errore. Ma, dal momento che una simile procedura non sussiste, siamo costretti a convenire che non vi è alcuna grandezza fisica che possa essere esattamente misurabile se non a svantaggio dell'assoluta indeterminazione di un'altra grandezza fisica a essa legata. Dice Heisenberg:

Quando non occorre che una precisione relativamente scarsa è certo possibile anche parlare del luogo e della velocità di un elettrone, e questa precisazione, se adottiamo come criterio gli oggetti della nostra vita quotidiana, è già straordinariamente grande. Se invece teniamo conto della piccolezza degli atomi, questa precisione è scarsa, e una legge naturale caratteristica di questo mondo in piccolo ci impedisce di conoscere il luogo e la velocità di una particella con la precisione che vogliamo. Si possono bensì eseguire esperimenti che ci permettano di stabilire con grande precisione il luogo di una particella, ma per compiere queste misurazioni, noi dobbiamo esporre la particella a una forte azione esterna, sì che ne segue una grande indeterminazione della sua velocità. La natura dunque si sottrae ad una precisa fissazione dei nostri concetti intuitivi, per l'inevitabile perturbazione che è collegata con ogni osservazione. Mentre in origine lo scopo di ogni indagine scientifica era quello di descrivere possibilmente la natura come essa sarebbe di per sé, vale a dire senza il nostro intervento e senza la nostra osservazione, ora noi comprendiamo che proprio questo scopo è irraggiungibile. Nella fisica atomica non è possibile astrarre in alcuna maniera dalle modificazioni che ogni osservazione produce nell'oggetto osservato¹²⁶.

¹²⁶ W. Heisenberg, *Mutamenti nelle basi della scienza*, Bollati Boringhieri, Torino 2000, pp. 97-98.

Com'è facile capire, sulla nozione di conoscenza scientifica della realtà così come essa è, viene a determinarsi una frattura estremamente profonda. Per Heisenberg, Bohr, Born, e la maggior parte dei fisici di quel periodo, e non solo, non ha alcun significato parlare di una realtà che è indipendente dall'osservatore. A questa posizione si opposero orgogliosamente i sostenitori della concezione classica a partire da Planck e, come vedremo, dallo stesso Einstein. Afferma infatti il padre della nozione di quanto di luce:

Il fondamento e la condizione preliminare di ogni scienza veramente fertile è l'ipotesi metafisica, certo non giustificabile per via puramente logica, ma che la logica non potrà nemmeno mai controbattere, dell'esistenza di un mondo esterno, a sé, completamente indipendente da noi, per quanto noi non ne possiamo avere conoscenza diretta che attraverso i nostri sensi. È come se noi potessimo osservare un oggetto soltanto per mezzo di occhiali il cui colore fosse un po' diverso da persona a persona. Non ci verrebbe certo in mente di attribuire ai nostri occhiali tutte le proprietà dell'immagine percepita, per quanto nel formare il nostro giudizio sull'oggetto, noi ci preoccupiamo di stabilire fino a che punto il colore con cui esso ci appare è prodotto dai nostri occhiali. Analogamente il pensiero scientifico esige per prima cosa che si riconosca e si esegua la distinzione tra il mondo esteriore e il mondo interiore. Le singole scienze non si sono mai preoccupate di giustificare questo salto nel trascendentale, ed hanno fatto bene. Se si fossero comportate altrimenti non avrebbero fatto così rapidi progressi; e poi, ciò che più importa, una confutazione non era e non sarà mai da temersi, perché questioni di tale genere non possono venire risolte col ragionamento¹²⁷.

A ben vedere, nell'atteggiamento filosofico assunto da Heisenberg e da Bohr è implicita una seconda, grave, conseguenza: la negazione del fondamentale principio di causalità. I motivi sono chiari. Chi investiga la natura, il fisico, ha sempre legato la nozione di causa con la possibilità di prevedere gli eventi futuri. Ora, il fatto che nessuna misura possa essere considerata esatta, nel senso che è stato in precedenza spiegato, implica che nessuna previsione calcolata in precedenza può concordare esattamente con il risultato della misura, sicché diventa impossibile prevedere esattamente un fenomeno

¹²⁷ M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, Torino 2002, p. 135.

fisico. La conclusione è che in natura non ci sono leggi rigorose, sottomesse a un principio di causalità ma solo regole con un altissimo grado di approssimazione, e per questo mai assolutamente certe. E ancora una volta Planck ribatterà:

Indubbiamente la legge causale non è dimostrabile per via logica, non è quindi né vera, né falsa; ma è un principio euristico, una guida, la guida più preziosa che noi possediamo se vogliamo orientarci nel groviglio degli eventi e conoscere la direzione in cui deve procedere la ricerca scientifica per giungere a risultati fecondi¹²⁸.

Di fronte alle relazioni di indeterminazione, Bohr espresse una sua particolare posizione che si sviluppa semplicemente a partire dall'interrogativo che, queste stesse relazioni, non possono non suscitare. Come mai, si chiese Bohr, se ci vogliamo rappresentare un ente come l'elettrone, il fotone, eccetera, possiamo impiegare tranquillamente, cioè senza timore di cadere in contraddizione, due modelli antitetici quali quello corpuscolare e quello ondulatorio? Una volta dimostrato, proprio in virtù delle relazioni d'indeterminazione, che non si dà contraddizione perché nel momento in cui si spinge a fondo la precisazione di un modello l'altro sfuma sempre più nell'indistinto e viceversa, sicché non sono mai entrambi presenti allo stesso grado di distinzione, la conclusione da trarre non può che essere la seguente. L'elettrone, o il fotone, hanno due aspetti che, se si presentassero contemporaneamente, si escluderebbero necessariamente; ma, dal momento che se si dà l'uno non si dà l'altro, pur escludendosi si completano, sono perciò due aspetti complementari. È questo il famoso *principio di complementarità*, destinato a divenire una delle caratteristiche fondamentali della nuova scienza fisica.

8. Onde di probabilità

La fisica classica aveva introdotto, nel dominio di studio dell'evoluzione dei gas, delle leggi probabilistiche, ossia delle leggi statistiche, come sintesi di leggi individuali e causali. L'atteggiamento della fisica quantica è, su questo piano, completamente diverso: non si dà alcuna enumerazione di casi singoli cui far seguire una legge statistica; quest'ultima è data immediatamente e si applica, si

¹²⁸ Ivi, p. 292.

TEORIA ED ESPERIENZA

1. La nozione di “trascendentale”

Per comprendere pienamente il dissenso che caratterizza la posizione di Einstein nei confronti della meccanica quantica consideriamo opportuno chiarire sin d'ora il significato di un termine il cui uso è spesso tanto inflazionato quanto improprio. Lo faremo prendendo ad esempio Immanuel Kant che, nel secondo paragrafo dell'“Introduzione alla logica trascendentale” della seconda edizione della *Critica della ragion pura*, afferma:

E qui faccio un'osservazione che concerne tutte le considerazioni successive e che sarà bene tener sempre innanzi agli occhi: e cioè che non bisogna chiamare trascendentale ogni conoscenza a priori, bensì solamente quella attraverso la quale conosciamo che e come alcune rappresentazioni (intuizioni o concetti) sono impiegate o sono possibili esclusivamente a priori (cioè la possibilità della conoscenza e il suo uso a priori). Pertanto né lo spazio né una sua qualsiasi determinazione geometrica a priori sono rappresentazioni trascendentali; lo sono invece soltanto la conoscenza dell'origine non empirica di queste rappresentazioni e la possibilità che tuttavia posseggono di riferirsi a priori agli oggetti dell'esperienza¹²⁹.

Come è stato giustamente osservato,

“trascendentale” non è quindi lo spazio considerato come forma *a priori*, né una possibile determinazione geometrica di esso (per esempio, lo spazio a una, due, tre... *n* dimensioni), ma il nostro “modo” di conoscerlo come “struttura” della conoscenza, ponendo il problema della sua natura, della sua origine, della sua funzione (come “struttura”) per quanto riguarda la conoscenza

¹²⁹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, in *Immanuel Kant Werkausgabe*, Hersg. von Wilhelm Weischedel, Zürich 1977, Bd. III; trad. it. a cura di P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino 1977, p. 29.

in generale e la conoscenza geometrica in particolare. Lo stesso discorso si può fare, secondo Kant, per tutte le altre “forme” o strutture del nostro conoscere, e in maniera particolare per le categorie dell’intelletto le quali, prese di per sé, sono sì *a priori* ma non *trascendentali*, perché trascendentale è solo il nostro modo di conoscere le stesse categorie e di conoscere per mezzo delle categorie. *A priori* e *trascendentale* vengono quindi a muoversi su *due piani* diversi, perché diversa è la loro funzione: conoscitiva e teoretica quella dell’*a priori*; filosofica e metateorica quella del *trascendentale*, che pur presupponendo l’*a priori* va di là da esso, giacché il suo scopo è quello di fondare, di legittimare, di giustificare quello che già c’è in maniera universale (c’è per tutti gli uomini) e necessaria (non può non esserci, perché altrimenti non avremmo conoscenza)¹³⁰.

Ben diversa è l’accezione kantiana del termine, offerta dai *Prolegomena* del 1783. Precisa infatti il filosofo di Königsberg:

La parola “trascendentale”, il cui significato in tanti modi da me spiegato non è stato neppure una volta capito dal recesente (tanto di sfuggita egli ha visto il tutto), non significa qualcosa che oltrepassa ogni esperienza, ma qualcosa che certo la precede (*a priori*) ma non è determinato a nulla più che a render possibile la conoscenza nell’esperienza. Quando questi concetti oltrepassano l’esperienza, allora si dice trascendente il loro uso, che ben si distingue da quello immanente, cioè limitato all’esperienza¹³¹.

Siamo di fronte a un’identificazione tra *a priori* e trascendentale. Per dirla con Francesco Barone.

È qui chiaro che “trascendentale” non è riferito alla conoscenza circa la possibilità e applicabilità *a priori* delle rappresentazioni, bensì alle rappresentazioni stesse per caratterizzarne l’apriorità (...) In quest’ultima accezione il termine viene sostantivato e si parla del trascendentale (o dell’*a priori*) riferendosi a quelle strutture della conoscenza (intuizioni o concetti) che non sono derivate dall’esperienza e che tuttavia la rendono possibile¹³².

¹³⁰ S. Marcucci, *Studi kantiani*, vol. III, Maria Pacini Fazzi, Lucca 1988, pp. 47-48.

¹³¹ I. Kant, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*, in *Immanuel Kant Werkausgabe...*, cit., Bd. V; trad. it. a cura di R. Assunto, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza*, Laterza, Roma-Bari 1979, p. 146, n. 1.

¹³² F. Barone, *Il trascendentalismo kantiano e l’epistemologia*, in “Filosofia”, XXIII, 3, 1972, p. 226.

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

secondo Einstein, sarebbe necessario attenuarne decisamente la rigidità con una nozione, come quella di convenzione, che consente una condizione più flessibile, meno vincolante e non ultimativa. Il commento espresso da Born di fronte alla confidenza del collega sembrerebbe così pienamente giustificato:

L'atteggiamento qui assunto da Einstein nei riguardi della filosofia di Kant implicava in definitiva un rifiuto. A quel tempo egli era strettamente empirista e seguace di Hume, ma in seguito cambiò: speculazioni e congetture prive di un solido fondamento empirico assunsero nel suo pensiero un'importanza sempre più grande¹³⁵.

Vi sono, a nostro avviso, serie ragioni per dubitare della fondatezza della valutazione espressa da Born. In linea di principio, pur concedendo che il fisico tedesco abbia avuto la forza di “non cadere nelle mani” del filosofo di Königsberg, da ciò non consegue affatto che il presunto rifiuto abbracci anche la problematica dell'*a priori*. Su base documentale è anzi possibile mostrare che tale problematica accompagna i nodi cruciali della riflessione einsteiniana dedicata alla teoria della relatività per proporsi poi chiaramente a partire dal 1919, cioè un anno dopo la lettura dei *Prolegomeni*, congiuntamente ai sempre più frequenti riferimenti diretti e indiretti a Kant. Che l'orizzonte sul quale viene a configurarsi passo dopo passo, rinuncia dopo rinuncia, la teoria della relatività ristretta sia quello illuminato dalla problematica dell'*a priori* o del trascendentale, risulterà chiaro non appena si sarà fatta mente locale a quanto è stato affermato a suo tempo nella sua sede opportuna, allorché abbiamo preso in esame le memorie fondamentali del 1905. Si ricorderà che Einstein era giunto a denunciare le due ipotesi arbitrarie, l'una relativa alla grandezza tempo, l'altra riguardante le grandezze spaziali, vero e proprio fondamento della regola classica di addi-

desunta sistematicamente da un principio comune, ossia dalla facoltà di *giudicare* (equivalente a quella di pensare); non è dunque ricavata rapsodicamente da una ricerca dei concetti puri, condotta ad arbitrio e della cui completezza numerica non è data certezza poiché si procede soltanto per intuizione, senza rendersi conto che, così facendo, non si è in grado di spiegare perché questi e non altri sono i concetti propri dell'intelletto puro. Andare alla ricerca di questi concetti fondamentali fu un progetto ben degno di quell'acuto pensatore che fu Aristotele; mancando di ogni principio, egli procedette però alla raccolta di essi come gli si andavano presentando” (*ibid.*). Così, precisa, “seguendo Aristotele, chiamiamo questi concetti categorie, poiché il nostro scopo, nella sua origine prima, fa tutt'uno col suo, benché ne diverga assai nell'esecuzione” (ivi, p. 145).

¹³⁵ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 12.

zione delle velocità. Queste due ipotesi erano responsabili del fatto che la teoria formulata da Lorentz sembrava dover essere considerata irrimediabilmente inconciliabile con il principio di relatività. In termini matematici, la prima ipotesi arbitraria risultava trascrivibile nell'equazione

$$t' = t.$$

La seconda ipotesi arbitraria, che consisteva nell'identificazione tra la configurazione cinematica di un corpo e la sua configurazione geometrica assumeva invece la forma:

$$x' = x - vt; y' = y; z' = z.$$

Se riuniamo insieme tutte queste uguaglianze, otterremo il gruppo di trasformazione di Galileo, ovvero le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di assi cartesiani animato da un moto rettilineo e uniforme:

$$\begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Chiediamoci adesso: che cosa significa, sul piano epistemologico, la denuncia einsteiniana formulata con un linguaggio inusuale per un fisico e che ricorda, non certo vagamente, quello critico proprio del filosofo di Königsberg? Risponderemo con le stesse parole con le quali il fisico tedesco si esprime nella lettera del 24 aprile 1920 a Maurice Solovine proprio a proposito della teoria della relatività.

Denunciare le due ipotesi arbitrarie significa, dice Einstein, affermare semplicemente il fatto che “non c'è in fisica nozione il cui impiego sia a priori necessario o giustificato. Una nozione acquista il suo diritto all'esistenza unicamente mediante la sua connessione chiara e univoca degli eventi, rispettivamente delle esperienze fisiche”¹³⁶. Sicché “di ogni nozione fisica deve esser data una definizione tale che si possa, in virtù di questa definizione, de-

¹³⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 19.

cidere in principio se essa si trova o non si trova adeguata al caso concreto”¹³⁷.

E cosa vuol dire tutto questo? Anzitutto, che non esistono nozioni definitive e assolute: nemmeno quelle di tempo e di spazio che, è importante sottolinearlo di nuovo, per Kant sono intuizioni pure e *a priori* (pure, perché non empiriche, *a priori*, perché precedono ogni esperienza e anzi la rendono possibile), mentre per Einstein sono invece semplicemente dei concetti¹³⁸. In secondo luogo, che l’esperienza fisica non si riduce alla semplice connessione dei dati che ci provengono dai sensi, ma si prospetta come un costruito.

Sul piano fisico, come ben sappiamo, il rigido divieto imposto dal fisico tedesco rappresenta la chiave di volta per risolvere il problema del rapporto tra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, considerato privo di ogni conciliazione fino a quel momento, giacché proprio attraverso l’analisi del tempo e dello spazio dal punto di vista fisico “risultò evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile. A essa si dà il nome di teoria della relatività ristretta”¹³⁹. Perché “risultò evidente”? Semplicemente perché se tempo e spazio non sono grandezze assolute non può nemmeno esserci una velocità infinita, come invece presuppone la regola del parallelogramma. Detto in altri termini, la velocità di propagazione della luce è una velocità finita e soprattutto costante nel vuoto, indipendente dal moto del corpo che la emette.

Veniamo adesso al breve articolo pubblicato da Einstein il 25 dicembre 1919. La sua importanza sta nel fatto che esso segna, come ci auguriamo di mostrare, una sottile ma decisa presa di posizione a favore dell’impostazione costruttivista del pensiero scientifico, a conferma di quanto affermato a proposito delle nozioni di spazio e di tempo.

Contrariamente a quanto si può pensare, osserva Einstein, lo statuto metodologico della fisica in quanto scienza empirica non si identifica né si esaurisce con il procedimento induttivo. Si badi bene: il fisico tedesco non sostiene che il metodo induttivo non ha alcun valore per la conoscenza scientifica, bensì che, considerando criticamente lo svi-

¹³⁷ *Ibid.*

¹³⁸ Cfr. Einstein, *Relatività...*, cit., p. 57.

¹³⁹ Ivi, pp. 57-58.

luppo storico della scienza, le procedure induttive si sono rivelate insoddisfacenti sul piano dei risultati. Afferma il Nostro: “I progressi veramente grandi della conoscenza della natura si sono avuti da una via quasi diametralmente opposta a quella dell’induzione”¹⁴⁰. Infatti,

se il ricercatore si avvicinasse alle cose senza una qualche idea preconcepita, come potrebbe egli cogliere dall’enorme quantità di una complicatissima esperienza quei fatti che sono abbastanza semplici da rendere palesi relazioni legiformi? Galilei non avrebbe mai potuto trovare la legge della caduta libera dei gravi senza l’idea preconcepita che i rapporti che troviamo di fatto sono complicati dagli effetti della resistenza dell’aria, e che quindi dobbiamo considerare cadute dei gravi in cui tale resistenza gioca un ruolo sostanzialmente nullo¹⁴¹.

La scarsa fecondità del metodo induttivo risiederebbe, dunque, nell’impossibilità di derivare direttamente elementi conoscitivi dalla base empirica e osservativa. Si pone così il delicato problema di definire la natura della impossibilità appena denunciata: si tratta di un’impossibilità logica o pragmatica? Se l’impossibilità è di natura pragmatica e determinata unicamente dall’incapacità manifesta di gestire una massa enorme di dati, ben si spiegano i pochi risultati perseguiti, come sostiene Einstein, attraverso il metodo induttivo. Il ricorso all’impostazione costruttivista, risponderebbe allora a necessità di ordine pratico e risiederebbe, in sostanza, nell’utilità di poter continuare l’attività di ricerca di connessione tra i dati empirici: un ricorso tattico e soprattutto debole; il fatto che attualmente siamo in grado, con l’ausilio di calcolatori estremamente sofisticati e potentissimi, di gestire e operare contemporaneamente miliardi di informazioni ogni secondo, lo dimostrerebbe. Al contrario, se l’impostazione sostenuta dal fisico tedesco trova la sua giustificazione in un’impossibilità di natura logica, nel senso forte della tesi humiana della non derivabilità o deducibilità dei concetti dal dato empirico, sicché l’induzione non ha valore dal punto di vista logico¹⁴², si capisce altrettanto bene la ragione della necessità di avvicinarsi alle cose disponendo di un elemento *a priori*, un’“idea preconcepita” avanzata dal ricercatore, ma

¹⁴⁰ A. Einstein, *Induktion und Deduktion in der Physik*, in “Berliner Tageblatt”, 25 Dezember 1919; trad. it., *Induzione e deduzione nella fisica*, in “Nuova civiltà delle macchine”, XIII, 1-2, 1995, p. 149.

¹⁴¹ *Ibid.*

¹⁴² Cfr. D. Hume, *Ricerche sull’intelletto umano e sui principi della morale*, Sez. IV, Parte prima, Laterza, Roma-Bari 1980, pp. 38-39 e pp. 52-53.

dovremmo riconoscere e denunciare la palese contraddizione in cui cadrebbe Einstein, dal momento che non si è più in grado di giustificare i successi scientifici che, sebbene in piccola parte, sono stati comunque ottenuti attraverso procedure induttive. Come si esce da questa situazione? L'unica via che intravediamo per superare lo scoglio, ed evitare così di ricorrere alla drammatica ipotesi di un Einstein schizofrenico, patologia che peraltro non gli fu mai diagnosticata, è quella di stabilire che cosa effettivamente intende il fisico tedesco con “metodo induttivo” nel contesto considerato, se cioè l'espressione si riferisce direttamente alla nozione puramente logica di inferenza induttiva o se, invece, l'accezione einsteiniana considera le procedure induttive nel senso della loro applicazione e complicazione nell'ambito del progressivo sviluppo scientifico.

Se questa è la direzione, nel percorrerla tornerà utile e vantaggioso guardare a chi questo percorso lo ha già compiuto, ossia a Ernst Mach e, precisamente, al capitolo intitolato “Deduzione e induzione dal punto di vista psicologico” dell'opera *Erkenntnis und Irrtum* pubblicata nel 1905. L'utilità del riferimento machiano sta nel fatto che lo scienziato austriaco riesce a dimostrare non solo che, sul piano teorico, “le regole della logica non possono avere il compito di aprire nuove fonti cognitive. Debbono servire, piuttosto, a saggiare la concordanza o la discordanza delle conoscenze ottenute da altre fonti, e nel secondo caso a indicare la necessità di istituire una concordanza piena”¹⁴³; ma soprattutto, dal punto di vista storico, che “l'operazione psichica che fa ottenere nuove conoscenze, per lo più designata col termine inadatto di ‘induzione’, non è un processo semplice, ma assai complicato. Anzitutto non è un processo logico, anche se può contenere processi logici come membri intermediari e ausiliari”¹⁴⁴.

¹⁴³ E. Mach, *Conoscenza ed errore. Abbozzi per una psicologia della ricerca*, Einaudi, Torino 1982, p. 297.

¹⁴⁴ Ivi, p. 312. Se la logica non apre alcun nuovo orizzonte cognitivo, “è ben strano, allora”, osserva Mach “che la maggior parte degli scienziati che si sono occupati dei metodi della ricerca continuano ad indicare nell'*induzione* lo strumento principale della ricerca, quasi che le scienze non abbiano altra occupazione che quella di ordinare in classi i fatti individuali a portata di mano. L'importanza di questa occupazione non va contestata, però non esaurisce il compito dello scienziato: egli deve prima di tutto individuare i caratteri dell'oggetto d'indagine e le loro connessioni, cosa molto più difficile del classificare ciò che è già noto. (...) Ora, questo processo non ha niente a che vedere con l'induzione. Ma se riflettiamo che l'osservazione o enumerazione di *molti* casi, che malgrado le variazioni concordano in certi caratteri, ci porta con maggior facilità a concepire *astrattamente* i caratteri *stabili*, che non la considerazione di *un solo* caso, per analogia questo processo ricorderà di fatto l'induzione. Per questo forse il termine si è conservato così a lungo” (ivi, p. 306).

Solo considerando il procedimento induttivo nel senso indicato da Mach si può legittimamente sostenere, come fa Einstein, che tutte le grandi scoperte della fisica hanno un carattere ipotetico e, conseguentemente, precisare che il ricercatore parte “sempre dai fatti, il cui nesso costituisce lo scopo dei suoi sforzi. Ma egli non perviene al suo sistema teorico per via metodica, induttiva; egli, piuttosto, si avvicina ai fatti tramite una scelta intuitiva tra teorie pensabili, basate su assiomi”¹⁴⁵. Ora, anche per Mach l’intuizione assolve un compito essenziale nell’acquisizione di nuove conoscenze, ne è anzi il “fondamento”, ma essa non si applica ai fatti favorendo einsteinianamente la scelta di un costrutto teorico; al contrario, l’intuizione machiana è sempre direttamente legata a *un* particolare dato dell’osservazione¹⁴⁶. Afferma Mach:

Per poter dire *che* un elemento dipende da uno o più altri, *come* si dispone la loro dipendenza reciproca, *che tipo* di dipendenza funzionale c’è, lo scienziato deve aggiungere del suo, al di là dell’osservazione immediata. Non si può pensare di poter ridurre tutto questo chiamandolo descrizione¹⁴⁷

giacché

il lavoro principale nel reperimento di nuove conoscenze spetta all’*astrazione* e all’*attività della fantasia*¹⁴⁸.

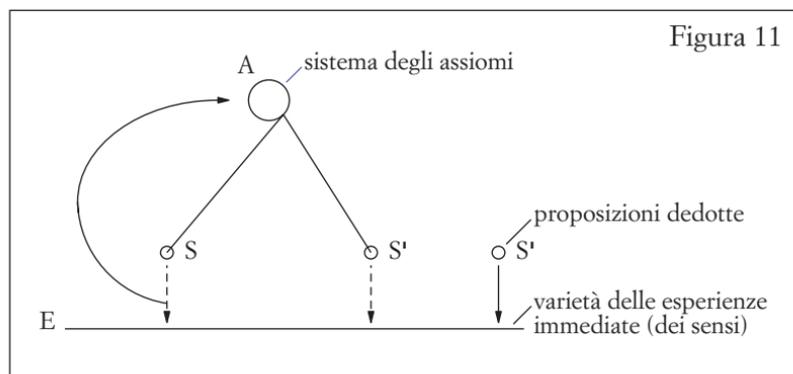
¹⁴⁵ Einstein, *Induzione e deduzione nella fisica*, cit., p. 149.

¹⁴⁶ Tutte le nuove conoscenze, dice Mach, “germinano sempre dall’osservazione, che può essere ‘esterna’, sensoriale, oppure ‘interna’, e allora riguarda le rappresentazioni. L’attenzione sottolinea ora questa ora quella connessione di elementi e la fissa in concetti: quando il dato che si reperisce viene mantenuto rispetto ad altri, e si dimostra sostenibile, c’è conoscenza, nel caso contrario errore. Il fondamento di ogni conoscenza dunque è l’intuizione, che può riferirsi sia al sentito sensorialmente, sia al rappresentato in modo puramente intuitivo, sia al potenzialmente intuitivo, concettuale ecc. (...) Sia che veniamo condotti a un nuovo dato effettivo della vita sensoriale o rappresentativa per puro caso fisico o psichico, o mediante estensione pianificata dell’esperienza, si tratta sempre di questo dato, da cui scaturisce ogni conoscenza” (Mach, *op. cit.*, p. 308).

¹⁴⁷ Ivi, pp. 309-310.

¹⁴⁸ Ivi, p. 312. Secondo Mach “lo scienziato esperto può astrarre per tentativi anche in modo intenzionale, con la piena consapevolezza di correre un rischio – a prescindere dalle circostanze accessorie. Allora l’idea più generale va saggiata – per quanto concerne la sua sostenibilità – con l’osservazione e l’esperimento. Ma poiché la rappresentazione del dato individuale viene plasmata ed estesa a idea più generale per tentativi, questa integrazione provvisoria dà un certo spazio all’arbitrio. Uno o più casi osservati possono offrire punti d’appoggio a una parte di questo processo di estensione del dato. Così Keplero può vedere che Marte si muove in un’orbita ovale, Galilei che la velocità di caduta aumenta con l’aumentare dello spazio (...); ma un’altra parte deve essere aggiunta per attività autonoma sulla base del patrimonio mentale accumulato. Così, quando Keplero suppone, per tentativi, che l’orbita di Marte sia un’ellisse, si tratta di una sua costruzione. Lo stesso vale per il presupposto galileiano della proporzionalità tra tempo e velocità della caduta” (ivi, p. 309).

Il processo che conduce il fisico teorico a nuove scoperte si articola per Einstein nei seguenti momenti, rappresentabili graficamente come in figura 11.



Una comprensione intuitiva dell'essenziale di un grosso complesso di fatti porta il ricercatore alla costituzione di un principio fondamentale ipotetico o di più principi di tal genere. Dal principio fondamentale (sistema di assiomi) egli deduce in via puramente logico-deduttiva le conseguenze nella maniera più completa possibile. Queste conseguenze derivabili dal principio fondamentale, spesso attraverso sviluppi e calcoli complicati, vengono poi poste a confronto con le esperienze e forniscono così un criterio per la giustificazione del principio fondamentale ammesso. Tale principio (assiomi) e le conseguenze formano insieme quella che si dice una "teoria"¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Siamo ora in condizione di comprendere che cosa il fisico tedesco intende dire quando afferma che i veri, grandi progressi della fisica hanno seguito una strada *non interamente* ma "quasi diametralmente opposta" all'induzione. Il "quasi" sta a significare che l'elaborazione dell'elemento teorico si è sviluppata, in questi casi, a partire dal *già noto*. Di qui la necessaria e storicamente adeguata distinzione di natura tra le teorie fisiche. Dice infatti Einstein nel 1934: "In fisica si possono distinguere teorie di natura diversa. La maggior parte sono teorie costruttive: per mezzo di un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi. È così che la teoria cinetica dei gas cerca di ricondurre i fenomeni meccanici, tecnici e di diffusione a movimenti di molecole, vale a dire a costruire partendo dall'ipotesi del movimento molecolare. Quando si dice che si è riusciti a comprendere un gruppo di fenomeni naturali, significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione. Ma accanto a questa classe importante di teorie ve n'è una seconda che invece del metodo sintetico impiega il metodo analitico. Qui il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di fenomeni

Il momento progettuale, costruttivo, creativo dell'indagine scientifica emerge così sulla base dell'insegnamento umano, di cui Kant fece per primo tesoro¹⁵⁰, della non diretta deducibilità del fattore teorico dal dato empirico, e mostra che Einstein non solo non ha abbandonato il concetto dell'*a priori* dopo la lettura "deliziosa" dei *Prolegomeni*, ma che anzi da essa trasse ben presto le dovute conseguenze. Certo, egli si guarda bene dall'affermare esplicitamente con Kant che "l'intelletto non attinge le sue leggi (*a priori*) dalla natura, ma le prescrive ad essa"¹⁵¹; ma, coerentemente, parla di "criterio di giustificazione", e la nozione di "giustificazione" è tipicamente kantiana. Detto in altri termini, l'accettare o meno una proposizione come dotata di significato dal punto di vista scientifico non è questione di fatto, ma di diritto: il principio o le ipotesi avanzate per render conto di una serie di fenomeni non è accettabile perché dai fenomeni esso trae origine e a essi ritorna per esser verificato, in quanto risulta fondato sulla sua propria base empirica; la validità del principio dipende anzitutto dalla sua legittimità, cioè dalla possibilità di essere sottoposto al vaglio dell'esperimento. Ne deriva che una teoria, osserva opportunamente il fisico tedesco, può

essere riconosciuta come sbagliata, quando c'è un errore logico nelle sue deduzioni, o come inesatta quando un fatto non si accorda con una delle sue conseguenze. Ma non si può mai dimostrare la verità di una teoria. Perché non si sa mai che anche nel futuro non si avrà un'esperienza che contraddica le sue conseguenze; e perché sono sempre pensabili altri sistemi teorici che siano in grado di connettere i medesimi fatti dati¹⁵².

Il 6 aprile 1922, in occasione dell'incontro a Parigi con i membri della *Société Française de Philosophie* sul tema della teoria della

naturali determinate empiricamente dalle quali derivano in seguito criteri matematicamente formulati, ai quali i fenomeni particolari o le loro immagini teoriche devono soddisfare. È così che la termodinamica, partendo dal risultato generale dell'esperienza secondo il quale il moto perpetuo è impossibile, cerca di determinare, per via analitica, le relazioni alle quali i fenomeni particolari devono uniformarsi. La teoria della relatività appartiene alla seconda categoria" (A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, Newton & Compton Editori, Roma 1975, pp. 84-85).

¹⁵⁰ Cfr. Kant, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica...*, cit., pp. 7-9.

¹⁵¹ Ivi, p. 82.

¹⁵² Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Einstein indica anche un criterio di scelta tra due teorie concorrenti quando, in chiusura, afferma che "se sono a disposizione due teorie entrambe compatibili con il materiale fattuale dato, allora non esiste alcun criterio per preferire l'una o l'altra che lo sguardo intuitivo del ricercatore. È così che si capisce come ricercatori acuti, che dominano teorie e fatti, possono tuttavia essere passionali sostenitori di teorie opposte" (*ibid.*).

relatività, Einstein torna sulla questione dell'*a priori* di Kant e critica severamente la figura del Mach “filosofo” in virtù della nozione di “sistema”, anch’essa tipica, benché non esclusiva, del criticismo kantiano. Non possiamo esser sorpresi di ciò! Dice Einstein:

Ciò che mi sembra essere la cosa più importante nella filosofia di Kant è che vi si parla di concetti *a priori* per edificare la scienza. Si possono opporre due punti di vista, l’apriorismo di Kant, per il quale taluni concetti preesistono nella nostra coscienza, e il convenzionalismo di Poincaré. Questi due punti di vista concordano su questo: che, per essere edificata, la scienza ha bisogno di concetti arbitrari; quanto a stabilire se questi concetti sono dati *a priori*, o sono delle convenzioni arbitrarie, io non posso dire niente¹⁵³.

È facile rilevare quanto questa dichiarazione richiami, rendendola al contempo più chiara, la confidenza fatta da Einstein a Born quattro anni prima. Ma, diversamente dal 1918, egli non afferma di non poter esser d’accordo con la dottrina kantiana: la questione non si pone nemmeno. È quindi significativo che, pur non entrando nel merito della “naturalità” o “convenzionalità” dell’*a priori*, il fisico tedesco suggerisca indirettamente il proprio punto di vista guardando, come annunciavamo, a Mach.

Il sistema di Mach (...) studia le relazioni che esistono tra i dati dell’esperienza; l’insieme di queste relazioni è, per Mach, la scienza. Questo è un punto di vista sbagliato; insomma, ciò che fa Mach è un catalogo e non un sistema. Tanto Mach fu un buon [fisico] meccanico, quanto fu un riprovevole filosofo. Quest’ottica limitata sulla scienza lo portò a rifiutare l’esistenza degli atomi. È probabile che, se Mach fosse tuttora vivente, cambierebbe opinione. Tengo tuttavia a dire che su questo punto, cioè che i concetti possono cambiare, io sono completamente d’accordo con Mach¹⁵⁴.

Se i “concetti possono cambiare” in virtù del divieto humiano e dell’insegnamento machiano, è evidente che non vi può essere un sistema categoriale esaustivo e immutabile, il che significa che la dottrina kantiana è, dal punto di vista einsteiniano, inaccettabile

¹⁵³ A. Einstein, *Comptes rendus des séances de la Société Française de Philosophie, séance du 6 avril 1922. La théorie de la relativité*, in “Bulletin de la Société Française de Philosophie”, XVII, 1922, pp. 101-102.

¹⁵⁴ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., pp. 111-112.

non tanto perché storicamente datata, quanto perché teoricamente viziata all'origine. Ciò che non deve essere accettato non risiede tanto nella pretesa definitività o esaustività dell'*a priori*, quanto, piuttosto, nella modalità attraverso la quale Kant sarebbe giunto ad affermarlo; il dissenso einsteiniano è insomma rivolto al fondamento che impone come conseguenze la staticità e la rigidità e, necessariamente, una diversa concezione della natura del pensiero.

Il riferimento a Hume, confidenzialmente manifestato a Born, si spinge del resto ben oltre le motivazioni di carattere estetico, peraltro condivise dallo stesso Kant; riguarda la risposta che quest'ultimo pensava di aver soddisfacentemente dato al problema sollevato dal filosofo di Edimburgo: quello della possibilità di inferire, a partire dall'esperienza, qualsiasi nozione che possa essere considerata certa ed evidente quanto lo sono i concetti della matematica e della geometria, a cominciare dalla connessione di causa ed effetto. Afferma infatti il Nostro: "Le idee si riferiscono alle esperienze dei sensi, ma non possono mai derivarne logicamente. Per questa ragione non ho mai potuto comprendere la questione dell'*a priori* nel senso di Kant"¹⁵⁵. Detto in altri termini, "non esistono categorie definitive nel senso di Kant"¹⁵⁶, né, conseguentemente, la possibilità di distinguere dei giudizi sintetici *a priori* da altri giudizi sintetici *a posteriori*. Osserva ancora Einstein:

Fermamente convinto che certi concetti fossero indispensabili, e che fossero proprio quelli che si erano dimostrati tali nella pratica, [Kant] li interpretò come le necessarie premesse di ogni tipo di speculazione, e li distinse dai concetti di origine empirica. Io sono convinto, invece, che questa distinzione sia erronea, cioè non ponga il problema nei suoi giusti termini¹⁵⁷.

Ed è per l'appunto questa "convinzione erronea" che spiega come e perché possa darsi una "meraviglia" anomala e fuorviante, come quella relativa alla seconda, cruciale, esperienza adolescenziale ricordata dal fisico tedesco, sulla quale abbiamo indirizzato inizialmente la nostra attenzione. Kant, conclude il Nostro,

¹⁵⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 93.

¹⁵⁶ Ivi, p. 39.

¹⁵⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 8-9.

fu portato fuori strada dalla falsa opinione – difficile da evitare ai suoi tempi – che la geometria euclidea fosse necessaria al pensiero e fornisse una conoscenza certa (cioè indipendente dall'esperienza sensoriale) sugli oggetti della percezione "esterna". Da questo errore facilmente comprensibile egli dedusse l'esistenza di giudizi sintetici a priori, prodotti dalla sola ragione, e suscettibili, per conseguenza di pretendere assoluta validità¹⁵⁸.

Siamo dunque autorizzati a concludere che il fisico tedesco ha ormai abbandonato ogni riferimento al pensiero kantiano e respinto la prospettiva del "trascendentale" elaborata nei *Prolegomeni*? Per niente: la critica rivolta all'epistemologia machiana indica, proprio al contrario, che Einstein non doveva aver dimenticato l'invito del filosofo di Königsberg a tener ben ferma la distinzione tra "giudizi di esperienza" e "giudizi di percezione"¹⁵⁹, dal momento che la nozione di "sistema" presuppone non solo un principio direttivo, un filo conduttore che funge da elemento unificante, ma anche la necessaria e fondamentale assunzione che ciò che noi chiamiamo mondo esterno, realtà, può essere, seppur indirettamente, conosciuto adeguatamente.

Così, se di Kant sono inaccettabili le premesse, di Hume devono essere rifiutate le conclusioni, ovvero lo scetticismo e il probabilismo. Non è infatti difficile mostrare che entrambi i contenuti delle due sconvolgenti esperienze giovanili rientrano a pieno titolo, e ciò sia detto anche per la seconda esperienza debitamente emendata, nella prospettiva del trascendentale proposta dal filosofo di Königsberg: un risultato decisivo, questo, dal momento che tali esperienze precorrono ciò che Einstein non esiterà a indicare come la propria professione di fede dal punto di vista epistemologico (di qui la loro crucialità) e, soprattutto, rivelano la comune natura controinduttiva della libertà e del pensiero.

Per quanto riguarda l'affermazione di una realtà oggettiva, assunzione che caratterizza il contenuto della prima esperienza e deter-

¹⁵⁸ Einstein, *Replica ai vari autori*, in AA.VV., *Albert Einstein scienziato e filosofo*, cit., p. 624.

¹⁵⁹ Cfr. Kant, *Prolegomeni*, cit., § 18, pp. 55-56. Al § 26 Kant afferma: "Al lettore, per lunga consuetudine abituato a ritenere l'esperienza una composizione puramente empirica di percezioni e perciò a non pensare affatto che essa va molto più lontano di queste, e cioè dà ai giudizi empirici una validità universale, e perciò ha bisogno di una pura unità intellettuale, la quale precede *a priori*, a tal lettore, adunque, raccomando di far bene attenzione su questa distinzione della esperienza da un semplice aggregato di percezioni" (ivi, p. 70).

mina la stessa possibilità della fisica come scienza¹⁶⁰, lo stesso Einstein confessa:

Io non sono cresciuto nella tradizione kantiana, ma sono arrivato a capire l'aspetto veramente valido che si può trovare nella dottrina di Kant accanto agli errori che oggi, cioè troppo tardi, sono considerati molto ovvi. Quest'aspetto è contenuto nella proposizione: "Il reale non ci è dato, ma ci è proposto (come un indovinello)". Ciò significa ovviamente: una costruzione concettuale è una cosa che serve ad afferrare le relazioni interpersonali, e la sua autorità sta soltanto nella convalidazione. Questa costruzione si riferisce precisamente al "reale" (per definizione), e ogni ulteriore questione sulla "natura del reale" appare vuota di senso¹⁶¹.

Rispetto alla possibilità del conseguimento di una conoscenza certa e completa dei dati dell'esperienza attraverso il pensiero, dunque l'edificazione della fisica come scienza mediante proposizioni *a priori*, il Nostro afferma:

L'atteggiamento teorico che noi difendiamo si distingue da quello di Kant solo in quanto noi non concepiamo le "categorie" come se fossero immutabili (condizionate dalla natura del pensiero), ma come se fossero (in senso logico) libere convenzioni. Esse si presentano come categorie *a priori* solo in quanto il pensare, senza fondarsi su categorie e concetti in generale, sarebbe impossibile come il respirare nel vuoto¹⁶².

¹⁶⁰ È importante precisare che se, dal punto di vista generale, per il fisico tedesco "la fede in un mondo esterno indipendente dall'individuo che lo esplora è alla base di ogni scienza della natura" (Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 72), dal punto di vista particolare e proprio, "i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia (...) la rappresentazione degli oggetti (corpi, campi, ecc.) stabilita dalla fisica aspirano a un'esistenza reale' indipendente dai soggetti della percezione; d'altra parte queste rappresentazioni sono messe in relazione nel modo più certo possibile con le impressioni sensoriali. Inoltre, è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamano un'esistenza singola autonoma in quanto 'collocati in regioni distinte dello spazio'. Fuori dell'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un 'essere così') dei singoli oggetti spazialmente separati – ipotesi che deriva in primo luogo dalla riflessione quotidiana – non sarebbe possibile un pensiero fisico nel senso per noi abituale; né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo" (Einstein, Born, *op. cit.*, p. 201).

¹⁶¹ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., pp. 625-626. E ancora: "Una delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità" (A. Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, Boringhieri, Torino, p. 39, cit., p. 39).

¹⁶² Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 619.

A priori e a posteriori, teoria ed esperienza vengono così a configurare un rapporto di pari dignità fra i due estremi, l'empirismo e il razionalismo, in virtù di quella prospettiva dell'*a priori* o del "trascendentale" che caratterizza la concezione einsteiniana della scienza fisica; una concezione che se da un lato, fondando il suo "credo epistemologico", giustifica l'atteggiamento duramente critico che il fisico tedesco adotterà nei riguardi della meccanica quantica, dall'altro, rende trasparente il ruolo che la riflessione filosofica è stata chiamata a svolgere nella sua propria esperienza scientifica.

Con sottile ironia e limpida coerenza, Einstein annuncia in sede autobiografica il contenuto della propria fede scientifica previa giustificazione della parentesi aperta a proposito dell'esposizione delle due esperienze giovanili di cui abbiamo definitivamente accertato la crucialità. "Visto che mi sono permesso una digressione abbastanza lunga da interrompere il mio necrologio (...) non mi farò più scrupolo di enunciare ora in alcune proposizioni il mio credo epistemologico, di cui ho già accennato qualcosa incidentalmente"¹⁶³. Anzitutto, la fondamentale e logicamente irriducibile distinzione tra il piano delle esperienze offerte dai sensi, *a posteriori*, e il piano del pensiero, *a priori*: "Io distinguo da una parte la totalità delle esperienze sensibili, e dall'altra la totalità dei concetti e delle proposizioni che sono enunciati nei libri"¹⁶⁴. Sul piano del pensiero, "il sistema dei concetti è una creazione dell'uomo, né più né meno delle regole della sintassi"¹⁶⁵, e poiché "i rapporti interni fra i diversi concetti e proposizioni sono di natura logica e il compito del pensiero logico è strettamente limitato a stabilire tutte le connessioni interne fra concetti e proposizioni secondo regole ben definite, che sono appunto quelle della logica"¹⁶⁶, ne deriva che "una proposizione è corretta se, entro un certo sistema logico, viene dedotta secondo le regole logiche accettate"¹⁶⁷. Non tutti i sistemi logici, sebbene arbitrari, sono tuttavia da considerarsi sullo stesso livello: due condizioni, completezza ed economicità, ne sanciscono la piena accettabilità. In primo luogo, sono preferibili i sistemi "intesi a permettere la coordinazione più completa e quanto più possibile certa (intuitiva) con la totalità dell'esperienza dei sensi"¹⁶⁸; in

¹⁶³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 7-8.

¹⁶⁴ *Ivi*, p. 8.

¹⁶⁵ *Ibid.*

¹⁶⁶ *Ibid.*

¹⁶⁷ *Ibid.*

¹⁶⁸ *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

disporre tutti gli elementi a nostra disposizione in modo che a un certo istante dato, segnato sull'orologio, l'otturatore apra la strada quel tanto che è necessario per lasciar passare un fotone e, immediatamente dopo, ripristini la condizione di chiusura. Ebbene, pesando il contenitore prima dell'emissione e dopo l'avvenuta emissione del fotone, saremo in grado di dedurre sia la massa del fotone fuggiasco sia la sua energia. In questo modo otterremo, senza relazioni di incertezza o di indeterminazione reciproca, l'esatta misura del tempo e dell'energia.

Il diabolico congegno messo a punto da Einstein turbò, con molta probabilità, il sonno di molti dei fisici presenti all'incontro; di certo non fece dormire Bohr, che non poteva accettare di lasciar cadere in così malo modo gli sforzi congiunti compiuti in quegli anni. Il mattino seguente, il fisico danese era pronto a sostenere la causa dell'indeterminismo, sicuro di poter scardinare la trappola einsteiniana. La chiave per risolvere il problema era semplice e, al contempo, terribilmente efficace. Bohr spiegò che la misurazione del peso del contenitore metallico implica un margine di incertezza. Se immaginiamo di compiere la misura attraverso una lancetta che indicherà un numero sul quadrante della nostra bilancia, proprio nella posizione della lancetta avremo sempre, coerentemente con le tesi di Heisenberg, un margine di inesattezza. Inoltre, possiamo addirittura stabilire con precisione questo margine se conveniamo di riconoscere alla bilancia una quantità di moto. Solo che, in tal caso, la bilancia si muove in un campo gravitazionale, quello terrestre, e poiché il tempo misurato dall'orologio dipende, come è noto, proprio dalla sua posizione nel campo di gravitazione, la determinazione del momento in cui l'otturatore lascia passare il fotone avrà necessariamente un margine di incertezza. La meccanica dei quanti era salva. Einstein incassò una tremenda sconfitta, tanto più pesante quanto più la vittoria, come emerse con chiarezza, era stata ottenuta proprio grazie alla sua più geniale conquista, la relatività generale.

Naturalmente il fisico tedesco non si arrese, e anzi perseverò fino alla fine sostenendo le proprie ragioni. Tanto che, dopo appena due anni di stabile e definitiva residenza negli Stati Uniti, dove occupava una cattedra presso l'Institute for Advanced of Science di Princeton, nella prima metà di marzo del 1935 inviò alla "Physical Review" un breve ma denso articolo scritto in collaborazione con Boris Podolski e Nathan Rosen intitolato *Can quantum-mechanical*

description of physical reality be considered complete? (*La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*). Dopo una breve sezione introduttiva dove vengono esposti i risultati raggiunti, lo scritto si preoccupa di delimitare con precisione l'ambito, l'oggetto sul quale focalizzare l'attenzione, attraverso una considerazione di carattere epistemologico. Premesso che "ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione fra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera"¹⁷³, sicché si presume che questi concetti corrispondano alla realtà obiettiva, ce ne diano una rappresentazione, occorre compiere una fondamentale distinzione sul piano della valutazione del successo o meno di una tale teoria. Ci si deve interrogare, da una parte, sulla correttezza della teoria, dall'altra, sulla sua completezza. Ora, "la correttezza della teoria è giudicata in base al grado di accordo fra le sue conclusioni e l'esperienza umana; questa esperienza, che sola ci consente di inferire alcunché sul reale, assume in fisica la forma di esperimenti e misure"¹⁷⁴. Sul piano della completezza, in una teoria esaustiva vi dovrà essere un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà.

Dal momento che è questo l'oggetto del nostro discorso, converrà intendersi e tentare una definizione del termine completezza. Dice Einstein:

Qualunque significato si attribuisca al termine "completo", sembra necessario, per la completezza di una teoria, che essa soddisfi alla condizione seguente: *ciascun elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*. Questa la chiameremo "condizione di completezza"¹⁷⁵.

Dare una risposta alla questione posta sarà così tanto più agevole, quanto più saremo in grado di indicare gli elementi della realtà fisica; ci serve insomma un criterio di realtà. Afferma allora il fisico tedesco:

Gli elementi della realtà fisica non possono essere determinati da considerazioni filosofiche a priori, ma debbono essere trovati ricorrendo ai risultati di esperimenti e di misure. Tuttavia, per i no-

¹⁷³ A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in "Physical Review" (2) 48, 1935; trad. it., *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 375.

¹⁷⁴ *Ibid.*

¹⁷⁵ *Ibid.*

stri scopi, non è necessario dare una definizione esauriente di realtà. Ci accontenteremo del criterio seguente che consideriamo ragionevole. *“Se si è in grado di prevedere con certezza (cioè con probabilità uguale a uno), il valore di una grandezza fisica senza perturbare in alcun modo un sistema, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica”*¹⁷⁶.

Va da sé che il criterio di realtà fisica appena enunciato non esaurisce tutti i modi di riconoscere una simile realtà; esso è tuttavia sufficiente e, in questa veste, si trova in accordo con l'idea classica e con quella quantica di realtà.

Una volta chiariti i termini della questione, si passa alla formulazione di un esperimento mentale che consiste nel prendere in considerazione la descrizione quantica di una particella con un solo grado di libertà. Si studierà il problema di compiere delle previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema che non ha in precedenza avuto interazioni con il primo sistema. Come è noto, dal punto di vista della meccanica quantica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell'una preclude la conoscenza dell'altra, sicché “o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalle funzioni d'onda della meccanica quantica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali”¹⁷⁷. Il concetto fondamentale, nella circostanza, è quello di stato, che si suppone completamente caratterizzato dalla funzione d'onda ψ , una funzione delle variabili scelte per descrivere il comportamento della particella. Si giunge allora a una situazione contraddittoria. Infatti: 1) da una parte, si dimostra che o la descrizione quantica data dalla funzione d'onda deve essere considerata incompleta, nel senso della condizione di completezza posta in precedenza, oppure che quando i corrispondenti non commutano, due grandezze non possono avere realtà simultaneamente; 2) dall'altra parte, nell'ipotesi che la funzione d'onda ψ offra effettivamente una descrizione completa della realtà fisica, si deduce che due grandezze fisiche con operatori che non commutano possono avere realtà simultaneamente. Ora, 1) non può essere vera; per esserlo dovrebbe essere completa, ma allora le due grandezze dovrebbero essere al contempo reali. Allo stesso modo, 2) non

¹⁷⁶ *Ibid.*

¹⁷⁷ *Ivi*, p. 374.

può essere vera perché, per esserlo, dovrebbe essere incompleta, sicché le due grandezze non potrebbero essere entrambe conosciute simultaneamente. Così, non solo la negazione del primo caso porta alla negazione del secondo, ma dovremo necessariamente concludere che “la descrizione della realtà fornita da una funzione d’onda non è completa”¹⁷⁸.

A questo nuovo contributo einsteiniano, di lì a poco indicato con la sigla EPR dalle iniziali dei cognomi degli autori, non vi furono inizialmente reazioni di un certo peso, se non due interventi di Bohr¹⁷⁹; nel replicare, il fisico danese considerò decisiva l’ambiguità che, a suo avviso, caratterizzerebbe il criterio di realtà scelto. La discussione sul testo che abbiamo esaminato resta comunque, tuttora, ambito di confronto e di scontro.

Nel 1949, rispondendo ai propri critici, il Nostro ribadiva la propria posizione nei seguenti termini.

A quanto pare, sono tutti dell’opinione che la relazione d’indeterminazione di Heisenberg (la cui rigorosità scientifica si considera giustamente, anche a mio parere, dimostrata in modo definitivo) determini nel senso suddetto il carattere di tutte le teorie fisiche pensabili e ragionevoli, costituendone un presupposto fondamentale. In ciò che segue, desidero esporre le ragioni che m’impediscono di allinearli con l’opinione di quasi tutti i fisici teorici contemporanei. Io sono, infatti, fermamente convinto che il carattere essenzialmente statistico della teoria quantistica contemporanea dev’essere attribuito unicamente al fatto che essa opera con una descrizione incompleta dei sistemi fisici¹⁸⁰.

Ciò non significa, si badi bene, annullare tutti i progressi compiuti, insomma, bocciare quanto di buono è stato fatto finora. Ben al contrario, riprende Einstein,

io riconosco pienamente l’importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici – cioè dovunque è possibile considerare l’interazione delle strutture e delle loro parti con sufficiente precisione, postulando un’energia potenziale fra i punti materiali – questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capa-

¹⁷⁸ *Ibid.*

¹⁷⁹ N. Bohr, *Quantum Mechanics and Physical Reality*, in “Nature”, CXXXVI, 1935, p. 65; Einstein, Podolski, Rosen, *op. cit.*, pp. 697-702.

¹⁸⁰ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 610.

ce, pur nel suo carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra fenomeni specificabili, in modo corrispondente alle previsioni della teoria: essa è finora la sola che unisca il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia in modo logicamente soddisfacente¹⁸¹.

Il punto dolente, infatti, è un altro. Dice Einstein:

Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica. Ogniquivolta il fisico moderno dalle simpatie positivistiche ode una simile formulazione, la sua reazione è un sorriso di compatimento. Egli dice fra sé: “Ecco qui la formulazione pura e semplice di un pregiudizio metafisico, vuoto di contenuto, e, peggio ancora, di un pregiudizio la cui confutazione costituisce il maggior risultato epistemologico ottenuto dai fisici nell’ultimo quarto di secolo. C’è forse un uomo che abbia mai percepito una ‘situazione reale’? Com’è possibile che una persona ragionevole possa ancora illudersi, al giorno d’oggi, di riuscire a confutare la parte più essenziale della nostra conoscenza e del nostro modo di pensare, risuscitando quest’ombra senza vita?”. Pazienza! Quella mia laconica definizione non voleva convincere nessuno; voleva semplicemente indicare il punto di riferimento¹⁸².

Quanto grande sia il valore che il fisico tedesco riconosce alla nozione di “reale”, nozione vitale per la possibilità stessa della scienza, lo si evince infine, ancora una volta, da uno dei suoi ultimi interventi critici rivolto all’indirizzo della meccanica quantica. Afferma il Nostro:

C’è qualcosa come lo “stato reale” di un sistema fisico, che esiste oggettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misura, e che, in linea di principio, può esser descritto attraverso i mezzi di espressione della fisica (...) Questa tesi che riguarda la realtà non ha il senso di un enunciato chiaro in sé a causa della sua natura “metafisica”; essa ha solo il carattere proprio di un programma¹⁸³.

¹⁸¹ Ivi, p. 611.

¹⁸² *Ibid.*

¹⁸³ A. Einstein, *Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux*, in AA.VV., *Louis de Broglie physiciens...*, cit., p. 7.

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ Ivi, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

vuto alla stessa circostanza, dato che il desiderio ardente di cogliere i principi aveva come conseguenza che la maggior parte del tempo fosse impiegata in sforzi infruttuosi”¹⁸⁸.

Ora, se è ben vero che la specificità dell’impegno scientifico rispondeva alle più intime aspettative dell’uomo Einstein – vi era dunque una necessità e un movente soggettivo –, lo è altrettanto che esso si calava in un contesto scientifico e culturale, oggettivo, che piegava provvisoriamente tale necessità alle più urgenti esigenze epistemologiche, le autorizzava e, in qualche modo, ne offriva anche in seguito piena legittimazione. Le autorizzava ben prima del 1924, allorché ventiquattrenne Einstein dà vita a Berna, come ben sappiamo, a quella *Akademie Olympia*, occasione di studio e riflessione critica che proprio sul terreno epistemologico si rivela momento fecondo sia intellettualmente sia esistenzialmente. “La fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo” testimonia Solovine “erano l’epoca eroica delle ricerche sui fondamenti e i principi della scienza, ed è questo che era la nostra costante preoccupazione”¹⁸⁹. Le legittimerà dopo il 1924, sulla base degli sconvolgenti sviluppi della meccanica quantica, a tal punto che il fisico tedesco, nel 1936, affronterà il problema dei rapporti tra scienza e filosofia nei seguenti termini.

Spesso si è detto, e certamente non senza una giustificazione, che l’uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Questa invero potrebbe essere la cosa migliore in un’epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari così ben fondate da essere inaccessibili al dubbio¹⁹⁰.

Malauguratamente, riprende il Nostro:

Non può essere la cosa migliore in un’epoca, in cui, come quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici. In un’epoca come la presente, in cui l’esperienza ci obbliga a cercare un nuovo più solido fondamento, il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo le considerazioni critiche dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov’è che la scarpa fa male¹⁹¹.

¹⁸⁸ *Ibid.*

¹⁸⁹ Einstein, *Introduction. Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. VIII.

¹⁹⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., pp. 36-37.

¹⁹¹ Ivi, p. 37.

Del resto, ben oltre l'urgenza e la straordinarietà che richiedono al fisico di indossare provvisoriamente le vesti del filosofo in generale e dell'epistemologo in specie, cioè di incrementare l'impegno sul piano speculativo rivolto a cogliere i principi e gli assiomi, anche in regime di piena ordinarietà difficilmente si potrà contestare il carattere speciale che determina la qualità del rapporto che lega la scienza e l'epistemologia. Per il fisico tedesco, infatti, "esse dipendono l'una dall'altra"¹⁹². Per evitare il rischio fatale di proporsi né più né meno che come una semplice esercitazione accademica che non morde il reale, l'epistemologia deve interagire con l'attività scientifica¹⁹³, ma al contempo guardarsi dal ridurre il dominio di riferimento della scienza e chiudere nella prigione di un sistema compiuto la ricerca del fisico. "Non appena l'epistemologo, nella sua ricerca di un sistema chiaro, riesce ad aprirsi la strada verso di esso" osserva Einstein, "è portato a interpretare il contenuto di pensiero della scienza secondo il suo sistema, e a rifiutare tutto ciò che al suo sistema non si adatta"¹⁹⁴. Da parte sua la scienza, per non degradare inevitabilmente verso la mera tecnica¹⁹⁵, non può considerare marginale l'efficacia e la necessità dell'apparato speculativo e sistematico; lo scienziato "accetta con riconoscenza l'analisi concettuale epistemologica; ma le condizioni esterne, che per lui sono date dai fatti dell'esperienza, non gli permettono di accettare condizioni troppo restrittive, nella costruzione del suo mondo concettuale, in base all'autorità di un sistema epistemologico"¹⁹⁶. Così, se l'epistemologo, dal suo punto di vista, è libero di apostrofare il fisico "come un opportunista senza scrupoli"¹⁹⁷, quest'ultimo, nel pieno esercizio della propria libertà, non può che vincolarsi al dato e al responso dell'esperienza, distinguendosi decisamente e radicalmente dal filosofo.

Che la riflessione filosofica di carattere epistemologico abbia avuto un ruolo esclusivo e decisivo nell'attività di ricerca portata avanti dal fisico tedesco è del resto confermato *a posteriori* dalle occasioni di dibattito che lo stesso Einstein ha ben voluto accettare e onorare; ci riferiamo in particolare alle accese polemiche sollevate in Francia

¹⁹² Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., p. 629.

¹⁹³ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁴ *Ibid.*

¹⁹⁵ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁶ Ivi, pp. 629-630.

¹⁹⁷ Ivi, p. 630.

dalla teoria della relatività, che coinvolsero intellettuali, scienziati e filosofi della statura di Henri Bergson¹⁹⁸. In tal senso consideriamo fuorviante sollevare l'interrogativo circa l'appartenenza o meno del fisico tedesco alla schiera dei filosofi, giacché un simile approccio conduce facilmente alla formulazione di valutazioni per un verso tendenzialmente elusive e sprezzanti, come nel caso di Abraham Pais, per l'altro, forzatamente entusiastiche, se non celebrative, come in quello di Leopold Infeld. Dice Pais: "Einstein amava la saggezza. Ma fu un filosofo? La risposta è una questione di gusti, più che di fatto. Personalmente ritengo che il meglio di sé non l'abbia dato alla filosofia, ma non polemizzerei a tutti i costi con chi sostenesse il contrario. È indubbio che l'interesse di Einstein per la filosofia fosse autentico, ma è altrettanto certo che lui per primo non si considerasse un filosofo"¹⁹⁹. Tuttavia, poco dopo, lo stesso Pais non ha difficoltà ad affermare: "Negli ultimi trent'anni della sua vita, però, egli smise di essere un 'opportunist senza scrupoli', per diventare con suo grave danno un filosofo"²⁰⁰. Secondo Leopold Infeld "Einstein non è considerato soltanto un grande fisico, ma anche un grande filosofo. Egli stesso si considerava un filosofo. Spesso mi diceva: 'Io sono più un filosofo che un fisico'"²⁰¹. Naturalmente il fisico tedesco non si identificava con la figura del filosofo tradizionale, ma si sarebbe collocato invece nella corrente di pensiero che nei primi decenni del Novecento si proponeva come neoempirismo o neopositivismo. Dice Infeld: "Per il positivista logico il filosofo, nel moderno significato della parola, è un uomo il cui interesse è rivolto ai fondamenti del nostro sapere, alla chiarificazione dei suoi concetti basilari. Solo in questo senso Einstein può essere chiamato un filosofo, e in questo senso egli è uno dei più grandi filosofi che ci siano mai stati"²⁰². Niente di più distante e di

¹⁹⁸ Sull'intera vicenda ci permettiamo di rinviare ai nostri lavori: H. Bergson, *Lettere a Albert Einstein*, introduzione, trascrizione, traduzione e note di A. Genovesi, in "Filosofia", XLIX, 1, 1998, pp. 3-41; A. Genovesi, *Il carteggio tra Albert Einstein ed Edouard Guillaume. "Tempo universale" e teoria della relatività ristretta nella filosofia francese contemporanea*, Franco Angeli, Milano 2000; A. Genovesi, *Bergson e Einstein. Dalla percezione della durata alla concezione del tempo*, Franco Angeli, Milano 2001.

¹⁹⁹ A. Pais, "Subtle is the Lord...". *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, New York 1982; trad. it. di L. Belloni e T. Cannillo, "Sottile è il Signore...". *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino 1986 p. 24.

²⁰⁰ Ivi, p. 25.

²⁰¹ L. Infeld, *Albert Einstein*, Charles Scribner's Sons, New York 1952; trad. it. di O. Nicotra, *Albert Einstein*, Einaudi, Torino 1998, p. 134.

²⁰² Ivi, p. 135.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarà questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

logna?”. All’udire ciò il genitore, persona poco incline allo spettacolo della natura e men che mai a intraprendere discussioni che non fossero saldamente ancorate all’evidenza dell’esperienza sensibile, dopo un sussulto di collera non poté che disperarsi mettendosi, come si suol dire, le mani nei capelli al pensiero degli enormi sacrifici sostenuti per elevare il prestigio sociale della famiglia; sacrifici il cui risultato, così a lui sembrava, si concretizzava in una domanda palesemente incomprensibile per l’ovvietà della risposta. Chissà quale sarebbe stata la reazione del poveretto sapendo che Albert Einstein, pressappoco nello stesso periodo si diletta a porre in modo analogo simili interrogativi a un giovane fisico, Abraham Pais, che ricorda così l’episodio: “Deve essere stato attorno al 1950. Camminavamo, io e Einstein, lungo la strada che dall’Institute for Advanced Study conduceva alla sua abitazione, quando si fermò. ‘Veramente è convinto’ mi chiese ‘che la Luna esiste solo se la si guarda?’”²⁰⁵.

Benché impiegasse la maggior parte del proprio tempo sul versante della problematica relativistica, la testimonianza di Pais conferma che anche dopo il 1935 Einstein non cessa di dedicare spazio e ironia all’assunto filosofico che, a suo avviso, starebbe al fondamento della meccanica quantica. Del resto, non poteva essere altrimenti. Bisogna considerare che, dopo la teoria della relatività generale, si poneva un problema particolarmente imbarazzante: con la teoria del 1916 la gravitazione era di fatto ridotta a una geometria, ed è evidente che ciò la poneva su un piano diverso rispetto a quello dell’elettromagnetismo. Il problema non era avvertito solo da Einstein; tanto è vero che già dal 1918 il matematico H. Weyl si era dato da fare per elaborare una teoria che unificasse la gravitazione e il magnetismo. Entrambi venivano ridotti a geometria. Ma Weyl non era il solo a cimentarsi nell’impresa. Un anno dopo, nel 1919, il matematico T. Kaluza, conterraneo e concittadino del grande Kant, riusciva a mostrare che la semplice aggiunta di un’ulteriore dimensione spaziale lasciava intatti i limiti entro i quali restava valida la geometria di Riemann. Il Nostro, naturalmente, era ben al corrente di questi sviluppi, che prese attentamente in esame. Pur riconoscendo il fascino della concezione elaborata da Weyl, Einstein si rese ben presto conto che in essa era presente una grave conseguenza che ne comprometteva decisamente l’accettazione. Dalla teoria di

²⁰⁵ Pais, *op. cit.*, p. 15.

Weyl conseguiva infatti che il ritmo con il quale marciano gli orologi verrebbe a dipendere dalle linee di universo percorse dagli stessi orologi nel passato. Un'eventualità, questa, esclusa dal fatto che le righe spettrali di ciascun elemento, che altro non sono se non la misura del ritmo atomico, sono rigidamente fissate, al di là della linea di universo che il singolo atomo abbia potuto seguire o potrà percorrere. La teoria avanzata da Kaluza era più intrigante, ma anche più inquietante: si sarebbe dovuta pensare una dimensione in più dello spazio-tempo, cioè $4 + 1$. Il fisico tedesco la prese in esame più volte e a distanza di anni, ma non la seguì. Del resto, già nel 1925, aveva avanzato il tentativo di una teoria unificata, ed era persino giunto a ottenere le equazioni della gravitazione e quelle di Maxwell. Fu questa prospettiva, quella dell'inserimento di un tensore non simmetrico, che il fisico di Ulm riprenderà dopo il 1945 e continuerà a occuparlo fino a pochi istanti prima della morte. Ma dietro, sullo sfondo dell'unificazione, c'era tuttavia qualcos'altro: l'esigenza di risolvere il dualismo onda-corpuscolo, al quale aveva a suo tempo conferito tanto rilievo oggettivo.

TEORIA ED ESPERIENZA

1. La nozione di “trascendentale”

Per comprendere pienamente il dissenso che caratterizza la posizione di Einstein nei confronti della meccanica quantica consideriamo opportuno chiarire sin d'ora il significato di un termine il cui uso è spesso tanto inflazionato quanto improprio. Lo faremo prendendo ad esempio Immanuel Kant che, nel secondo paragrafo dell'“Introduzione alla logica trascendentale” della seconda edizione della *Critica della ragion pura*, afferma:

E qui faccio un'osservazione che concerne tutte le considerazioni successive e che sarà bene tener sempre innanzi agli occhi: e cioè che non bisogna chiamare trascendentale ogni conoscenza a priori, bensì solamente quella attraverso la quale conosciamo che e come alcune rappresentazioni (intuizioni o concetti) sono impiegate o sono possibili esclusivamente a priori (cioè la possibilità della conoscenza e il suo uso a priori). Pertanto né lo spazio né una sua qualsiasi determinazione geometrica a priori sono rappresentazioni trascendentali; lo sono invece soltanto la conoscenza dell'origine non empirica di queste rappresentazioni e la possibilità che tuttavia posseggono di riferirsi a priori agli oggetti dell'esperienza¹²⁹.

Come è stato giustamente osservato,

“trascendentale” non è quindi lo spazio considerato come forma *a priori*, né una possibile determinazione geometrica di esso (per esempio, lo spazio a una, due, tre... *n* dimensioni), ma il nostro “modo” di conoscerlo come “struttura” della conoscenza, ponendo il problema della sua natura, della sua origine, della sua funzione (come “struttura”) per quanto riguarda la conoscenza

¹²⁹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, in *Immanuel Kant Werkausgabe*, Hersg. von Wilhelm Weischedel, Zürich 1977, Bd. III; trad. it. a cura di P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino 1977, p. 29.

in generale e la conoscenza geometrica in particolare. Lo stesso discorso si può fare, secondo Kant, per tutte le altre “forme” o strutture del nostro conoscere, e in maniera particolare per le categorie dell’intelletto le quali, prese di per sé, sono sì *a priori* ma non *trascendentali*, perché trascendentale è solo il nostro modo di conoscere le stesse categorie e di conoscere per mezzo delle categorie. *A priori* e *trascendentale* vengono quindi a muoversi su *due piani* diversi, perché diversa è la loro funzione: conoscitiva e teoretica quella dell’*a priori*; filosofica e metateorica quella del *trascendentale*, che pur presupponendo l’*a priori* va di là da esso, giacché il suo scopo è quello di fondare, di legittimare, di giustificare quello che già c’è in maniera universale (c’è per tutti gli uomini) e necessaria (non può non esserci, perché altrimenti non avremmo conoscenza)¹³⁰.

Ben diversa è l’accezione kantiana del termine, offerta dai *Prolegomena* del 1783. Precisa infatti il filosofo di Königsberg:

La parola “trascendentale”, il cui significato in tanti modi da me spiegato non è stato neppure una volta capito dal recesente (tanto di sfuggita egli ha visto il tutto), non significa qualcosa che oltrepassa ogni esperienza, ma qualcosa che certo la precede (*a priori*) ma non è determinato a nulla più che a render possibile la conoscenza nell’esperienza. Quando questi concetti oltrepassano l’esperienza, allora si dice trascendente il loro uso, che ben si distingue da quello immanente, cioè limitato all’esperienza¹³¹.

Siamo di fronte a un’identificazione tra *a priori* e trascendentale. Per dirla con Francesco Barone.

È qui chiaro che “trascendentale” non è riferito alla conoscenza circa la possibilità e applicabilità *a priori* delle rappresentazioni, bensì alle rappresentazioni stesse per caratterizzarne l’apriorità (...) In quest’ultima accezione il termine viene sostantivato e si parla del trascendentale (o dell’*a priori*) riferendosi a quelle strutture della conoscenza (intuizioni o concetti) che non sono derivate dall’esperienza e che tuttavia la rendono possibile¹³².

¹³⁰ S. Marcucci, *Studi kantiani*, vol. III, Maria Pacini Fazzi, Lucca 1988, pp. 47-48.

¹³¹ I. Kant, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*, in *Immanuel Kant Werkausgabe...*, cit., Bd. V; trad. it. a cura di R. Assunto, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza*, Laterza, Roma-Bari 1979, p. 146, n. 1.

¹³² F. Barone, *Il trascendentalismo kantiano e l’epistemologia*, in “Filosofia”, XXIII, 3, 1972, p. 226.

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

Ora, è proprio questa seconda accezione che, come tenteremo di mostrare, caratterizza la posizione espressa da Einstein, che non userà mai il termine “trascendentale”, ma sempre il suo gemello, cioè quello di *a priori*.

2. Le “premesse” di Kant e le “conclusioni” di Hume

In un breve passo di una lettera inviata da Albert Einstein a Max Born nel 1918 il padre della teoria della relatività afferma:

Sto leggendo fra l'altro i *Prolegomeni* di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo “a priori” in “convenzionali”, ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume¹³³.

Si tratta di una confidenza particolarmente rilevante perché non ci informa solo del fatto che Einstein ha letto un'opera kantiana di carattere teoretico, appunto i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che si presenterà come scienza* del 1783, che la lettura svolta è stata certamente attenta e meditata giacché individua nel concetto di giudizio sintetico *a priori* l'elemento che può determinare o meno l'assenso alla dottrina elaborata dal filosofo di Königsberg, ma soprattutto ci suggerisce i motivi che starebbero alla base del rifiuto einsteiniano della posizione espressa da Kant. Parliamo esplicitamente di rifiuto perché il disaccordo appare totale, giacché contempla tanto il dato fondamentale quanto i dettagli: l'*a priori* di Kant costituisce un sistema categoriale che potremmo dire naturale, definito (perché contempla, oltre alle due forme pure, *a priori*, della sensibilità, cioè lo spazio e il tempo, dodici e non più di dodici concetti puri dell'intelletto) e definitivo, ossia immodificabile¹³⁴, sicché

¹³³ A. Einstein, H.&M. Born, *Scienza e vita. Lettere 1916-1955*, Einaudi, Torino 1973, p. 11.

¹³⁴ Poiché pensare equivale a giudicare, e il pensiero è tale attraverso la formazione dei concetti, una volta individuate tutte le possibili forme di giudizio, pensava il filosofo prussiano, potremo disporre della tavola di tutte le funzioni logiche dell'intelletto. Afferma infatti Kant: “Questo è dunque l'elenco di tutti i concetti puri originari della sintesi, che l'intelletto contiene in sé a priori e in virtù dei quali soltanto è anche un intelletto puro; perché solo per mezzo di essi può comprendere qualcosa nel molteplice dell'intuizione, ossia può pensare un oggetto della medesima” (*Critica della ragion pura*, cit., p. 146). Tuttavia, osserva il filosofo di Königsberg polemizzando con Aristotele, “questa suddivisione è

secondo Einstein, sarebbe necessario attenuarne decisamente la rigidità con una nozione, come quella di convenzione, che consente una condizione più flessibile, meno vincolante e non ultimativa. Il commento espresso da Born di fronte alla confidenza del collega sembrerebbe così pienamente giustificato:

L'atteggiamento qui assunto da Einstein nei riguardi della filosofia di Kant implicava in definitiva un rifiuto. A quel tempo egli era strettamente empirista e seguace di Hume, ma in seguito cambiò: speculazioni e congetture prive di un solido fondamento empirico assunsero nel suo pensiero un'importanza sempre più grande¹³⁵.

Vi sono, a nostro avviso, serie ragioni per dubitare della fondatezza della valutazione espressa da Born. In linea di principio, pur concedendo che il fisico tedesco abbia avuto la forza di “non cadere nelle mani” del filosofo di Königsberg, da ciò non consegue affatto che il presunto rifiuto abbracci anche la problematica dell'*a priori*. Su base documentale è anzi possibile mostrare che tale problematica accompagna i nodi cruciali della riflessione einsteiniana dedicata alla teoria della relatività per proporsi poi chiaramente a partire dal 1919, cioè un anno dopo la lettura dei *Prolegomeni*, congiuntamente ai sempre più frequenti riferimenti diretti e indiretti a Kant. Che l'orizzonte sul quale viene a configurarsi passo dopo passo, rinuncia dopo rinuncia, la teoria della relatività ristretta sia quello illuminato dalla problematica dell'*a priori* o del trascendentale, risulterà chiaro non appena si sarà fatta mente locale a quanto è stato affermato a suo tempo nella sua sede opportuna, allorché abbiamo preso in esame le memorie fondamentali del 1905. Si ricorderà che Einstein era giunto a denunciare le due ipotesi arbitrarie, l'una relativa alla grandezza tempo, l'altra riguardante le grandezze spaziali, vero e proprio fondamento della regola classica di addi-

desunta sistematicamente da un principio comune, ossia dalla facoltà di *giudicare* (equivalente a quella di pensare); non è dunque ricavata rapsodicamente da una ricerca dei concetti puri, condotta ad arbitrio e della cui completezza numerica non è data certezza poiché si procede soltanto per intuizione, senza rendersi conto che, così facendo, non si è in grado di spiegare perché questi e non altri sono i concetti propri dell'intelletto puro. Andare alla ricerca di questi concetti fondamentali fu un progetto ben degno di quell'acuto pensatore che fu Aristotele; mancando di ogni principio, egli procedette però alla raccolta di essi come gli si andavano presentando” (*ibid.*). Così, precisa, “seguendo Aristotele, chiamiamo questi concetti categorie, poiché il nostro scopo, nella sua origine prima, fa tutt'uno col suo, benché ne diverga assai nell'esecuzione” (ivi, p. 145).

¹³⁵ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 12.

zione delle velocità. Queste due ipotesi erano responsabili del fatto che la teoria formulata da Lorentz sembrava dover essere considerata irrimediabilmente inconciliabile con il principio di relatività. In termini matematici, la prima ipotesi arbitraria risultava trascrivibile nell'equazione

$$t' = t.$$

La seconda ipotesi arbitraria, che consisteva nell'identificazione tra la configurazione cinematica di un corpo e la sua configurazione geometrica assumeva invece la forma:

$$x' = x - vt; y' = y; z' = z.$$

Se riuniamo insieme tutte queste uguaglianze, otterremo il gruppo di trasformazione di Galileo, ovvero le equazioni fondamentali della meccanica newtoniana riferite a un sistema di assi cartesiani animato da un moto rettilineo e uniforme:

$$\begin{cases} t' = t \\ x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Chiediamoci adesso: che cosa significa, sul piano epistemologico, la denuncia einsteiniana formulata con un linguaggio inusuale per un fisico e che ricorda, non certo vagamente, quello critico proprio del filosofo di Königsberg? Risponderemo con le stesse parole con le quali il fisico tedesco si esprime nella lettera del 24 aprile 1920 a Maurice Solovine proprio a proposito della teoria della relatività.

Denunciare le due ipotesi arbitrarie significa, dice Einstein, affermare semplicemente il fatto che “non c'è in fisica nozione il cui impiego sia a priori necessario o giustificato. Una nozione acquista il suo diritto all'esistenza unicamente mediante la sua connessione chiara e univoca degli eventi, rispettivamente delle esperienze fisiche”¹³⁶. Sicché “di ogni nozione fisica deve esser data una definizione tale che si possa, in virtù di questa definizione, de-

¹³⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 19.

cidere in principio se essa si trova o non si trova adeguata al caso concreto”¹³⁷.

E cosa vuol dire tutto questo? Anzitutto, che non esistono nozioni definitive e assolute: nemmeno quelle di tempo e di spazio che, è importante sottolinearlo di nuovo, per Kant sono intuizioni pure e *a priori* (pure, perché non empiriche, *a priori*, perché precedono ogni esperienza e anzi la rendono possibile), mentre per Einstein sono invece semplicemente dei concetti¹³⁸. In secondo luogo, che l’esperienza fisica non si riduce alla semplice connessione dei dati che ci provengono dai sensi, ma si prospetta come un costruito.

Sul piano fisico, come ben sappiamo, il rigido divieto imposto dal fisico tedesco rappresenta la chiave di volta per risolvere il problema del rapporto tra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, considerato privo di ogni conciliazione fino a quel momento, giacché proprio attraverso l’analisi del tempo e dello spazio dal punto di vista fisico “risultò evidente che nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce, e che attenendosi strettamente e sistematicamente a entrambe queste leggi si poteva pervenire a una teoria logicamente ineccepibile. A essa si dà il nome di teoria della relatività ristretta”¹³⁹. Perché “risultò evidente”? Semplicemente perché se tempo e spazio non sono grandezze assolute non può nemmeno esserci una velocità infinita, come invece presuppone la regola del parallelogramma. Detto in altri termini, la velocità di propagazione della luce è una velocità finita e soprattutto costante nel vuoto, indipendente dal moto del corpo che la emette.

Veniamo adesso al breve articolo pubblicato da Einstein il 25 dicembre 1919. La sua importanza sta nel fatto che esso segna, come ci auguriamo di mostrare, una sottile ma decisa presa di posizione a favore dell’impostazione costruttivista del pensiero scientifico, a conferma di quanto affermato a proposito delle nozioni di spazio e di tempo.

Contrariamente a quanto si può pensare, osserva Einstein, lo statuto metodologico della fisica in quanto scienza empirica non si identifica né si esaurisce con il procedimento induttivo. Si badi bene: il fisico tedesco non sostiene che il metodo induttivo non ha alcun valore per la conoscenza scientifica, bensì che, considerando criticamente lo svi-

¹³⁷ *Ibid.*

¹³⁸ Cfr. Einstein, *Relatività...*, cit., p. 57.

¹³⁹ Ivi, pp. 57-58.

luppo storico della scienza, le procedure induttive si sono rivelate insoddisfacenti sul piano dei risultati. Afferma il Nostro: “I progressi veramente grandi della conoscenza della natura si sono avuti da una via quasi diametralmente opposta a quella dell’induzione”¹⁴⁰. Infatti,

se il ricercatore si avvicinasse alle cose senza una qualche idea preconcepita, come potrebbe egli cogliere dall’enorme quantità di una complicatissima esperienza quei fatti che sono abbastanza semplici da rendere palesi relazioni legiformi? Galilei non avrebbe mai potuto trovare la legge della caduta libera dei gravi senza l’idea preconcepita che i rapporti che troviamo di fatto sono complicati dagli effetti della resistenza dell’aria, e che quindi dobbiamo considerare cadute dei gravi in cui tale resistenza gioca un ruolo sostanzialmente nullo¹⁴¹.

La scarsa fecondità del metodo induttivo risiederebbe, dunque, nell’impossibilità di derivare direttamente elementi conoscitivi dalla base empirica e osservativa. Si pone così il delicato problema di definire la natura della impossibilità appena denunciata: si tratta di un’impossibilità logica o pragmatica? Se l’impossibilità è di natura pragmatica e determinata unicamente dall’incapacità manifesta di gestire una massa enorme di dati, ben si spiegano i pochi risultati perseguiti, come sostiene Einstein, attraverso il metodo induttivo. Il ricorso all’impostazione costruttivista, risponderebbe allora a necessità di ordine pratico e risiederebbe, in sostanza, nell’utilità di poter continuare l’attività di ricerca di connessione tra i dati empirici: un ricorso tattico e soprattutto debole; il fatto che attualmente siamo in grado, con l’ausilio di calcolatori estremamente sofisticati e potentissimi, di gestire e operare contemporaneamente miliardi di informazioni ogni secondo, lo dimostrerebbe. Al contrario, se l’impostazione sostenuta dal fisico tedesco trova la sua giustificazione in un’impossibilità di natura logica, nel senso forte della tesi humiana della non derivabilità o deducibilità dei concetti dal dato empirico, sicché l’induzione non ha valore dal punto di vista logico¹⁴², si capisce altrettanto bene la ragione della necessità di avvicinarsi alle cose disponendo di un elemento *a priori*, un’“idea preconcepita” avanzata dal ricercatore, ma

¹⁴⁰ A. Einstein, *Induktion und Deduktion in der Physik*, in “Berliner Tageblatt”, 25 Dezember 1919; trad. it., *Induzione e deduzione nella fisica*, in “Nuova civiltà delle macchine”, XIII, 1-2, 1995, p. 149.

¹⁴¹ *Ibid.*

¹⁴² Cfr. D. Hume, *Ricerche sull’intelletto umano e sui principi della morale*, Sez. IV, Parte prima, Laterza, Roma-Bari 1980, pp. 38-39 e pp. 52-53.

dovremmo riconoscere e denunciare la palese contraddizione in cui cadrebbe Einstein, dal momento che non si è più in grado di giustificare i successi scientifici che, sebbene in piccola parte, sono stati comunque ottenuti attraverso procedure induttive. Come si esce da questa situazione? L'unica via che intravediamo per superare lo scoglio, ed evitare così di ricorrere alla drammatica ipotesi di un Einstein schizofrenico, patologia che peraltro non gli fu mai diagnosticata, è quella di stabilire che cosa effettivamente intende il fisico tedesco con “metodo induttivo” nel contesto considerato, se cioè l'espressione si riferisce direttamente alla nozione puramente logica di inferenza induttiva o se, invece, l'accezione einsteiniana considera le procedure induttive nel senso della loro applicazione e complicazione nell'ambito del progressivo sviluppo scientifico.

Se questa è la direzione, nel percorrerla tornerà utile e vantaggioso guardare a chi questo percorso lo ha già compiuto, ossia a Ernst Mach e, precisamente, al capitolo intitolato “Deduzione e induzione dal punto di vista psicologico” dell'opera *Erkenntnis und Irrtum* pubblicata nel 1905. L'utilità del riferimento machiano sta nel fatto che lo scienziato austriaco riesce a dimostrare non solo che, sul piano teorico, “le regole della logica non possono avere il compito di aprire nuove fonti cognitive. Debbono servire, piuttosto, a saggiare la concordanza o la discordanza delle conoscenze ottenute da altre fonti, e nel secondo caso a indicare la necessità di istituire una concordanza piena”¹⁴³; ma soprattutto, dal punto di vista storico, che “l'operazione psichica che fa ottenere nuove conoscenze, per lo più designata col termine inadatto di ‘induzione’, non è un processo semplice, ma assai complicato. Anzitutto non è un processo logico, anche se può contenere processi logici come membri intermediari e ausiliari”¹⁴⁴.

¹⁴³ E. Mach, *Conoscenza ed errore. Abbozzi per una psicologia della ricerca*, Einaudi, Torino 1982, p. 297.

¹⁴⁴ Ivi, p. 312. Se la logica non apre alcun nuovo orizzonte cognitivo, “è ben strano, allora”, osserva Mach “che la maggior parte degli scienziati che si sono occupati dei metodi della ricerca continuano ad indicare nell'*induzione* lo strumento principale della ricerca, quasi che le scienze non abbiano altra occupazione che quella di ordinare in classi i fatti individuali a portata di mano. L'importanza di questa occupazione non va contestata, però non esaurisce il compito dello scienziato: egli deve prima di tutto individuare i caratteri dell'oggetto d'indagine e le loro connessioni, cosa molto più difficile del classificare ciò che è già noto. (...) Ora, questo processo non ha niente a che vedere con l'induzione. Ma se riflettiamo che l'osservazione o enumerazione di *molti* casi, che malgrado le variazioni concordano in certi caratteri, ci porta con maggior facilità a concepire *astrattamente* i caratteri *stabili*, che non la considerazione di *un solo* caso, per analogia questo processo ricorderà di fatto l'induzione. Per questo forse il termine si è conservato così a lungo” (ivi, p. 306).

Solo considerando il procedimento induttivo nel senso indicato da Mach si può legittimamente sostenere, come fa Einstein, che tutte le grandi scoperte della fisica hanno un carattere ipotetico e, conseguentemente, precisare che il ricercatore parte “sempre dai fatti, il cui nesso costituisce lo scopo dei suoi sforzi. Ma egli non perviene al suo sistema teorico per via metodica, induttiva; egli, piuttosto, si avvicina ai fatti tramite una scelta intuitiva tra teorie pensabili, basate su assiomi”¹⁴⁵. Ora, anche per Mach l’intuizione assolve un compito essenziale nell’acquisizione di nuove conoscenze, ne è anzi il “fondamento”, ma essa non si applica ai fatti favorendo einsteinianamente la scelta di un costrutto teorico; al contrario, l’intuizione machiana è sempre direttamente legata a *un* particolare dato dell’osservazione¹⁴⁶. Afferma Mach:

Per poter dire *che* un elemento dipende da uno o più altri, *come* si dispone la loro dipendenza reciproca, *che tipo* di dipendenza funzionale c’è, lo scienziato deve aggiungere del suo, al di là dell’osservazione immediata. Non si può pensare di poter ridurre tutto questo chiamandolo descrizione¹⁴⁷

giacché

il lavoro principale nel reperimento di nuove conoscenze spetta all’*astrazione* e all’*attività della fantasia*¹⁴⁸.

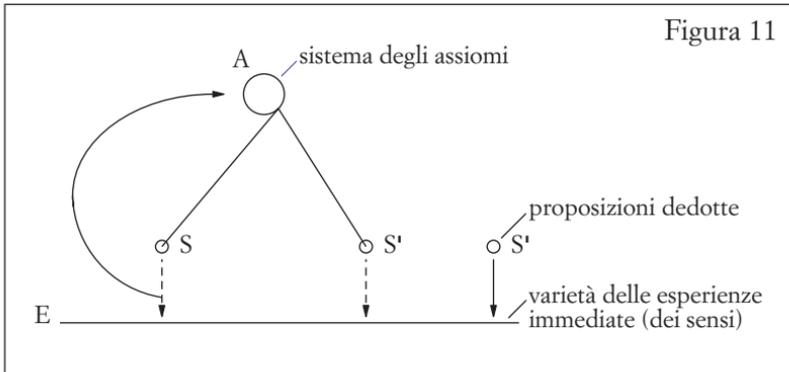
¹⁴⁵ Einstein, *Induzione e deduzione nella fisica*, cit., p. 149.

¹⁴⁶ Tutte le nuove conoscenze, dice Mach, “germinano sempre dall’osservazione, che può essere ‘esterna’, sensoriale, oppure ‘interna’, e allora riguarda le rappresentazioni. L’attenzione sottolinea ora questa ora quella connessione di elementi e la fissa in concetti: quando il dato che si reperisce viene mantenuto rispetto ad altri, e si dimostra sostenibile, c’è conoscenza, nel caso contrario errore. Il fondamento di ogni conoscenza dunque è l’intuizione, che può riferirsi sia al sentito sensorialmente, sia al rappresentato in modo puramente intuitivo, sia al potenzialmente intuitivo, concettuale ecc. (...) Sia che veniamo condotti a un nuovo dato effettivo della vita sensoriale o rappresentativa per puro caso fisico o psichico, o mediante estensione pianificata dell’esperienza, si tratta sempre di questo dato, da cui scaturisce ogni conoscenza” (Mach, *op. cit.*, p. 308).

¹⁴⁷ Ivi, pp. 309-310.

¹⁴⁸ Ivi, p. 312. Secondo Mach “lo scienziato esperto può astrarre per tentativi anche in modo intenzionale, con la piena consapevolezza di correre un rischio – a prescindere dalle circostanze accessorie. Allora l’idea più generale va saggiata – per quanto concerne la sua sostenibilità – con l’osservazione e l’esperimento. Ma poiché la rappresentazione del dato individuale viene plasmata ed estesa a idea più generale per tentativi, questa integrazione provvisoria dà un certo spazio all’arbitrio. Uno o più casi osservati possono offrire punti d’appoggio a una parte di questo processo di estensione del dato. Così Keplero può vedere che Marte si muove in un’orbita ovale, Galilei che la velocità di caduta aumenta con l’aumentare dello spazio (...); ma un’altra parte deve essere aggiunta per attività autonoma sulla base del patrimonio mentale accumulato. Così, quando Keplero suppone, per tentativi, che l’orbita di Marte sia un’ellisse, si tratta di una sua costruzione. Lo stesso vale per il presupposto galileiano della proporzionalità tra tempo e velocità della caduta” (ivi, p. 309).

Il processo che conduce il fisico teorico a nuove scoperte si articola per Einstein nei seguenti momenti, rappresentabili graficamente come in figura 11.



Una comprensione intuitiva dell'essenziale di un grosso complesso di fatti porta il ricercatore alla costituzione di un principio fondamentale ipotetico o di più principi di tal genere. Dal principio fondamentale (sistema di assiomi) egli deduce in via puramente logico-deduttiva le conseguenze nella maniera più completa possibile. Queste conseguenze derivabili dal principio fondamentale, spesso attraverso sviluppi e calcoli complicati, vengono poi poste a confronto con le esperienze e forniscono così un criterio per la giustificazione del principio fondamentale ammesso. Tale principio (assiomi) e le conseguenze formano insieme quella che si dice una "teoria"¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Siamo ora in condizione di comprendere che cosa il fisico tedesco intende dire quando afferma che i veri, grandi progressi della fisica hanno seguito una strada *non interamente* ma "quasi diametralmente opposta" all'induzione. Il "quasi" sta a significare che l'elaborazione dell'elemento teorico si è sviluppata, in questi casi, a partire dal *già noto*. Di qui la necessaria e storicamente adeguata distinzione di natura tra le teorie fisiche. Dice infatti Einstein nel 1934: "In fisica si possono distinguere teorie di natura diversa. La maggior parte sono teorie costruttive: per mezzo di un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi. È così che la teoria cinetica dei gas cerca di ricondurre i fenomeni meccanici, tecnici e di diffusione a movimenti di molecole, vale a dire a costruire partendo dall'ipotesi del movimento molecolare. Quando si dice che si è riusciti a comprendere un gruppo di fenomeni naturali, significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione. Ma accanto a questa classe importante di teorie ve n'è una seconda che invece del metodo sintetico impiega il metodo analitico. Qui il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di fenomeni

Il momento progettuale, costruttivo, creativo dell'indagine scientifica emerge così sulla base dell'insegnamento umano, di cui Kant fece per primo tesoro¹⁵⁰, della non diretta deducibilità del fattore teorico dal dato empirico, e mostra che Einstein non solo non ha abbandonato il concetto dell'*a priori* dopo la lettura "deliziosa" dei *Prolegomeni*, ma che anzi da essa trasse ben presto le dovute conseguenze. Certo, egli si guarda bene dall'affermare esplicitamente con Kant che "l'intelletto non attinge le sue leggi (*a priori*) dalla natura, ma le prescrive ad essa"¹⁵¹; ma, coerentemente, parla di "criterio di giustificazione", e la nozione di "giustificazione" è tipicamente kantiana. Detto in altri termini, l'accettare o meno una proposizione come dotata di significato dal punto di vista scientifico non è questione di fatto, ma di diritto: il principio o le ipotesi avanzate per render conto di una serie di fenomeni non è accettabile perché dai fenomeni esso trae origine e a essi ritorna per esser verificato, in quanto risulta fondato sulla sua propria base empirica; la validità del principio dipende anzitutto dalla sua legittimità, cioè dalla possibilità di essere sottoposto al vaglio dell'esperimento. Ne deriva che una teoria, osserva opportunamente il fisico tedesco, può

essere riconosciuta come sbagliata, quando c'è un errore logico nelle sue deduzioni, o come inesatta quando un fatto non si accorda con una delle sue conseguenze. Ma non si può mai dimostrare la verità di una teoria. Perché non si sa mai che anche nel futuro non si avrà un'esperienza che contraddica le sue conseguenze; e perché sono sempre pensabili altri sistemi teorici che siano in grado di connettere i medesimi fatti dati¹⁵².

Il 6 aprile 1922, in occasione dell'incontro a Parigi con i membri della *Société Française de Philosophie* sul tema della teoria della

naturali determinate empiricamente dalle quali derivano in seguito criteri matematicamente formulati, ai quali i fenomeni particolari o le loro immagini teoriche devono soddisfare. È così che la termodinamica, partendo dal risultato generale dell'esperienza secondo il quale il moto perpetuo è impossibile, cerca di determinare, per via analitica, le relazioni alle quali i fenomeni particolari devono uniformarsi. La teoria della relatività appartiene alla seconda categoria" (A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, Newton & Compton Editori, Roma 1975, pp. 84-85).

¹⁵⁰ Cfr. Kant, *Prolegomeni ad ogni futura metafisica...*, cit., pp. 7-9.

¹⁵¹ Ivi, p. 82.

¹⁵² Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., p. 149. Einstein indica anche un criterio di scelta tra due teorie concorrenti quando, in chiusura, afferma che "se sono a disposizione due teorie entrambe compatibili con il materiale fattuale dato, allora non esiste alcun criterio per preferire l'una o l'altra che lo sguardo intuitivo del ricercatore. È così che si capisce come ricercatori acuti, che dominano teorie e fatti, possono tuttavia essere passionali sostenitori di teorie opposte" (*ibid.*).

relatività, Einstein torna sulla questione dell'*a priori* di Kant e critica severamente la figura del Mach “filosofo” in virtù della nozione di “sistema”, anch’essa tipica, benché non esclusiva, del criticismo kantiano. Non possiamo esser sorpresi di ciò! Dice Einstein:

Ciò che mi sembra essere la cosa più importante nella filosofia di Kant è che vi si parla di concetti *a priori* per edificare la scienza. Si possono opporre due punti di vista, l’apriorismo di Kant, per il quale taluni concetti preesistono nella nostra coscienza, e il convenzionalismo di Poincaré. Questi due punti di vista concordano su questo: che, per essere edificata, la scienza ha bisogno di concetti arbitrari; quanto a stabilire se questi concetti sono dati *a priori*, o sono delle convenzioni arbitrarie, io non posso dire niente¹⁵³.

È facile rilevare quanto questa dichiarazione richiami, rendendola al contempo più chiara, la confidenza fatta da Einstein a Born quattro anni prima. Ma, diversamente dal 1918, egli non afferma di non poter esser d’accordo con la dottrina kantiana: la questione non si pone nemmeno. È quindi significativo che, pur non entrando nel merito della “naturalità” o “convenzionalità” dell’*a priori*, il fisico tedesco suggerisca indirettamente il proprio punto di vista guardando, come annunciavamo, a Mach.

Il sistema di Mach (...) studia le relazioni che esistono tra i dati dell’esperienza; l’insieme di queste relazioni è, per Mach, la scienza. Questo è un punto di vista sbagliato; insomma, ciò che fa Mach è un catalogo e non un sistema. Tanto Mach fu un buon [fisico] meccanico, quanto fu un riprovevole filosofo. Quest’ottica limitata sulla scienza lo portò a rifiutare l’esistenza degli atomi. È probabile che, se Mach fosse tuttora vivente, cambierebbe opinione. Tengo tuttavia a dire che su questo punto, cioè che i concetti possono cambiare, io sono completamente d’accordo con Mach¹⁵⁴.

Se i “concetti possono cambiare” in virtù del divieto humiano e dell’insegnamento machiano, è evidente che non vi può essere un sistema categoriale esaustivo e immutabile, il che significa che la dottrina kantiana è, dal punto di vista einsteiniano, inaccettabile

¹⁵³ A. Einstein, *Comptes rendus des séances de la Société Française de Philosophie, séance du 6 avril 1922. La théorie de la relativité*, in “Bulletin de la Société Française de Philosophie”, XVII, 1922, pp. 101-102.

¹⁵⁴ Einstein, *Induzione e deduzione...*, cit., pp. 111-112.

non tanto perché storicamente datata, quanto perché teoricamente viziata all'origine. Ciò che non deve essere accettato non risiede tanto nella pretesa definitività o esaustività dell'*a priori*, quanto, piuttosto, nella modalità attraverso la quale Kant sarebbe giunto ad affermarlo; il dissenso einsteiniano è insomma rivolto al fondamento che impone come conseguenze la staticità e la rigidità e, necessariamente, una diversa concezione della natura del pensiero.

Il riferimento a Hume, confidenzialmente manifestato a Born, si spinge del resto ben oltre le motivazioni di carattere estetico, peraltro condivise dallo stesso Kant; riguarda la risposta che quest'ultimo pensava di aver soddisfacentemente dato al problema sollevato dal filosofo di Edimburgo: quello della possibilità di inferire, a partire dall'esperienza, qualsiasi nozione che possa essere considerata certa ed evidente quanto lo sono i concetti della matematica e della geometria, a cominciare dalla connessione di causa ed effetto. Afferma infatti il Nostro: "Le idee si riferiscono alle esperienze dei sensi, ma non possono mai derivarne logicamente. Per questa ragione non ho mai potuto comprendere la questione dell'*a priori* nel senso di Kant"¹⁵⁵. Detto in altri termini, "non esistono categorie definitive nel senso di Kant"¹⁵⁶, né, conseguentemente, la possibilità di distinguere dei giudizi sintetici *a priori* da altri giudizi sintetici *a posteriori*. Osserva ancora Einstein:

Fermamente convinto che certi concetti fossero indispensabili, e che fossero proprio quelli che si erano dimostrati tali nella pratica, [Kant] li interpretò come le necessarie premesse di ogni tipo di speculazione, e li distinse dai concetti di origine empirica. Io sono convinto, invece, che questa distinzione sia erronea, cioè non ponga il problema nei suoi giusti termini¹⁵⁷.

Ed è per l'appunto questa "convinzione erronea" che spiega come e perché possa darsi una "meraviglia" anomala e fuorviante, come quella relativa alla seconda, cruciale, esperienza adolescenziale ricordata dal fisico tedesco, sulla quale abbiamo indirizzato inizialmente la nostra attenzione. Kant, conclude il Nostro,

¹⁵⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 93.

¹⁵⁶ Ivi, p. 39.

¹⁵⁷ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 8-9.

fu portato fuori strada dalla falsa opinione – difficile da evitare ai suoi tempi – che la geometria euclidea fosse necessaria al pensiero e fornisse una conoscenza certa (cioè indipendente dall'esperienza sensoriale) sugli oggetti della percezione "esterna". Da questo errore facilmente comprensibile egli dedusse l'esistenza di giudizi sintetici a priori, prodotti dalla sola ragione, e suscettibili, per conseguenza di pretendere assoluta validità¹⁵⁸.

Siamo dunque autorizzati a concludere che il fisico tedesco ha ormai abbandonato ogni riferimento al pensiero kantiano e respinto la prospettiva del "trascendentale" elaborata nei *Prolegomeni*? Per niente: la critica rivolta all'epistemologia machiana indica, proprio al contrario, che Einstein non doveva aver dimenticato l'invito del filosofo di Königsberg a tener ben ferma la distinzione tra "giudizi di esperienza" e "giudizi di percezione"¹⁵⁹, dal momento che la nozione di "sistema" presuppone non solo un principio direttivo, un filo conduttore che funge da elemento unificante, ma anche la necessaria e fondamentale assunzione che ciò che noi chiamiamo mondo esterno, realtà, può essere, seppur indirettamente, conosciuto adeguatamente.

Così, se di Kant sono inaccettabili le premesse, di Hume devono essere rifiutate le conclusioni, ovvero lo scetticismo e il probabilismo. Non è infatti difficile mostrare che entrambi i contenuti delle due sconvolgenti esperienze giovanili rientrano a pieno titolo, e ciò sia detto anche per la seconda esperienza debitamente emendata, nella prospettiva del trascendentale proposta dal filosofo di Königsberg: un risultato decisivo, questo, dal momento che tali esperienze precorrono ciò che Einstein non esiterà a indicare come la propria professione di fede dal punto di vista epistemologico (di qui la loro crucialità) e, soprattutto, rivelano la comune natura controinduttiva della libertà e del pensiero.

Per quanto riguarda l'affermazione di una realtà oggettiva, assunzione che caratterizza il contenuto della prima esperienza e deter-

¹⁵⁸ Einstein, *Replica ai vari autori*, in AA.VV., *Albert Einstein scienziato e filosofo*, cit., p. 624.

¹⁵⁹ Cfr. Kant, *Prolegomeni*, cit., § 18, pp. 55-56. Al § 26 Kant afferma: "Al lettore, per lunga consuetudine abituato a ritenere l'esperienza una composizione puramente empirica di percezioni e perciò a non pensare affatto che essa va molto più lontano di queste, e cioè dà ai giudizi empirici una validità universale, e perciò ha bisogno di una pura unità intellettuale, la quale precede *a priori*, a tal lettore, adunque, raccomando di far bene attenzione su questa distinzione della esperienza da un semplice aggregato di percezioni" (ivi, p. 70).

mina la stessa possibilità della fisica come scienza¹⁶⁰, lo stesso Einstein confessa:

Io non sono cresciuto nella tradizione kantiana, ma sono arrivato a capire l'aspetto veramente valido che si può trovare nella dottrina di Kant accanto agli errori che oggi, cioè troppo tardi, sono considerati molto ovvi. Quest'aspetto è contenuto nella proposizione: "Il reale non ci è dato, ma ci è proposto (come un indovinello)". Ciò significa ovviamente: una costruzione concettuale è una cosa che serve ad afferrare le relazioni interpersonali, e la sua autorità sta soltanto nella convalidazione. Questa costruzione si riferisce precisamente al "reale" (per definizione), e ogni ulteriore questione sulla "natura del reale" appare vuota di senso¹⁶¹.

Rispetto alla possibilità del conseguimento di una conoscenza certa e completa dei dati dell'esperienza attraverso il pensiero, dunque l'edificazione della fisica come scienza mediante proposizioni *a priori*, il Nostro afferma:

L'atteggiamento teorico che noi difendiamo si distingue da quello di Kant solo in quanto noi non concepiamo le "categorie" come se fossero immutabili (condizionate dalla natura del pensiero), ma come se fossero (in senso logico) libere convenzioni. Esse si presentano come categorie *a priori* solo in quanto il pensare, senza fondarsi su categorie e concetti in generale, sarebbe impossibile come il respirare nel vuoto¹⁶².

¹⁶⁰ È importante precisare che se, dal punto di vista generale, per il fisico tedesco "la fede in un mondo esterno indipendente dall'individuo che lo esplora è alla base di ogni scienza della natura" (Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 72), dal punto di vista particolare e proprio, "i concetti della fisica si riferiscono a un universo esterno reale, ossia (...) la rappresentazione degli oggetti (corpi, campi, ecc.) stabilita dalla fisica aspirano a un'esistenza reale' indipendente dai soggetti della percezione; d'altra parte queste rappresentazioni sono messe in relazione nel modo più certo possibile con le impressioni sensoriali. Inoltre, è caratteristico degli oggetti fisici l'essere concepiti come disposti in un continuo spazio-temporale; in questa disposizione appare essenziale il fatto che in un dato istante gli oggetti considerati dalla fisica reclamano un'esistenza singola autonoma in quanto 'collocati in regioni distinte dello spazio'. Fuori dell'ipotesi di una simile esistenza autonoma (di un 'essere così') dei singoli oggetti spazialmente separati – ipotesi che deriva in primo luogo dalla riflessione quotidiana – non sarebbe possibile un pensiero fisico nel senso per noi abituale; né si vede come potrebbero essere formulate e verificate delle leggi fisiche senza una netta distinzione di questo tipo" (Einstein, Born, *op. cit.*, p. 201).

¹⁶¹ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., pp. 625-626. E ancora: "Una delle grandi scoperte di Immanuel Kant fu il riconoscimento che la costruzione di un mondo esterno reale sarebbe priva di senso senza la sua comprensibilità" (A. Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, Boringhieri, Torino, p. 39, cit., p. 39).

¹⁶² Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 619.

A priori e a posteriori, teoria ed esperienza vengono così a configurare un rapporto di pari dignità fra i due estremi, l'empirismo e il razionalismo, in virtù di quella prospettiva dell'*a priori* o del "trascendentale" che caratterizza la concezione einsteiniana della scienza fisica; una concezione che se da un lato, fondando il suo "credo epistemologico", giustifica l'atteggiamento duramente critico che il fisico tedesco adotterà nei riguardi della meccanica quantica, dall'altro, rende trasparente il ruolo che la riflessione filosofica è stata chiamata a svolgere nella sua propria esperienza scientifica.

Con sottile ironia e limpida coerenza, Einstein annuncia in sede autobiografica il contenuto della propria fede scientifica previa giustificazione della parentesi aperta a proposito dell'esposizione delle due esperienze giovanili di cui abbiamo definitivamente accertato la crucialità. "Visto che mi sono permesso una digressione abbastanza lunga da interrompere il mio necrologio (...) non mi farò più scrupolo di enunciare ora in alcune proposizioni il mio credo epistemologico, di cui ho già accennato qualcosa incidentalmente"¹⁶³. Anzitutto, la fondamentale e logicamente irriducibile distinzione tra il piano delle esperienze offerte dai sensi, *a posteriori*, e il piano del pensiero, *a priori*: "Io distinguo da una parte la totalità delle esperienze sensibili, e dall'altra la totalità dei concetti e delle proposizioni che sono enunciati nei libri"¹⁶⁴. Sul piano del pensiero, "il sistema dei concetti è una creazione dell'uomo, né più né meno delle regole della sintassi"¹⁶⁵, e poiché "i rapporti interni fra i diversi concetti e proposizioni sono di natura logica e il compito del pensiero logico è strettamente limitato a stabilire tutte le connessioni interne fra concetti e proposizioni secondo regole ben definite, che sono appunto quelle della logica"¹⁶⁶, ne deriva che "una proposizione è corretta se, entro un certo sistema logico, viene dedotta secondo le regole logiche accettate"¹⁶⁷. Non tutti i sistemi logici, sebbene arbitrari, sono tuttavia da considerarsi sullo stesso livello: due condizioni, completezza ed economicità, ne sanciscono la piena accettabilità. In primo luogo, sono preferibili i sistemi "intesi a permettere la coordinazione più completa e quanto più possibile certa (intuitiva) con la totalità dell'esperienza dei sensi"¹⁶⁸; in

¹⁶³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 7-8.

¹⁶⁴ *Ivi*, p. 8.

¹⁶⁵ *Ibid.*

¹⁶⁶ *Ibid.*

¹⁶⁷ *Ibid.*

¹⁶⁸ *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

secondo luogo, si privilegiano quelli “intesi alla maggiore economia possibile dei loro elementi indipendenti da un punto di vista logico (concetti fondamentali e assiomi)”¹⁶⁹. Per quanto riguarda i rapporti *a priori* e *a posteriori*, conclude il fisico tedesco, “i concetti e le proposizioni acquistano ‘significato’, cioè ‘contenuto’, solo attraverso la loro connessione con le esperienze sensibili. Questa connessione è puramente intuitiva, non è di natura logica. Ciò che distingue la vuota fantasia dalla ‘verità’ scientifica è il grado di certezza con cui questa connessione, cioè questa associazione intuitiva, può essere compiuta, e null’altro”¹⁷⁰. Sicché “la verità contenuta in un sistema corrisponde alla *certezza* e *completezza* con cui è possibile coordinarlo con la totalità dell’esperienza”¹⁷¹ e, di conseguenza, “una proposizione corretta ripete la sua ‘verità’ da quella contenuta nel sistema a cui appartiene”¹⁷².

3. Un dissenso insanabile

Stando così le cose, memori dei fondamentali sviluppi ottenuti dalla fisica atomica, non si avrà difficoltà a riconoscere che mai e poi mai Einstein avrebbe potuto accettare le teorie quantiche nei termini con i quali esse si erano imposte con l’opera di Bohr e di Heisenberg. Al fondo dei principi di indeterminazione e di complementarità vi è infatti, come abbiamo accertato, la cruda e irriducibile negazione della nozione di reale sostenuta e difesa a oltranza dal fisico tedesco e, di conseguenza, come vedremo più avanti, la determinazione di connessione causale. Già nel 1930, in occasione degli ormai abitudinari incontri Solvay, Einstein incalzava gli stimati colleghi con un esperimento mentale che, tenuto conto dei concetti relativistici, avrebbe dovuto seppellire definitivamente, erano queste le intenzioni del suo creatore, le relazioni di incertezza. Immaginiamo una scatola metallica alla quale è stato opportunamente praticato un foro su una parete. Il pertugio può essere aperto e chiuso a piacimento utilizzando un otturatore che svolge la sua funzione attraverso un meccanismo a orologeria disposto all’interno della scatola. Poniamo adesso che la scatola contenga una radiazione; possiamo

¹⁶⁹ *Ibid.*

¹⁷⁰ *Ibid.*

¹⁷¹ *Ibid.* Il corsivo è nostro.

¹⁷² *Ibid.*

disporre tutti gli elementi a nostra disposizione in modo che a un certo istante dato, segnato sull'orologio, l'otturatore apra la strada quel tanto che è necessario per lasciar passare un fotone e, immediatamente dopo, ripristini la condizione di chiusura. Ebbene, pesando il contenitore prima dell'emissione e dopo l'avvenuta emissione del fotone, saremo in grado di dedurre sia la massa del fotone fuggiasco sia la sua energia. In questo modo otterremo, senza relazioni di incertezza o di indeterminazione reciproca, l'esatta misura del tempo e dell'energia.

Il diabolico congegno messo a punto da Einstein turbò, con molta probabilità, il sonno di molti dei fisici presenti all'incontro; di certo non fece dormire Bohr, che non poteva accettare di lasciar cadere in così malo modo gli sforzi congiunti compiuti in quegli anni. Il mattino seguente, il fisico danese era pronto a sostenere la causa dell'indeterminismo, sicuro di poter scardinare la trappola einsteiniana. La chiave per risolvere il problema era semplice e, al contempo, terribilmente efficace. Bohr spiegò che la misurazione del peso del contenitore metallico implica un margine di incertezza. Se immaginiamo di compiere la misura attraverso una lancetta che indicherà un numero sul quadrante della nostra bilancia, proprio nella posizione della lancetta avremo sempre, coerentemente con le tesi di Heisenberg, un margine di inesattezza. Inoltre, possiamo addirittura stabilire con precisione questo margine se conveniamo di riconoscere alla bilancia una quantità di moto. Solo che, in tal caso, la bilancia si muove in un campo gravitazionale, quello terrestre, e poiché il tempo misurato dall'orologio dipende, come è noto, proprio dalla sua posizione nel campo di gravitazione, la determinazione del momento in cui l'otturatore lascia passare il fotone avrà necessariamente un margine di incertezza. La meccanica dei quanti era salva. Einstein incassò una tremenda sconfitta, tanto più pesante quanto più la vittoria, come emerse con chiarezza, era stata ottenuta proprio grazie alla sua più geniale conquista, la relatività generale.

Naturalmente il fisico tedesco non si arrese, e anzi perseverò fino alla fine sostenendo le proprie ragioni. Tanto che, dopo appena due anni di stabile e definitiva residenza negli Stati Uniti, dove occupava una cattedra presso l'Institute for Advanced of Science di Princeton, nella prima metà di marzo del 1935 inviò alla "Physical Review" un breve ma denso articolo scritto in collaborazione con Boris Podolski e Nathan Rosen intitolato *Can quantum-mechanical*

description of physical reality be considered complete? (*La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*). Dopo una breve sezione introduttiva dove vengono esposti i risultati raggiunti, lo scritto si preoccupa di delimitare con precisione l'ambito, l'oggetto sul quale focalizzare l'attenzione, attraverso una considerazione di carattere epistemologico. Premesso che "ogni serio esame di una teoria fisica presuppone la distinzione fra la realtà obiettiva, che è indipendente da qualsiasi teoria, e i concetti fisici con cui la teoria stessa opera"¹⁷³, sicché si presume che questi concetti corrispondano alla realtà obiettiva, ce ne diano una rappresentazione, occorre compiere una fondamentale distinzione sul piano della valutazione del successo o meno di una tale teoria. Ci si deve interrogare, da una parte, sulla correttezza della teoria, dall'altra, sulla sua completezza. Ora, "la correttezza della teoria è giudicata in base al grado di accordo fra le sue conclusioni e l'esperienza umana; questa esperienza, che sola ci consente di inferire alcunché sul reale, assume in fisica la forma di esperimenti e misure"¹⁷⁴. Sul piano della completezza, in una teoria esaustiva vi dovrà essere un elemento in corrispondenza a ciascun elemento della realtà.

Dal momento che è questo l'oggetto del nostro discorso, converrà intendersi e tentare una definizione del termine completezza. Dice Einstein:

Qualunque significato si attribuisca al termine "completo", sembra necessario, per la completezza di una teoria, che essa soddisfi alla condizione seguente: *ciascun elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*. Questa la chiameremo "condizione di completezza"¹⁷⁵.

Dare una risposta alla questione posta sarà così tanto più agevole, quanto più saremo in grado di indicare gli elementi della realtà fisica; ci serve insomma un criterio di realtà. Afferma allora il fisico tedesco:

Gli elementi della realtà fisica non possono essere determinati da considerazioni filosofiche a priori, ma debbono essere trovati ricorrendo ai risultati di esperimenti e di misure. Tuttavia, per i no-

¹⁷³ A. Einstein, B. Podolski, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, in "Physical Review" (2) 48, 1935; trad. it., *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*, in Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 375.

¹⁷⁴ *Ibid.*

¹⁷⁵ *Ibid.*

stri scopi, non è necessario dare una definizione esauriente di realtà. Ci accontenteremo del criterio seguente che consideriamo ragionevole. *“Se si è in grado di prevedere con certezza (cioè con probabilità uguale a uno), il valore di una grandezza fisica senza perturbare in alcun modo un sistema, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica”*¹⁷⁶.

Va da sé che il criterio di realtà fisica appena enunciato non esaurisce tutti i modi di riconoscere una simile realtà; esso è tuttavia sufficiente e, in questa veste, si trova in accordo con l'idea classica e con quella quantica di realtà.

Una volta chiariti i termini della questione, si passa alla formulazione di un esperimento mentale che consiste nel prendere in considerazione la descrizione quantica di una particella con un solo grado di libertà. Si studierà il problema di compiere delle previsioni relative a un sistema sulla base di misure effettuate su un altro sistema che non ha in precedenza avuto interazioni con il primo sistema. Come è noto, dal punto di vista della meccanica quantica, quando si hanno due grandezze fisiche descritte da operatori che non commutano, la conoscenza dell'una preclude la conoscenza dell'altra, sicché “o è incompleta la descrizione della realtà fornita dalle funzioni d'onda della meccanica quantica, o non possono, queste due grandezze, essere simultaneamente reali”¹⁷⁷. Il concetto fondamentale, nella circostanza, è quello di stato, che si suppone completamente caratterizzato dalla funzione d'onda ψ , una funzione delle variabili scelte per descrivere il comportamento della particella. Si giunge allora a una situazione contraddittoria. Infatti: 1) da una parte, si dimostra che o la descrizione quantica data dalla funzione d'onda deve essere considerata incompleta, nel senso della condizione di completezza posta in precedenza, oppure che quando i corrispondenti non commutano, due grandezze non possono avere realtà simultaneamente; 2) dall'altra parte, nell'ipotesi che la funzione d'onda ψ offra effettivamente una descrizione completa della realtà fisica, si deduce che due grandezze fisiche con operatori che non commutano possono avere realtà simultaneamente. Ora, 1) non può essere vera; per esserlo dovrebbe essere completa, ma allora le due grandezze dovrebbero essere al contempo reali. Allo stesso modo, 2) non

¹⁷⁶ *Ibid.*

¹⁷⁷ *Ivi*, p. 374.

può essere vera perché, per esserlo, dovrebbe essere incompleta, sicché le due grandezze non potrebbero essere entrambe conosciute simultaneamente. Così, non solo la negazione del primo caso porta alla negazione del secondo, ma dovremo necessariamente concludere che “la descrizione della realtà fornita da una funzione d’onda non è completa”¹⁷⁸.

A questo nuovo contributo einsteiniano, di lì a poco indicato con la sigla EPR dalle iniziali dei cognomi degli autori, non vi furono inizialmente reazioni di un certo peso, se non due interventi di Bohr¹⁷⁹; nel replicare, il fisico danese considerò decisiva l’ambiguità che, a suo avviso, caratterizzerebbe il criterio di realtà scelto. La discussione sul testo che abbiamo esaminato resta comunque, tuttora, ambito di confronto e di scontro.

Nel 1949, rispondendo ai propri critici, il Nostro ribadiva la propria posizione nei seguenti termini.

A quanto pare, sono tutti dell’opinione che la relazione d’indeterminazione di Heisenberg (la cui rigorosità scientifica si considera giustamente, anche a mio parere, dimostrata in modo definitivo) determini nel senso suddetto il carattere di tutte le teorie fisiche pensabili e ragionevoli, costituendone un presupposto fondamentale. In ciò che segue, desidero esporre le ragioni che m’impediscono di allinearli con l’opinione di quasi tutti i fisici teorici contemporanei. Io sono, infatti, fermamente convinto che il carattere essenzialmente statistico della teoria quantistica contemporanea dev’essere attribuito unicamente al fatto che essa opera con una descrizione incompleta dei sistemi fisici¹⁸⁰.

Ciò non significa, si badi bene, annullare tutti i progressi compiuti, insomma, bocciare quanto di buono è stato fatto finora. Ben al contrario, riprende Einstein,

io riconosco pienamente l’importantissimo progresso che la teoria statistica dei quanti ha fatto compiere alla fisica teorica. Nel campo dei problemi meccanici – cioè dovunque è possibile considerare l’interazione delle strutture e delle loro parti con sufficiente precisione, postulando un’energia potenziale fra i punti materiali – questa teoria costituisce ancora oggi un sistema capa-

¹⁷⁸ *Ibid.*

¹⁷⁹ N. Bohr, *Quantum Mechanics and Physical Reality*, in “Nature”, CXXXVI, 1935, p. 65; Einstein, Podolski, Rosen, *op. cit.*, pp. 697-702.

¹⁸⁰ Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori...*, cit., p. 610.

ce, pur nel suo carattere ristretto, di descrivere correttamente le relazioni empiriche fra fenomeni specificabili, in modo corrispondente alle previsioni della teoria: essa è finora la sola che unisca il duplice carattere corpuscolare e ondulatorio della materia in modo logicamente soddisfacente¹⁸¹.

Il punto dolente, infatti, è un altro. Dice Einstein:

Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che mi sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica. Ogniquivolta il fisico moderno dalle simpatie positivistiche ode una simile formulazione, la sua reazione è un sorriso di compatimento. Egli dice fra sé: “Ecco qui la formulazione pura e semplice di un pregiudizio metafisico, vuoto di contenuto, e, peggio ancora, di un pregiudizio la cui confutazione costituisce il maggior risultato epistemologico ottenuto dai fisici nell’ultimo quarto di secolo. C’è forse un uomo che abbia mai percepito una ‘situazione reale’? Com’è possibile che una persona ragionevole possa ancora illudersi, al giorno d’oggi, di riuscire a confutare la parte più essenziale della nostra conoscenza e del nostro modo di pensare, risuscitando quest’ombra senza vita?”. Pazienza! Quella mia laconica definizione non voleva convincere nessuno; voleva semplicemente indicare il punto di riferimento¹⁸².

Quanto grande sia il valore che il fisico tedesco riconosce alla nozione di “reale”, nozione vitale per la possibilità stessa della scienza, lo si evince infine, ancora una volta, da uno dei suoi ultimi interventi critici rivolto all’indirizzo della meccanica quantica. Afferma il Nostro:

C’è qualcosa come lo “stato reale” di un sistema fisico, che esiste oggettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misura, e che, in linea di principio, può esser descritto attraverso i mezzi di espressione della fisica (...) Questa tesi che riguarda la realtà non ha il senso di un enunciato chiaro in sé a causa della sua natura “metafisica”; essa ha solo il carattere proprio di un programma¹⁸³.

¹⁸¹ Ivi, p. 611.

¹⁸² *Ibid.*

¹⁸³ A. Einstein, *Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux*, in AA.VV., *Louis de Broglie physiciens...*, cit., p. 7.

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ *Ivi*, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

Il fisico tedesco associa dunque la nozione di “reale” a quella di “programma”. La ricerca scientifica, del resto, è un cammino sempre aperto che incrementa la sua credibilità sulla base di successi sempre parziali ottenuti sotto la guida del suo principio fondamentale, quello di causa, che costituisce einsteinianamente “l’immagine del mondo” cui il fisico teorico deve tendere¹⁸⁴; un cammino che, in prospettiva, deve tuttavia offrire una descrizione unitaria dei fenomeni. Conclude infatti Einstein:

Abbiamo il diritto di essere convinti che la natura è la realizzazione di tutto ciò che si può immaginare di più matematicamente semplice. Sono persuaso che la costruzione puramente matematica ci permette di scoprire questi concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano fra loro. I concetti matematici utilizzabili possono essere suggeriti dall’esperienza, ma mai esserne dedotti in nessun caso. L’esperienza resta naturalmente l’unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica.¹⁸⁵

4. Scienza e filosofia

Disponiamo ora di tutti gli elementi necessari per poter avanzare una valutazione del ruolo svolto dalla riflessione filosofica nell’esperienza scientifica di Einstein; lo faremo, con l’auspicio di giungere a una risoluzione serena e rispettosa, facendo nostre le stesse parole con le quali il padre della teoria della relatività ne informa, a fini biografici, l’amico Solovine nella missiva del 30 ottobre 1924. “Avevo sempre dell’interesse per la filosofia” scrive il fisico tedesco, “ma per me essa non figurava che al secondo posto”¹⁸⁶. In primo piano non poteva esserci che la scienza: non la scienza *tout court* ma, come ben sappiamo, la speculazione matematica e fisica, e anch’essa decisamente caratterizzata e orientata. “L’interesse per la scienza” precisa il Nostro “era, in fondo, limitato allo studio dei principi, per cui si spiega al meglio ogni mia condotta”¹⁸⁷, non solo in merito all’oggetto della speculazione ma anche nei riguardi degli esiti della stessa, giacché il fatto “che io abbia pubblicato così poche cose è do-

¹⁸⁴ Cfr. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., pp. 35-36.

¹⁸⁵ Ivi, pp. 49-50.

¹⁸⁶ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 49.

¹⁸⁷ *Ibid.*

vuto alla stessa circostanza, dato che il desiderio ardente di cogliere i principi aveva come conseguenza che la maggior parte del tempo fosse impiegata in sforzi infruttuosi”¹⁸⁸.

Ora, se è ben vero che la specificità dell’impegno scientifico rispondeva alle più intime aspettative dell’uomo Einstein – vi era dunque una necessità e un movente soggettivo –, lo è altrettanto che esso si calava in un contesto scientifico e culturale, oggettivo, che piegava provvisoriamente tale necessità alle più urgenti esigenze epistemologiche, le autorizzava e, in qualche modo, ne offriva anche in seguito piena legittimazione. Le autorizzava ben prima del 1924, allorché ventiquattrenne Einstein dà vita a Berna, come ben sappiamo, a quella *Akademie Olympia*, occasione di studio e riflessione critica che proprio sul terreno epistemologico si rivela momento fecondo sia intellettualmente sia esistenzialmente. “La fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo” testimonia Solovine “erano l’epoca eroica delle ricerche sui fondamenti e i principi della scienza, ed è questo che era la nostra costante preoccupazione”¹⁸⁹. Le legittimerà dopo il 1924, sulla base degli sconvolgenti sviluppi della meccanica quantica, a tal punto che il fisico tedesco, nel 1936, affronterà il problema dei rapporti tra scienza e filosofia nei seguenti termini.

Spesso si è detto, e certamente non senza una giustificazione, che l’uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il filosofare? Questa invero potrebbe essere la cosa migliore in un’epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari così ben fondate da essere inaccessibili al dubbio¹⁹⁰.

Malauguratamente, riprende il Nostro:

Non può essere la cosa migliore in un’epoca, in cui, come quella attuale, gli stessi fondamenti della fisica sono diventati problematici. In un’epoca come la presente, in cui l’esperienza ci obbliga a cercare un nuovo più solido fondamento, il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo le considerazioni critiche dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov’è che la scarpa fa male¹⁹¹.

¹⁸⁸ *Ibid.*

¹⁸⁹ Einstein, *Introduction. Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. VIII.

¹⁹⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., pp. 36-37.

¹⁹¹ Ivi, p. 37.

Del resto, ben oltre l'urgenza e la straordinarietà che richiedono al fisico di indossare provvisoriamente le vesti del filosofo in generale e dell'epistemologo in specie, cioè di incrementare l'impegno sul piano speculativo rivolto a cogliere i principi e gli assiomi, anche in regime di piena ordinarietà difficilmente si potrà contestare il carattere speciale che determina la qualità del rapporto che lega la scienza e l'epistemologia. Per il fisico tedesco, infatti, "esse dipendono l'una dall'altra"¹⁹². Per evitare il rischio fatale di proporsi né più né meno che come una semplice esercitazione accademica che non morde il reale, l'epistemologia deve interagire con l'attività scientifica¹⁹³, ma al contempo guardarsi dal ridurre il dominio di riferimento della scienza e chiudere nella prigione di un sistema compiuto la ricerca del fisico. "Non appena l'epistemologo, nella sua ricerca di un sistema chiaro, riesce ad aprirsi la strada verso di esso" osserva Einstein, "è portato a interpretare il contenuto di pensiero della scienza secondo il suo sistema, e a rifiutare tutto ciò che al suo sistema non si adatta"¹⁹⁴. Da parte sua la scienza, per non degradare inevitabilmente verso la mera tecnica¹⁹⁵, non può considerare marginale l'efficacia e la necessità dell'apparato speculativo e sistematico; lo scienziato "accetta con riconoscenza l'analisi concettuale epistemologica; ma le condizioni esterne, che per lui sono date dai fatti dell'esperienza, non gli permettono di accettare condizioni troppo restrittive, nella costruzione del suo mondo concettuale, in base all'autorità di un sistema epistemologico"¹⁹⁶. Così, se l'epistemologo, dal suo punto di vista, è libero di apostrofare il fisico "come un opportunista senza scrupoli"¹⁹⁷, quest'ultimo, nel pieno esercizio della propria libertà, non può che vincolarsi al dato e al responso dell'esperienza, distinguendosi decisamente e radicalmente dal filosofo.

Che la riflessione filosofica di carattere epistemologico abbia avuto un ruolo esclusivo e decisivo nell'attività di ricerca portata avanti dal fisico tedesco è del resto confermato *a posteriori* dalle occasioni di dibattito che lo stesso Einstein ha ben voluto accettare e onorare; ci riferiamo in particolare alle accese polemiche sollevate in Francia

¹⁹² Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., p. 629.

¹⁹³ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁴ *Ibid.*

¹⁹⁵ Cfr. *ibid.*

¹⁹⁶ Ivi, pp. 629-630.

¹⁹⁷ Ivi, p. 630.

dalla teoria della relatività, che coinvolsero intellettuali, scienziati e filosofi della statura di Henri Bergson¹⁹⁸. In tal senso consideriamo fuorviante sollevare l'interrogativo circa l'appartenenza o meno del fisico tedesco alla schiera dei filosofi, giacché un simile approccio conduce facilmente alla formulazione di valutazioni per un verso tendenzialmente elusive e sprezzanti, come nel caso di Abraham Pais, per l'altro, forzatamente entusiastiche, se non celebrative, come in quello di Leopold Infeld. Dice Pais: "Einstein amava la saggezza. Ma fu un filosofo? La risposta è una questione di gusti, più che di fatto. Personalmente ritengo che il meglio di sé non l'abbia dato alla filosofia, ma non polemizzerei a tutti i costi con chi sostenesse il contrario. È indubbio che l'interesse di Einstein per la filosofia fosse autentico, ma è altrettanto certo che lui per primo non si considerasse un filosofo"¹⁹⁹. Tuttavia, poco dopo, lo stesso Pais non ha difficoltà ad affermare: "Negli ultimi trent'anni della sua vita, però, egli smise di essere un 'opportunist senza scrupoli', per diventare con suo grave danno un filosofo"²⁰⁰. Secondo Leopold Infeld "Einstein non è considerato soltanto un grande fisico, ma anche un grande filosofo. Egli stesso si considerava un filosofo. Spesso mi diceva: 'Io sono più un filosofo che un fisico'"²⁰¹. Naturalmente il fisico tedesco non si identificava con la figura del filosofo tradizionale, ma si sarebbe collocato invece nella corrente di pensiero che nei primi decenni del Novecento si proponeva come neoempirismo o neopositivismo. Dice Infeld: "Per il positivista logico il filosofo, nel moderno significato della parola, è un uomo il cui interesse è rivolto ai fondamenti del nostro sapere, alla chiarificazione dei suoi concetti basilari. Solo in questo senso Einstein può essere chiamato un filosofo, e in questo senso egli è uno dei più grandi filosofi che ci siano mai stati"²⁰². Niente di più distante e di

¹⁹⁸ Sull'intera vicenda ci permettiamo di rinviare ai nostri lavori: H. Bergson, *Lettere a Albert Einstein*, introduzione, trascrizione, traduzione e note di A. Genovesi, in "Filosofia", XLIX, 1, 1998, pp. 3-41; A. Genovesi, *Il carteggio tra Albert Einstein ed Edouard Guillaume. "Tempo universale" e teoria della relatività ristretta nella filosofia francese contemporanea*, Franco Angeli, Milano 2000; A. Genovesi, *Bergson e Einstein. Dalla percezione della durata alla concezione del tempo*, Franco Angeli, Milano 2001.

¹⁹⁹ A. Pais, "Subtle is the Lord...". *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, New York 1982; trad. it. di L. Belloni e T. Cannillo, "Sottile è il Signore...". *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino 1986 p. 24.

²⁰⁰ Ivi, p. 25.

²⁰¹ L. Infeld, *Albert Einstein*, Charles Scribner's Sons, New York 1952; trad. it. di O. Nicotra, *Albert Einstein*, Einaudi, Torino 1998, p. 134.

²⁰² Ivi, p. 135.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarà questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

avversato, con buona pace di Infeld, dal pensiero di Einstein, che considerava lo stesso atteggiamento positivistico insostenibile e inaccettabile, pari a quello espresso da George Berkeley, e responsabile dell'atteggiamento tenuto tanto dagli "scettici" che non si arrendono alla teoria atomica della materia, ossia Ostwald e Mach, quanto dai sostenitori della meccanica quantica. La posizione dei primi, afferma il fisico tedesco nel 1949, "può farsi indubbiamente risalire al loro atteggiamento filosofico positivistico. (...) Il pregiudizio – che a tutt'oggi non è affatto sparito – consiste nella convinzione che i fatti possano e debbano tradursi in conoscenza scientifica di per sé, senza libera costruzione concettuale"²⁰³. La difesa che i secondi oppongono all'accusa di offrire una descrizione incompleta dei fenomeni si fonda sullo stesso pregiudizio appena denunciato, giacché essi fanno risalire la difficoltà contestata all'identificazione tra "reale" e "osservabile".

Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento (...) è l'atteggiamento positivistico fondamentale, che dal mio punto di vista è insostenibile, e che a mio parere si riduce a essere la stessa cosa del principio di Berkeley, *esse est percipi*. "Essere" è sempre qualcosa che noi costruiamo con la mente, cioè qualcosa che noi supponiamo con assoluta libertà (in senso logico). La giustificazione di tali costrutti non sta nel fatto che essi derivino dai dati dei sensi. Questo tipo di derivazione (nel senso della deducibilità logica) non è mai possibile, nemmeno nell'ambito del pensiero prescientifico. La giustificazione di tali costrutti che per noi rappresentano la "realtà" sta soltanto nella loro capacità di rendere intelligibile ciò che è dato dai sensi"²⁰⁴.

5. La Luna di Bologna e quella di Princeton

La tradizione popolare racconta che al più giovane dei figli di una numerosa famiglia contadina, considerato particolarmente disposto alle fatiche dello studio, fu concesso il privilegio e l'onere di ricevere un'istruzione superiore e di accedere finalmente all'Università di Bologna. Una sera d'estate, conversando con il padre nel dopocena, cedendo a un irresistibile impulso il giovane ebbe a chiedere: "Ma la Luna che rischiarà questa calda notte è la stessa di Bo-

²⁰³ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., p. 26.

²⁰⁴ Einstein, *Replica ai vari autori...*, cit., pp. 613-614.

logna?”. All’udire ciò il genitore, persona poco incline allo spettacolo della natura e men che mai a intraprendere discussioni che non fossero saldamente ancorate all’evidenza dell’esperienza sensibile, dopo un sussulto di collera non poté che disperarsi mettendosi, come si suol dire, le mani nei capelli al pensiero degli enormi sacrifici sostenuti per elevare il prestigio sociale della famiglia; sacrifici il cui risultato, così a lui sembrava, si concretizzava in una domanda palesemente incomprensibile per l’ovvietà della risposta. Chissà quale sarebbe stata la reazione del poveretto sapendo che Albert Einstein, pressappoco nello stesso periodo si diletta a porre in modo analogo simili interrogativi a un giovane fisico, Abraham Pais, che ricorda così l’episodio: “Deve essere stato attorno al 1950. Camminavamo, io e Einstein, lungo la strada che dall’Institute for Advanced Study conduceva alla sua abitazione, quando si fermò. ‘Veramente è convinto’ mi chiese ‘che la Luna esiste solo se la si guarda?’”²⁰⁵.

Benché impiegasse la maggior parte del proprio tempo sul versante della problematica relativistica, la testimonianza di Pais conferma che anche dopo il 1935 Einstein non cessa di dedicare spazio e ironia all’assunto filosofico che, a suo avviso, starebbe al fondamento della meccanica quantica. Del resto, non poteva essere altrimenti. Bisogna considerare che, dopo la teoria della relatività generale, si poneva un problema particolarmente imbarazzante: con la teoria del 1916 la gravitazione era di fatto ridotta a una geometria, ed è evidente che ciò la poneva su un piano diverso rispetto a quello dell’elettromagnetismo. Il problema non era avvertito solo da Einstein; tanto è vero che già dal 1918 il matematico H. Weyl si era dato da fare per elaborare una teoria che unificasse la gravitazione e il magnetismo. Entrambi venivano ridotti a geometria. Ma Weyl non era il solo a cimentarsi nell’impresa. Un anno dopo, nel 1919, il matematico T. Kaluza, conterraneo e concittadino del grande Kant, riusciva a mostrare che la semplice aggiunta di un’ulteriore dimensione spaziale lasciava intatti i limiti entro i quali restava valida la geometria di Riemann. Il Nostro, naturalmente, era ben al corrente di questi sviluppi, che prese attentamente in esame. Pur riconoscendo il fascino della concezione elaborata da Weyl, Einstein si rese ben presto conto che in essa era presente una grave conseguenza che ne comprometteva decisamente l’accettazione. Dalla teoria di

²⁰⁵ Pais, *op. cit.*, p. 15.

Weyl conseguiva infatti che il ritmo con il quale marciano gli orologi verrebbe a dipendere dalle linee di universo percorse dagli stessi orologi nel passato. Un'eventualità, questa, esclusa dal fatto che le righe spettrali di ciascun elemento, che altro non sono se non la misura del ritmo atomico, sono rigidamente fissate, al di là della linea di universo che il singolo atomo abbia potuto seguire o potrà percorrere. La teoria avanzata da Kaluza era più intrigante, ma anche più inquietante: si sarebbe dovuta pensare una dimensione in più dello spazio-tempo, cioè $4 + 1$. Il fisico tedesco la prese in esame più volte e a distanza di anni, ma non la seguì. Del resto, già nel 1925, aveva avanzato il tentativo di una teoria unificata, ed era persino giunto a ottenere le equazioni della gravitazione e quelle di Maxwell. Fu questa prospettiva, quella dell'inserimento di un tensore non simmetrico, che il fisico di Ulm riprenderà dopo il 1945 e continuerà a occuparlo fino a pochi istanti prima della morte. Ma dietro, sullo sfondo dell'unificazione, c'era tuttavia qualcos'altro: l'esigenza di risolvere il dualismo onda-corpuscolo, al quale aveva a suo tempo conferito tanto rilievo oggettivo.

SCIENZA, RELIGIONE ED ETICA

1. “La scienza senza la religione è zoppa; la religione senza la scienza è cieca”

Nello scorrere gli scritti einsteiniani, la sorpresa sollevata dal fatto che il fisico tedesco abbia riservato una certa attenzione alla problematica religiosa e, conseguentemente, si sia riferito direttamente al Dio delle religioni ebraica e cristiana, non va oltre il dovuto. In veste di intellettuale e uomo di cultura, difficilmente il Nostro avrebbe potuto eludere la spinosa questione, peraltro vissuta a suo tempo in prima persona come risposta a una domanda di senso che si faceva sempre più urgente al cospetto della frenesia del possesso e della competizione che sembrava affermarsi come unico fine utile da perseguire. Ricorda infatti l'ormai sessantasettenne fisico tedesco:

Fin da quando ero un giovane abbastanza precoce, la vanità delle speranze che travolgono incessantemente la maggior parte degli uomini in una corsa affannosa attraverso la vita, mi aveva colpito profondamente. Ed anzi, avevo ben presto scoperto la crudeltà di questa corsa affannosa, che in quegli anni era mascherata di ipocrisia e di belle parole con cura molto maggiore di quanto si faccia oggi. Per il solo fatto di possedere uno stomaco, tutti erano condannati a partecipare a questa corsa; ma tale partecipazione poteva forse soddisfare lo stomaco, non già l'uomo come essere pensante e dotato di sentimenti. La prima via d'uscita era offerta dalla religione, che viene inculcata in ogni bambino attraverso la macchina educativa tradizionale. Così io – benché figlio di genitori (ebrei) completamente irreligiosi – divenni religiosissimo; ma cessai improvvisamente di esserlo all'età di 12 anni. (...) Ora comprendo che il paradiso religioso della giovinezza, così presto perduto, fu il primo tentativo di liberarmi dalle catene del “puramente personale”, da un'esistenza dominata solo dai desideri, dalle speranze, e dai sentimenti primitivi²⁰⁶.

²⁰⁶ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 3-4.

Fu l'approccio con la scienza che, come ben sappiamo, determinò la fine di quell'esperienza e il faticoso incamminarsi verso un'altra fonte di realizzazione e soddisfacimento che, riprende il Nostro, non sarà mai più abbandonata:

Fuori c'era questo enorme mondo, che esiste indipendentemente da noi, esseri umani, e che ci sta di fronte come un grande, eterno enigma, accessibile solo parzialmente alla nostra osservazione e al nostro pensiero. La contemplazione di questo mondo mi attirò come una liberazione, e subito notai che molti uomini che avevo imparato a stimare e ad ammirare avevano trovato la propria libertà e sicurezza interiore dedicandosi ad essa. Il possesso intellettuale di questo mondo extrapersonale mi balenò nella mente, in modo più o meno consapevole, come la meta più alta fra quelle concesse all'uomo. Gli amici che non si potevano perdere erano gli uomini del presente e del passato che avevano avuto la stessa meta, con i profondi orizzonti che avevano saputo dischiudere. La strada verso questo paradiso non era così comoda e allettante come quella del paradiso religioso; ma si è dimostrata una strada sicura, e non ho mai rimpianto di averla scelta²⁰⁷.

Di fronte a una posizione così netta e soprattutto definitiva, non si può non restare interdetti al cospetto di certe espressioni di evidente familiarità con la divinità inserite, con tutto il peso del loro significato, in un contesto scientifico; in particolar modo, e a maggior ragione, se in più di un'occasione non ci si è affatto preoccupati di negarne l'esistenza. "Non credo in un Dio personale" afferma infatti Einstein, "né ho mai negato questo fatto, anzi ho sempre espresso chiaramente il mio parere in proposito"²⁰⁸. Facendo ricorso a un movente che per la sua genericità vale sempre e in ogni circostanza, specie nel caso del fisico tedesco, si potrebbe pensare che il ripetersi di espressioni quali "il segreto del gran Vecchio"²⁰⁹, "dare un'occhiata alle carte di Dio"²¹⁰, "non credo per un istante che Lui giochi a dadi"²¹¹, ecc., debba semplicemente essere attribuito a un motivo strumentale, quello di colorire con una battuta una questione meritevole di attenzione, che ben rispecchierebbe la proverbiale

²⁰⁷ Ivi, p. 4.

²⁰⁸ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 41.

²⁰⁹ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 109.

²¹⁰ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 63.

²¹¹ *Ibid.*

eccentricità del personaggio. Al di là dell'evidente irriverenza, una spiegazione di questo genere non è sufficiente a fugare un sincero turbamento, che anzi si fa sempre più motivato allorché si viene a precisare l'ambito specifico nel quale le citate espressioni vengono chiamate a operare, ambito sempre legato alla nozione di causalità e quasi esclusivamente proprio della discussione sollevata dalla meccanica quantica. Che cosa ha infatti a che spartire la scienza in generale e la fisica, in quanto conoscenza della natura in particolare, con la religione e la divinità?

Se si resta sul piano puramente formale non v'è dubbio che, per dirlo con lo stesso fisico tedesco, scienza e religione rappresentino due sfere ben delimitate, nel loro esercizio teorico e pratico, dalla diversità del loro oggetto:

La scienza, infatti, può solo accertare ciò che è, ma non ciò che *dovrebbe essere*, ed al di là del suo ambito restano necessari i giudizi di valore di ogni genere. La religione, d'altra parte, ha a che fare solo con i giudizi di valore sul pensiero e sull'azione umana: non può con diritto parlare dei fatti e delle relazioni esistenti tra i fatti stessi²¹².

Così, se da un lato la specificità dei rispettivi domini di riferimento consente di evitare inopportune quanto pericolose interferenze, dall'altro non impedisce, e anzi favorisce, la reciproca e rispettosa apertura di spazi di comunicazione e di collaborazione. Semmai, ciò che colpisce è che, volente o nolente lo stesso Einstein, le eventuali relazioni tra i due campi giungano ad assumere una legittimità non solo *de facto*, ma anche *de jure*.

In effetti, il sentimento religioso può articolarsi e assumere le connotazioni di un "discorso" proprio perché, grazie alla conoscenza in generale, è in grado di individuare dei mezzi e di coordinarli coerentemente in vista del fine. Afferma infatti il Nostro: "Per quanto la religione possa essere quella che determina il fine, essa ha tuttavia imparato dalla scienza, nel senso più ampio della parola, quali mezzi possono contribuire al raggiungimento dei fini da essa prefissati"²¹³. La scienza, per proprio conto, non può assolutamente avanzare alcun "discorso" sensato senza la tensione sincera e coerente alla verità e, soprattutto, la fede nella possi-

²¹² Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 134.

²¹³ Ivi, pp. 134-135.

bilità di conoscere in termini oggettivi l'esistente, ciò che è. Dice Einstein:

La scienza può essere creata solo da coloro che sono integralmente convinti delle aspirazioni verso la verità e verso la comprensione. Ma questa sorgente di sentimento nasce dalla sfera della religione, alla quale appartiene anche la fede nella possibilità che le regole valide per il mondo dell'esistenza siano razionali, comprensibili, cioè, con la ragione²¹⁴.

Di fatto, se la “religione senza la scienza è cieca”²¹⁵, perché priva della conoscenza dei mezzi non può focalizzare e distinguere nettamente il proprio oggetto, cioè il valore, né prospettare alcun giudizio su di esso, “la scienza senza la religione è zoppa”²¹⁶, cioè limitata nel procedere verso l'effettiva comprensione del dato esistente, a tal punto che “là dove questo sentimento viene meno, la scienza degenera in empiria priva di spirito”²¹⁷.

Che la religione abbia il sostegno della conoscenza per poter efficacemente operare nel proprio territorio rientra, per così dire, nell'ordine delle cose, come pure il fatto che l'uomo di scienza si distingue appunto per il suo esser votato alla missione di ricercare e di comprendere la verità; ma non può certo passare sotto silenzio che *il fondamento epistemologico garante della stessa possibilità della scienza, cioè l'affermazione di una realtà esterna indipendente dal soggetto conoscente e tuttavia comprensibile oggettivamente con certezza, appartiene propriamente alla sfera religiosa*. Per quanto sconvolgente possa sembrare, l'interdipendenza predicata *de facto* tra la sfera scientifica e quella religiosa deve essere affermata tale anche *de jure*, con tutto ciò che una simile affermazione comporta; lo si deve, perché entrambi i domini fondano la propria identità sulla medesima, originaria, esigenza: quella di trascendere l'empiria per accedere al puramente spirituale, in una parola, alla libertà. Afferma infatti il Nostro in termini inequivocabili:

Tutte le religioni, le arti e le scienze sono rami dello stesso albero. Tutte queste aspirazioni sono volte alla nobilitazione della vita dell'uomo, sollevando l'individuo dalla pura esistenza fisica e conducendolo verso la libertà²¹⁸.

²¹⁴ Ivi, p. 135.

²¹⁵ *Ibid.*

²¹⁶ *Ibid.*

²¹⁷ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 103

²¹⁸ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 85.

Orbene, se il cuore pulsante della scienza è ritmato di diritto e di fatto dal sentimento religioso, si può davvero continuare a sostenere che “se si concepiscono la religione e la scienza secondo queste definizioni allora è evidente che fra esse non è possibile alcun contrasto”²¹⁹? Lo si può, ma a una precisa e inappellabile condizione: quella di ridurre necessariamente la fede religiosa a pura evidenza razionale dei principi che organizzano il reale, privandola così di ciò che ne costituisce l’essenza, cioè l’affermazione dell’esistenza di una potenza creatrice che esercita la propria sovranità e signoria non solo nel possesso dei fini ma anche dei mezzi. E infatti il fisico tedesco è costretto a precisare:

Per quanto io abbia sostenuto in precedenza che non può esistere un vero conflitto fra religione e scienza, debbo tuttavia specificare questa affermazione ancora una volta circa un punto essenziale, a proposito del contenuto reale delle religioni storiche. Questa precisazione si riferisce al concetto di Dio²²⁰.

Ed è, potremmo aggiungere, precisazione tanto più necessaria quanto più chiarificatrice. È anzitutto necessaria, perché toglie ogni possibile contraddizione che verrebbe a presentarsi all’interno dello stesso dettato einsteiniano. Proprio perché oggettiva, la realtà naturale faticosamente e progressivamente costruita dalla scienza risponde solo ed esclusivamente a una causalità efficiente che esclude ogni possibilità di costituire un ordine retto e governato da qualsivoglia intento finalistico e, di conseguenza, considera priva di senso l’esistenza di una volontà e intenzionalità divine. Per il Nostro

quanto più un uomo è conscio della regolarità di tutti gli eventi tanto più salda diventa la sua convinzione che non vi è posto, accanto a questa regolarità ordinata, per cause di natura differente. Per lui né la legge della volontà umana né la legge della volontà divina esistono come causa indipendente di eventi naturali²²¹.

La precisazione è in secondo luogo chiarificatrice, perché indica in termini inequivocabili l’oggetto vero e proprio del sentimento religioso einsteinianamente inteso. Ciò che ispira devozione non è tanto l’attività di ricerca che la scienza produce per giungere a una connessione unitaria dei fenomeni e alla loro previsione, in ogni caso scopo e condizione preliminare liberante giacché conduce “a una completa

²¹⁹ Ivi, p. 134.

²²⁰ Ivi, p. 135.

²²¹ Ivi, p. 137.

emancipazione dai ceppi delle speranze e delle paure personali”²²², quanto la “ragione incarnata nell’esistenza”²²³, che si svela al termine del tentativo pienamente realizzato di “ridurre le connessioni scoperte al minor numero possibile di elementi concettuali fra loro indipendenti”²²⁴, cioè i principi e gli assiomi. Da quest’esperienza speculativa, secondo Einstein, trae origine un atteggiamento particolare

di un genere alquanto diverso da quello comunemente definito religioso. Si tratta più di un sentimento di timore reverenziale per l’ordinamento che si manifesta nell’universo materiale; non ci conduce a modellare un essere divino a nostra immagine, un personaggio che abbia delle esigenze nei nostri confronti, che si interessa a noi in quanto individui. Non vi è in ciò né volontà né scopo, né necessità, ma solo l’essere allo stato puro²²⁵.

In questo senso, e solo in questo, il Nostro può dichiararsi devoto e profondamente religioso²²⁶ e, dunque, legittimato a riferirsi alla divinità nei termini che, di primo acchito, giustificavano perplessità e turbamento.

Il “credo epistemologico” e il credo religioso abbracciano, come è agevole comprendere, l’intera realtà naturale einsteinianamente intesa²²⁷, realtà che viene così a fondarsi interamente sulla libertà; ma, per converso, la libertà non può che identificarsi con la necessità della causalità efficiente che governa l’ordine naturale. In effetti, è

²²² Ivi, p. 138.

²²³ *Ibid.*

²²⁴ *Ibid.*

²²⁵ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 64.

²²⁶ Dice Einstein: “Quel che vedo nella natura è una struttura magnifica che possiamo capire solo molto imperfettamente, il che non può non riempire di umiltà qualsiasi persona razionale. Si tratta di un autentico sentimento religioso che non ha niente a che fare con il misticismo” (ivi, pp. 37-38). In tal senso, “la mia religiosità consiste in una umile ammirazione dello Spirito infinitamente superiore che si rivela in quel poco che noi, con la nostra ragione debole ed effimera, possiamo capire della realtà” (ivi, p. 61).

²²⁷ A tal punto che, a proposito dei successi della scienza, ci si può indifferentemente esprimere con i termini di “miracolo” o di “eterno mistero”. Nella lettera inviata a Solovine il 30 marzo 1952 Einstein afferma testualmente: “Lei trova curioso che io consideri la comprensibilità del mondo (nella misura in cui siamo autorizzati a parlare di una tale comprensibilità) come un miracolo o come un eterno mistero. Ebbene, *a priori* ci si dovrebbe attendere un mondo caotico, che non può in alcun modo essere colto attraverso il pensiero. Ci si potrebbe (ci si dovrebbe) aspettare che il mondo sia sottoposto alla legge solamente nella misura in cui noi interveniamo con la nostra intelligenza ordinatrice. Sarebbe una specie di ordine come l’ordine alfabetico delle parole di una lingua” (*Lettere à Maurice Solovine*, cit., p. 115). Al contrario, riprende il fisico tedesco, “la specie di ordine creata, per esempio, dalla teoria della gravitazione di Newton, è di tutt’altro carattere. Anche se gli assiomi della teoria sono posti dall’uomo, il successo di una tale impresa suppone un ordine di alto grado del mondo oggettivo che, *a priori*, non si è affatto autorizzati ad attendere. È questo il ‘miracolo’, che si corrobora sempre più con lo sviluppo delle nostre conoscenze” (*ibid.*).

ben vero che, in virtù della sua natura controinduttiva, il pensiero è libero di creare, anche attraverso la fantasia, le più svariate ipotesi; ma lo è altrettanto che, come sappiamo, non tutte le congetture formulate possono essere accettate sul piano formale e definitivamente accolte su quello materiale. Dice Einstein:

Non si deve biasimare, tacciandolo di soverchia fantasia, il teorico che intraprende questo studio: ma bisogna al contrario provare la sua fantasia, perché, tutto ben considerato, non c'è per lui altro cammino per arrivare allo scopo: in ogni caso non è una fantasia senza disegno, ma una ricerca eseguita in vista di possibilità logicamente semplici e delle loro conseguenze²²⁸.

E infatti, nel cammino verso la contemplazione della razionalità del reale, il fisico teorico deve tener conto non solo della condizione formale ma anche di quella materiale, ovvero che la scelta dei principi e degli assiomi superi il tribunale esigentissimo dell'esperienza. Egli è certo libero di scegliere; la sua

libertà di scelta, tuttavia, è di un tipo particolare: non è affatto simile alla libertà di uno scrittore di romanzi. Essa è piuttosto simile a quella di chi è impegnato nella risoluzione di un ben congegnato cruciverba. Egli può, è vero, proporre ogni volta qualsiasi parola come soluzione; ma ogni volta è *una sola* parola che dà la chiave per risolvere il cruciverba in tutte le sue parti²²⁹.

Che si tratti della previsione delle orbite dei pianeti o del funzionamento di una lampada elettrica, tutti i fenomeni, anche quelli che come la meteorologia²³⁰ sembrano opporre una strenua resistenza alla previsione, risultano dunque necessariamente determinati.

2. Natura e libertà: il problema etico

Se l'autentica religione si riduce al sentimento di assoluta deferenza e riverenza al cospetto della razionalità che si rivela al pensiero²³¹, se l'universo materiale è interamente sottoposto

²²⁸ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 100.

²²⁹ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 42.

²³⁰ Cfr. *ivi*, pp. 136-137.

²³¹ "Io sostengo" afferma Einstein "che la religione cosmica è l'impulso più potente e più nobile alla ricerca scientifica. Solo colui che può valutare gli sforzi e soprattutto i sacrifici umani per arrivare a quelle scoperte scientifiche che schiudono nuove vie, è in grado di rendersi conto della forza del sentimento che solo può suscitare un'opera tale, libera da ogni vincolo con la vita pratica immediata. Quale gioia profonda a cospetto dell'edificio

alla determinazione meccanica, che ne è della realtà umana? L'interrogativo si giustifica in un duplice senso. Anzitutto, la negazione di un riferimento assoluto sul piano dei valori e dei fini, ovvero del Dio delle religioni storiche e della rivelazione cui dovrebbe far riferimento la coscienza singola e comunitaria, l'individuo e la storia, piega prepotentemente l'attenzione verso l'imperativo morale, ormai autonomo perché svincolato da ogni suggestione trascendente, rendendolo cogente. "Non credo nell'immortalità dell'individuo" dichiara Einstein "e considero che l'etica sia un interesse esclusivamente umano che non deriva da alcuna autorità sovranaturale"²³²; proprio per questo motivo, continua il fisico tedesco, "noi scienziati consideriamo la moralità una questione puramente umana"²³³, essa, infatti, "ha la massima importanza – ma per noi, non per Dio"²³⁴.

In secondo luogo, dal momento che lo stesso fenomeno biologico, compreso l'essere umano, non sfugge alla medesima regola che ordina la realtà naturale, la questione del fondamento del comportamento e dell'agire umano diviene evidentemente problematica. A onor del vero, il Nostro riconosce che, sul piano della complessità della realtà vitale, la stretta esercitata dalla causalità efficiente sembra debole e talvolta irrilevante, ma considera che ciò sia da attribuire a motivi di crescita e di progresso della conoscenza, non certo alla logica intrinseca che regge i fenomeni. Dice Einstein: "Le nostre conoscenze sono assai meno approfondite per quanto riguarda le regolarità presenti nel campo degli esseri viventi; ma lo sono abbastanza, tuttavia, per permetterci di intuire almeno la regola della necessità sistematica"²³⁵. In realtà, "ciò che ancora manca qui, è la comprensione

del mondo e quale ardente desiderio di conoscere – sia pure limitato a qualche debole raggio dello splendore rivelato dall'ordine mirabile dell'universo – dovevano possedere Keplero e Newton per aver potuto, in un solitario lavoro di lunghissimi anni svelare il meccanismo celeste!" (*Come io vedo il mondo*, cit., p. 29).

²³² Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 37.

²³³ Ivi, p. 64.

²³⁴ Ivi, p. 61. Non è dunque casuale che, a proposito di rapporti tra la scienza e la morale, Einstein si esprima con i medesimi termini utilizzati per definire i rapporti tra la scienza e la religione. Afferma infatti il Nostro: "Ciò che noi chiamiamo scienza ha esclusivamente per scopo quello di stabilire ciò che è. La determinazione di ciò che *deve essere* ne è qualcosa di totalmente indipendente, che non può essere ottenuto per via metodica. La scienza può formulare delle proposizioni sulla morale solo in una connessione logica e fornire dei mezzi per la realizzazione dei fini morali, ma la determinazione dei fini medesimi è al di fuori del suo dominio" (*Lettere a Maurice Solovine*, cit., p. 105).

²³⁵ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 137.

delle connessioni profonde e generali, ma non la conoscenza dell'ordine in se stesso"²³⁶.

Per il fisico tedesco, infatti, l'io è interamente condizionato dagli impulsi primari, tendenze innate riconducibili alla conservazione propria e della specie e alla relazione con i propri simili²³⁷, a tal punto che, "obiettivamente, non esiste in fondo il libero arbitrio"²³⁸. Che si applichi alla materia inerte o vivente, o alla stessa vita psicologica, "la ricerca scientifica" conclude Einstein "è basata sul concetto che tutto quel che accade è determinato dalle leggi della natura e questo vale anche per il comportamento della gente"²³⁹, sia sul piano individuale sia sociale. Ma in che senso si potrà ancora parlare di imperativo morale?

L'interrogativo etico sorge per il semplice porsi dell'esistenza umana; tant'è che la constatazione di uno *status* permanente di conflittualità imputabile alla cieca guida delle forze originarie dell'Io, e la conseguente necessità di un suo superamento, sta alla base di qualsiasi insegnamento morale. Si è pensato di provvedere, osserva il Nostro, ritenendo che gli uomini "dovrebbero lasciare che la loro condotta fosse guidata dagli stessi principi: principi tali che seguendoli ne deriverebbero a tutti la massima sicurezza e soddisfazione e la minima sofferenza possibili"²⁴⁰. Ma con quale linguaggio esprimeremo questi valori? E poi, una volta individuati e condivisi, non è affatto scontato che tali fini fondamentali possano essere efficacemente perseguiti, sì da trarne determinanti benefici.

Di certo, come abbiamo avuto modo di mostrare, non potremo esprimere i fini fondamentali per l'esistenza, ossia i valori, avvalendoci dell'autorità della scienza, cioè con il linguaggio della ragione, né tanto meno guardando alla religione, fosse anche quella predicata dal fisico tedesco; ma potremo, e anzi non potremo non farlo, rivolgendosi alla tradizione. Afferma il fisico tedesco:

Se ci si domanda di dove derivi l'autorità di tali fini fondamentali, dato che questi non possono essere stabiliti e giustificati semplicemente dalla ragione, si può rispondere soltanto così: essi esi-

²³⁶ *Ibid.*

²³⁷ Ivi, p. 88.

²³⁸ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 76. "Per lo più" affermerà Einstein di se stesso "io faccio ciò che la mia natura mi induce a fare" (*Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 36).

²³⁹ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 30.

²⁴⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 89.

stono in una società sana come potenti tradizioni, che agiscono sul comportamento e le aspirazioni e i giudizi degli individui²⁴¹;

ed esistono, precisa Einstein,

come qualcosa di vivo, senza che sia necessario trovare la giustificazione della loro esistenza. Essi nascono non da una dimostrazione ma da una rivelazione, grazie alla mediazione di forti personalità. Si deve tentare non di giustificarli, ma piuttosto di sentirne la natura con semplicità e con chiarezza²⁴².

In questa prospettiva, tanto la scienza quanto la religione assumono un ruolo, non primario, ma comunque apprezzabile. La scienza, perché attraverso la logica dell'analisi è in grado di incamminarci verso la formulazione di proposizioni etiche che discendono direttamente da premesse generali, riconosciute tali e condivise. Peraltro, queste premesse assumono una connotazione particolare, paragonabile a quella degli assiomi matematici, con l'indubbio vantaggio, per un verso, di godere dell'arbitrarietà del pensiero, per l'altro, di potersi proporre sul piano pratico in quanto riferibili a uno *status* psicologico e genetico²⁴³. La religione, dal momento che la presentazione, la difesa e, soprattutto, il tentativo di rendere vitali i valori fondamentali attraverso la testimonianza e le opere ne caratterizza la specifica funzione nei confronti della società²⁴⁴.

Ma a quale tradizione potremo far riferimento? La scelta, in questo caso, non può essere arbitraria, né è sufficiente orientarsi verso quella che, tra le diverse tradizioni che possono essere considerate, sembra maggiormente radicata nella società, benché ciò debba essere considerata come la condizione necessaria. L'opzione deve infatti sciogliere il vero nodo che ha ostacolato e continua a ostacolare la piena affermazione dell'istanza etica, come la storia recente e passata sta eloquentemente a testimoniare, e che risponde all'interrogativo: "In che modo possiamo rendere il nostro insegnamento tanto potente nella vita emotiva dell'uomo che la sua influenza sopporti la pressione delle forze psichiche elementari dell'individuo?"²⁴⁵. Dovremo avvalerci di una tradizione la cui capacità di condizionamento sia così profonda da esser connaturata alla stessa

²⁴¹ Ivi, pp. 109-110.

²⁴² *Ibid.*

²⁴³ Ivi, p. 249.

²⁴⁴ Cfr. ivi, p. 109.

²⁴⁵ Ivi, p. 90.

soggettività, in modo tale da costituire il presupposto per ogni possibile comportamento etico. Questo presupposto, come è agevole comprendere, non può che identificarsi con l'esigenza di libertà propria della persona umana. Per essa si esige, dice Einstein, che

ogni individuo abbia la possibilità di sviluppare i doni naturali che possono essere latenti in lui. Soltanto in questo modo l'individuo può ottenere la soddisfazione cui giustamente ha diritto; e soltanto in questo modo la comunità può raggiungere la sua più ricca prosperità. Infatti, tutto ciò che di veramente grande ed esaltante esiste, è creazione di un individuo che può operare in libertà. Restrizioni a questa libertà sono giustificate soltanto per necessità di sicurezza riguardanti l'esistenza fisica²⁴⁶.

Da essa, come conseguenza, deriva quel principio di tolleranza senza il quale sarebbe impossibile parlare di agire morale; principio, osserva il Nostro, secondo cui “non dobbiamo semplicemente *sopportare* le benvenute fra gli individui e i gruppi, ma anzi accoglierle come le benvenute, considerandole un arricchimento della nostra esistenza”²⁴⁷.

La tradizione che, einsteinianamente, assolve a entrambe le condizioni richieste è quella propria delle religioni ebraica e cristiana²⁴⁸, su cui poggia l'intera civiltà europea; considerato laicamente, il comportamento morale che si ispira a essa “non è un invito a un'austera rinuncia a qualche gioia della vita, ma piuttosto un amichevole interesse a una sorte più felice per tutti gli uomini”²⁴⁹, mentre la morale cessa di essere un sistema chiuso e rigido per proporsi come prospettiva aperta attraverso la quale esercitare il nostro discernimento.

3. Cultura della libertà e libertà della cultura

Al tema della libertà, considerata dal punto di vista esterno e interno, cioè in prospettiva sociale e individuale, Einstein dedicherà nel 1940 alcune brevi, essenziali riflessioni.

²⁴⁶ Ivi, p. 92.

²⁴⁷ *Ibid.*

²⁴⁸ Cfr. ivi, p. 110. Secondo il fisico tedesco, “i nostri antenati ebrei, i profeti e i vecchi saggi cristiani compresero e proclamarono che il fattore più importante nella formazione della esistenza umana è la creazione di un fine: quello di una comunità libera e di esseri umani felici che con un continuo sforzo interiore lottino per liberarsi dall'eredità di istinti antisociali e distruttivi” (ivi, p. 149).

²⁴⁹ Ivi, pp. 91-92.

La sfera esterna della libertà investe, da una parte, la soddisfazione delle esigenze primarie dell'esistenza fisica e materiale, ovvero la disponibilità dei "beni strumentali necessari a conservare la vita e la salute di tutti gli esseri umani"²⁵⁰; dall'altra, la possibilità di superare queste stesse esigenze "con la minima fatica possibile da parte di tutti"²⁵¹, così da poter disporre l'individuo ad attività più creative, visto che "per essere contenti gli uomini debbono anche avere la possibilità di sviluppare le loro facoltà intellettuali e artistiche nella misura desiderata secondo le loro caratteristiche e capacità personali"²⁵². In tal senso, il fisico tedesco distingue due tipi di libertà esterna. Il primo tipo si identifica con la libera circolazione delle idee e delle opinioni, ciò che potremmo ben indicare come libertà della cultura. Dice Einstein:

Per libertà io intendo condizioni sociali tali che l'espressione delle opinioni e delle idee riguardanti questioni di conoscenza generali e particolari non implichi pericoli o seri inconvenienti per chi li esprime. Questa libertà di comunicazione è indispensabile allo sviluppo e all'estensione della conoscenza scientifica, considerazione questa che ha una vasta portata pratica²⁵³.

E infatti, solo il progresso della conoscenza e della tecnologia può procurare gli strumenti per soddisfare i bisogni elementari sia singoli sia comunitari. Tuttavia, ritiene opportuno precisare il Nostro, "la legge da sola non può assicurare la libertà di espressione; affinché ogni uomo possa esprimere i propri punti di vista senza pericolo ci deve essere uno spirito di tolleranza nella popolazione intera"²⁵⁴. Il secondo tipo di libertà esterna riguarda le rigide condizioni di lavoro che rendono impraticabile, per l'individuo che vi è sottoposto, la possibilità di valorizzare le sue doti naturali sul piano spirituale. Dice Einstein:

L'uomo non dovrebbe essere costretto a lavorare per ottenere quanto gli è necessario per vivere, al punto da non avere più né il tempo né la forza di iniziare delle attività personali. Senza questo secondo tipo di libertà esterna, la libertà di espressione gli è completamente inutile²⁵⁵.

²⁵⁰ Ivi, p. 127.

²⁵¹ *Ibid.*

²⁵² Ivi, p. 128.

²⁵³ *Ibid.*

²⁵⁴ *Ibid.*

²⁵⁵ *Ibid.*

Einstein non dispera che, anche in questo caso, lo sviluppo tecnico renda possibile questa libertà, specie se a esso si affiancano politiche efficaci e ragionevoli circa la divisione del lavoro.

La sfera della libertà interna è propria della scienza, della filosofia e di tutte le attività superiori coltivate dallo spirito: in quanto tale è qualificabile come cultura della libertà e consiste, afferma il fisico tedesco, “nell’indipendenza del pensiero dalle limitazioni dei pregiudizi autoritari e sociali come dagli automatismi acritici e dagli abiti acquisiti. Questa libertà è un dono raro da parte della natura e rappresenta un obiettivo degno per l’individuo”²⁵⁶. Al suo conseguimento, tuttavia, non è certo ininfluenza la disposizione dell’organismo sociale che, nel migliore dei casi, può essere passiva o attiva: passiva, allorché si limita a non ostacolare e a non interferire sullo sviluppo dell’individuo; attiva, favorendo e incrementando le opportunità e gli strumenti rivolti alla realizzazione delle caratteristiche proprie della persona. In un senso e nell’altro l’educazione, e dunque l’istruzione e la scuola, svolgono, secondo Einstein, un ruolo importante giacché “possono interferire nello sviluppo della libertà interna mediante pressioni autoritarie e con l’imporre ai giovani fardelli spirituali eccessivi; d’altra parte le scuole possono favorire una tale libertà incoraggiando il pensiero indipendente”²⁵⁷. La riflessione einsteiniana mette capo a una conclusione sicuramente impegnativa, ma comunque realistica ed equilibrata; in verità, “soltanto se la libertà interna ed esterna sono costantemente e consapevolmente ricercate vi è una possibilità di sviluppo e di perfezione spirituale e quindi di un miglioramento della vita esterna e interna dell’uomo”²⁵⁸. Senza una cultura della libertà non può esservi libertà della cultura, perché quest’ultima presuppone un principio di tolleranza che solo l’ascesi verso la libertà interna può procurare e diffondere; senza la libertà della cultura ogni sforzo per liberarci dai legami dell’io e dalle condizioni meramente materiali di sussistenza è vano. Libertà esterna e libertà interna si richiamano e si giustificano reciprocamente: in quanto tali indicano il valore da perseguire sul piano individuale e sociale; quello stesso valore che Albert Einstein non si è mai stancato di affermare sul terreno teorico e pratico.

²⁵⁶ Ivi, p. 129.

²⁵⁷ *Ibid.*

²⁵⁸ *Ibid.*

SCIENZA, RELIGIONE ED ETICA

1. “La scienza senza la religione è zoppa; la religione senza la scienza è cieca”

Nello scorrere gli scritti einsteiniani, la sorpresa sollevata dal fatto che il fisico tedesco abbia riservato una certa attenzione alla problematica religiosa e, conseguentemente, si sia riferito direttamente al Dio delle religioni ebraica e cristiana, non va oltre il dovuto. In veste di intellettuale e uomo di cultura, difficilmente il Nostro avrebbe potuto eludere la spinosa questione, peraltro vissuta a suo tempo in prima persona come risposta a una domanda di senso che si faceva sempre più urgente al cospetto della frenesia del possesso e della competizione che sembrava affermarsi come unico fine utile da perseguire. Ricorda infatti l'ormai sessantasettenne fisico tedesco:

Fin da quando ero un giovane abbastanza precoce, la vanità delle speranze che travolgono incessantemente la maggior parte degli uomini in una corsa affannosa attraverso la vita, mi aveva colpito profondamente. Ed anzi, avevo ben presto scoperto la crudeltà di questa corsa affannosa, che in quegli anni era mascherata di ipocrisia e di belle parole con cura molto maggiore di quanto si faccia oggi. Per il solo fatto di possedere uno stomaco, tutti erano condannati a partecipare a questa corsa; ma tale partecipazione poteva forse soddisfare lo stomaco, non già l'uomo come essere pensante e dotato di sentimenti. La prima via d'uscita era offerta dalla religione, che viene inculcata in ogni bambino attraverso la macchina educativa tradizionale. Così io – benché figlio di genitori (ebrei) completamente irreligiosi – divenni religiosissimo; ma cessai improvvisamente di esserlo all'età di 12 anni. (...) Ora comprendo che il paradiso religioso della giovinezza, così presto perduto, fu il primo tentativo di liberarmi dalle catene del “puramente personale”, da un'esistenza dominata solo dai desideri, dalle speranze, e dai sentimenti primitivi²⁰⁶.

²⁰⁶ Einstein, *Note autobiografiche*, cit., pp. 3-4.

Fu l'approccio con la scienza che, come ben sappiamo, determinò la fine di quell'esperienza e il faticoso incamminarsi verso un'altra fonte di realizzazione e soddisfacimento che, riprende il Nostro, non sarà mai più abbandonata:

Fuori c'era questo enorme mondo, che esiste indipendentemente da noi, esseri umani, e che ci sta di fronte come un grande, eterno enigma, accessibile solo parzialmente alla nostra osservazione e al nostro pensiero. La contemplazione di questo mondo mi attirò come una liberazione, e subito notai che molti uomini che avevo imparato a stimare e ad ammirare avevano trovato la propria libertà e sicurezza interiore dedicandosi ad essa. Il possesso intellettuale di questo mondo extrapersonale mi balenò nella mente, in modo più o meno consapevole, come la meta più alta fra quelle concesse all'uomo. Gli amici che non si potevano perdere erano gli uomini del presente e del passato che avevano avuto la stessa meta, con i profondi orizzonti che avevano saputo dischiudere. La strada verso questo paradiso non era così comoda e allettante come quella del paradiso religioso; ma si è dimostrata una strada sicura, e non ho mai rimpianto di averla scelta²⁰⁷.

Di fronte a una posizione così netta e soprattutto definitiva, non si può non restare interdetti al cospetto di certe espressioni di evidente familiarità con la divinità inserite, con tutto il peso del loro significato, in un contesto scientifico; in particolar modo, e a maggior ragione, se in più di un'occasione non ci si è affatto preoccupati di negarne l'esistenza. "Non credo in un Dio personale" afferma infatti Einstein, "né ho mai negato questo fatto, anzi ho sempre espresso chiaramente il mio parere in proposito"²⁰⁸. Facendo ricorso a un movente che per la sua genericità vale sempre e in ogni circostanza, specie nel caso del fisico tedesco, si potrebbe pensare che il ripetersi di espressioni quali "il segreto del gran Vecchio"²⁰⁹, "dare un'occhiata alle carte di Dio"²¹⁰, "non credo per un istante che Lui giochi a dadi"²¹¹, ecc., debba semplicemente essere attribuito a un motivo strumentale, quello di colorire con una battuta una questione meritevole di attenzione, che ben rispecchierebbe la proverbiale

²⁰⁷ Ivi, p. 4.

²⁰⁸ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 41.

²⁰⁹ Einstein, Born, *op. cit.*, p. 109.

²¹⁰ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 63.

²¹¹ *Ibid.*

eccentricità del personaggio. Al di là dell'evidente irriverenza, una spiegazione di questo genere non è sufficiente a fugare un sincero turbamento, che anzi si fa sempre più motivato allorché si viene a precisare l'ambito specifico nel quale le citate espressioni vengono chiamate a operare, ambito sempre legato alla nozione di causalità e quasi esclusivamente proprio della discussione sollevata dalla meccanica quantica. Che cosa ha infatti a che spartire la scienza in generale e la fisica, in quanto conoscenza della natura in particolare, con la religione e la divinità?

Se si resta sul piano puramente formale non v'è dubbio che, per dirlo con lo stesso fisico tedesco, scienza e religione rappresentino due sfere ben delimitate, nel loro esercizio teorico e pratico, dalla diversità del loro oggetto:

La scienza, infatti, può solo accertare ciò che è, ma non ciò che *dovrebbe essere*, ed al di là del suo ambito restano necessari i giudizi di valore di ogni genere. La religione, d'altra parte, ha a che fare solo con i giudizi di valore sul pensiero e sull'azione umana: non può con diritto parlare dei fatti e delle relazioni esistenti tra i fatti stessi²¹².

Così, se da un lato la specificità dei rispettivi domini di riferimento consente di evitare inopportune quanto pericolose interferenze, dall'altro non impedisce, e anzi favorisce, la reciproca e rispettosa apertura di spazi di comunicazione e di collaborazione. Semmai, ciò che colpisce è che, volente o nolente lo stesso Einstein, le eventuali relazioni tra i due campi giungano ad assumere una legittimità non solo *de facto*, ma anche *de jure*.

In effetti, il sentimento religioso può articolarsi e assumere le connotazioni di un "discorso" proprio perché, grazie alla conoscenza in generale, è in grado di individuare dei mezzi e di coordinarli coerentemente in vista del fine. Afferma infatti il Nostro: "Per quanto la religione possa essere quella che determina il fine, essa ha tuttavia imparato dalla scienza, nel senso più ampio della parola, quali mezzi possono contribuire al raggiungimento dei fini da essa prefissati"²¹³. La scienza, per proprio conto, non può assolutamente avanzare alcun "discorso" sensato senza la tensione sincera e coerente alla verità e, soprattutto, la fede nella possi-

²¹² Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 134.

²¹³ Ivi, pp. 134-135.

bilità di conoscere in termini oggettivi l'esistente, ciò che è. Dice Einstein:

La scienza può essere creata solo da coloro che sono integralmente convinti delle aspirazioni verso la verità e verso la comprensione. Ma questa sorgente di sentimento nasce dalla sfera della religione, alla quale appartiene anche la fede nella possibilità che le regole valide per il mondo dell'esistenza siano razionali, comprensibili, cioè, con la ragione²¹⁴.

Di fatto, se la “religione senza la scienza è cieca”²¹⁵, perché priva della conoscenza dei mezzi non può focalizzare e distinguere nettamente il proprio oggetto, cioè il valore, né prospettare alcun giudizio su di esso, “la scienza senza la religione è zoppa”²¹⁶, cioè limitata nel procedere verso l'effettiva comprensione del dato esistente, a tal punto che “là dove questo sentimento viene meno, la scienza degenera in empiria priva di spirito”²¹⁷.

Che la religione abbia il sostegno della conoscenza per poter efficacemente operare nel proprio territorio rientra, per così dire, nell'ordine delle cose, come pure il fatto che l'uomo di scienza si distingue appunto per il suo esser votato alla missione di ricercare e di comprendere la verità; ma non può certo passare sotto silenzio che *il fondamento epistemologico garante della stessa possibilità della scienza, cioè l'affermazione di una realtà esterna indipendente dal soggetto conoscente e tuttavia comprensibile oggettivamente con certezza, appartiene propriamente alla sfera religiosa*. Per quanto sconvolgente possa sembrare, l'interdipendenza predicata *de facto* tra la sfera scientifica e quella religiosa deve essere affermata tale anche *de jure*, con tutto ciò che una simile affermazione comporta; lo si deve, perché entrambi i domini fondano la propria identità sulla medesima, originaria, esigenza: quella di trascendere l'empiria per accedere al puramente spirituale, in una parola, alla libertà. Afferma infatti il Nostro in termini inequivocabili:

Tutte le religioni, le arti e le scienze sono rami dello stesso albero. Tutte queste aspirazioni sono volte alla nobilitazione della vita dell'uomo, sollevando l'individuo dalla pura esistenza fisica e conducendolo verso la libertà²¹⁸.

²¹⁴ Ivi, p. 135.

²¹⁵ *Ibid.*

²¹⁶ *Ibid.*

²¹⁷ Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*, cit., p. 103

²¹⁸ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 85.

Orbene, se il cuore pulsante della scienza è ritmato di diritto e di fatto dal sentimento religioso, si può davvero continuare a sostenere che “se si concepiscono la religione e la scienza secondo queste definizioni allora è evidente che fra esse non è possibile alcun contrasto”²¹⁹? Lo si può, ma a una precisa e inappellabile condizione: quella di ridurre necessariamente la fede religiosa a pura evidenza razionale dei principi che organizzano il reale, privandola così di ciò che ne costituisce l’essenza, cioè l’affermazione dell’esistenza di una potenza creatrice che esercita la propria sovranità e signoria non solo nel possesso dei fini ma anche dei mezzi. E infatti il fisico tedesco è costretto a precisare:

Per quanto io abbia sostenuto in precedenza che non può esistere un vero conflitto fra religione e scienza, debbo tuttavia specificare questa affermazione ancora una volta circa un punto essenziale, a proposito del contenuto reale delle religioni storiche. Questa precisazione si riferisce al concetto di Dio²²⁰.

Ed è, potremmo aggiungere, precisazione tanto più necessaria quanto più chiarificatrice. È anzitutto necessaria, perché toglie ogni possibile contraddizione che verrebbe a presentarsi all’interno dello stesso dettato einsteiniano. Proprio perché oggettiva, la realtà naturale faticosamente e progressivamente costruita dalla scienza risponde solo ed esclusivamente a una causalità efficiente che esclude ogni possibilità di costituire un ordine retto e governato da qualsivoglia intento finalistico e, di conseguenza, considera priva di senso l’esistenza di una volontà e intenzionalità divine. Per il Nostro

quanto più un uomo è conscio della regolarità di tutti gli eventi tanto più salda diventa la sua convinzione che non vi è posto, accanto a questa regolarità ordinata, per cause di natura differente. Per lui né la legge della volontà umana né la legge della volontà divina esistono come causa indipendente di eventi naturali²²¹.

La precisazione è in secondo luogo chiarificatrice, perché indica in termini inequivocabili l’oggetto vero e proprio del sentimento religioso einsteinianamente inteso. Ciò che ispira devozione non è tanto l’attività di ricerca che la scienza produce per giungere a una connessione unitaria dei fenomeni e alla loro previsione, in ogni caso scopo e condizione preliminare liberante giacché conduce “a una completa

²¹⁹ Ivi, p. 134.

²²⁰ Ivi, p. 135.

²²¹ Ivi, p. 137.

emancipazione dai ceppi delle speranze e delle paure personali”²²², quanto la “ragione incarnata nell’esistenza”²²³, che si svela al termine del tentativo pienamente realizzato di “ridurre le connessioni scoperte al minor numero possibile di elementi concettuali fra loro indipendenti”²²⁴, cioè i principi e gli assiomi. Da quest’esperienza speculativa, secondo Einstein, trae origine un atteggiamento particolare

di un genere alquanto diverso da quello comunemente definito religioso. Si tratta più di un sentimento di timore reverenziale per l’ordinamento che si manifesta nell’universo materiale; non ci conduce a modellare un essere divino a nostra immagine, un personaggio che abbia delle esigenze nei nostri confronti, che si interessa a noi in quanto individui. Non vi è in ciò né volontà né scopo, né necessità, ma solo l’essere allo stato puro²²⁵.

In questo senso, e solo in questo, il Nostro può dichiararsi devoto e profondamente religioso²²⁶ e, dunque, legittimato a riferirsi alla divinità nei termini che, di primo acchito, giustificavano perplessità e turbamento.

Il “credo epistemologico” e il credo religioso abbracciano, come è agevole comprendere, l’intera realtà naturale einsteinianamente intesa²²⁷, realtà che viene così a fondarsi interamente sulla libertà; ma, per converso, la libertà non può che identificarsi con la necessità della causalità efficiente che governa l’ordine naturale. In effetti, è

²²² Ivi, p. 138.

²²³ *Ibid.*

²²⁴ *Ibid.*

²²⁵ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 64.

²²⁶ Dice Einstein: “Quel che vedo nella natura è una struttura magnifica che possiamo capire solo molto imperfettamente, il che non può non riempire di umiltà qualsiasi persona razionale. Si tratta di un autentico sentimento religioso che non ha niente a che fare con il misticismo” (ivi, pp. 37-38). In tal senso, “la mia religiosità consiste in una umile ammirazione dello Spirito infinitamente superiore che si rivela in quel poco che noi, con la nostra ragione debole ed effimera, possiamo capire della realtà” (ivi, p. 61).

²²⁷ A tal punto che, a proposito dei successi della scienza, ci si può indifferentemente esprimere con i termini di “miracolo” o di “eterno mistero”. Nella lettera inviata a Solovine il 30 marzo 1952 Einstein afferma testualmente: “Lei trova curioso che io consideri la comprensibilità del mondo (nella misura in cui siamo autorizzati a parlare di una tale comprensibilità) come un miracolo o come un eterno mistero. Ebbene, *a priori* ci si dovrebbe attendere un mondo caotico, che non può in alcun modo essere colto attraverso il pensiero. Ci si potrebbe (ci si dovrebbe) aspettare che il mondo sia sottoposto alla legge solamente nella misura in cui noi interveniamo con la nostra intelligenza ordinatrice. Sarebbe una specie di ordine come l’ordine alfabetico delle parole di una lingua” (*Lettere à Maurice Solovine*, cit., p. 115). Al contrario, riprende il fisico tedesco, “la specie di ordine creata, per esempio, dalla teoria della gravitazione di Newton, è di tutt’altro carattere. Anche se gli assiomi della teoria sono posti dall’uomo, il successo di una tale impresa suppone un ordine di alto grado del mondo oggettivo che, *a priori*, non si è affatto autorizzati ad attendere. È questo il ‘miracolo’, che si corrobora sempre più con lo sviluppo delle nostre conoscenze” (*ibid.*).

ben vero che, in virtù della sua natura controinduttiva, il pensiero è libero di creare, anche attraverso la fantasia, le più svariate ipotesi; ma lo è altrettanto che, come sappiamo, non tutte le congetture formulate possono essere accettate sul piano formale e definitivamente accolte su quello materiale. Dice Einstein:

Non si deve biasimare, tacciandolo di soverchia fantasia, il teorico che intraprende questo studio: ma bisogna al contrario provare la sua fantasia, perché, tutto ben considerato, non c'è per lui altro cammino per arrivare allo scopo: in ogni caso non è una fantasia senza disegno, ma una ricerca eseguita in vista di possibilità logicamente semplici e delle loro conseguenze²²⁸.

E infatti, nel cammino verso la contemplazione della razionalità del reale, il fisico teorico deve tener conto non solo della condizione formale ma anche di quella materiale, ovvero che la scelta dei principi e degli assiomi superi il tribunale esigentissimo dell'esperienza. Egli è certo libero di scegliere; la sua

libertà di scelta, tuttavia, è di un tipo particolare: non è affatto simile alla libertà di uno scrittore di romanzi. Essa è piuttosto simile a quella di chi è impegnato nella risoluzione di un ben congegnato cruciverba. Egli può, è vero, proporre ogni volta qualsiasi parola come soluzione; ma ogni volta è *una sola* parola che dà la chiave per risolvere il cruciverba in tutte le sue parti²²⁹.

Che si tratti della previsione delle orbite dei pianeti o del funzionamento di una lampada elettrica, tutti i fenomeni, anche quelli che come la meteorologia²³⁰ sembrano opporre una strenua resistenza alla previsione, risultano dunque necessariamente determinati.

2. Natura e libertà: il problema etico

Se l'autentica religione si riduce al sentimento di assoluta deferenza e riverenza al cospetto della razionalità che si rivela al pensiero²³¹, se l'universo materiale è interamente sottoposto

²²⁸ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 100.

²²⁹ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 42.

²³⁰ Cfr. *ivi*, pp. 136-137.

²³¹ "Io sostengo" afferma Einstein "che la religione cosmica è l'impulso più potente e più nobile alla ricerca scientifica. Solo colui che può valutare gli sforzi e soprattutto i sacrifici umani per arrivare a quelle scoperte scientifiche che schiudono nuove vie, è in grado di rendersi conto della forza del sentimento che solo può suscitare un'opera tale, libera da ogni vincolo con la vita pratica immediata. Quale gioia profonda a cospetto dell'edificio

ben vero che, in virtù della sua natura controinduttiva, il pensiero è libero di creare, anche attraverso la fantasia, le più svariate ipotesi; ma lo è altrettanto che, come sappiamo, non tutte le congetture formulate possono essere accettate sul piano formale e definitivamente accolte su quello materiale. Dice Einstein:

Non si deve biasimare, tacciandolo di soverchia fantasia, il teorico che intraprende questo studio: ma bisogna al contrario provare la sua fantasia, perché, tutto ben considerato, non c'è per lui altro cammino per arrivare allo scopo: in ogni caso non è una fantasia senza disegno, ma una ricerca eseguita in vista di possibilità logicamente semplici e delle loro conseguenze²²⁸.

E infatti, nel cammino verso la contemplazione della razionalità del reale, il fisico teorico deve tener conto non solo della condizione formale ma anche di quella materiale, ovvero che la scelta dei principi e degli assiomi superi il tribunale esigentissimo dell'esperienza. Egli è certo libero di scegliere; la sua

libertà di scelta, tuttavia, è di un tipo particolare: non è affatto simile alla libertà di uno scrittore di romanzi. Essa è piuttosto simile a quella di chi è impegnato nella risoluzione di un ben congegnato cruciverba. Egli può, è vero, proporre ogni volta qualsiasi parola come soluzione; ma ogni volta è *una sola* parola che dà la chiave per risolvere il cruciverba in tutte le sue parti²²⁹.

Che si tratti della previsione delle orbite dei pianeti o del funzionamento di una lampada elettrica, tutti i fenomeni, anche quelli che come la meteorologia²³⁰ sembrano opporre una strenua resistenza alla previsione, risultano dunque necessariamente determinati.

2. Natura e libertà: il problema etico

Se l'autentica religione si riduce al sentimento di assoluta deferenza e riverenza al cospetto della razionalità che si rivela al pensiero²³¹, se l'universo materiale è interamente sottoposto

²²⁸ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 100.

²²⁹ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 42.

²³⁰ Cfr. *ivi*, pp. 136-137.

²³¹ "Io sostengo" afferma Einstein "che la religione cosmica è l'impulso più potente e più nobile alla ricerca scientifica. Solo colui che può valutare gli sforzi e soprattutto i sacrifici umani per arrivare a quelle scoperte scientifiche che schiudono nuove vie, è in grado di rendersi conto della forza del sentimento che solo può suscitare un'opera tale, libera da ogni vincolo con la vita pratica immediata. Quale gioia profonda a cospetto dell'edificio

alla determinazione meccanica, che ne è della realtà umana? L'interrogativo si giustifica in un duplice senso. Anzitutto, la negazione di un riferimento assoluto sul piano dei valori e dei fini, ovvero del Dio delle religioni storiche e della rivelazione cui dovrebbe far riferimento la coscienza singola e comunitaria, l'individuo e la storia, piega prepotentemente l'attenzione verso l'imperativo morale, ormai autonomo perché svincolato da ogni suggestione trascendente, rendendolo cogente. "Non credo nell'immortalità dell'individuo" dichiara Einstein "e considero che l'etica sia un interesse esclusivamente umano che non deriva da alcuna autorità sovranaturale"²³²; proprio per questo motivo, continua il fisico tedesco, "noi scienziati consideriamo la moralità una questione puramente umana"²³³, essa, infatti, "ha la massima importanza – ma per noi, non per Dio"²³⁴.

In secondo luogo, dal momento che lo stesso fenomeno biologico, compreso l'essere umano, non sfugge alla medesima regola che ordina la realtà naturale, la questione del fondamento del comportamento e dell'agire umano diviene evidentemente problematica. A onor del vero, il Nostro riconosce che, sul piano della complessità della realtà vitale, la stretta esercitata dalla causalità efficiente sembra debole e talvolta irrilevante, ma considera che ciò sia da attribuire a motivi di crescita e di progresso della conoscenza, non certo alla logica intrinseca che regge i fenomeni. Dice Einstein: "Le nostre conoscenze sono assai meno approfondite per quanto riguarda le regolarità presenti nel campo degli esseri viventi; ma lo sono abbastanza, tuttavia, per permetterci di intuire almeno la regola della necessità sistematica"²³⁵. In realtà, "ciò che ancora manca qui, è la comprensione

del mondo e quale ardente desiderio di conoscere – sia pure limitato a qualche debole raggio dello splendore rivelato dall'ordine mirabile dell'universo – dovevano possedere Keplero e Newton per aver potuto, in un solitario lavoro di lunghissimi anni svelare il meccanismo celeste!" (*Come io vedo il mondo*, cit., p. 29).

²³² Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 37.

²³³ Ivi, p. 64.

²³⁴ Ivi, p. 61. Non è dunque casuale che, a proposito di rapporti tra la scienza e la morale, Einstein si esprima con i medesimi termini utilizzati per definire i rapporti tra la scienza e la religione. Afferma infatti il Nostro: "Ciò che noi chiamiamo scienza ha esclusivamente per scopo quello di stabilire ciò che è. La determinazione di ciò che *deve essere* ne è qualcosa di totalmente indipendente, che non può essere ottenuto per via metodica. La scienza può formulare delle proposizioni sulla morale solo in una connessione logica e fornire dei mezzi per la realizzazione dei fini morali, ma la determinazione dei fini medesimi è al di fuori del suo dominio" (*Lettere à Maurice Solovine*, cit., p. 105).

²³⁵ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 137.

delle connessioni profonde e generali, ma non la conoscenza dell'ordine in se stesso"²³⁶.

Per il fisico tedesco, infatti, l'io è interamente condizionato dagli impulsi primari, tendenze innate riconducibili alla conservazione propria e della specie e alla relazione con i propri simili²³⁷, a tal punto che, "obiettivamente, non esiste in fondo il libero arbitrio"²³⁸. Che si applichi alla materia inerte o vivente, o alla stessa vita psicologica, "la ricerca scientifica" conclude Einstein "è basata sul concetto che tutto quel che accade è determinato dalle leggi della natura e questo vale anche per il comportamento della gente"²³⁹, sia sul piano individuale sia sociale. Ma in che senso si potrà ancora parlare di imperativo morale?

L'interrogativo etico sorge per il semplice porsi dell'esistenza umana; tant'è che la constatazione di uno *status* permanente di conflittualità imputabile alla cieca guida delle forze originarie dell'Io, e la conseguente necessità di un suo superamento, sta alla base di qualsiasi insegnamento morale. Si è pensato di provvedere, osserva il Nostro, ritenendo che gli uomini "dovrebbero lasciare che la loro condotta fosse guidata dagli stessi principi: principi tali che seguendoli ne deriverebbero a tutti la massima sicurezza e soddisfazione e la minima sofferenza possibili"²⁴⁰. Ma con quale linguaggio esprimeremo questi valori? E poi, una volta individuati e condivisi, non è affatto scontato che tali fini fondamentali possano essere efficacemente perseguiti, sì da trarne determinanti benefici.

Di certo, come abbiamo avuto modo di mostrare, non potremo esprimere i fini fondamentali per l'esistenza, ossia i valori, avvalendoci dell'autorità della scienza, cioè con il linguaggio della ragione, né tanto meno guardando alla religione, fosse anche quella predicata dal fisico tedesco; ma potremo, e anzi non potremo non farlo, rivolgendosi alla tradizione. Afferma il fisico tedesco:

Se ci si domanda di dove derivi l'autorità di tali fini fondamentali, dato che questi non possono essere stabiliti e giustificati semplicemente dalla ragione, si può rispondere soltanto così: essi esi-

²³⁶ *Ibid.*

²³⁷ Ivi, p. 88.

²³⁸ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 76. "Per lo più" affermerà Einstein di se stesso "io faccio ciò che la mia natura mi induce a fare" (*Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 36).

²³⁹ Einstein, *Il lato umano*, cit., p. 30.

²⁴⁰ Einstein, *Pensieri degli anni difficili*, cit., p. 89.

stono in una società sana come potenti tradizioni, che agiscono sul comportamento e le aspirazioni e i giudizi degli individui²⁴¹;

ed esistono, precisa Einstein,

come qualcosa di vivo, senza che sia necessario trovare la giustificazione della loro esistenza. Essi nascono non da una dimostrazione ma da una rivelazione, grazie alla mediazione di forti personalità. Si deve tentare non di giustificarli, ma piuttosto di sentirne la natura con semplicità e con chiarezza²⁴².

In questa prospettiva, tanto la scienza quanto la religione assumono un ruolo, non primario, ma comunque apprezzabile. La scienza, perché attraverso la logica dell'analisi è in grado di incamminarci verso la formulazione di proposizioni etiche che discendono direttamente da premesse generali, riconosciute tali e condivise. Peraltro, queste premesse assumono una connotazione particolare, paragonabile a quella degli assiomi matematici, con l'indubbio vantaggio, per un verso, di godere dell'arbitrarietà del pensiero, per l'altro, di potersi proporre sul piano pratico in quanto riferibili a uno *status* psicologico e genetico²⁴³. La religione, dal momento che la presentazione, la difesa e, soprattutto, il tentativo di rendere vitali i valori fondamentali attraverso la testimonianza e le opere ne caratterizza la specifica funzione nei confronti della società²⁴⁴.

Ma a quale tradizione potremo far riferimento? La scelta, in questo caso, non può essere arbitraria, né è sufficiente orientarsi verso quella che, tra le diverse tradizioni che possono essere considerate, sembra maggiormente radicata nella società, benché ciò debba essere considerata come la condizione necessaria. L'opzione deve infatti sciogliere il vero nodo che ha ostacolato e continua a ostacolare la piena affermazione dell'istanza etica, come la storia recente e passata sta eloquentemente a testimoniare, e che risponde all'interrogativo: "In che modo possiamo rendere il nostro insegnamento tanto potente nella vita emotiva dell'uomo che la sua influenza sopporti la pressione delle forze psichiche elementari dell'individuo?"²⁴⁵. Dovremo avvalerci di una tradizione la cui capacità di condizionamento sia così profonda da esser connaturata alla stessa

²⁴¹ Ivi, pp. 109-110.

²⁴² *Ibid.*

²⁴³ Ivi, p. 249.

²⁴⁴ Cfr. ivi, p. 109.

²⁴⁵ Ivi, p. 90.

soggettività, in modo tale da costituire il presupposto per ogni possibile comportamento etico. Questo presupposto, come è agevole comprendere, non può che identificarsi con l'esigenza di libertà propria della persona umana. Per essa si esige, dice Einstein, che

ogni individuo abbia la possibilità di sviluppare i doni naturali che possono essere latenti in lui. Soltanto in questo modo l'individuo può ottenere la soddisfazione cui giustamente ha diritto; e soltanto in questo modo la comunità può raggiungere la sua più ricca prosperità. Infatti, tutto ciò che di veramente grande ed esaltante esiste, è creazione di un individuo che può operare in libertà. Restrizioni a questa libertà sono giustificate soltanto per necessità di sicurezza riguardanti l'esistenza fisica²⁴⁶.

Da essa, come conseguenza, deriva quel principio di tolleranza senza il quale sarebbe impossibile parlare di agire morale; principio, osserva il Nostro, secondo cui “non dobbiamo semplicemente *sopportare* le benvenute fra gli individui e i gruppi, ma anzi accoglierle come le benvenute, considerandole un arricchimento della nostra esistenza”²⁴⁷.

La tradizione che, einsteinianamente, assolve a entrambe le condizioni richieste è quella propria delle religioni ebraica e cristiana²⁴⁸, su cui poggia l'intera civiltà europea; considerato laicamente, il comportamento morale che si ispira a essa “non è un invito a un'austera rinuncia a qualche gioia della vita, ma piuttosto un amichevole interesse a una sorte più felice per tutti gli uomini”²⁴⁹, mentre la morale cessa di essere un sistema chiuso e rigido per proporsi come prospettiva aperta attraverso la quale esercitare il nostro discernimento.

3. Cultura della libertà e libertà della cultura

Al tema della libertà, considerata dal punto di vista esterno e interno, cioè in prospettiva sociale e individuale, Einstein dedicherà nel 1940 alcune brevi, essenziali riflessioni.

²⁴⁶ Ivi, p. 92.

²⁴⁷ *Ibid.*

²⁴⁸ Cfr. ivi, p. 110. Secondo il fisico tedesco, “i nostri antenati ebrei, i profeti e i vecchi saggi cristiani compresero e proclamarono che il fattore più importante nella formazione della esistenza umana è la creazione di un fine: quello di una comunità libera e di esseri umani felici che con un continuo sforzo interiore lottino per liberarsi dall'eredità di istinti antisociali e distruttivi” (ivi, p. 149).

²⁴⁹ Ivi, pp. 91-92.

soggettività, in modo tale da costituire il presupposto per ogni possibile comportamento etico. Questo presupposto, come è agevole comprendere, non può che identificarsi con l'esigenza di libertà propria della persona umana. Per essa si esige, dice Einstein, che

ogni individuo abbia la possibilità di sviluppare i doni naturali che possono essere latenti in lui. Soltanto in questo modo l'individuo può ottenere la soddisfazione cui giustamente ha diritto; e soltanto in questo modo la comunità può raggiungere la sua più ricca prosperità. Infatti, tutto ciò che di veramente grande ed esaltante esiste, è creazione di un individuo che può operare in libertà. Restrizioni a questa libertà sono giustificate soltanto per necessità di sicurezza riguardanti l'esistenza fisica²⁴⁶.

Da essa, come conseguenza, deriva quel principio di tolleranza senza il quale sarebbe impossibile parlare di agire morale; principio, osserva il Nostro, secondo cui “non dobbiamo semplicemente *sopportare* le benvenute fra gli individui e i gruppi, ma anzi accoglierle come le benvenute, considerandole un arricchimento della nostra esistenza”²⁴⁷.

La tradizione che, einsteinianamente, assolve a entrambe le condizioni richieste è quella propria delle religioni ebraica e cristiana²⁴⁸, su cui poggia l'intera civiltà europea; considerato laicamente, il comportamento morale che si ispira a essa “non è un invito a un'austera rinuncia a qualche gioia della vita, ma piuttosto un amichevole interesse a una sorte più felice per tutti gli uomini”²⁴⁹, mentre la morale cessa di essere un sistema chiuso e rigido per proporsi come prospettiva aperta attraverso la quale esercitare il nostro discernimento.

3. Cultura della libertà e libertà della cultura

Al tema della libertà, considerata dal punto di vista esterno e interno, cioè in prospettiva sociale e individuale, Einstein dedicherà nel 1940 alcune brevi, essenziali riflessioni.

²⁴⁶ Ivi, p. 92.

²⁴⁷ *Ibid.*

²⁴⁸ Cfr. ivi, p. 110. Secondo il fisico tedesco, “i nostri antenati ebrei, i profeti e i vecchi saggi cristiani compresero e proclamarono che il fattore più importante nella formazione della esistenza umana è la creazione di un fine: quello di una comunità libera e di esseri umani felici che con un continuo sforzo interiore lottino per liberarsi dall'eredità di istinti antisociali e distruttivi” (ivi, p. 149).

²⁴⁹ Ivi, pp. 91-92.

La sfera esterna della libertà investe, da una parte, la soddisfazione delle esigenze primarie dell'esistenza fisica e materiale, ovvero la disponibilità dei "beni strumentali necessari a conservare la vita e la salute di tutti gli esseri umani"²⁵⁰; dall'altra, la possibilità di superare queste stesse esigenze "con la minima fatica possibile da parte di tutti"²⁵¹, così da poter disporre l'individuo ad attività più creative, visto che "per essere contenti gli uomini debbono anche avere la possibilità di sviluppare le loro facoltà intellettuali e artistiche nella misura desiderata secondo le loro caratteristiche e capacità personali"²⁵². In tal senso, il fisico tedesco distingue due tipi di libertà esterna. Il primo tipo si identifica con la libera circolazione delle idee e delle opinioni, ciò che potremmo ben indicare come libertà della cultura. Dice Einstein:

Per libertà io intendo condizioni sociali tali che l'espressione delle opinioni e delle idee riguardanti questioni di conoscenza generali e particolari non implichi pericoli o seri inconvenienti per chi li esprime. Questa libertà di comunicazione è indispensabile allo sviluppo e all'estensione della conoscenza scientifica, considerazione questa che ha una vasta portata pratica²⁵³.

E infatti, solo il progresso della conoscenza e della tecnologia può procurare gli strumenti per soddisfare i bisogni elementari sia singoli sia comunitari. Tuttavia, ritiene opportuno precisare il Nostro, "la legge da sola non può assicurare la libertà di espressione; affinché ogni uomo possa esprimere i propri punti di vista senza pericolo ci deve essere uno spirito di tolleranza nella popolazione intera"²⁵⁴. Il secondo tipo di libertà esterna riguarda le rigide condizioni di lavoro che rendono impraticabile, per l'individuo che vi è sottoposto, la possibilità di valorizzare le sue doti naturali sul piano spirituale. Dice Einstein:

L'uomo non dovrebbe essere costretto a lavorare per ottenere quanto gli è necessario per vivere, al punto da non avere più né il tempo né la forza di iniziare delle attività personali. Senza questo secondo tipo di libertà esterna, la libertà di espressione gli è completamente inutile²⁵⁵.

²⁵⁰ Ivi, p. 127.

²⁵¹ *Ibid.*

²⁵² Ivi, p. 128.

²⁵³ *Ibid.*

²⁵⁴ *Ibid.*

²⁵⁵ *Ibid.*

Einstein non dispera che, anche in questo caso, lo sviluppo tecnico renda possibile questa libertà, specie se a esso si affiancano politiche efficaci e ragionevoli circa la divisione del lavoro.

La sfera della libertà interna è propria della scienza, della filosofia e di tutte le attività superiori coltivate dallo spirito: in quanto tale è qualificabile come cultura della libertà e consiste, afferma il fisico tedesco, “nell’indipendenza del pensiero dalle limitazioni dei pregiudizi autoritari e sociali come dagli automatismi acritici e dagli abiti acquisiti. Questa libertà è un dono raro da parte della natura e rappresenta un obiettivo degno per l’individuo”²⁵⁶. Al suo conseguimento, tuttavia, non è certo ininfluenza la disposizione dell’organismo sociale che, nel migliore dei casi, può essere passiva o attiva: passiva, allorché si limita a non ostacolare e a non interferire sullo sviluppo dell’individuo; attiva, favorendo e incrementando le opportunità e gli strumenti rivolti alla realizzazione delle caratteristiche proprie della persona. In un senso e nell’altro l’educazione, e dunque l’istruzione e la scuola, svolgono, secondo Einstein, un ruolo importante giacché “possono interferire nello sviluppo della libertà interna mediante pressioni autoritarie e con l’imporre ai giovani fardelli spirituali eccessivi; d’altra parte le scuole possono favorire una tale libertà incoraggiando il pensiero indipendente”²⁵⁷. La riflessione einsteiniana mette capo a una conclusione sicuramente impegnativa, ma comunque realistica ed equilibrata; in verità, “soltanto se la libertà interna ed esterna sono costantemente e consapevolmente ricercate vi è una possibilità di sviluppo e di perfezione spirituale e quindi di un miglioramento della vita esterna e interna dell’uomo”²⁵⁸. Senza una cultura della libertà non può esservi libertà della cultura, perché quest’ultima presuppone un principio di tolleranza che solo l’ascesi verso la libertà interna può procurare e diffondere; senza la libertà della cultura ogni sforzo per liberarci dai legami dell’io e dalle condizioni meramente materiali di sussistenza è vano. Libertà esterna e libertà interna si richiamano e si giustificano reciprocamente: in quanto tali indicano il valore da perseguire sul piano individuale e sociale; quello stesso valore che Albert Einstein non si è mai stancato di affermare sul terreno teorico e pratico.

²⁵⁶ Ivi, p. 129.

²⁵⁷ *Ibid.*

²⁵⁸ *Ibid.*

L'IMPEGNO PER LA PACE

1. Nazionalismo aberrante e leva obbligatoria

Sul fondamento di quella libertà interna che costituisce il movente principale da cui trae origine il progetto di vita e di pensiero faticosamente ma tenacemente realizzato da Einstein, riposa l'impegno, anch'esso spassionato, per l'affermazione e l'effettiva attuazione di quella libertà esterna, base del benessere e del progresso della società, di cui il fisico tedesco si farà infaticabile promotore.

Pur non tralasciando la propria attività di ricerca, sin dal 1920 il Nostro inizia con sempre maggiore intensità a dedicare parte del proprio tempo e delle proprie energie ad attività extrascientifiche che talvolta accompagnano gli incontri di carattere didattico e le conferenze che è chiamato a presenziare, come nel caso del suo primo viaggio negli Stati Uniti d'America nei mesi di aprile e maggio del 1921. Invitato alla Princeton University per tenere quattro conferenze sulla teoria della relatività e ritirare una laurea in fisica conferitagli dall'istituzione universitaria, tra un intervento e l'altro affianca nell'opera di sensibilizzazione e raccolta di finanziamenti per l'erigenda Università ebraica di Gerusalemme Chaim Weizmann, colui che diverrà il primo presidente dello Stato di Israele, nonché presidente dell'Organizzazione mondiale del sionismo. Grazie all'impegno di Weizmann, fin dal 1916 vengono poste le basi politiche e finanziarie per la realizzazione dell'istituzione accademica, che sarà inaugurata il 1° aprile 1925. Ma sarà l'impegno etico per la promozione e la difesa di una pace effettiva e reale che vedrà Einstein operare a diversi livelli proprio a partire dal 1925 quando, assieme a Gandhi, decide di firmare il manifesto contro il servizio militare obbligatorio. La decisione non riflette solo e semplicemente la volontà di estendere pubblicamente una scelta personale a suo tempo maturata e consumata ma, come mostreremo, rinvia a una visione ben precisa delle cause della guerra, al progetto di

una pace duratura e al ruolo che, in questo progetto, è chiamato a svolgere l'intellettuale. Dice Einstein:

Il grande e deplorabile sviluppo assunto oggi dal nazionalismo in ogni parte del globo è, a mio giudizio, strettamente legato all'esistenza del servizio militare obbligatorio o, per usare un'espressione meno forte, degli eserciti nazionali. Lo Stato che richiede un servizio militare obbligatorio ai suoi cittadini è costretto a allevarli nello spirito nazionalistico, dando così una giustificazione psicologica al loro sfruttamento per fini militaristi. Nelle sue scuole lo Stato fa idolatrare ai giovani, a fianco della religione, questi strumenti di forza brutta. L'introduzione del servizio militare obbligatorio è quindi, a mio giudizio, la causa prima della decadenza morale della razza bianca, la quale minaccia da vicino non solo la sopravvivenza della nostra civiltà, ma la nostra stessa esistenza. È dovere quindi di coloro che desiderano che si stabilisca uno spirito internazionale e combattono lo sciovinismo, di prender posizione contro il servizio militare obbligatorio. Non è forse la persecuzione cui sono esposti oggi gli obiettori di coscienza altrettanto disonorante per l'umanità di quella alla quale furono sottoposti nei primi secoli i martiri della religione²⁵⁹?

E ancora:

Il servizio militare obbligatorio, che è all'origine del nazionalismo malsano, deve essere combattuto, e, soprattutto dobbiamo assicurare la nostra assistenza in tutto il mondo agli obiettori di coscienza²⁶⁰.

Il doveroso sostegno a coloro che rifiutano di essere addestrati all'uso della violenza e delle armi è del resto indispensabile per rendere palese la gravissima violazione che lo Stato, inteso come Einstein lo concepisce, viene a perpetrare nei riguardi dei suoi stessi doveri rispetto al singolo cittadino. Afferma infatti il Nostro:

Lo Stato è fatto per l'uomo e non l'uomo per lo Stato. (...) Considero principale dovere dello Stato quello di proteggere l'individuo e di offrirgli la possibilità di sviluppare le sue capacità creative. In altre parole, lo Stato dovrebbe essere messo al nostro servizio, piuttosto che essere noi i suoi schiavi. Esso viene meno a questa norma, allorché usando la forza ci impone il servizio mi-

²⁵⁹ A. Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 101-102.

²⁶⁰ Ivi, p. 102.

litare, in particolare quando scopo e conseguenze di questa degradante milizia è la morte data a uomini di altri Paesi e l'intermissione nella loro sfera di libertà. Noi siamo debitori allo Stato solo di quei sacrifici che valgono a promuovere il libero sviluppo dell'individuo²⁶¹.

Come potrà uno Stato, una nazione, privata di un apparato di difesa e di sicurezza armata, proteggere i suoi cittadini, la sua cultura e le sue tradizioni? È davvero realistico pensare di ottenere la pace privandosi volontariamente di ogni mezzo di dissuasione? L'interrogativo, per quanto crudo possa sembrare, discende direttamente dalle premesse einsteiniane: la protezione invocata dal fisico tedesco da parte dello Stato non può, necessariamente, non estendersi anche alla prevenzione o alla risposta, a minacce provenienti tanto dall'esterno quanto dall'interno. Si potrebbe pensare che il negoziato, la possibilità di stipulare dei patti di non aggressione, il semplice controllo, se non addirittura la limitazione degli armamenti potrebbero costituire una strada certamente impegnativa, ma potenzialmente percorribile con speranza di successo. Solo che, per negoziare, stringere accordi o controllare è necessario disporre di potere contrattuale: con cosa scambieremo la nostra sicurezza e il nostro eventuale benessere? E del resto, lo stesso Einstein esclude categoricamente una prospettiva di questo genere. Rivolgendosi a un gruppo di studenti pacifisti tedeschi, nel 1930 il Nostro precisa:

Se il sacro egoismo illimitato conduce a funeste conseguenze nella vita economica, effetti ancora peggiori esso produce quando lo si assuma a criterio regolatore nei rapporti tra le nazioni. Se in breve tempo non si scoprirà un mezzo per impedire le guerre, l'attuale impressionante sviluppo dei mezzi bellici renderà la nostra vita intollerabile. L'importanza di questo fine è solo uguagliata dall'inadeguatezza degli sforzi che si sono finora messi in opera per raggiungerlo. Si cerca di diminuire il pericolo ricorrendo a limitazioni negli armamenti e ad accordi particolari sulla condotta della guerra. Ma la guerra non è un gioco di società dove i partecipanti si attengono scrupolosamente alle regole. Dove la posta in gioco è rappresentata dalla vita o dalla morte, le regole e gl'impegni perdono ogni valore²⁶².

²⁶¹ Ivi, p. 100.

²⁶² A. Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 99.

Di più, nemmeno autorevoli organismi internazionali quali la Società delle Nazioni, prima, e l'Onu, dopo, possono offrire una soluzione soddisfacente: almeno nella forma e nelle funzioni con le quali esplicano attualmente o hanno esplicato il loro ruolo. Dice Einstein nel 1931, in occasione della Conferenza sul disarmo:

Noi disponiamo, è vero, di una Società delle Nazioni e di una Corte arbitrale, ma la prima non è niente più di un luogo di incontro e la Corte da parte sua non dispone di alcun mezzo per imporre con la forza le decisioni. Si tratta di istituzioni incapaci di offrire qualsiasi protezione ai Paesi in caso di aggressione²⁶³.

L'unica possibilità di giungere a una pace vera è di fronte a tutte le nazioni, ma nessuna è in grado di compiere il primo passo. Eppure, afferma chiaramente il Nostro, “soltanto il ripudio totale della guerra può scongiurare il pericolo”²⁶⁴.

Einstein fu buon profeta: gli eventi che si susseguirono dopo il 1933 in Europa, con l'ascesa al potere in Germania del partito nazional-socialista e di Adolf Hitler dimostrano quanto la sua sfiducia negli strumenti messi in atto dopo il primo conflitto mondiale per scongiurare nuovi bagni di sangue fosse motivata. Del resto, il fisico tedesco aveva il polso della situazione. Dopo un soggiorno di tre mesi presso il California Institute of Technology (CalThec) di Pasadena, nel marzo del 1932 era infatti rientrato a Berlino. In Germania resterà fino a dicembre, per poi tornare nuovamente negli Stati Uniti: non metterà mai più piede nella sua terra natale e, a questa decisione, seguiranno atti ben precisi quali le dimissioni irrevocabili dall'Accademia bavarese delle scienze e la rinuncia, per la seconda volta, della cittadinanza tedesca. Rientrato in Europa, accompagnato alla moglie, il Nostro trova ospitalità e protezione dai reali del Belgio, dove a breve sarà raggiunto da Ilse, Margot, la segretaria Helen Dukas, assunta a tale compito nel 1928, e un assistente, W. Mayer. Dopo un viaggio a Oxford e una breve sosta in Svizzera, dove incontrerà per l'ultima volta il figlio Eduard, affetto da disturbi mentali, i coniugi Einstein e il loro seguito lasciano l'Europa nel settembre del 1933. Nel frattempo, il marito di Ilse, R. Kaiser, riesce miracolosamente a spedire tutte le carte di Einstein, archivio compreso, prima in Francia e, da qui, negli Stati

²⁶³ Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, cit., p. 101.

²⁶⁴ Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, cit., p. 99.

Uniti. Il 17 ottobre 1933 il fisico tedesco sbarca a New York per poi procedere alla volta di Princeton, dove lo attende la cattedra che ha deciso di accettare.

2. Il governo mondiale

Ben prima che le tenebre del male assoluto oscurassero anche la debole fiamma della ragione di un'umanità destinata a negare se stessa e a percorrere interamente quel *mysterium iniquitatis* con lo sterminio scientifico di oltre sei milioni di ebrei e di un numero considerevole di persone di altre etnie, Einstein aveva indicato una prospettiva. Si trattava di rafforzare decisamente e realmente quelle istituzioni mondiali già presenti e operanti, quali la Corte arbitrale internazionale, attraverso la cessione volontaria, da parte degli Stati, di una quota della loro sovranità. Afferma il Nostro:

La creazione di una corte arbitrale internazionale è insufficiente. Si rendono altresì necessari patti che garantiscano l'effettiva applicazione delle decisioni di quella corte, attraverso l'azione coordinata di tutte le nazioni. Senza una tale garanzia mai le nazioni avranno il coraggio di procedere a un serio disarmo²⁶⁵.

Così,

Finché non sarà stato raggiunto un accordo inteso a limitare la sovranità degli Stati particolari obbligando ciascuno di essi a un'azione collettiva contro quel Paese che apertamente od occultamente resiste ad una decisione della Corte arbitrale, non ci sarà dato di uscire dallo stato generale di anarchia e terrore in cui viviamo. Ci vorranno nuove sciagure perché i Paesi si rendano conto della necessità di sostenere le decisioni della legittima Corte internazionale²⁶⁶?

Il progetto di un'autorità mondiale che, attraverso poteri ben stabiliti e determinati, sarebbe in grado di mantenere la pace in termini efficaci e reali, fu delineato compiutamente da Einstein solo dopo la fine della Seconda guerra mondiale, allorché si pose il problema sollevato oggettivamente dall'utilizzo e dal possesso dell'arma atomica.

²⁶⁵ *Ibid.*

²⁶⁶ Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, cit., p. 101.

Nello scritto intitolato *Guerra atomica o pace*, del novembre 1945, il disegno einsteiniano prende corpo dopo un chiarimento considerato indispensabile rispetto alla natura dei nuovi e devastanti armamenti in rapporto alle nuove condizioni in cui si sono venute a trovare le relazioni tra gli Stati. “La scoperta dell’energia atomica” precisa il fisico tedesco “non ha creato un nuovo problema, ha soltanto reso più urgente l’esigenza di risolvere quello che già esiste. L’influenza di quella scoperta è stata di carattere quantitativo, non qualitativo. Finché esisteranno grandi potenze statali, la guerra sarà inevitabile. (...) Quel che è cambiato è soltanto il potere distruttivo della guerra”²⁶⁷. La proposta di una soluzione definitiva al problema si articola in diversi passaggi, primo tra tutti quello che, autonomamente, gli Stati Uniti d’America dovrebbero compiere affidando, a un governo mondiale costituito dagli stessi Usa, da ciò che prima del 1989 era l’Unione Sovietica e dalla Gran Bretagna, ossia le uniche e vere potenze mondiali sul piano militare, il segreto atomico. La costituzione di questo governo mondiale dovrebbe essere affidata in prima battuta all’Unione Sovietica per il semplice fatto di non possedere il segreto atomico. Naturalmente, questa prima bozza non dovrebbe essere considerata come definitiva, ma sottoposta a eventuali modifiche di cui sarebbero incaricati tre rappresentanti delle tre potenze effettive, supportati da un ristretto numero di consiglieri ai quali è concesso di intervenire solo su richiesta dei saggi. Una volta definita e accettata la costituzione, dice Einstein,

le nazioni più piccole dovrebbero essere invitate ad aderire al governo mondiale. Esse naturalmente sarebbero lasciate libere di restare fuori, e per quanto garantite anche in questo caso, io penso che esse desidererebbero dare la loro adesione. È fuor di dubbio che esse disporrebbero del diritto di proporre modificazioni alla costituzione elaborata dai Tre Grandi. Questi dovrebbero in ogni caso procedere all’organizzazione del governo mondiale sia che vi aderiscano le piccole nazioni sia in caso contrario²⁶⁸.

Il governo mondiale, che nelle intenzioni del fisico tedesco potrebbe essere “creato attraverso il rafforzamento delle Nazioni Unite”²⁶⁹, godrebbe solo ed esclusivamente di un potere militare, così da poter intervenire là dove tensioni o ribellioni da parte di mino-

²⁶⁷ A. Einstein, *Guerra atomica o pace*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 119-120.

²⁶⁸ Ivi, pp. 120-121.

²⁶⁹ Ivi, p. 131.

ranze violente costituiscono un reale focolaio di guerra, benché possa darsi l'eventualità di estendere il diritto d'intervento anche su questioni di carattere economico. Afferma chiaramente il Nostro: "Vorrei vedere tutte le nazioni costituenti lo Stato internazionale mettere in comune le loro forze armate conservando per sé soltanto le forze di polizia"²⁷⁰, in modo tale da "intervenire in Paesi dove una minoranza opprime una maggioranza creando così quella instabilità che porta alla guerra"²⁷¹.

Einstein non si nasconde certo i pericoli e le difficoltà di un simile progetto, anzitutto la possibilità di dar vita a un potere assoluto:

Certamente. Ma io temo ancora di più l'eventualità di un'altra guerra o di altre guerre. Ogni governo è, in una certa misura, un male. Ma un governo mondiale è preferibile al male assai maggiore rappresentato dalle guerre, dato soprattutto il loro accresciuto potere di distruzione. Se non si giungerà alla creazione di un governo mondiale per mezzo di accordi io penso che a esso si arriverà ugualmente, ma con mezzi assai più pericolosi. La guerra o le guerre, infatti, finiscono col dar vita a una potenza superiore a tutte le altre che dominerà il resto del mondo con la sua irresistibile forza militare²⁷².

Non ci sono dunque alternative alla guerra, se non la volontà ferma e sicura di una pace da realizzare attraverso un disarmo immediato ma autorevolmente garantito da un consenso il più possibile generale.

3. Il ruolo dell'intellettuale

Il raggiungimento di una pace duratura nella sicurezza richiede indubbiamente delle rinunce che solo una grande tensione morale, accompagnata da una potente forza emotiva, quale quella provocata dal sentimento religioso²⁷³, è in grado di assicurare. E chi, se non il vero intellettuale, colui che è stato provato dal sacro fuoco della ricerca della verità e dal possesso della libertà, potrà farsi carico del conseguimento di un obiettivo così ambizioso? Dice Einstein:

²⁷⁰ *Ibid.*

²⁷¹ *Ivi*, p. 121.

²⁷² *Ibid.*

²⁷³ Cfr. *ivi*, p. 132.

“Ovunque la via che conduce a un’esistenza sicura e felice passa per le rinunce e le limitazioni individuali. Da dove possono venire le forze necessarie a una tale marcia in avanti? Soltanto da coloro ai quali è stata offerta la possibilità di fortificare il proprio spirito attraverso gli studi e di allargare il proprio orizzonte”²⁷⁴. Per questo, l’opera di educazione deve in ogni modo privilegiare il confronto delle idee, teso a scongiurare il deleterio egoismo nazionalistico, e l’amore per la conoscenza.

Credo sinceramente che indirizzare gli uomini alla cultura di nobili discipline e poi indirettamente elevarli, sia il servizio migliore che si possa rendere all’umanità. Questo metodo trova conferma, in primo luogo, nei cultori delle lettere, della filosofia e delle arti, ma anche, dopo di essi, negli scienziati. Non sono, è vero, i *risultati* delle loro ricerche che elevano e arricchiscono moralmente gli uomini, ma è il loro sforzo per capire, è il loro lavoro intellettuale e capace²⁷⁵.

Sicché:

La preliminare preparazione degli spiriti è, prima di tutto, indispensabile. Noi dobbiamo sforzarci di svegliare gradualmente fra gli uomini un sentimento di solidarietà che non s’arresti, come è accaduto fino ad oggi, alle frontiere degli Stati²⁷⁶.

Il 4 gennaio 1922 il Consiglio della Società delle nazioni istituiva con deliberazione la nascita della Commissione internazionale per la cooperazione intellettuale; lo stesso Consiglio indicava luogo e data della prima riunione dei lavori (Ginevra, 1-5 agosto 1922), e suggeriva un elenco di personalità da interpellare per dar vita alla Commissione stessa. Tra i nominativi indicati figurava anche Albert Einstein che accettò ma, di lì a pochi mesi, rassegnò le sue dimissioni. Il gesto fu motivato nei seguenti termini.

La mia decisione di non andare più a Ginevra è dovuta alla ragione seguente: ho potuto, purtroppo, rendermi conto direttamente dell’incapacità della Commissione di svolgere un serio lavoro per il miglioramento delle relazioni internazionali. (...) La creazione in ogni Stato di una sola “Commissione nazionale”, funzionante da unico collegamento tra gli intellettuali dei vari

²⁷⁴ Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, cit., p. 99.

²⁷⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 30.

²⁷⁶ Ivi, pp. 33-34.

Paesi e la Commissione di Ginevra, ha finito col favorire l'oppressione di quest'ultima sulle minoranze culturali. Essa perciò ha deliberatamente rinunciato al compito che le è proprio, vale a dire di sostenere le minoranze nazionali nella loro lotta contro l'oppressione culturale²⁷⁷.

Se a quanto detto si aggiunge che la Commissione è colpevole di non aver preso alcuna iniziativa per opporsi alle correnti militariste e scioviniste nell'ambito dell'insegnamento, né offerto sostegno morale a singoli o associazioni che operano contro lo spirito militarista in favore di un sistema di diritto internazionale, si comprende bene perché, scrivendo a Freud il fisico tedesco operi una netta distinzione tra il vero intellettuale e il politico.

I dirigenti politici e i governi devono la loro posizione in parte alla forza e in parte alle elezioni delle masse. Essi non possono essere considerati come i rappresentanti dei migliori elementi, dal punto di vista morale e intellettuale della nazione²⁷⁸.

L'intellettuale autentico è chiamato a essere voce critica, scomoda; è colui che è disposto a giocarsi in prima persona, consapevole che "i valori umani hanno un significato che trascende la politica e le frontiere"²⁷⁹, assumendosi la responsabilità di ricorrere a strumenti estremi qualora sia in gioco la perdita totale della libertà. In tal senso ben si comprende la decisione di Einstein che, il 2 agosto 1939, inviava al presidente americano F.D. Roosevelt una lettera firmata di suo pugno con la quale, mentre si davano informazioni sui possibili esiti bellici delle ricerche tedesche condotte a livello atomico, si sollecitavano iniziative tese a verificare e, nel caso, a contrastare, una simile eventualità. Il pacifista Einstein si rendeva così responsabile, sebbene indirettamente²⁸⁰, dell'avvio di un progetto che avrebbe portato alla costruzione e all'utilizzazione dell'arma atomica.

²⁷⁷ A. Einstein, *Un congedo*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 90-91.

²⁷⁸ A. Einstein, *A Sigmund Freud*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 108.

²⁷⁹ A. Einstein, *Cultura e prosperità*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 115.

²⁸⁰ "La parte da me avuta nella costruzione della bomba atomica" afferma il Nostro "si limita a un solo atto: firmai una lettera al presidente Roosevelt, insistendo sulla necessità di esperimenti su larga scala per sondare la possibilità della costruzione della bomba atomica. Ero pienamente consapevole del terribile pericolo per il genere umano nel caso che quel tentativo avesse avuto successo, ma la possibilità che i tedeschi stessero lavorando al medesimo problema con una possibilità di riuscita mi spinse a quel passo. Non avrei potuto agire altrimenti, sebbene io sia sempre stato un pacifista convinto. Per me uccidere in guerra non è colpa meno grave che commettere un comune assassinio" (A. Einstein, *Sull'abolizione della minaccia di guerra*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 161-162).

L'IMPEGNO PER LA PACE

1. Nazionalismo aberrante e leva obbligatoria

Sul fondamento di quella libertà interna che costituisce il movente principale da cui trae origine il progetto di vita e di pensiero faticosamente ma tenacemente realizzato da Einstein, riposa l'impegno, anch'esso spassionato, per l'affermazione e l'effettiva attuazione di quella libertà esterna, base del benessere e del progresso della società, di cui il fisico tedesco si farà infaticabile promotore.

Pur non tralasciando la propria attività di ricerca, sin dal 1920 il Nostro inizia con sempre maggiore intensità a dedicare parte del proprio tempo e delle proprie energie ad attività extrascientifiche che talvolta accompagnano gli incontri di carattere didattico e le conferenze che è chiamato a presenziare, come nel caso del suo primo viaggio negli Stati Uniti d'America nei mesi di aprile e maggio del 1921. Invitato alla Princeton University per tenere quattro conferenze sulla teoria della relatività e ritirare una laurea in fisica conferitagli dall'istituzione universitaria, tra un intervento e l'altro affianca nell'opera di sensibilizzazione e raccolta di finanziamenti per l'erigenda Università ebraica di Gerusalemme Chaim Weizmann, colui che diverrà il primo presidente dello Stato di Israele, nonché presidente dell'Organizzazione mondiale del sionismo. Grazie all'impegno di Weizmann, fin dal 1916 vengono poste le basi politiche e finanziarie per la realizzazione dell'istituzione accademica, che sarà inaugurata il 1° aprile 1925. Ma sarà l'impegno etico per la promozione e la difesa di una pace effettiva e reale che vedrà Einstein operare a diversi livelli proprio a partire dal 1925 quando, assieme a Gandhi, decide di firmare il manifesto contro il servizio militare obbligatorio. La decisione non riflette solo e semplicemente la volontà di estendere pubblicamente una scelta personale a suo tempo maturata e consumata ma, come mostreremo, rinvia a una visione ben precisa delle cause della guerra, al progetto di

una pace duratura e al ruolo che, in questo progetto, è chiamato a svolgere l'intellettuale. Dice Einstein:

Il grande e deplorabile sviluppo assunto oggi dal nazionalismo in ogni parte del globo è, a mio giudizio, strettamente legato all'esistenza del servizio militare obbligatorio o, per usare un'espressione meno forte, degli eserciti nazionali. Lo Stato che richiede un servizio militare obbligatorio ai suoi cittadini è costretto a allevarli nello spirito nazionalistico, dando così una giustificazione psicologica al loro sfruttamento per fini militaristi. Nelle sue scuole lo Stato fa idolatrare ai giovani, a fianco della religione, questi strumenti di forza brutta. L'introduzione del servizio militare obbligatorio è quindi, a mio giudizio, la causa prima della decadenza morale della razza bianca, la quale minaccia da vicino non solo la sopravvivenza della nostra civiltà, ma la nostra stessa esistenza. È dovere quindi di coloro che desiderano che si stabilisca uno spirito internazionale e combattono lo sciovinismo, di prender posizione contro il servizio militare obbligatorio. Non è forse la persecuzione cui sono esposti oggi gli obiettori di coscienza altrettanto disonorante per l'umanità di quella alla quale furono sottoposti nei primi secoli i martiri della religione²⁵⁹?

E ancora:

Il servizio militare obbligatorio, che è all'origine del nazionalismo malsano, deve essere combattuto, e, soprattutto dobbiamo assicurare la nostra assistenza in tutto il mondo agli obiettori di coscienza²⁶⁰.

Il doveroso sostegno a coloro che rifiutano di essere addestrati all'uso della violenza e delle armi è del resto indispensabile per rendere palese la gravissima violazione che lo Stato, inteso come Einstein lo concepisce, viene a perpetrare nei riguardi dei suoi stessi doveri rispetto al singolo cittadino. Afferma infatti il Nostro:

Lo Stato è fatto per l'uomo e non l'uomo per lo Stato. (...) Considero principale dovere dello Stato quello di proteggere l'individuo e di offrirgli la possibilità di sviluppare le sue capacità creative. In altre parole, lo Stato dovrebbe essere messo al nostro servizio, piuttosto che essere noi i suoi schiavi. Esso viene meno a questa norma, allorché usando la forza ci impone il servizio mi-

²⁵⁹ A. Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 101-102.

²⁶⁰ Ivi, p. 102.

litare, in particolare quando scopo e conseguenze di questa degradante milizia è la morte data a uomini di altri Paesi e l'intermissione nella loro sfera di libertà. Noi siamo debitori allo Stato solo di quei sacrifici che valgono a promuovere il libero sviluppo dell'individuo²⁶¹.

Come potrà uno Stato, una nazione, privata di un apparato di difesa e di sicurezza armata, proteggere i suoi cittadini, la sua cultura e le sue tradizioni? È davvero realistico pensare di ottenere la pace privandosi volontariamente di ogni mezzo di dissuasione? L'interrogativo, per quanto crudo possa sembrare, discende direttamente dalle premesse einsteiniane: la protezione invocata dal fisico tedesco da parte dello Stato non può, necessariamente, non estendersi anche alla prevenzione o alla risposta, a minacce provenienti tanto dall'esterno quanto dall'interno. Si potrebbe pensare che il negoziato, la possibilità di stipulare dei patti di non aggressione, il semplice controllo, se non addirittura la limitazione degli armamenti potrebbero costituire una strada certamente impegnativa, ma potenzialmente percorribile con speranza di successo. Solo che, per negoziare, stringere accordi o controllare è necessario disporre di potere contrattuale: con cosa scambieremo la nostra sicurezza e il nostro eventuale benessere? E del resto, lo stesso Einstein esclude categoricamente una prospettiva di questo genere. Rivolgendosi a un gruppo di studenti pacifisti tedeschi, nel 1930 il Nostro precisa:

Se il sacro egoismo illimitato conduce a funeste conseguenze nella vita economica, effetti ancora peggiori esso produce quando lo si assuma a criterio regolatore nei rapporti tra le nazioni. Se in breve tempo non si scoprirà un mezzo per impedire le guerre, l'attuale impressionante sviluppo dei mezzi bellici renderà la nostra vita intollerabile. L'importanza di questo fine è solo uguagliata dall'inadeguatezza degli sforzi che si sono finora messi in opera per raggiungerlo. Si cerca di diminuire il pericolo ricorrendo a limitazioni negli armamenti e ad accordi particolari sulla condotta della guerra. Ma la guerra non è un gioco di società dove i partecipanti si attengono scrupolosamente alle regole. Dove la posta in gioco è rappresentata dalla vita o dalla morte, le regole e gl'impegni perdono ogni valore²⁶².

²⁶¹ Ivi, p. 100.

²⁶² A. Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 99.

Di più, nemmeno autorevoli organismi internazionali quali la Società delle Nazioni, prima, e l'Onu, dopo, possono offrire una soluzione soddisfacente: almeno nella forma e nelle funzioni con le quali esplicano attualmente o hanno esplicato il loro ruolo. Dice Einstein nel 1931, in occasione della Conferenza sul disarmo:

Noi disponiamo, è vero, di una Società delle Nazioni e di una Corte arbitrale, ma la prima non è niente più di un luogo di incontro e la Corte da parte sua non dispone di alcun mezzo per imporre con la forza le decisioni. Si tratta di istituzioni incapaci di offrire qualsiasi protezione ai Paesi in caso di aggressione²⁶³.

L'unica possibilità di giungere a una pace vera è di fronte a tutte le nazioni, ma nessuna è in grado di compiere il primo passo. Eppure, afferma chiaramente il Nostro, "soltanto il ripudio totale della guerra può scongiurare il pericolo"²⁶⁴.

Einstein fu buon profeta: gli eventi che si susseguirono dopo il 1933 in Europa, con l'ascesa al potere in Germania del partito nazional-socialista e di Adolf Hitler dimostrano quanto la sua sfiducia negli strumenti messi in atto dopo il primo conflitto mondiale per scongiurare nuovi bagni di sangue fosse motivata. Del resto, il fisico tedesco aveva il polso della situazione. Dopo un soggiorno di tre mesi presso il California Institute of Technology (CalThec) di Pasadena, nel marzo del 1932 era infatti rientrato a Berlino. In Germania resterà fino a dicembre, per poi tornare nuovamente negli Stati Uniti: non metterà mai più piede nella sua terra natale e, a questa decisione, seguiranno atti ben precisi quali le dimissioni irrevocabili dall'Accademia bavarese delle scienze e la rinuncia, per la seconda volta, della cittadinanza tedesca. Rientrato in Europa, accompagnato alla moglie, il Nostro trova ospitalità e protezione dai reali del Belgio, dove a breve sarà raggiunto da Ilse, Margot, la segretaria Helen Dukas, assunta a tale compito nel 1928, e un assistente, W. Mayer. Dopo un viaggio a Oxford e una breve sosta in Svizzera, dove incontrerà per l'ultima volta il figlio Eduard, affetto da disturbi mentali, i coniugi Einstein e il loro seguito lasciano l'Europa nel settembre del 1933. Nel frattempo, il marito di Ilse, R. Kaiser, riesce miracolosamente a spedire tutte le carte di Einstein, archivio compreso, prima in Francia e, da qui, negli Stati

²⁶³ Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, cit., p. 101.

²⁶⁴ Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, cit., p. 99.

Uniti. Il 17 ottobre 1933 il fisico tedesco sbarca a New York per poi procedere alla volta di Princeton, dove lo attende la cattedra che ha deciso di accettare.

2. Il governo mondiale

Ben prima che le tenebre del male assoluto oscurassero anche la debole fiamma della ragione di un'umanità destinata a negare se stessa e a percorrere interamente quel *mysterium iniquitatis* con lo sterminio scientifico di oltre sei milioni di ebrei e di un numero considerevole di persone di altre etnie, Einstein aveva indicato una prospettiva. Si trattava di rafforzare decisamente e realmente quelle istituzioni mondiali già presenti e operanti, quali la Corte arbitrale internazionale, attraverso la cessione volontaria, da parte degli Stati, di una quota della loro sovranità. Afferma il Nostro:

La creazione di una corte arbitrale internazionale è insufficiente. Si rendono altresì necessari patti che garantiscano l'effettiva applicazione delle decisioni di quella corte, attraverso l'azione coordinata di tutte le nazioni. Senza una tale garanzia mai le nazioni avranno il coraggio di procedere a un serio disarmo²⁶⁵.

Così,

Finché non sarà stato raggiunto un accordo inteso a limitare la sovranità degli Stati particolari obbligando ciascuno di essi a un'azione collettiva contro quel Paese che apertamente od occultamente resiste ad una decisione della Corte arbitrale, non ci sarà dato di uscire dallo stato generale di anarchia e terrore in cui viviamo. Ci vorranno nuove sciagure perché i Paesi si rendano conto della necessità di sostenere le decisioni della legittima Corte internazionale²⁶⁶?

Il progetto di un'autorità mondiale che, attraverso poteri ben stabiliti e determinati, sarebbe in grado di mantenere la pace in termini efficaci e reali, fu delineato compiutamente da Einstein solo dopo la fine della Seconda guerra mondiale, allorché si pose il problema sollevato oggettivamente dall'utilizzo e dal possesso dell'arma atomica.

²⁶⁵ *Ibid.*

²⁶⁶ Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, cit., p. 101.

Uniti. Il 17 ottobre 1933 il fisico tedesco sbarca a New York per poi procedere alla volta di Princeton, dove lo attende la cattedra che ha deciso di accettare.

2. Il governo mondiale

Ben prima che le tenebre del male assoluto oscurassero anche la debole fiamma della ragione di un'umanità destinata a negare se stessa e a percorrere interamente quel *mysterium iniquitatis* con lo sterminio scientifico di oltre sei milioni di ebrei e di un numero considerevole di persone di altre etnie, Einstein aveva indicato una prospettiva. Si trattava di rafforzare decisamente e realmente quelle istituzioni mondiali già presenti e operanti, quali la Corte arbitrale internazionale, attraverso la cessione volontaria, da parte degli Stati, di una quota della loro sovranità. Afferma il Nostro:

La creazione di una corte arbitrale internazionale è insufficiente. Si rendono altresì necessari patti che garantiscano l'effettiva applicazione delle decisioni di quella corte, attraverso l'azione coordinata di tutte le nazioni. Senza una tale garanzia mai le nazioni avranno il coraggio di procedere a un serio disarmo²⁶⁵.

Così,

Finché non sarà stato raggiunto un accordo inteso a limitare la sovranità degli Stati particolari obbligando ciascuno di essi a un'azione collettiva contro quel Paese che apertamente od occultamente resiste ad una decisione della Corte arbitrale, non ci sarà dato di uscire dallo stato generale di anarchia e terrore in cui viviamo. Ci vorranno nuove sciagure perché i Paesi si rendano conto della necessità di sostenere le decisioni della legittima Corte internazionale²⁶⁶?

Il progetto di un'autorità mondiale che, attraverso poteri ben stabiliti e determinati, sarebbe in grado di mantenere la pace in termini efficaci e reali, fu delineato compiutamente da Einstein solo dopo la fine della Seconda guerra mondiale, allorché si pose il problema sollevato oggettivamente dall'utilizzo e dal possesso dell'arma atomica.

²⁶⁵ *Ibid.*

²⁶⁶ Einstein, *La conferenza del disarmo del 1932*, cit., p. 101.

Nello scritto intitolato *Guerra atomica o pace*, del novembre 1945, il disegno einsteiniano prende corpo dopo un chiarimento considerato indispensabile rispetto alla natura dei nuovi e devastanti armamenti in rapporto alle nuove condizioni in cui si sono venute a trovare le relazioni tra gli Stati. “La scoperta dell’energia atomica” precisa il fisico tedesco “non ha creato un nuovo problema, ha soltanto reso più urgente l’esigenza di risolvere quello che già esiste. L’influenza di quella scoperta è stata di carattere quantitativo, non qualitativo. Finché esisteranno grandi potenze statali, la guerra sarà inevitabile. (...) Quel che è cambiato è soltanto il potere distruttivo della guerra”²⁶⁷. La proposta di una soluzione definitiva al problema si articola in diversi passaggi, primo tra tutti quello che, autonomamente, gli Stati Uniti d’America dovrebbero compiere affidando, a un governo mondiale costituito dagli stessi Usa, da ciò che prima del 1989 era l’Unione Sovietica e dalla Gran Bretagna, ossia le uniche e vere potenze mondiali sul piano militare, il segreto atomico. La costituzione di questo governo mondiale dovrebbe essere affidata in prima battuta all’Unione Sovietica per il semplice fatto di non possedere il segreto atomico. Naturalmente, questa prima bozza non dovrebbe essere considerata come definitiva, ma sottoposta a eventuali modifiche di cui sarebbero incaricati tre rappresentanti delle tre potenze effettive, supportati da un ristretto numero di consiglieri ai quali è concesso di intervenire solo su richiesta dei saggi. Una volta definita e accettata la costituzione, dice Einstein,

le nazioni più piccole dovrebbero essere invitate ad aderire al governo mondiale. Esse naturalmente sarebbero lasciate libere di restare fuori, e per quanto garantite anche in questo caso, io penso che esse desidererebbero dare la loro adesione. È fuor di dubbio che esse disporrebbero del diritto di proporre modificazioni alla costituzione elaborata dai Tre Grandi. Questi dovrebbero in ogni caso procedere all’organizzazione del governo mondiale sia che vi aderiscano le piccole nazioni sia in caso contrario²⁶⁸.

Il governo mondiale, che nelle intenzioni del fisico tedesco potrebbe essere “creato attraverso il rafforzamento delle Nazioni Unite”²⁶⁹, godrebbe solo ed esclusivamente di un potere militare, così da poter intervenire là dove tensioni o ribellioni da parte di mino-

²⁶⁷ A. Einstein, *Guerra atomica o pace*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 119-120.

²⁶⁸ Ivi, pp. 120-121.

²⁶⁹ Ivi, p. 131.

ranze violente costituiscono un reale focolaio di guerra, benché possa darsi l'eventualità di estendere il diritto d'intervento anche su questioni di carattere economico. Afferma chiaramente il Nostro: "Vorrei vedere tutte le nazioni costituenti lo Stato internazionale mettere in comune le loro forze armate conservando per sé soltanto le forze di polizia"²⁷⁰, in modo tale da "intervenire in Paesi dove una minoranza opprime una maggioranza creando così quella instabilità che porta alla guerra"²⁷¹.

Einstein non si nasconde certo i pericoli e le difficoltà di un simile progetto, anzitutto la possibilità di dar vita a un potere assoluto:

Certamente. Ma io temo ancora di più l'eventualità di un'altra guerra o di altre guerre. Ogni governo è, in una certa misura, un male. Ma un governo mondiale è preferibile al male assai maggiore rappresentato dalle guerre, dato soprattutto il loro accresciuto potere di distruzione. Se non si giungerà alla creazione di un governo mondiale per mezzo di accordi io penso che a esso si arriverà ugualmente, ma con mezzi assai più pericolosi. La guerra o le guerre, infatti, finiscono col dar vita a una potenza superiore a tutte le altre che dominerà il resto del mondo con la sua irresistibile forza militare²⁷².

Non ci sono dunque alternative alla guerra, se non la volontà ferma e sicura di una pace da realizzare attraverso un disarmo immediato ma autorevolmente garantito da un consenso il più possibile generale.

3. Il ruolo dell'intellettuale

Il raggiungimento di una pace duratura nella sicurezza richiede indubbiamente delle rinunce che solo una grande tensione morale, accompagnata da una potente forza emotiva, quale quella provocata dal sentimento religioso²⁷³, è in grado di assicurare. E chi, se non il vero intellettuale, colui che è stato provato dal sacro fuoco della ricerca della verità e dal possesso della libertà, potrà farsi carico del conseguimento di un obiettivo così ambizioso? Dice Einstein:

²⁷⁰ *Ibid.*

²⁷¹ *Ivi*, p. 121.

²⁷² *Ibid.*

²⁷³ *Cfr. ivi*, p. 132.

ranze violente costituiscono un reale focolaio di guerra, benché possa darsi l'eventualità di estendere il diritto d'intervento anche su questioni di carattere economico. Afferma chiaramente il Nostro: "Vorrei vedere tutte le nazioni costituenti lo Stato internazionale mettere in comune le loro forze armate conservando per sé soltanto le forze di polizia"²⁷⁰, in modo tale da "intervenire in Paesi dove una minoranza opprime una maggioranza creando così quella instabilità che porta alla guerra"²⁷¹.

Einstein non si nasconde certo i pericoli e le difficoltà di un simile progetto, anzitutto la possibilità di dar vita a un potere assoluto:

Certamente. Ma io temo ancora di più l'eventualità di un'altra guerra o di altre guerre. Ogni governo è, in una certa misura, un male. Ma un governo mondiale è preferibile al male assai maggiore rappresentato dalle guerre, dato soprattutto il loro accresciuto potere di distruzione. Se non si giungerà alla creazione di un governo mondiale per mezzo di accordi io penso che a esso si arriverà ugualmente, ma con mezzi assai più pericolosi. La guerra o le guerre, infatti, finiscono col dar vita a una potenza superiore a tutte le altre che dominerà il resto del mondo con la sua irresistibile forza militare²⁷².

Non ci sono dunque alternative alla guerra, se non la volontà ferma e sicura di una pace da realizzare attraverso un disarmo immediato ma autorevolmente garantito da un consenso il più possibile generale.

3. Il ruolo dell'intellettuale

Il raggiungimento di una pace duratura nella sicurezza richiede indubbiamente delle rinunce che solo una grande tensione morale, accompagnata da una potente forza emotiva, quale quella provocata dal sentimento religioso²⁷³, è in grado di assicurare. E chi, se non il vero intellettuale, colui che è stato provato dal sacro fuoco della ricerca della verità e dal possesso della libertà, potrà farsi carico del conseguimento di un obiettivo così ambizioso? Dice Einstein:

²⁷⁰ *Ibid.*

²⁷¹ *Ivi*, p. 121.

²⁷² *Ibid.*

²⁷³ Cfr. *ivi*, p. 132.

“Ovunque la via che conduce a un’esistenza sicura e felice passa per le rinunce e le limitazioni individuali. Da dove possono venire le forze necessarie a una tale marcia in avanti? Soltanto da coloro ai quali è stata offerta la possibilità di fortificare il proprio spirito attraverso gli studi e di allargare il proprio orizzonte”²⁷⁴. Per questo, l’opera di educazione deve in ogni modo privilegiare il confronto delle idee, teso a scongiurare il deleterio egoismo nazionalistico, e l’amore per la conoscenza.

Credo sinceramente che indirizzare gli uomini alla cultura di nobili discipline e poi indirettamente elevarli, sia il servizio migliore che si possa rendere all’umanità. Questo metodo trova conferma, in primo luogo, nei cultori delle lettere, della filosofia e delle arti, ma anche, dopo di essi, negli scienziati. Non sono, è vero, i *risultati* delle loro ricerche che elevano e arricchiscono moralmente gli uomini, ma è il loro sforzo per capire, è il loro lavoro intellettuale e capace²⁷⁵.

Sicché:

La preliminare preparazione degli spiriti è, prima di tutto, indispensabile. Noi dobbiamo sforzarci di svegliare gradualmente fra gli uomini un sentimento di solidarietà che non s’arresti, come è accaduto fino ad oggi, alle frontiere degli Stati²⁷⁶.

Il 4 gennaio 1922 il Consiglio della Società delle nazioni istituiva con deliberazione la nascita della Commissione internazionale per la cooperazione intellettuale; lo stesso Consiglio indicava luogo e data della prima riunione dei lavori (Ginevra, 1-5 agosto 1922), e suggeriva un elenco di personalità da interpellare per dar vita alla Commissione stessa. Tra i nominativi indicati figurava anche Albert Einstein che accettò ma, di lì a pochi mesi, rassegnò le sue dimissioni. Il gesto fu motivato nei seguenti termini.

La mia decisione di non andare più a Ginevra è dovuta alla ragione seguente: ho potuto, purtroppo, rendermi conto direttamente dell’incapacità della Commissione di svolgere un serio lavoro per il miglioramento delle relazioni internazionali. (...) La creazione in ogni Stato di una sola “Commissione nazionale”, funzionante da unico collegamento tra gli intellettuali dei vari

²⁷⁴ Einstein, *Discorso a una manifestazione studentesca per il disarmo*, cit., p. 99.

²⁷⁵ Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit., p. 30.

²⁷⁶ Ivi, pp. 33-34.

Paesi e la Commissione di Ginevra, ha finito col favorire l'oppressione di quest'ultima sulle minoranze culturali. Essa perciò ha deliberatamente rinunciato al compito che le è proprio, vale a dire di sostenere le minoranze nazionali nella loro lotta contro l'oppressione culturale²⁷⁷.

Se a quanto detto si aggiunge che la Commissione è colpevole di non aver preso alcuna iniziativa per opporsi alle correnti militariste e scioviniste nell'ambito dell'insegnamento, né offerto sostegno morale a singoli o associazioni che operano contro lo spirito militarista in favore di un sistema di diritto internazionale, si comprende bene perché, scrivendo a Freud il fisico tedesco operi una netta distinzione tra il vero intellettuale e il politico.

I dirigenti politici e i governi devono la loro posizione in parte alla forza e in parte alle elezioni delle masse. Essi non possono essere considerati come i rappresentanti dei migliori elementi, dal punto di vista morale e intellettuale della nazione²⁷⁸.

L'intellettuale autentico è chiamato a essere voce critica, scomoda; è colui che è disposto a giocarsi in prima persona, consapevole che "i valori umani hanno un significato che trascende la politica e le frontiere"²⁷⁹, assumendosi la responsabilità di ricorrere a strumenti estremi qualora sia in gioco la perdita totale della libertà. In tal senso ben si comprende la decisione di Einstein che, il 2 agosto 1939, inviava al presidente americano F.D. Roosevelt una lettera firmata di suo pugno con la quale, mentre si davano informazioni sui possibili esiti bellici delle ricerche tedesche condotte a livello atomico, si sollecitavano iniziative tese a verificare e, nel caso, a contrastare, una simile eventualità. Il pacifista Einstein si rendeva così responsabile, sebbene indirettamente²⁸⁰, dell'avvio di un progetto che avrebbe portato alla costruzione e all'utilizzazione dell'arma atomica.

²⁷⁷ A. Einstein, *Un congedo*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 90-91.

²⁷⁸ A. Einstein, *A Sigmund Freud*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 108.

²⁷⁹ A. Einstein, *Cultura e prosperità*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., p. 115.

²⁸⁰ "La parte da me avuta nella costruzione della bomba atomica" afferma il Nostro "si limita a un solo atto: firmai una lettera al presidente Roosevelt, insistendo sulla necessità di esperimenti su larga scala per sondare la possibilità della costruzione della bomba atomica. Ero pienamente consapevole del terribile pericolo per il genere umano nel caso che quel tentativo avesse avuto successo, ma la possibilità che i tedeschi stessero lavorando al medesimo problema con una possibilità di riuscita mi spinse a quel passo. Non avrei potuto agire altrimenti, sebbene io sia sempre stato un pacifista convinto. Per me uccidere in guerra non è colpa meno grave che commettere un comune assassinio" (A. Einstein, *Sull'abolizione della minaccia di guerra*, in Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 161-162).

EPILOGO

Nell'autunno del 1950, in occasione della quarantatreesima riunione della Società italiana per il progresso delle scienze²⁸¹, Albert Einstein inviò un messaggio che, sul piano dei contenuti, può ben essere considerato la memoria di un'esistenza interamente spesa alla ricerca di quella verità che solo un'appassionata sete di libertà poteva conquistare. Gravi motivi di salute, causati da un grosso aneurisma dell'aorta addominale, impedirono al fisico tedesco di prender parte direttamente alla manifestazione. Il lettore attento non avrà difficoltà a rinvenire in questo messaggio, che proponiamo nella sua versione integrale tradotta dall'originale manoscritto in lingua tedesca²⁸², tutti i momenti cruciali che hanno fondato e orientato la vita e l'opera del più grande scienziato del Novecento.

Permettetemi anzitutto il mio cordiale ringraziamento per l'invito a me rivolto per il Congresso della *Society for the new of sc.* Io darei seguito con gioia a questo invito, se la mia indebolita salute lo permettesse. Così, però, mi devo accontentare di indirizzarVi da qui due parole. Questo lo faccio non nell'illusione di poterVi dire qualcosa che in qualche modo arricchisca effettivamente la Vostra conoscenza. Noi viviamo tuttavia in un tempo di tale insicurezza esteriore e interiore, in un tempo di tale mancanza di stabili scopi, che anche il confessare convincimenti può essere di valore, anche qualora questi convincimenti non siano di un genere tale che possano essere fondati logicamente.

Qui sorge subito la questione: Dobbiamo eleggere la conoscenza della verità, o – espresso più modestamente – la comprensione del mondo sperimentabile, attraverso un pensiero logico-co-

²⁸¹ La riunione si teneva a Lucca nei giorni 1-4 ottobre 1950.

²⁸² Il testo del messaggio fu pubblicato in lingua inglese nella rivista dell'Unesco "Impact" nell'autunno del 1950 e ristampato in traduzione italiana, prima nel volume Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 331-334, poi nell'opera *Albert Einstein. Autobiografia e colloqui*, (a cura di A. Brissoni), Isonomia, Padova 1994, pp. 133-136. Solo recentemente il documento è stato proposto in versione integrale e originale con testo a fronte da Giuseppe Sgherri, in "Kamen. Rivista di poesia e filosofia", XIV, 27, 2005, pp. 82-90.

struttivo, come uno scopo autonomo della nostra aspirazione? Oppure questa aspirazione a una conoscenza razionale deve essere subordinata a un qualche genere di scopi di altra natura, per es. “pratici”. Il semplice pensiero non ha mezzi per decidere questa questione. La decisione però ha un rilevante influsso sul nostro pensare e valutare, premesso che abbia il carattere di un convincimento incrollabile. Lasciatemi perciò confessare. Per me l’aspirazione alla conoscenza è uno di quegli scopi autonomi senza i quali, per l’uomo pensante, una cosciente affermazione dell’esistenza non appare possibile.

Appartiene all’essenza dell’aspirazione alla conoscenza, che essa tenda sia alla più ampia padronanza della varietà dell’esperienza, che alla semplicità ed economicità delle ipotesi fondamentali. La definitiva compatibilità di questi scopi è, allo stato attuale della nostra rudimentale ricerca, una cosa di fede. Senza una tale fede il convincimento del valore autonomo della conoscenza non sarebbe per me forte e incrollabile.

Questa posizione per così dire religiosa dell’uomo di scienza in ordine alla verità non è senza influsso sull’intera personalità. Al di fuori infatti di ciò che è dato attraverso le esperienze e delle leggi del pensiero non c’è in linea di principio, per il ricercatore, un’autorità le cui decisioni o comunicazioni possano in se stesse accampare pretesa di “verità”. Sorge così il paradosso che un uomo, che dedica le sue forze migliori a cose oggettive, considerato dal punto di vista sociale diventa un estremo individualista che – almeno in linea di principio – non si fida che del proprio giudizio. Si può addirittura ben sostenere l’opinione che individualismo intellettuale e aspirazione scientifica, nella storia, sono inizialmente comparsi insieme e rimasti inseparabili. Ora, si può dire che l’uomo di scienza così abbozzato non è altro che una semplice astrazione che non si trova in questo mondo in carne e sangue, qualcosa di analogo all’*homo economicus* dell’economia classica. Mi sembra però che la scienza, quale noi oggi abbiamo davanti, non sarebbe potuta sorgere e restare vitale se l’uomo di scienza, almeno in rilevante approssimazione, non fosse per molti secoli effettivamente esistito in molti individui.

Naturalmente io non vedo un uomo di scienza in ognuno che abbia imparato ad adoperare strumenti e metodi che, direttamente o indirettamente, appaiono “scientifici”. Sono intesi solo coloro nei quali la mentalità scientifica è realmente viva.

Ora, come sta l’uomo di scienza di oggi nel corpo sociale dell’umanità? Egli è in qualche modo orgoglioso del fatto che il lavoro dei suoi simili, anche se per lo più in modo indiretto, attraverso

la pressoché totale eliminazione del lavoro muscolare, ha totalmente trasformato la vita economica degli uomini. Egli è anche indubbiamente turbato dal fatto che i risultati della sua ricerca hanno comportato un'acuta minaccia dell'umanità, dopo che i frutti di questa ricerca sono caduti nelle mani di detentori della forza politica ciechi d'animo. Egli è cosciente del fatto che i metodi tecnici che si basano sulle sue ricerche hanno condotto a una concentrazione del potere economico, e con ciò anche di quello politico, nelle mani di piccole minoranze, dalle cui manipolazioni è divenuto dipendente il destino della massa, che appare sempre più amorfa, degli individui. Di più, ancora. Quella concentrazione del potere economico e politico in poche mani ha non solo comportato una dipendenza materiale esteriore anche dell'uomo di scienza, essa minaccia anche la sua esistenza dall'interno, in quanto, attraverso la creazione di mezzi raffinati di influenza spirituale e psichica, impedisce la crescita di personalità indipendenti.

Così vediamo compiersi per l'uomo di scienza un destino veramente tragico. Sorretto dall'aspirazione alla chiarezza e all'indipendenza interiore, attraverso i suoi sforzi pressoché sovrumani, ha creato i mezzi per il suo asservimento esteriore e il suo annientamento dall'interno. Dai detentori del potere egli deve farsi mettere la museruola. Come soldato è costretto a sacrificare la propria vita e a distruggere la vita altrui, anche se è convinto della mancanza di senso di un tale sacrificio. Egli vede sì con tutta chiarezza, che la circostanza storicamente condizionata per cui gli Stati nazionali sono i detentori del potere economico, politico, e con ciò anche di quello militare, deve condurre all'annientamento di tutti. Egli sa che soltanto l'abbandono dei metodi della nuda forza attraverso un ordine sopranazionale del diritto può ancora salvare gli uomini. Ma egli è già arrivato al punto, da accettare come destino inevitabile la schiavitù posta su di lui dagli Stati nazionali. Egli si umilia addirittura a tal punto da aiutare a perfezionare ulteriormente, su comando, i mezzi per l'annientamento generale dell'uomo.

<Deve realmente l'uomo di scienza sottostare a tutte queste umiliazioni? Gandhi ha indicato, nel suo ambito, quella via che resta aperta anche per l'uomo di scienza: *non cooperation* e – se questo deve essere – *civil disobedience*. Questa via di liberazione è aperta a chiunque è deciso a prender su di sé il rischio della messa al bando sociale e del martirio. Nella presente situazione io non vedo effettivamente altra via accanto a questa. Così risulta alla fine

evidente con terrificante chiarezza che sviluppo dell'intelligenza, da solo, non può redimere gli uomini²⁸³.

È passato il tempo in cui la sua libertà interiore e l'autonomia del suo pensare e ricercare ha potuto illuminare e arricchire la vita degli uomini? Non ha egli, in una aspirazione orientata soltanto a ciò che è intellettuale, dimenticato la sua responsabilità e dignità? Un uomo interiormente libero e coscienzioso si può sì annientare, ma non rendere schiavo o cieco strumento.

Se l'uomo di scienza dei nostri giorni trovasse il tempo e il coraggio di considerare con calma e criticamente la sua situazione e il suo compito, e di operare in modo adeguato, le prospettive di una ragionevole e soddisfacente soluzione della presente pericolosa situazione internazionale verrebbero essenzialmente migliorate.

[A. Einstein]

Il 18 aprile 1955, in seguito alla rottura dell'aneurisma dell'aorta addominale, alle ore 13.15 Albert Einstein cessava di vivere.

²⁸³ Cancellato nel manoscritto originale.

EPILOGO

Nell'autunno del 1950, in occasione della quarantatreesima riunione della Società italiana per il progresso delle scienze²⁸¹, Albert Einstein inviò un messaggio che, sul piano dei contenuti, può ben essere considerato la memoria di un'esistenza interamente spesa alla ricerca di quella verità che solo un'appassionata sete di libertà poteva conquistare. Gravi motivi di salute, causati da un grosso aneurisma dell'aorta addominale, impedirono al fisico tedesco di prender parte direttamente alla manifestazione. Il lettore attento non avrà difficoltà a rinvenire in questo messaggio, che proponiamo nella sua versione integrale tradotta dall'originale manoscritto in lingua tedesca²⁸², tutti i momenti cruciali che hanno fondato e orientato la vita e l'opera del più grande scienziato del Novecento.

Permettetemi anzitutto il mio cordiale ringraziamento per l'invito a me rivolto per il Congresso della *Society for the new of sc.* Io darei seguito con gioia a questo invito, se la mia indebolita salute lo permettesse. Così, però, mi devo accontentare di indirizzarVi da qui due parole. Questo lo faccio non nell'illusione di poterVi dire qualcosa che in qualche modo arricchisca effettivamente la Vostra conoscenza. Noi viviamo tuttavia in un tempo di tale insicurezza esteriore e interiore, in un tempo di tale mancanza di stabili scopi, che anche il confessare convincimenti può essere di valore, anche qualora questi convincimenti non siano di un genere tale che possano essere fondati logicamente.

Qui sorge subito la questione: Dobbiamo eleggere la conoscenza della verità, o – espresso più modestamente – la comprensione del mondo sperimentabile, attraverso un pensiero logico-co-

²⁸¹ La riunione si teneva a Lucca nei giorni 1-4 ottobre 1950.

²⁸² Il testo del messaggio fu pubblicato in lingua inglese nella rivista dell'Unesco "Impact" nell'autunno del 1950 e ristampato in traduzione italiana, prima nel volume Einstein, *Idee e opinioni*, cit., pp. 331-334, poi nell'opera *Albert Einstein. Autobiografia e colloqui*, (a cura di A. Brissoni), Isonomia, Padova 1994, pp. 133-136. Solo recentemente il documento è stato proposto in versione integrale e originale con testo a fronte da Giuseppe Sgherri, in "Kamen. Rivista di poesia e filosofia", XIV, 27, 2005, pp. 82-90.

struttivo, come uno scopo autonomo della nostra aspirazione? Oppure questa aspirazione a una conoscenza razionale deve essere subordinata a un qualche genere di scopi di altra natura, per es. “pratici”. Il semplice pensiero non ha mezzi per decidere questa questione. La decisione però ha un rilevante influsso sul nostro pensare e valutare, premesso che abbia il carattere di un convincimento incrollabile. Lasciatemi perciò confessare. Per me l’aspirazione alla conoscenza è uno di quegli scopi autonomi senza i quali, per l’uomo pensante, una cosciente affermazione dell’esistenza non appare possibile.

Appartiene all’essenza dell’aspirazione alla conoscenza, che essa tenda sia alla più ampia padronanza della varietà dell’esperienza, che alla semplicità ed economicità delle ipotesi fondamentali. La definitiva compatibilità di questi scopi è, allo stato attuale della nostra rudimentale ricerca, una cosa di fede. Senza una tale fede il convincimento del valore autonomo della conoscenza non sarebbe per me forte e incrollabile.

Questa posizione per così dire religiosa dell’uomo di scienza in ordine alla verità non è senza influsso sull’intera personalità. Al di fuori infatti di ciò che è dato attraverso le esperienze e delle leggi del pensiero non c’è in linea di principio, per il ricercatore, un’autorità le cui decisioni o comunicazioni possano in se stesse accampare pretesa di “verità”. Sorge così il paradosso che un uomo, che dedica le sue forze migliori a cose oggettive, considerato dal punto di vista sociale diventa un estremo individualista che – almeno in linea di principio – non si fida che del proprio giudizio. Si può addirittura ben sostenere l’opinione che individualismo intellettuale e aspirazione scientifica, nella storia, sono inizialmente comparsi insieme e rimasti inseparabili. Ora, si può dire che l’uomo di scienza così abbozzato non è altro che una semplice astrazione che non si trova in questo mondo in carne e sangue, qualcosa di analogo all’*homo economicus* dell’economia classica. Mi sembra però che la scienza, quale noi oggi abbiamo davanti, non sarebbe potuta sorgere e restare vitale se l’uomo di scienza, almeno in rilevante approssimazione, non fosse per molti secoli effettivamente esistito in molti individui.

Naturalmente io non vedo un uomo di scienza in ognuno che abbia imparato ad adoperare strumenti e metodi che, direttamente o indirettamente, appaiono “scientifici”. Sono intesi solo coloro nei quali la mentalità scientifica è realmente viva.

Ora, come sta l’uomo di scienza di oggi nel corpo sociale dell’umanità? Egli è in qualche modo orgoglioso del fatto che il lavoro dei suoi simili, anche se per lo più in modo indiretto, attraverso

la pressoché totale eliminazione del lavoro muscolare, ha totalmente trasformato la vita economica degli uomini. Egli è anche indubbiamente turbato dal fatto che i risultati della sua ricerca hanno comportato un'acuta minaccia dell'umanità, dopo che i frutti di questa ricerca sono caduti nelle mani di detentori della forza politica ciechi d'animo. Egli è cosciente del fatto che i metodi tecnici che si basano sulle sue ricerche hanno condotto a una concentrazione del potere economico, e con ciò anche di quello politico, nelle mani di piccole minoranze, dalle cui manipolazioni è divenuto dipendente il destino della massa, che appare sempre più amorfa, degli individui. Di più, ancora. Quella concentrazione del potere economico e politico in poche mani ha non solo comportato una dipendenza materiale esteriore anche dell'uomo di scienza, essa minaccia anche la sua esistenza dall'interno, in quanto, attraverso la creazione di mezzi raffinati di influenza spirituale e psichica, impedisce la crescita di personalità indipendenti.

Così vediamo compiersi per l'uomo di scienza un destino veramente tragico. Sorretto dall'aspirazione alla chiarezza e all'indipendenza interiore, attraverso i suoi sforzi pressoché sovrumani, ha creato i mezzi per il suo asservimento esteriore e il suo annientamento dall'interno. Dai detentori del potere egli deve farsi mettere la museruola. Come soldato è costretto a sacrificare la propria vita e a distruggere la vita altrui, anche se è convinto della mancanza di senso di un tale sacrificio. Egli vede sì con tutta chiarezza, che la circostanza storicamente condizionata per cui gli Stati nazionali sono i detentori del potere economico, politico, e con ciò anche di quello militare, deve condurre all'annientamento di tutti. Egli sa che soltanto l'abbandono dei metodi della nuda forza attraverso un ordine sopranazionale del diritto può ancora salvare gli uomini. Ma egli è già arrivato al punto, da accettare come destino inevitabile la schiavitù posta su di lui dagli Stati nazionali. Egli si umilia addirittura a tal punto da aiutare a perfezionare ulteriormente, su comando, i mezzi per l'annientamento generale dell'uomo.

<Deve realmente l'uomo di scienza sottostare a tutte queste umiliazioni? Gandhi ha indicato, nel suo ambito, quella via che resta aperta anche per l'uomo di scienza: *non cooperation* e – se questo deve essere – *civil disobedience*. Questa via di liberazione è aperta a chiunque è deciso a prender su di sé il rischio della messa al bando sociale e del martirio. Nella presente situazione io non vedo effettivamente altra via accanto a questa. Così risulta alla fine

evidente con terrificante chiarezza che sviluppo dell'intelligenza, da solo, non può redimere gli uomini²⁸³.

È passato il tempo in cui la sua libertà interiore e l'autonomia del suo pensare e ricercare ha potuto illuminare e arricchire la vita degli uomini? Non ha egli, in una aspirazione orientata soltanto a ciò che è intellettuale, dimenticato la sua responsabilità e dignità? Un uomo interiormente libero e coscienzioso si può sì annientare, ma non rendere schiavo o cieco strumento.

Se l'uomo di scienza dei nostri giorni trovasse il tempo e il coraggio di considerare con calma e criticamente la sua situazione e il suo compito, e di operare in modo adeguato, le prospettive di una ragionevole e soddisfacente soluzione della presente pericolosa situazione internazionale verrebbero essenzialmente migliorate.

[A. Einstein]

Il 18 aprile 1955, in seguito alla rottura dell'aneurisma dell'aorta addominale, alle ore 13.15 Albert Einstein cessava di vivere.

²⁸³ Cancellato nel manoscritto originale.