

## Albert Einstein. Relativamente a spazio e tempo

### 1. Albert Einstein

Albert Einstein nasce a Ulm il 14 marzo 1879 e poco dopo la famiglia si trasferisce a Monaco di Baviera, quindi nel 1894 a Pavia; nel 1896 Albert entra al Politecnico di Zurigo, dedicandosi specialmente alla matematica e alla fisica, dove conclude gli studi nel 1900. Cittadino svizzero dal 1901, trova impiego a Berna presso l'ufficio brevetti (1902-9); è in questo periodo che sviluppa i concetti fondamentali della sua opera e nel 1905 pubblica sulla rivista «*Annalen der Physik*» quattro articoli destinati a rivoluzionare la scienza del Novecento. Al suo lavoro teorico si devono lo sviluppo del concetto di fotone, la teoria dei moti browniani e la teoria statistica dei campi gravitazionali, anche se la sua fama è senza dubbio legata alla formulazione della teoria della relatività speciale (1905) e generale (1916). Le conseguenze di queste teorie, assieme ai suoi lavori sulla teoria dei quanti (statistica di Bose-Einstein), stravolgono le concezioni della fisica classica gettando le basi della meccanica relativistica moderna. La formulazione del principio di equivalenza tra massa ed energia, espresso nella formula  $E=mc^2$ , diviene il punto di partenza per una nuova era nella fisica teorica. Dal 1908 Einstein insegna a Berna, poi a Praga, e nel 1913, attirato dalla possibilità di lavorare con grandi scienziati come Max Planck e Walther Nernst, accetta di trasferirsi a Berlino, uno dei maggiori centri di ricerca dell'epoca; nel 1914 diviene direttore del laboratorio di fisica del *Kaiser-Wilhelm-Institut*, dove rimane fino al 1933, ma rifiuta di aderire alle tesi patriottiche e militariste e, allo scoppio della prima guerra mondiale, firma un manifesto pacifista.

Nel 1921 viene insignito del premio Nobel per la fisica per il suo contributo alla fisica teorica e specialmente per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico.

Quando Adolf Hitler prende il potere nel 1933, lo scienziato, che si trova all'estero, decide di non rientrare in Germania e ottiene un incarico all'università di Princeton (New Jersey), dove arricchisce in modo originale e fruttuoso la sua ricerca. Conscio del fatto che il regime nazista avrebbe potuto dotarsi di armi nucleari, il 2 agosto 1939 invia una prima lettera al presidente Franklin D. Roosevelt nella quale descrive lo stato dell'arte della ricerca nucleare e sottolinea la straordinaria potenza distruttiva che si può ricavare da una bomba atomica. Quando però il presidente dà il via al progetto Manhattan, Einstein non viene chiamato a parteciparvi.

Cittadino statunitense dal 1940, dopo i bombardamenti di Hiroshima e Nagasaki si impegna sempre più attivamente nel movimento pacifista internazionale. L'11 aprile 1955 firma con Bertrand Russell e altri scienziati - tra cui Max Born, Frédéric Joliot-Curie e Linus Pauling - il manifesto pacifista per l'abolizione delle armi nucleari e pochi giorni dopo, il 18 aprile 1955, muore per un aneurisma all'ospedale di Princeton.

### 2. Il rapporto con la scienza classica

Per parlare della fisica di Albert Einstein inizio da qualcosa che accade quando Einstein ha già settant'anni. Siamo nel 1949, e negli Stati Uniti si pubblica un volume intitolato *Albert Einstein scienziato-filosofo*. È un libro diviso in tre parti.

Nella prima Einstein racconta la propria vita scientifica. Parla dei problemi che ha dovuto formulare e risolvere. Parla delle prospettive che si sono aperte alla fisica del Novecento. Nella seconda parte intervengono scienziati e filosofi di altissimo livello (Pauli, Bohr, Reichenbach, ...), i quali espongono le loro considerazioni sull'attività scientifica di Einstein. Il volume si chiude con la risposta che Einstein dà ai suoi contemporanei.

Da una lettura attenta emerge subito una questione fondamentale, sollevata da fisici come Pauli e Bohr: Einstein è troppo legato alla scienza classica.

A questa argomentazione Einstein risponde: «*Quest'accusa richiede o una difesa, o la confessione del reato. L'una cosa e l'altra, tuttavia, sono rese molto difficili dal fatto che non esiste un'unica, ovvia accezione di ciò che si debba intendere per teoria classica*».

E si spiega subito dopo: «*Se per teoria classica si intende un programma di ricerca, secondo il quale i concetti fondamentali di una teoria scientifica sono creati da funzioni matematiche nel continuo, allora è vero che io aderisco rigidamente a questo programma classico*».

Perché ho citato queste parole? Perché le userò come chiave di lettura della vicenda scientifica einsteiniana. Che cos'è il «continuo» evocato da Einstein? In generale, sia nel senso comune, sia in molte visioni della fisica, non si parla di continuo, ma di corpuscoli, particelle immerse nello spazio. La natura non è continua: è discreta e fatta di particelle (elettroni, atomi, molecole ecc.).

Ma allora cos'è una concezione classica del continuo? Un buon esempio ci viene da ciò che scrisse nella prima metà dell'Ottocento uno scienziato come Faraday. La proposta radicale suggerita da Faraday era di abbandonare sia la nozione di particella materiale estesa nello spazio sia la nozione di spazio geometrico vuoto tra una particella e l'altra. Neghiamo quindi l'azione a distanza tra le particelle e passiamo a qualcosa che egli chiamò «continuum», il continuo, appunto.

Per spiegare meglio cos'è il continuo, immaginiamo che non ci siano particelle ma punti geometrici, alcuni dei quali funzionano come sorgenti e altri come pozzi delle forze elettriche. L'elettricità esce ed entra, e gli enti geometrici comunicano tra loro perché sono uniti da un groviglio di linee di forza, che sono curve geometriche nello spazio, variamente aggrovigliate l'una sull'altra.

Quindi la materia diventa un continuo geometrico incurvato che sostituisce lo spazio euclideo. Questo è in sostanza il continuo al quale Einstein fa riferimento.

### 3. Il principio di relatività

Quando Einstein si laurea al Politecnico di Zurigo nel 1900, la fisica classica è molto più avanti di quanto comunemente si pensi.

Faccio solo un esempio. Uno scienziato di nome Clifford nel 1885 aveva dato alle stampe una raccolta delle proprie conferenze divulgative, in una delle quali parlava dell'universo e della geometria. Leggiamo che cosa diceva Clifford a cittadini che non erano certamente laureati né in fisica né in matematica: «*Il fare asserzioni dogmatiche sull'ignoto è da teologi del medioevo non da scienziati moderni. Su questa base è fondata l'ipotesi che il nostro spazio sia euclideo. Ma domandiamoci invece se non potrebbe darsi che noi considerassimo come variazioni fisiche nell'universo degli effetti che sono realmente dovuti a cambiamenti nella curvatura del nostro spazio. In altre parole, se alcune delle cause che noi chiamiamo fisiche, e forse tutte, non siano dovute alla costruzione geometrica del nostro spazio.*».

Ecco, è in questo clima che si forma il pensiero di Einstein. Egli riflette sul fatto che quando noi ragioniamo su fenomeni vicini o lontani da noi, usiamo sempre un sistema di coordinate (quant'è distante da me questa cosa? quanto dista dal soffitto?). E postula che se un sistema di coordinate è scelto in modo tale che le leggi della fisica siano soddisfatte nella loro forma più semplice, allora le stesse leggi devono essere soddisfatte se vengono riferite a un altro sistema di riferimento diverso dal nostro, che si muove di moto rettilineo uniforme rispetto all'altro sistema.

Questo è il principio di relatività che Einstein enuncia nel 1905, insieme a un altro postulato, secondo il quale la velocità della luce nel vuoto è costante e non dipende dalla velocità della sorgente che emette la luce. Perché formula questi due postulati? Perché aderisce a un programma classico, e lo spiega.

L'articolo che noi in genere chiamiamo «sulla relatività ristretta» aveva un titolo diverso, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*. E comincia con una dichiarazione molto semplice: «*La teoria di Maxwell [quella del campo elettromagnetico], così come è oggi comunemente intesa, conduce, nelle sue applicazioni ai corpi che si muovono, o, a delle asimmetrie che non sembrano conformi ai fenomeni.*».

Sta parlando di Faraday, che nel 1831 aveva condotto alcuni esperimenti usando un magnete e un filo di rame piegato a cerchio. E aveva dimostrato che, se i due oggetti sono in moto relativo l'uno rispetto all'altro, dentro il filo di rame circola una corrente elettrica. Se invece i due oggetti sono fermi, la corrente non circola.

Einstein riprende questi risultati sperimentali e li legge in modo nuovo. Immaginiamo di avere su un tavolo un magnete e un filo di rame ad anello: sono fermi, e quindi nel filo di rame non circola corrente elettrica. Proviamo ora a tenere stazionario il filo di rame, muovendo il magnete: secondo le teorie fisiche esistenti, attorno al magnete si dovrebbe generare un campo elettrico con abbastanza energia da far circolare una corrente nel filo di rame. E in effetti è questo che accade.

Adesso, sempre seguendo il ragionamento di Einstein, teniamo fermo il magnete, e mettiamo in movimento il nostro anello di rame. Attorno al magnete non si genera nessun campo elettrico, però nel filo di rame circola una corrente elettrica. Questa è una asimmetria. Per eliminare l'asimmetria bisogna accettare sino in fondo, costi quel che costi, l'idea che questi fenomeni si producono se, e solo se, c'è moto relativo tra i due oggetti.

Questo vuol dire che dobbiamo eliminare l'idea di uno spazio assoluto, di un moto assoluto: esiste soltanto un moto relativo. E implica inoltre che i fenomeni elettrici, magnetici e ottici, così come quelli della meccanica (e questo è il grande passo, che ora vedremo più nel dettaglio), non hanno proprietà corrispondenti all'idea della quiete assoluta, ma dipendono soltanto dai moti relativi.

#### 4. La relatività del tempo

Come abbiamo detto, secondo Einstein bisogna abbandonare l'idea dello spazio assoluto e del moto assoluto. E abbandonare anche l'idea che nello spazio assoluto ci sia un etere, all'epoca chiamato «etere luminifero», che trasmette la luce. Per esempio, secondo questa idea, la luce che arriva dalle stelle sarebbe un fenomeno ondulatorio trasmesso da un etere immobile.

Sostituiamo questi concetti con i due postulati del principio di relatività e del principio della costanza della velocità della luce, in modo che le leggi della fisica siano invarianti per sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme. Come conseguenza, le equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell sono invarianti per queste trasformazioni, ma quelle della meccanica no.

Bisogna quindi cambiare la forma delle leggi di Galileo e di Newton, in modo che siano anch'esse invarianti per le trasformazioni di coordinate che valgono per le equazioni di Maxwell. Questo porta subito Einstein a criticare alcune nozioni sia del senso comune, sia della scienza classica: nozioni che riguardano il tempo e lo spazio.

L'operazione qui diventa molto difficile concettualmente, però possiamo provare lo stesso a seguire il ragionamento di Einstein. Iniziamo con il chiederci qual è il significato di un' espressione di senso comune, che è poi l'esempio portato da Einstein nel suo articolo: «*il treno arriva alle ore sette*».

Einstein ci invita a riflettere un attimo su questa dichiarazione. Che cosa vuol dire in realtà? Vuol dire che la lancetta del mio orologio, indicante il numero 7, e l'arrivo del treno in stazione, sono due eventi simultanei. Ma siamo sicuri che la simultaneità si conservi quando cambiamo sistema di riferimento? Il problema è molto delicato, ed Einstein nella sua vita dedicò molte pagine a una spiegazione divulgativa del concetto di simultaneità. Ne prendo una da un libro che scrisse insieme a un suo collega.

Invece di parlare delle lancette dell' orologio e del treno, Einstein invitava il lettore a riflettere su un esperimento più semplice. Immaginiamo di essere in una stanza dalle pareti completamente trasparenti, in modo che dall' esterno una persona possa vedere molto bene ciò che accade all'interno. La nostra stanza si sta muovendo nello spazio con una certa velocità costante, che chiamiamo  $v$ .

Al centro della stanza abbiamo posizionato una sorgente di luce, che quando viene accesa lancia un segnale luminoso contro la parete di fronte a noi e uno verso la parete alle nostre spalle. Se questa sorgente di luce è al centro della mia stanza trasparente, quando viene accesa vediamo che la luce arriva su entrambe le pareti simultaneamente, perché la velocità della luce viaggia con velocità  $c$ , uguale sia in un senso sia nell'altro.

Adesso immaginiamo di essere fuori dalla stanza. Siamo in quiete, la stanza ci passa davanti con una certa velocità  $v$  e osserviamo lo stesso fenomeno. Che cosa vediamo? Vediamo che il segnale luminoso arriva prima contro la parete che si sta avvicinando a noi con una certa velocità  $v$ , mentre sulla parete opposta, che si sta allontanando con la stessa velocità, arriva dopo. L'arrivo della luce sulle due pareti non è più simultaneo: era simultaneo soltanto per l'osservatore fermo nella stanza.

Quindi l'idea secondo la quale cambiando i sistemi di riferimento il tempo non cambia è da abbandonare. E questo abbandono richiede il pagamento di un prezzo molto salato. Infatti, la relatività ristretta è una rivoluzione concettuale, non solo scientifica, ma anche filosofica, perché cambia la nostra nozione di tempo attraverso una critica della nozione di simultaneità. Dobbiamo chiederci se una variazione così radicale interviene anche per quanto riguarda il concetto di spazio.

#### 5. La relatività dello spazio

Abbiamo appena visto che la critica einsteiniana della simultaneità coinvolge tutta quanta la nozione di tempo: il tempo diventa relativo rispetto all'osservatore. E lo spazio?

Chiediamoci se l'intervallo di spazio tra due punti rimane lo stesso, quale che sia lo stato di moto degli osservatori. Come facciamo a porre il problema e a risolverlo? Non è difficile.

Io ho in mano, dice Einstein, una sbarretta rigida, e sono in quiete rispetto a essa. Per misurare la lunghezza della sbarretta prendo un regolo e lo applico tante volte finché arrivo all' estremità della sbarretta. Diciamo che la lunghezza è  $l$ . Adesso io sono in quiete, e la sbarretta si sta muovendo rispetto a me di moto rettilineo uniforme nello spazio. Per misurarla, ho soltanto due possibilità: o mi metto a cavalcioni della sbarra e la seguo, e trovo la lunghezza di prima, oppure lascio viaggiare la sbarretta nello spazio. Ma in questo secondo caso come faccio a misurare la lunghezza?

Posso immaginare di avere riempito lo spazio di orologi, tutti identici, perfettamente sincronizzati, orologi perfetti. Mi devo allora chiedere in quali punti dello spazio si trovano simultaneamente, a un istante dato, i due estremi della sbarretta. Per determinarlo devo guardare gli orologi, ma abbiamo visto che gli eventi sono simultanei o no a seconda dello stato di moto dell'osservatore. E allora constato che, se misuro la lunghezza della sbarretta quando questa è in movimento rispetto a me, trovo una lunghezza differente rispetto a quando era ferma. Quindi anche lo spazio dipende dallo stato di movimento degli osservatori.

Il grande messaggio del 1905 è questo. Quando un orologio è in movimento nello spazio, il suo ritmo rallenta. Nel caso ipotetico che la sua velocità sia coincidente con quella della luce, il tempo non scorre più. La lunghezza di una sbarra in movimento nello spazio dipende dalla sua velocità rispetto a me: quanto più la velocità aumenta e si avvicina a quella della luce, tanto più la sbarretta si accorcia. Se arrivasse alla velocità della luce, avremmo una sbarretta di lunghezza zero.

Nella nostra esperienza quotidiana del mondo non ci rendiamo conto degli effetti relativistici. Infatti, come caso limite, per velocità molto basse rispetto a quella della luce vale la meccanica classica.

La teoria della relatività ristretta contiene in sé sia le equazioni dell'ottica, dell'elettricità e del magnetismo, sia quelle della meccanica. Come chiamare questa teoria? Questo lo sanno in pochi: Einstein non voleva che si chiamasse «teoria della relatività», perché temeva che si sarebbe fatta confusione con il relativismo. In effetti, la teoria del 1905 riguarda ciò che è invariante nell'universo, non ciò che è relativizzato nel senso banale del termine.

Einstein invia il suo articolo agli «*Annalen der Physik*», che lo pubblicano con la data 27 settembre 1905. Non ha bibliografia: Einstein non cita nessuno, se non un amico, Michele Besso, sul quale torneremo più avanti. La cosa curiosa è che, poche settimane dopo, la stessa rivista riceve una nota di due o tre paginette, nella quale Einstein, quasi chiedendo scusa, dice che dalla teoria precedentemente inviata si deduce anche un'equivalenza tra massa ed energia. L'energia è proporzionale alla massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce. È la famosa  $E = mc^2$ , di cui tutti abbiamo già sentito parlare.

## 6. Lo spazio-tempo

Come abbiamo appena visto, alla fine del 1905 Albert Einstein pubblica l'articolo in cui afferma l'invarianza di tutte le leggi della fisica per sistemi di coordinate di tipo galileiano (moti rettilinei uniformi). Una teoria che di relativo non ha nulla: è una teoria dell'invarianza, ed è governata da una forma di determinismo assoluto. Resta fuori dalla portata di questa teoria solo la gravitazione.

Pochi mesi dopo la pubblicazione di questo articolo memorabile, uno dei più grandi matematici allora viventi, Hermann Minkowski, tenne una conferenza di cui ci è rimasto il testo. In essa dichiarava sin dall'inizio che, grazie alla nuova teoria di Einstein, i concetti di spazio e di tempo con i quali avevamo convissuto per secoli e secoli dovevano essere buttati, erano ombre del passato: allora posto interveniva una nuova entità, lo spazio-tempo, uno spazio dalla geometria quadridimensionale. Ecco che ritroviamo ancora lo stretto rapporto tra fisica e geometria.

Pochi mesi prima dell'articolo di Minkowski, nella mente di Einstein nacque quello che egli stesso battezzò più tardi come «*il pensiero più felice di tutta la mia vita*», ovvero l'idea di generalizzare la teoria della relatività del 1905 per includere anche la gravitazione. Si tratta, cioè, di estendere il postulato di relatività a sistemi di coordinate in moto non uniforme gli uni rispetto agli altri (moti accelerati).

All'interno del nostro sistema di riferimento noi non possiamo, con esperimenti di meccanica, distinguere un'accelerazione dalla presenza di un campo gravitazionale. I campi gravitazionali sono equivalenti alle accelerazioni dei sistemi di riferimento.

## 7. Anni di lavoro intenso

Dal 1907 al 1916 Einstein si concentra nello studio, e molti suoi amici si chiedono cosa stia facendo. Ogni tanto pubblica qualcosa, ovviamente, ma non si capisce bene quale sia la sua direzione di lavoro.

Nel 1912 un suo grande amico, Arnold Sommerfeld, gli scrive una lettera affettuosa, chiedendo gli stesse facendo. Einstein risponde con una lettera contenente la seguente dichiarazione: «*In tutta la mia vita non ho mai lavorato tanto duramente, e l'animo mi si è riempito di un sacro rispetto per la matematica. A fronte di questo problema [sul quale sto lavorando] l'originaria teoria della relatività è un gioco da ragazzi*».

All'inizio del suo capolavoro *Fondamenti della relatività generale* (1916), Einstein sottolinea il contributo di Minkowski, che ha introdotto la nozione dello spazio-tempo come struttura geometrica, e della fisica

quadrimensionale. E sottolinea anche l'importanza di uno strumento già presente nella matematica classica: il calcolo differenziale assoluto, sviluppatosi nel corso dell'Ottocento grazie a grandi scienziati come i tedeschi Karl Friedrich Gauss e Bernhard Riemann, e gli italiani Gregorio Ricci-Curbastro e Tullio Levi-Civita.

Grazie a questi strumenti matematici, già esistenti e del tutto classici, Einstein è riuscito a dimostrare che tutte le leggi della natura devono essere tali da poterle applicare a qualunque sistema di riferimento indipendentemente dal suo moto.

### **8. Le conseguenze della relatività**

La relatività generale possiede tuttora una formidabile difficoltà matematica ed è ancor oggi valida, a distanza di tanti decenni. Contiene in sé, come caso limite, la relatività ristretta e la teoria di Newton per la gravitazione, e quindi poggia su una base empirica di secoli. I contemporanei del 1916 volevano sapere se questa teoria poteva fare previsioni verificabili e spiegare fenomeni altrimenti oscuri.

Una prima previsione riguarda la luce che arriva dalle stelle. Secondo la relatività generale, nel nostro sistema di riferimento dovremmo osservare uno spostamento verso il rosso delle righe spettrali del raggio luminoso. Però i dati esistenti nel 1916 erano insufficienti e imprecisi, e quindi questa previsione non poteva essere né verificata né falsificata.

Una seconda previsione permetteva di spiegare l'anomalia, nota da molti decenni, dell'orbita di Mercurio. E questo era un punto a favore della teoria di Einstein.

Secondo una terza previsione, un raggio di luce proveniente da una stella, se attraversa un campo gravitazionale molto intenso, si incurva. Nel 1916 non c'erano dati né a favore né contro, ma tutti sapevano che era un problema antico.

Era stato posto da Newton nel 1704, alla fine della prima edizione dell'Ottica, in cui aveva elencato dei quesiti ai quali non sapeva rispondere. E la questione numero uno era proprio se i corpi agissero a distanza sulla luce e se per effetto della loro azione incurvassero i raggi luminosi.

Einstein risolse il quesito con una previsione numericamente precisa. Tre anni più tardi, nel 1919, durante un'eclisse totale di Sole la previsione di Einstein viene controllata. La relatività generale diventa una teoria verificata e Einstein diviene di colpo l'uomo più famoso del mondo.

### **9. L'illusione di passato, presente e futuro**

Se si accetta la teoria della relatività generale così come presentata da Albert Einstein, si va incontro a conseguenze che sono violazioni radicali delle esperienze di senso comune. Perché l'universo descritto dalla teoria del 1916 è una geometria, complicata finché volete, ma è una struttura geometrica, e le geometrie non cambiano. Come amava dire Einstein, il mondo è e non diviene: non cambia mai niente, il mondo è statico.

Einstein ribadì questo punto di vista per tutta la vita, anche se era abbastanza isolato in questa convinzione. Immaginiamo di descrivere l'universo e dire «Questo è l'universo adesso». Fra dieci anni l'universo sarà un po' cambiato, e potremmo unire idealmente le due descrizioni, prima e dopo, con la freccia del tempo. Einstein negava che questa rappresentazione fosse un'immagine del mondo reale, perché, appunto, il mondo è e non diviene.

Ci credeva al punto che, quando nel 1955 morì il suo carissimo amico Michele Besso, con il quale ebbe uno scambio di corrispondenza di centinaia di lettere per più di mezzo secolo, scrisse una lettera di condoglianze al figlio e alla sorella. In essa è contenuta la frase seguente, che riflette perfettamente la concezione filosofica einsteiniana: «*Michele mi ha preceduto di un poco nel congedarsi da questo strano mondo, ma non significa niente: per noi che crediamo nella fisica, la divisione fra presente, passato e futuro ha solo il valore di una ostinata illusione*».

A questo punto, possiamo chiederci se questa idea che il mondo è e non diviene sia del tutto originale o se abbia anch'essa radici classiche. Prima ancora che Einstein si iscrivesse al Politecnico di Zurigo per imparare fisica e matematica, un grande fisico che si chiamava Ludwig Boltzmann aveva scritto a proposito del tempo e dello spazio alcune pagine, che vi riassumo brevemente qui di seguito.

Boltzmann diceva che quando esaminiamo un oggetto nello spazio, possiamo sostenere che l'oggetto è qui, oppure è sopra, oppure è sotto, ma dal punto di vista della meccanica classica possiamo anche sostenere il contrario, perché le equazioni della meccanica non distinguono tra il sopra e il sotto: la distinzione è di senso comune, non è scientifica.

A proposito della distinzione tra passato, presente e futuro, Boltzmann ragionava in modo simile. L'universo, nella sua globalità, è un sistema in equilibrio: quindi, la distinzione tra passato, presente e futuro a livello universale è priva di alcun significato. A livello universale il tempo è congelato, il tempo non scorre: il mondo è e non diviene. Non è un caso che Einstein conoscesse molto bene la fisica di Boltzmann.

### **10. Una misura dell'energia: i quanti**

Prima del 1905 che gli storici chiamano l'anno mirabile perché fu l'anno in cui pubblicò cinque articoli rivoluzionari, Einstein aveva scritto alcuni articoli di fisica teorica, tutti legati alla fisica di Boltzmann.

Questi aveva introdotto già nel 1872 l'ipotesi che le particelle in moto in un gas, per esempio, avessero energie discrete. E aveva introdotto la nozione di quanto di energia: una particella poteva avere un quanto di energia, oppure due quanti, o  $n$  quanti, ma non poteva avere un terzo, o un mezzo, di un quanto.

Einstein conosce perfettamente questa fisica e lo dimostra negli articoli precedenti il 1905. E conosce anche un altro problema classico, che a scuola impariamo come «*problema del corpo nero*». Il corpo nero era stato introdotto attorno alla metà dell'Ottocento da Gustav Robert Kirchhoff, il quale ci suggeriva di immaginare una cavità vuota, con le pareti annerite, e un unico forellino tramite il quale potevano essere assorbite o emesse tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico (luce visibile, raggi ultravioletti, infrarossi ecc.). L'intensità di questa emissione, scoprì Kirchhoff, dipendeva unicamente dalla temperatura del corpo nero e dalla lunghezza d'onda.

Questo creava grandi difficoltà concettuali, perché per la fisica classica un corpo nero avrebbe dovuto emettere radiazione con potenza infinita, ma questo era impossibile. Per tutta la seconda metà dell'Ottocento ci si era affaticati per trovare una soluzione del problema di Kirchhoff, senza mai riuscire. Una proposta era stata fatta il 14 dicembre del 1900 da Planck (egli stesso la chiamò «*rimedio disperato*»), e prevedeva che dentro un corpo nero ci fossero delle piccole strutture oscillanti, attorno alle quali la radiazione era emessa per quanti, cioè per quantità discrete, non in modo continuo.

Fatta questa premessa, veniamo a un problema sollevato da Einstein nel 1905. Einstein, che conosce Boltzmann e conosce la soluzione di Planck, concorda con Boltzmann ed è critico nei confronti di Planck. Scrive un articolo molto strano, intitolato *Un punto di vista euristico relativo alla generazione e alla trasformazione della luce*.

«Euristico» vuol dire che ci porta vicini alla verità, che ci porta verso di essa. Non è una teoria completa, e Einstein lo ammette, ma è interessante come la affronta. Scrive questo: «*Fra le descrizioni teoriche che i fisici si sono formati dei gas e della materia, e la teoria di Maxwell dell' elettromagnetismo nello spazio vuoto, vi è una profonda differenza formale. Mentre infatti lo stato di un corpo si considera completamente determinato dalla posizione e dalla velocità di un numero grandissimo, ma finito, di atomi e di elettroni, per la determinazione dello stato elettromagnetico di uno spazio si utilizzano funzioni spaziali continue*».

Questo riferimento al continuo è importante, perché ricordiamo che Einstein nello stesso anno elabora la teoria della relatività, che è una teoria del continuo, non del discreto. E poi aggiunge: «*È concepibile che una teoria della luce basata sul continuo porti a contraddizioni con l'esperienza*».

Ma come, lui è un difensore del continuo, e qui dice che la visione della luce nel continuo può portare a contraddizioni? Sì, e aggiunge: «*Secondo l'ipotesi che io considererò nel seguito, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande. Essa consiste invece di un numero finito di quanti di energia localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza*».

Fa questa ipotesi proprio per spiegare alcuni fenomeni che erano inspiegabili. Il più noto di essi era il cosiddetto «*effetto fotoelettrico*» (non facciamoci spaventare del nome, non è poi così complicato), che si verifica quando alcune sostanze, colpite da radiazione elettromagnetica, emettono elettroni, la cui energia dipende unicamente dalla frequenza della radiazione incidente e non dalla sua intensità.

### **11. Una fisica tra il discreto e il continuo**

La teoria di Einstein spiega l'effetto foto elettrico introducendo la nozione di quanto di luce, il fotone: un concetto rivoluzionario, che attraversa per vent'anni la fisica dell'Occidente, prima di essere accettato, a metà degli anni Venti del Novecento. Einstein continua a lavorare sui quanti di luce, e nel 1907 arriva a formulare un'ipotesi quantistica che non riguarda più soltanto la luce, ma riguarda effetti macroscopici: cioè effetti che influenzano gli oggetti grandi, la loro capacità termica per esempio.

Per capire questa oscillazione di Einstein tra il discreto e il continuo, e le polemiche che egli sostenne con Pauli e con Bohr, bisogna cercare di capire cosa volesse dire per Einstein fare fisica. Lo ha scritto più volte nei suoi testi divulgativi, lo ha ripetuto nelle conferenze che tenne per tutta la vita, ma la descrizione più efficiente si trova in una lettera che scrisse a un amico, Maurice Solovine.

Per comprendere sino in fondo il contenuto di questa lettera, che è una chiave di lettura per tutto il pensiero di Einstein, bisogna fare un piccolo passo indietro. Abbiamo visto che Einstein, da una parte, costruisce una fisica del continuo: il campo gravitazionale. E, dall'altra parte, dà grandi contributi alla fioritura della teoria dei quanti: introducendo, per esempio, il concetto di fotone.

La teoria dei quanti è un grandioso edificio della cultura del nostro tempo e dà una visione coerente del mondo naturale come di un mondo fatto di particelle. A questo proposito nacque, appunto, una polemica, a volte anche aspra, tra Einstein e i fisici più legati alla meccanica dei quanti. Una polemica che troviamo riassunta in una dichiarazione pubblica, più volte ripetuta da Einstein, secondo la quale una teoria veramente razionale della natura deve dedurre le particelle dal continuo.

Einstein, cioè, accusava molti sostenitori della fisica dei quanti di assumere le particelle come punti di partenza, mentre dovevano essere il punto di arrivo. In questa convinzione, Einstein era isolato. Questa presa di posizione einsteiniana su ciò che è razionale in fisica non discende forse da un'immagine della scienza alla quale Einstein era profondamente legato, un'immagine classica? Quasi. E qui arriva la lettera a Solovine.

## 12. Che cos'è la scienza?

C'era un disegno in questa lettera.

Il segmento orizzontale, battezzato E, indica le esperienze immediate, la base empirica. In alto c'è un circoletto A, gli assiomi, i punti più alti di una teoria.

Einstein sostiene che la salita dalla base empirica sino agli assiomi non è un processo logico. L'induzione dagli esperimenti agli assiomi è qualcosa di intuitivo, di extralogico, di psicologico. Poi, quando siamo a livello degli assiomi, possiamo dedurre (e qui la logica è importante) degli enunciati speciali (chiamiamoli S, S', S''), che sono deduzioni matematiche dagli assiomi.

Questi enunciati, gli S, possono anche pretendere di essere veri. Per dirlo, li confrontiamo con la base empirica. Ma questo è un processo privo di logica. E questa la razionalità che ha in mente Einstein. Per lui, in fin dei conti, il rapporto che sussiste tra gli S e la base empirica, da un punto di vista pragmatico, è più sicuro della salita verso gli assiomi. Ma è a livello degli assiomi che si fanno tutti i giochi, passando da una teoria all'altra. E il mondo delle idee, con il quale modelliamo la natura, perché abbiamo categorie che sono abbastanza standard E qui Einstein fa l'elogio dei grandi filosofi del passato che amava: Kant, Hume, Spinoza.

Sostanzialmente, Albert Einstein credeva profondamente in una grande unità culturale tra scienza e filosofia, che vedeva come un'impresa unica, non come una manifestazione tecnica da una parte, e riflessione filosofica dall'altra, ma come un unico bagaglio di concetti. Siamo ormai al 1952.

Nel 1955 muore Michele Besso, e Einstein scrive alla famiglia quella strana lettera di condoglianze di cui vi ho parlato prima. Il 12 aprile gli si rompe un aneurisma all'aorta addominale. Molti chirurghi accorrono e, valutate le sue condizioni, con molta onestà gli dicono che si può fare molto poco: si possono tentare interventi disperati per prolungare un po' la sua vita, ma le probabilità sono basse. Raccontano che Einstein abbia detto ai chirurghi questa frase: «È di cattivo gusto prolungare la vita artificialmente. Per quanto mi riguarda, io ho già fatto la mia parte, è ora di andare». Se ne andò il 18 aprile, all'una e un quarto del mattino.

