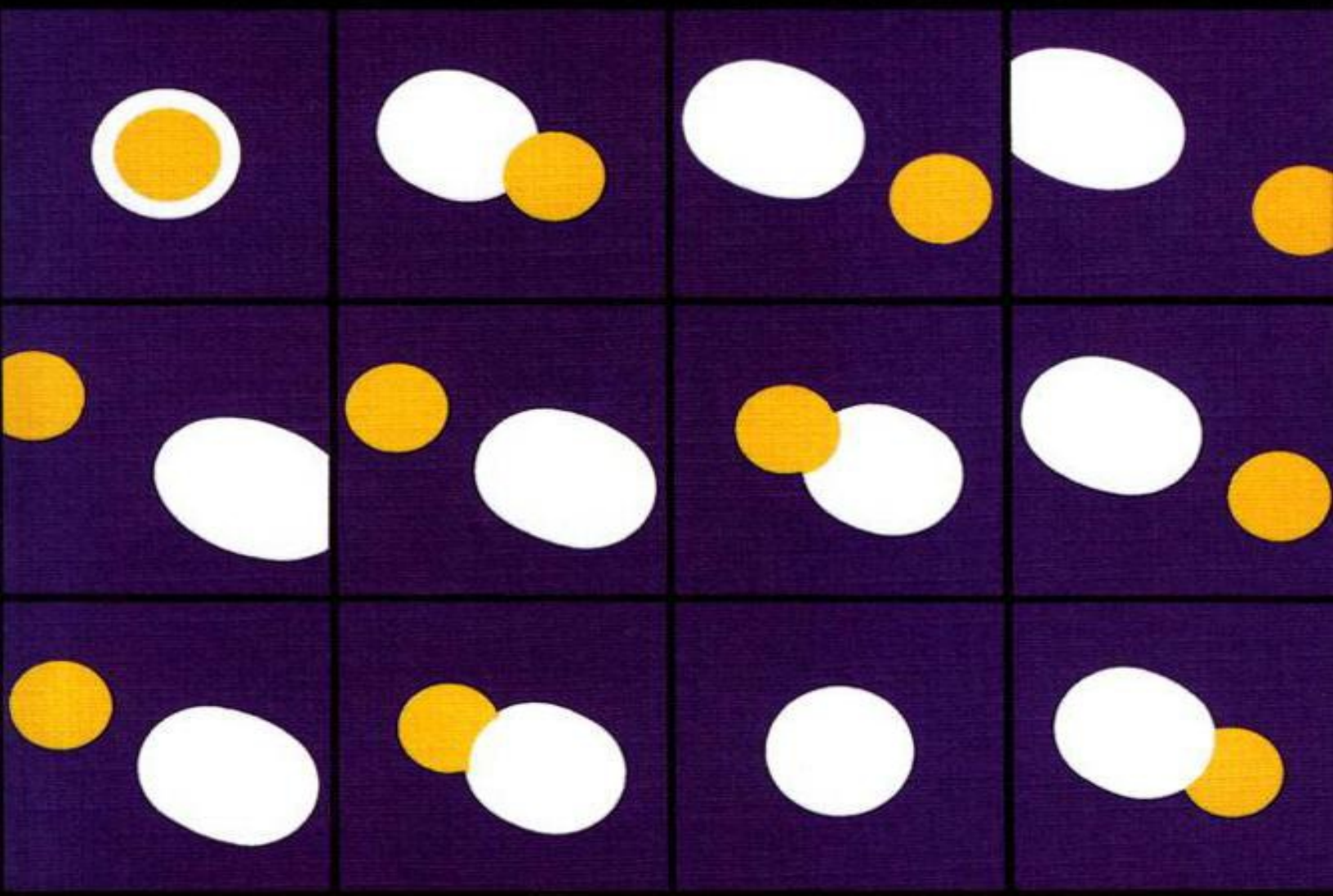
Richard Feynman

LA LEGGE FISICA



Universale Bollati Boringhieri

Richard Feynman

La legge fisica

Bollati Boringhieri

Prima edizione 1971
Ristampa maggio 2010
Titolo originale: *The Character of Physical Law*
Traduzione di Luca Radicati di Bròzolo
© 1971 Bollati Boringhieri editore Torino,
corso Vittorio Emanuele II, 86
Gruppo editoriale Mauri Spagnol
ISBN 978-88-339-0261-6
Schema grafico della copertina di Enzo Mari
www.bollatiboringhieri.it
Stampato in Italia dalla Litografia EST di Settimo Torinese (To)

Prefazione
di L. A. Radicati

Il presente volume è la trascrizione quasi letterale di una serie di conferenze indirizzate a studenti non fisici che Feynman, improvvisando sulla scorta di poche note, tenne nel 1964 all'Università Cornell. Le conferenze non si proponevano di insegnare la fisica ai non specialisti. Feynman è convinto che nessuna esposizione non matematica "potrà mai far capire la natura a 'quelli dell'altra cultura'", e quindi non si mette su questa strada sulla quale tanti altri prima di lui hanno fallito. Quello che si propone è invece di spiegare il metodo che la fisica usa per scoprire le leggi della natura e di far comprendere la motivazione di questa ricerca, per rendere in qualche modo partecipi i profani della bellezza di questa impresa intellettuale e consapevoli della "fortuna che abbiamo di vivere in un'epoca in cui stiamo ancora facendo delle scoperte".

Se a questo punto il lettore si fosse fatto l'idea che La legge fisica *è un libro di filosofia della scienza o di epistemologia, è bene disingannarlo subito. La sola parola filosofia farebbe inorridire Feynman, fisico al cento per cento, innamorato della sua scienza e alle volte, come un vero innamorato, ingenuamente unilaterale. Non che il libro sia ingenuo, tutt'altro. Sarebbe però un vero peccato se il lettore italiano, scandalizzato da certi giudizi ispirati in parte dal gusto del paradosso e anche troppo facilmente confutabili sul piano filosofico, concludesse affrettatamente che si tratta di un'opera di divulgazione superficiale.*

Feynman non vuole discutere il valore conoscitivo della fisica come scienza, ma vuole solo mostrarci come essa procede. Ce lo mostra col suo stile immediato e antiretorico, senza vaghe affermazioni qualitative, studiando su esempi concreti il modo in cui si arriva a stabilire le leggi fondamentali. Gli esempi sono tratti dalla fisica di ieri e di oggi e il loro esame è spinto tanto avanti quanto è necessario per studiarne il valore esemplare e fin dove io si può fare senza ricorrere alla matematica. Anche il lettore non specialista può così cogliere l'essenza del metodo della fisica e apprezzare il valore intellettuale di questa costruzione che ha permesso all'uomo di impadronirsi di qualcuno almeno dei segreti della natura. Al lettore più esperto non sfuggiranno le osservazioni sottili, le intuizioni profonde di cui questo libretto, come ogni scritto di Feynman, è ricco: dalla dimostrazione einsteiniana della località delle leggi di conservazione, all'analisi del significato della termodinamica, fino alle osservazioni contenute nelle bellissime pagine finali sul futuro della fisica.

Di una cosa ancora bisogna avvertire il lettore. Feynman, che è uno fra i più grandi dei fisici teorici viventi, ha anche delle doti eccezionali come oratore, e vorrei quasi dire come attore. Le sue conferenze, anche quelle più strettamente scientifiche, hanno una vivacità che è ben raro trovare nei discorsi di uno scienziato. Tale carattere di spontanea improvvisazione è evidentissimo in queste conferenze, esempio tipico dello stile di

Feynman, così diverso da quello della nostra tradizione. Stile che conserva l'immediatezza dello slang *di New York, le sue metafore pittoresche e il più sublime disprezzo per la sintassi e l'eleganza stilistica tradizionale.*

Per Feynman la ricerca delle leggi fisiche "è eccitante, è meravigliosa... è come la scoperta dell'America". Non c'è da stupirsi se in queste condizioni di spirito l'eleganza stilistica perda per lui un po' della sua importanza.

LUIGI A. RADICATI DI BRÒZOLO

La legge fisica

Capitolo 1.
La legge della gravitazione, esempio di legge fisica

È strano, ma nelle rare occasioni in cui mi hanno invitato a suonare in pubblico il tamburo,[1] il presentatore non ha mai creduto necessario ricordare che mi occupo anche di fisica teorica. Forse è perché rispettiamo più le arti delle scienze. Gli artisti del Rinascimento dicevano che l'interesse principale dell'uomo deve essere l'uomo: tuttavia ci sono altre cose interessanti al mondo, e perfino gli artisti apprezzano i tramonti, le onde dell'oceano e il cammino delle stelle attraverso i cieli. Dunque ci sono delle buone ragioni per parlare qualche volta anche di altro. Quando guardiamo le bellezze della natura, traiamo un piacere estetico dall'osservazione diretta. Tra i fenomeni della natura c'è però anche una struttura, un ritmo che non appare direttamente all'occhio, ma che si rivela solo dopo una più attenta analisi; e sono appunto questi ritmi e strutture che chiamiamo *leggi fisiche*. Ciò che voglio discutere in questa serie di lezioni è la caratteristica generale delle leggi fisiche; se volete, questo è un livello più alto di generalità che sta al di sopra delle leggi stesse. Più precisamente, quello che voglio considerare è la natura e le sue qualità più generali quali appaiono a un'analisi dettagliata.

Ora, un simile argomento ha una certa tendenza a diventare troppo filosofico proprio perché diventa tanto generale: quando si parla in termini così generali che tutti possano capire, allora l'argomento viene considerato profonda filosofia. Io vorrei essere un po' più specifico e desidererei essere capito in maniera onesta piuttosto che vaga. Perciò in questa prima lezione cercherò di dare, anziché generalità, un esempio di legge fisica, per darvi almeno un esempio di quello di cui sto parlando in modo generale. Così in seguito potrò riferirmi molte volte a questo caso, in modo da rendere concreto un argomento che altrimenti rimarrebbe troppo astratto. Ho scelto come esempio di legge fisica, non so bene perché, la teoria della gravitazione, cioè i fenomeni della gravità. In effetti essa è stata una delle prime leggi a essere scoperta e ha una storia interessante. Potreste dire: “Va bene, ma allora è una storia vecchia, vorremmo sentire qualcosa sulla scienza più moderna.” Più recente, forse, ma non più moderna. La scienza moderna è esattamente nella stessa tradizione della scoperta della legge della gravitazione. E se vi parlassi di quello che voi chiamate la scienza moderna, vi parlerei soltanto di scoperte più recenti. Non mi dispiace affatto parlarvi della legge della gravitazione, perché nel descrivere la sua storia e i suoi metodi, il carattere della sua scoperta e la sua qualità, io sono assolutamente moderno.

Questa legge è stata chiamata la “più grande generalizzazione compiuta dalla mente umana”, e già dalla mia introduzione potrete immaginare che sono interessato non tanto alla mente umana, quanto alla meraviglia di una natura che può obbedire a una legge tanto elegante e semplice come questa legge della gravitazione.

Perciò ci concentreremo soprattutto non tanto sulla nostra abilità nel trovarla, ma sull'abilità della natura nell'obbedirvi.

La legge della gravitazione dice che due corpi agiscono l'uno sull'altro con una forza che varia in proporzione inversa al quadrato della distanza tra loro, e che varia in proporzione diretta al prodotto delle loro masse. Matematicamente possiamo scrivere la grande legge con la formula

$$F = G\frac{m m'}{r^2}$$

cioè una costante moltiplicata per il prodotto delle due masse, diviso per il quadrato della distanza. Ora, se aggiungo l'osservazione che un corpo reagisce a una forza accelerando, ossia cambiando ogni secondo la sua velocità in maniera inversamente proporzionale alla sua massa, cioè che la sua velocità varia di più se la massa è più piccola, allora sulla legge della gravitazione ho detto tutto quello che c'è da dire. Tutto il resto è una conseguenza matematica di queste due cose. So che non siete tutti matematici, e che non potete vedere immediatamente tutte le conseguenze di queste due osservazioni, quindi quello che vorrei fare qui è parlarvi brevemente della storia della scoperta, dirvi quali sono alcune delle sue conseguenze, quali effetti la scoperta ha avuto sulla storia della scienza, quali misteri implica tale legge, aggiungere qualche cosa sui perfezionamenti apportati da Einstein, e magari sui rapporti con le altre leggi della fisica.

La storia in breve è questa. Già qualcuno tra gli antichi, osservando il modo in cui i pianeti sembravano muoversi nel cielo, concluse che tutti, insieme alla terra, ruotavano intorno al sole. La scoperta fu più tardi rifatta, indipendentemente, da Copernico, dopo che la gente aveva dimenticato che era già stata fatta. Ora, la domanda successiva che si presentava era questa: come girano intorno al sole, esattamente, cioè con che tipo di moto? Si muovono su un cerchio il cui centro è il sole, o seguono qualche altro tipo di curva? A che velocità si muovono? E così via. Per questa scoperta ci volle più tempo. Il periodo dopo Copernico fu un periodo in cui ci furono grandi dibattiti e si discuteva se in effetti i pianeti girassero con la terra intorno al sole, o se invece la terra fosse al centro dell'universo, e via dicendo. Poi un astronomo di nome Tycho Brahe,[2] trovò un modo per rispondere alla domanda. Pensò che forse sarebbe stata una buona idea guardare molto, molto attentamente e segnare con cura il punto in cui i pianeti apparivano nel cielo, in modo da poter distinguere l'una dall'altra le due teorie alternative. Questa è la chiave della scienza moderna, e fu l'inizio della vera comprensione della natura — questa idea di guardare le cose, di annotare i particolari, e di sperare che nell'informazione così ottenuta possa trovarsi la chiave per decidere tra le varie interpretazioni teoriche. E così Tycho, un ricco signore che possedeva un'isola vicino a Copenaghen, attrezzò la sua isola con grandi cerchi di ottone e speciali posti di osservazione e registrò una notte dopo l'altra la posizione dei pianeti. È solo attraverso un lavoro paziente come questo, che si può trovare qualcosa.

Quando tutti questi dati furono raccolti, essi vennero in mano a Keplero[3] che cercò di analizzare il tipo di movimento che i pianeti compivano intorno al sole. E fece questo con un metodo di tentativi successivi. A un certo punto credette di esserci arrivato; secondo lui giravano intorno al sole in cerchi con il sole fuori centro. Ma poi Keplero notò che un

pianeta, credo fosse Marte, si scostava di otto minuti d'arco dalla traiettoria calcolata, e decise che questo era molto di più dell'errore che Tycho Brahe poteva aver fatto, e che la sua non era la soluzione giusta. E così, per la precisione degli esperimenti poté procedere a un altro tentativo e finalmente trovò le tre cose seguenti.

Per prima cosa trovò che i pianeti ruotavano secondo ellissi intorno al sole, con il sole come fuoco. L'ellisse è una curva che tutti gli artisti conoscono perché è un cerchio visto in prospettiva. Anche i bambini la conoscono perché qualcuno ha detto loro che se si mette un anello su uno spago fissato alle estremità, e poi si mette una matita nell'anello, essa disegnerà un'ellisse (fig. 1).

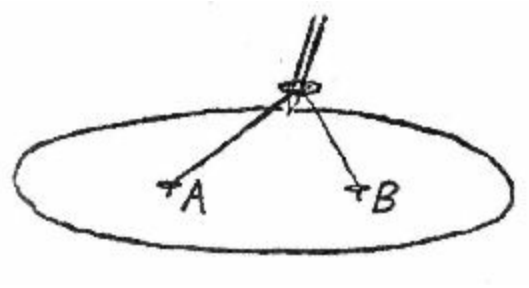


Figura 1

I due punti *A* e *B* sono i fuochi. L'orbita di un pianeta intorno al sole è un'ellisse con il sole in uno dei fuochi. La domanda seguente è questa: ruotando sull'ellisse, come si muove il pianeta? Va più in fretta quando è vicino al sole e più adagio quando è più lontano da esso? Keplero trovò una risposta anche per questo (fig. 2). Egli si accorse che se si segna la posizione del pianeta in due istanti, separati da un certo intervallo di tempo, diciamo tre settimane, poi in un altro punto della sua orbita si segnano di nuovo due posizioni ancora separate da tre settimane, e si tracciano le rette (tecnicamente chiamate *raggi vettori*) dal sole al pianeta, l'area compresa tra l'orbita del pianeta e le due rette definite dalla posizione del pianeta a distanza di tre settimane è uguale in qualsiasi parte dell'orbita. Cosicché il pianeta deve muoversi più velocemente quando è vicino al sole, e più lentamente quando è lontano, in modo da dare esattamente la stessa area.

Diversi anni dopo, Keplero trovò una terza legge che non riguardava solo il moto di un pianeta singolo intorno al sole, ma dava una relazione fra i movimenti di vari pianeti.

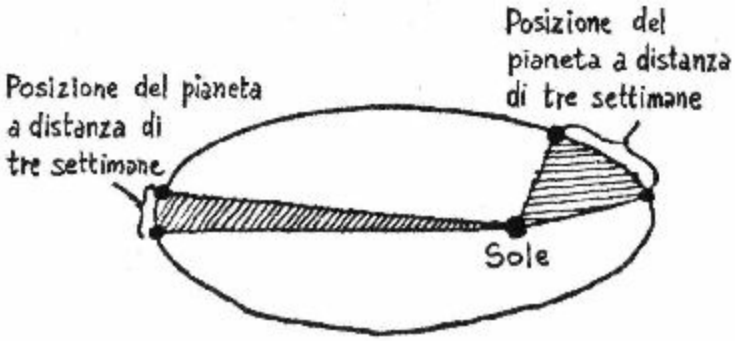


Figura 2

Questa legge dice che il tempo che il pianeta impiega per girare intorno al sole dipende dalla dimensione dell'orbita, e che i tempi variano come la radice quadrata del cubo della dimensione dell'orbita, dove per dimensione dell'orbita si intende il diametro maggiore

dell'ellisse. Keplero aveva così trovato queste tre leggi, che possono essere riassunte dicendo che *l'orbita forma un'ellisse*, che *aree uguali sono percorse in tempi uguali*, e che *il tempo per compiere il giro varia come la potenza tre mezzi della dimensione*, cioè la radice quadrata del cubo della dimensione. Queste tre leggi di Keplero danno una descrizione completa del moto dei pianeti intorno al sole.

La domanda seguente era questa: che cosa fa girare i pianeti intorno al sole? Al tempo di Keplero alcuni rispondevano a questo problema dicendo che dietro ad essi c'erano degli angeli che battendo le ali spingevano i pianeti lungo l'orbita. Come vedrete la risposta non è troppo lontana dal vero. L'unica differenza è che gli angeli stanno in una diversa direzione e che le loro ali spingono verso l'interno.

Allo stesso tempo Galileo stava analizzando le leggi del moto degli oggetti normali che starino sulla terra. Studiando queste leggi e facendo un certo numero di esperimenti per vedere come delle palle scorrono su piani inclinati e come oscillano i pendoli e così via, Galileo scoprì un grande principio chiamato *principio di inerzia*, che è il seguente: se su un oggetto non agisce nessuna forza e se esso si muove con una certa velocità su una linea retta, esso continuerà ad andare con la stessa velocità esattamente sulla stessa retta per sempre. Per quanto questo possa sembrare incredibile a chiunque ha cercato di far rotolare una palla per sempre, se questa idealizzazione è giusta, ossia se non c'è nessuna influenza esterna, come l'attrito del pavimento ecc., la palla continuerebbe a muoversi davvero con velocità uniforme.

Il passo seguente fu fatto da Newton che discusse questo problema: “Quando non va in linea retta, allora che cosa fa?” Egli rispose in questo modo: c'è bisogno di una forza per cambiare in qualsiasi modo una velocità. Per esempio, se state spingendo una palla nella direzione in cui si sta muovendo, essa accelererà. Se vi accorgete che cambia direzione, allora la forza deve essere stata laterale. La forza può essere misurata dal prodotto di due effetti. Quanto cambia la velocità in un piccolo intervallo di tempo? Questo si chiama accelerazione, e quando è moltiplicata per un coefficiente chiamato la massa del corpo, o anche il suo coefficiente di inerzia, le due cose insieme rappresentano la forza. Questa si può misurare. Per esempio, se si ha una pietra attaccata a una corda e la si fa girare in cerchio sopra la testa, ci si accorge che si deve tirare, e la ragione è che, sebbene la velocità non stia cambiando mentre questa gira, cambia la sua direzione; deve quindi esserci una forza che tira perennemente verso l'interno, e questa è proporzionale alla massa. Cosicché se prendiamo due oggetti diversi e facciamo ruotare prima l'uno e poi l'altro intorno alla testa alla stessa velocità e misuriamo le forze nei due casi, troviamo che esse sono diverse nella stessa proporzione in cui sono diverse le masse. Questo è un modo di misurare le masse per mezzo delle forze necessarie a variare la velocità.

Figura 3

Da questo Newton vide che, per prendere un esempio semplice, se un pianeta sta girando intorno al sole, *non occorre nessuna forza per mantenere il suo moto laterale, cioè tangenziale*; se non ci fosse nessuna forza continuerebbe semplicemente a muoversi liberamente. Ma in effetti il pianeta non continua a muoversi liberamente, e più tardi si viene a trovare non dove sarebbe andato se non ci fosse nessuna forza, ma più in giù verso il sole (fig. 3). In altre parole, la sua velocità, il suo moto, è stata piegata verso il sole. Così quello che gli angeli devono fare è battere le ali sempre in direzione del sole.

Il moto, però, che fa andare il pianeta in linea retta non ha nessuna ragione conosciuta. Il motivo per cui le cose continuano a muoversi per sempre non è mai stato trovato; cioè non si conosce l'origine della legge di inerzia. Sebbene gli angeli non esistano, il moto rettilineo uniforme esiste, e per ottenere l'operazione di caduta occorre una forza. Apparve subito chiaro che l'origine della forza era nel sole. In effetti Newton fu capace di dimostrare che l'affermazione che aree uguali sono percorse in tempi uguali è una conseguenza diretta della semplice idea che tutti i cambiamenti di velocità sono diretti esattamente verso il sole, anche nel caso ellittico. Nella prossima lezione potrò farvi vedere in dettaglio come funziona la cosa.

Da questa legge Newton confermò l'idea che la forza è in direzione del sole, e sapendo come i periodi dei diversi pianeti variano con la distanza dal sole, fu possibile determinare come quella forza diventi più debole a distanze diverse. Egli riuscì a determinare che la forza deve variare inversamente al quadrato della distanza.

Fin qui Newton non aveva detto niente di nuovo, perché aveva solo affermato due cose che Keplero aveva già detto in un linguaggio diverso. Una è esattamente equivalente all'affermazione che la forza è in direzione del sole, e l'altra è esattamente equivalente all'affermazione che la forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Poco prima però erano stati visti al telescopio i satelliti di Giove che ruotavano intorno ad esso, quasi come se il tutto costituisse un piccolo sistema solare, in cui i satelliti erano attratti da Giove. Anche la luna è attratta dalla terra esattamente nello stesso modo, e le ruota intorno. Sembrava quasi che ogni cosa fosse attratta da ogni altra, e così si giunse all'affermazione generale che ogni corpo attrae ogni altro corpo. Se è così, la terra deve attirare la luna come il sole attira il pianeta. Ma è risaputo che la terra attira ogni corpo, e difatti voi siete tutti attaccati alle vostre sedie, nonostante desideriate galleggiare per aria. L'attrazione degli oggetti sulla terra era ben conosciuta nei fenomeni di gravitazione, e l'idea di Newton fu che la gravitazione che teneva la luna in orbita fosse la stessa che attirava gli oggetti verso la terra.

È facile valutare di quanto la luna cada in un secondo, perché si conoscono le dimensioni dell'orbita, si sa che la luna ci mette un mese per girare intorno alla terra, e se si calcola la distanza che percorre in un secondo, si può valutare quanto l'orbita lunare è caduta al di sotto della linea retta su cui si sarebbe trovata se non si muovesse come effettivamente si muove. La distanza è 0,135 centimetri. La luna è sessanta volte più lontana dal centro della terra di noi; noi siamo a seimila chilometri dal centro, la luna a trecentomila, cosicché, se la legge dell'inverso del quadrato è giusta, un oggetto alla superficie della terra dovrebbe cadere in un secondo di centimetri 0,135×3600 (il quadrato di 60) perché nell'arrivare fino alla luna la forza è stata indebolita di 60×60 dalla

legge dell'inverso del quadrato. Ora, 0,135×3600 centimetri sono all'incirca 4,9 metri, e già dalle misure di Galileo si sapeva che i corpi cadono sulla superficie della terra di 4,9 metri in un secondo. Questo dunque voleva dire che Newton era sulla strada giusta, e che non si poteva tornare indietro, perché un nuovo fatto, prima totalmente indipendente, il periodo dell'orbita della luna e la sua distanza dalla terra, era connesso a un altro fatto, cioè alla lunghezza dello spazio percorso in un secondo da un corpo che cade sulla superficie della terra. Questa era una verifica straordinaria della validità dell'intuizione di Newton.

Inoltre Newton ottenne numerosi altri risultati. Riuscì a calcolare quella che avrebbe dovuto essere la forma dell'orbita se la legge fosse stata quella dell'inverso del quadrato, e trovò che in effetti era un'ellisse, prendendo, per così dire, due piccioni con una fava. Per giunta un certo numero di fenomeni ebbe una spiegazione ovvia. Il primo era quello delle maree. Le maree erano dovute all'attrazione della luna sulla terra e sulle sue acque. A questo si era già pensato qualche volta in precedenza, ma vi era la difficoltà che se la luna attirava l'acqua facendola diventare più alta dalla parte da cui si trovava la luna stessa, ci sarebbe stata una sola marea al giorno (fig. 4), mentre invece sappiamo che ci sono maree all'incirca ogni dodici ore, cioè due al giorno.

Figura 4

C'era anche un'altra corrente di pensiero che era giunta a un'altra conclusione. Secondo questa teoria, era la terra che veniva tirata via dall'acqua dall'attrazione lunare. Newton fu il primo a comprendere quello che accadeva, e cioè che la forza della luna sulla terra e sull'acqua è la stessa alla stessa distanza e che l'acqua in y è più vicina alla luna, mentre l'acqua in x è più lontana da essa della terra solida. L'acqua è attirata verso la luna più della terra in y e meno in x, di modo che la combinazione di queste due figure produce una doppia marea. In effetti la terra fa esattamente come la luna, cioè si muove in cerchio. Che cosa equilibra la forza della luna sulla terra? Il fatto che mentre la luna percorre un cerchio per equilibrare la forza della terra, anche questa percorre un cerchio,

il cui centro si trova all'interno della terra, e in questo modo bilancia l'attrazione della luna. Ambedue girano intorno al centro comune, cosicché le forze sono bilanciate per la terra, ma l'acqua è attirata dalla luna meno in *x* e più in *y* cosicché sporge da ambedue le parti. In questo modo furono spiegate le maree, e anche il fatto che ce ne fossero due al giorno. Molte altre cose divennero chiare; la terra è rotonda in conseguenza dell'attrazione di tutte le sue parti verso l'esterno, non è però esattamente rotonda perché ruota su sé stessa di modo che la parte più esterna viene spinta un po' in fuori; e così per la stessa ragione il sole e la luna sono rotondi e così via.

Man mano che la scienza si sviluppò e le misure divennero più precise, le prove della legge di Newton divennero più stringenti. Le prime verifiche precise interessarono le lune di Giove. Attraverso accurate osservazioni sul modo in cui ruotavano in lunghi periodi di tempo, si sarebbe dovuto avere la conferma del fatto che tutto andava secondo le previsioni di Newton, ma questo risultò non essere vero. Sembrava che le lune di Giove apparissero qualche volta otto minuti in anticipo e qualche volta otto minuti in ritardo rispetto al tempo calcolato secondo le leggi di Newton. Si osservò che esse erano in anticipo sull'orario quando Giove era vicino alla terra e in ritardo quando esso era lontano, una circostanza assai strana. Roemer,[4] che aveva fiducia nella legge della gravitazione, giunse all'interessante conclusione che ci vuole del tempo perché la luce viaggi dalle lune di Giove alla terra, e che quello che stiamo guardando quando guardiamo le lune non è come esse sono adesso, ma come erano tanto tempo fa, tanto quanto ne ha impiegato la luce per arrivare qui. Quando Giove è vicino a noi occorre meno tempo perché la luce ci giunga, e quando esso è più lontano ci vuole più tempo, cosicché Roemer dovette correggere le osservazioni per le differenze di tempo, e per il fatto che erano in anticipo o in ritardo. In questo modo fu in grado di determinare la velocità della luce e questa fu la prima dimostrazione che essa non è un segnale che si propaga istantaneamente.

Voglio richiamare la vostra attenzione su questo fatto particolare perché esso fa vedere che quando una legge è giusta, essa può essere usata per trovarne un'altra. Se noi abbiamo fiducia in una legge, e qualcosa sembra essere sbagliato, essa può suggerirci un altro fenomeno. Se non avessimo conosciuto la *legge* della gravitazione avremmo impiegato molto più tempo per trovare la velocità della luce, perché non avremmo saputo che cosa ci dovevamo aspettare dai satelliti di Giove. Questo processo si è sviluppato in una valanga di scoperte, ognuna delle quali ha fornito i mezzi per molte altre scoperte; è stato l'inizio di una valanga che si è prolungata per quattrocento anni in un processo continuo, e che sta ancora rotolando giù a gran velocità.

Venne fuori anche un altro problema, cioè che i pianeti non dovevano veramente muoversi lungo ellissi, perché secondo le leggi di Newton essi non sono attratti solo dal sole, ma si attirano anche un po' a vicenda, solo un poco, ma anche questo poco è qualcosa, e altererà leggermente il moto. Giove, Saturno e Urano erano i più grandi pianeti allora conosciuti, e fu calcolata la piccola differenza dell'orbita reale dall'ellisse perfetta di Keplero, causata dall'attrazione degli altri pianeti. Alla fine dei calcoli e delle osservazioni fu notato che Giove e Saturno si muovevano secondo le previsioni, mentre Urano faceva qualcosa di bizzarro. Un'altra occasione in cui le leggi di Newton avrebbero

potuto essere colte in fallo; ma coraggio! Due astronomi, Adams e Leverrier,[5] che fecero questi calcoli indipendentemente e quasi esattamente allo stesso tempo, suggerirono che il moto di Urano fosse dovuto a un pianeta non ancora visto, e scrissero lettere ai rispettivi Osservatori dicendo: “Puntate il vostro telescopio, guardate là e troverete un pianeta.” “Assurdo — disse uno degli Osservatori — questo tipo se ne sta lì con carta e matita e viene a dirci dove trovare un pianeta nuovo.” L'altro Osservatorio era più... beh, l'amministrazione era diversa, e trovarono Nettuno!

Più recentemente, all'inizio del ventesimo secolo, si vide che il moto del pianeta Mercurio non era esattamente giusto. Questo causò un sacco di guai, e non fu spiegato fino a che Einstein non dimostrò che le leggi di Newton erano leggermente imprecise e che dovevano essere modificate.

Il fatto è questo: fino a che punto vale la legge? Si estende anche al di fuori del nostro sistema solare? Nella tavola 1 faccio vedere che la legge della gravitazione è valida su una scala più larga del sistema solare. Questa è una serie di tre fotografie di una cosiddetta stella doppia. Per fortuna nella fotografia c'è una terza stella cosicché potete vedere che esse stanno veramente ruotando e che nessuno ha girato le lastre, cosa che è molto facile nelle fotografie astronomiche. Le stelle stanno effettivamente ruotando, e nella figura 5 potete vedere l'orbita che descrivono. È evidente che si attraggono a vicenda, e che stanno ruotando in un'ellisse nel modo previsto. Sono una successione di posizioni in vari momenti, con un moto orario. Sarete contenti fino a che non noterete, se non ve ne siete già accorti, che il centro non è un fuoco dell'ellisse, ma che è abbastanza lontano.

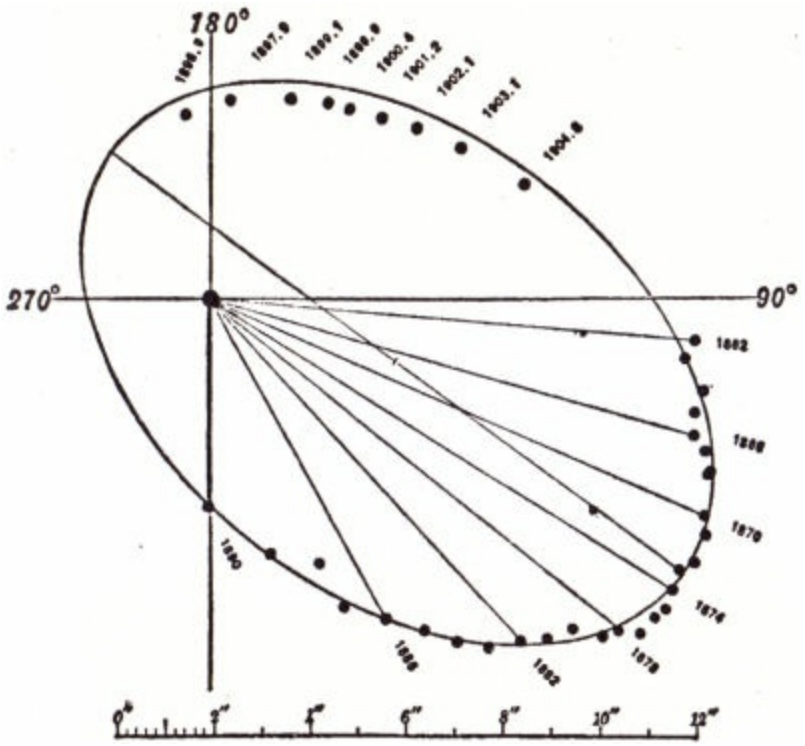


Figura 5

E così c'è qualcosa che non funziona nella legge? No, Dio non ci ha presentato questa orbita frontalmente; essa è inclinata di uno strano angolo. Se prendete un'ellisse di cui avete segnato il fuoco, e tenete il foglio di carta a un certo angolo e guardate la sua proiezione, troverete che il fuoco non deve essere necessariamente il fuoco dell'immagine

proiettata. Sembra così perché l'orbita è inclinata nello spazio.

E per una distanza maggiore? Nella foto, questa forza è tra due stelle; si estende anche a distanze maggiori di due o tre volte il diametro del sistema solare? Nella tavola 2 (*sopra*) abbiamo un oggetto che ha un diametro centomila volte più grande del sistema solare e contiene un numero enorme di stelle. La grande macchia bianca non rappresenta una massa compatta; sembra così per l'incapacità degli strumenti a risolverlo, ma sono invece piccolissimi punti come le altre stelle, ben separati gli uni dagli altri, che non si toccano, e ognuno dei quali va avanti e indietro in questo grande ammasso globulare. È una delle cose più stupende del cielo, meraviglioso come le onde del mare e i tramonti. La distribuzione di questo materiale è perfettamente chiara. Quello che tiene unita questa galassia è l'attrazione gravitazionale delle stelle tra loro. La distribuzione del materiale e il senso della distanza ci permette di trovare all'incirca qual è la legge delle forze tra le stelle... e, naturalmente, viene fuori che è più o meno l'inverso del quadrato. Tuttavia l'accuratezza in questi calcoli e misure è ben lontana dall'essere così grande come per il sistema solare.

La gravità si estende anche più lontano. Quell'ammasso era solo un piccolissimo punto nella grande galassia a spirale mostrata nella tavola 2 (*sotto*), ed è chiaro che anche qui l'oggetto è tenuto insieme da una qualche forza, e l'unico candidato plausibile è la gravitazione. Quando arriviamo a queste dimensioni non abbiamo nessun modo di controllare la legge dell'inverso del quadrato, ma non sembra esserci dubbio che in questi grandi agglomerati di stelle la gravità si estenda anche su queste distanze (queste galassie hanno dimensioni che variano dai cinquanta ai centomila anni luce da una estremità all'altra, mentre la distanza dalla terra al sole è di solo otto minuti luce). Nella tavola 3 (*sopra*) c'è la prova che si estende anche più lontano. Questo è quello che si chiama un ammasso di galassie; sono tutte in un gruppo analogo all'ammasso di stelle, ma questa volta ad essere ammassati sono quei piccoli oggetti della tavola 2 (*sotto*).

Fin qui, questo è un decimo, forse un centesimo della dimensione dell'universo, fino a dove abbiamo una prova diretta che le forze della gravitazione si estendono. Così la gravità della terra non ha alcun limite, anche se potrete leggere sui giornali che qualche cosa esce dal campo della gravitazione. Esso diventa sempre più debole in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza, cioè si divide per quattro ogni volta che si raddoppia la distanza, fino a che si perde nella confusione dei forti campi di altre stelle. Insieme alle stelle che sono nelle sue vicinanze attira altre stelle per formare una galassia, e tutte insieme attirano altre galassie per formare un ammasso di galassie. Così il campo gravitazionale della terra non finisce mai, ma si estingue molto lentamente secondo una legge precisa, probabilmente fino ai confini dell'universo.

La legge della gravitazione è diversa da molte altre leggi. Evidentemente è molto importante nell'economia, nel macchinario dell'universo; ci sono molti casi in cui la gravità ha le sue applicazioni pratiche per quello che concerne l'universo. Tuttavia, e qui sta la sua peculiarità, la conoscenza delle leggi della gravità ha relativamente poche applicazioni in confronto alle altre leggi della fisica. Questo è un caso in cui ho scelto un esempio non tipico. Tra parentesi, è impossibile, scegliendo una qualsiasi cosa, sceglierne una che non sia in qualche modo non tipica: questa è la meraviglia del mondo. Le uniche

applicazioni della conoscenza di questa legge che mi vengono in mente, sono nella prospezione geofisica, nella predizione delle maree, e ora, più modernamente, per stabilire i movimenti dei satelliti e delle sonde che mandiamo su, e così via; e infine, oggi, per calcolare le predizioni delle posizioni dei pianeti, che hanno grande utilità per gli astrologi che pubblicano predizioni sugli oroscopi dei settimanali. È un mondo strano quello in cui viviamo, in cui tutti i progressi del sapere sono usati soltanto per continuare le sciocchezze che sono esistite per duemila anni.

Devo menzionare i casi importanti in cui la gravitazione ha un vero effetto sul comportamento dell'universo, e uno di questi casi è la formazione di nuove stelle. La tavola 3 (*sotto*) è una nebulosa gassosa nella nostra stessa galassia: non è un agglomerato di stelle, ma una massa di gas. Le macchie nere sono punti in cui il gas è stato compresso, o attratto da sé stesso. Forse il fenomeno comincia con qualche tipo di onda d'urto, ma poi procede per effetto della gravità che attira i gas sempre più verso il centro, cosicché grandi masse di gas e polvere si radunano e formano delle palle; e mentre cadono verso il centro, il calore generato dalla caduta le incendia e diventano stelle. Nella tavola 4 abbiamo un'indicazione della creazione di nuove stelle.

È in questo modo che nascono le stelle, quando il gas si comprime troppo per effetto della gravitazione. Ogni tanto, quando esplodono, esse sparpagliano da tutte le parti polvere e gas, e questi si riuniscono di nuovo per formare nuove stelle: sembra quasi il moto perpetuo.

Ho già mostrato che la gravitazione si estende a grandi distanze, ma secondo Newton ogni cosa è attratta da ogni altra. È proprio vero che due oggetti si attraggono? Possiamo fare una prova diretta senza aspettare di vedere se i pianeti si attraggono a vicenda? Una prova diretta fu fatta da Cavendish,[6] con l'apparato che vedete indicato nella figura 6. L'idea era di appendere a una sottilissima fibra di quarzo una sbarra con due sfere, e poi di porre due altre grandi sfere di piombo ai lati, vicino ad esse nella posizione indicata. Per l'attrazione delle sfere si produce una torsione del filo assai piccola perché la forza gravitazionale tra gli oggetti ordinari è veramente molto piccola. Tuttavia fu possibile misurare la forza tra le due sfere; Cavendish chiamò il suo esperimento “pesare la terra”. Con l'insegnamento pedante e minuzioso di oggi non permetteremmo mai ai nostri studenti di dire questo; dovremmo dire “misurare la massa della terra”.

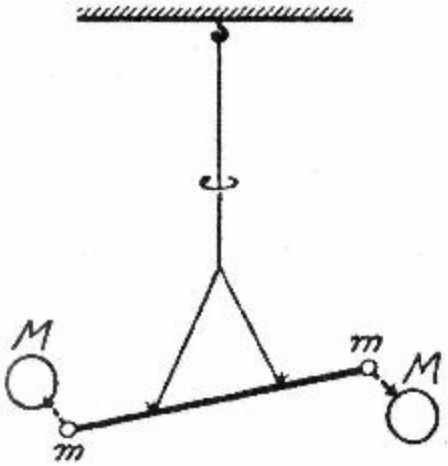


Figura 6

Con un esperimento diretto Cavendish poté misurare la forza, le due masse, e la distanza, e così determinò la costante di gravità *G*. Voi direte: “Va bene, ma qui abbiamo la stessa situazione. Sappiamo qual è la forza di attrazione, e la massa dell'oggetto attratto, sappiamo a che distanza siamo, ma non sappiamo né la massa della terra, né la costante, solo la combinazione.” Misurando la costante, e conoscendo le leggi sull'attrazione della terra, si può determinare la sua massa.

Indirettamente questo esperimento fu la prima determinazione di quanto fosse pesante e massiccia la palla su cui stiamo.

Trovare questo è un'impresa straordinaria, e credo che fu questo il motivo per cui Cavendish chiamò il suo esperimento “pesare la terra” invece di “determinare la costante dell'equazione gravitazionale”. Egli, incidentalmente, stava pesando il sole e ogni altra cosa allo stesso tempo, perché l'attrazione del sole è conosciuta nello stesso modo.

Un'altra verifica molto interessante della legge di gravitazione è determinare se l'attrazione è esattamente proporzionale alla massa. Se l'attrazione è esattamente proporzionale alla massa e la reazione alla forza, i movimenti prodotti dalle forze, cioè i cambiamenti di velocità, sono inversamente proporzionali alla massa. Ciò significa che in un campo gravitazionale due oggetti con massa diversa cambieranno la loro velocità allo stesso modo; o che due oggetti, nel vuoto, qualunque sia la loro massa cadranno a terra nello stesso modo. Questo è il vecchio esperimento di Galileo dalla torre di Pisa. Vuol dire, per esempio, che un oggetto dentro un satellite artificiale ruoterà intorno alla terra sullo stesso tipo di orbita di uno al di fuori, e così apparentemente galleggerà. Il fatto che la forza sia esattamente proporzionale alla massa e che le reazioni siano inversamente proporzionali alla massa ha questa interessantissima conseguenza.

Quanto è preciso questo risultato? Ciò fu misurato con un esperimento da Eötvös,[7] nel 1909, e molto più recentemente e più accuratamente da Dicke,[8] ed è conosciuto con la precisione di una parte su 10 miliardi. Le forze sono esattamente proporzionali alla massa. Com'è possibile misurare con questa precisione? Supponiamo di voler misurare se è vero per l'attrazione del sole. Sapete che il sole ci sta attirando tutti, e attira anche la terra, ma supponiamo che vogliate sapere se l'attrazione è direttamente proporzionale all'inerzia. L'esperimento fu fatto la prima volta con legno di sandalo, poi furono usati piombo e rame ed ora è fatto con polietilene. La terra gira intorno al sole, cosicché le cose sono lanciate fuori dall'inerzia, e lo sono proporzionalmente ad essa. Ma sono attratte dal sole proporzionalmente alla massa, per la legge dell'attrazione. Cosicché se sono attratte dal sole in una proporzione diversa da quella in cui sono lanciate fuori dall'inerzia, una sarà tirata verso il sole, e l'altra sarà sospinta via da esso, di modo che, attaccandole alle estremità opposte di una sbarra appesa a un'altra fibra di quarzo di Cavendish, il sistema girerà verso il sole. In effetti, entro questi limiti di precisione, non gira, per cui sappiamo che l'attrazione del sole è direttamente proporzionale all'effetto centrifugo, che è l'inerzia; per questo la forza di attrazione di un oggetto è direttamente proporzionale al suo coefficiente d'inerzia, cioè, in altre parole, alla sua massa.

Un'altra cosa particolarmente interessante è che la legge dell'inverso del quadrato appare anche in altri casi, per esempio nelle leggi dell'elettricità. Anche l'elettricità

esercita delle forze inversamente proporzionali al quadrato della distanza, questa volta tra cariche, e qualcuno forse crederà che questo abbia qualche significato profondo. Nessuno è mai riuscito a spiegare l'elettricità e la gravità come due aspetti differenti di una stessa cosa; oggi le nostre teorie fisiche, le leggi fisiche, sono una moltitudine di parti diverse e di pezzi che non si collegano molto bene insieme. Non abbiamo una sola struttura da cui tutto è dedotto, ma vari pezzi che non stanno ancora bene insieme. Questo è il motivo per cui in queste lezioni, invece di potervi dire ciò che è *la legge* della fisica, devo parlarvi delle cose che sono comuni alle varie leggi anche se non comprendiamo le connessioni che ci sono fra esse. La cosa strana, tuttavia, è che ci siano delle cose che sono uguali in ambedue. Ora torniamo all'elettricità.

La forza varia inversamente al quadrato della distanza, ma la cosa che colpisce è l'enorme differenza nell'intensità tra le forze elettriche e gravitazionali. Chi vuole unificare l'elettricità e la gravitazione troverà che la prima è molto più potente della seconda, ed è difficile credere che abbiano la stessa origine. Come posso dire che una cosa è più potente di un'altra? Dipende da quanta carica e da quanta massa si hanno. Non si può parlare di quanto sia forte la gravità dicendo “prendo un pezzo di una determinata dimensione”, perché siete *voi* che scegliete la dimensione. Se cerchiamo di prendere una cosa che ci dà la natura — un suo numero puro che non ha nulla a che vedere con centimetri, anni o un'altra delle nostre dimensioni — possiamo fare in questo modo. Se prendiamo una particella fondamentale come un elettrone — ogni altra particella darà un numero diverso, ma tanto per dare una idea diremo elettroni — due elettroni sono due particelle fondamentali, e si respingono in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza a causa dell'elettricità, e si attraggono nello stesso modo a causa della gravità.

Ora ci domandiamo: qual è il rapporto tra la forza gravitazionale e quella elettrica? Questo è illustrato nella figura 7: il rapporto tra la repulsione elettrica e l'attrazione gravitazionale è dato da un numero con quarantadue cifre. Ora, proprio in questo c'è un mistero molto profondo. Da dove potrebbe venir fuori un numero così enorme? Se ci fosse una teoria che spiega l'origine di queste due forze, come potrebbe giustificare questa sproporzione? Quale equazione ha, come soluzione per due tipi di forze, una di attrazione e una di repulsione, un rapporto così fantastico?

Alcuni hanno cercato un rapporto così grande anche altrove, sperando, per esempio, di trovare un altro numero enorme; e, se volete un numero grande, perché non prendere il rapporto fra il diametro dell'universo e quello di un protone? Per quanto possa sembrare strano anch'esso è un numero con quarantadue cifre. E così è stata fatta l'ipotesi interessante che questo rapporto sia uguale a quello tra la dimensione dell'universo e il diametro del protone. Ora l'universo si sta espandendo col tempo, e ciò significa che anche la costante gravitazionale sta cambiando; sebbene questa sia una possibilità, non vi è però alcuna evidenza che indichi che questo avvenga realmente.

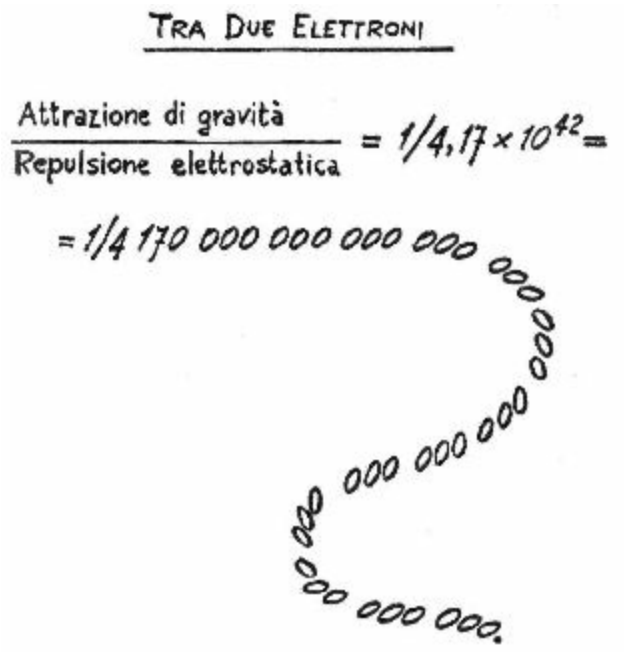


Figura 7

Anzi, ci sono varie indicazioni parziali che la costante gravitazionale non è cambiata in quel modo, e così questo numero spaventoso rimane un mistero.

Per finire con la teoria della gravitazione, devo dire ancora due cose. La prima è che Einstein dovette modificare le leggi della gravitazione secondo i suoi princìpi di relatività. Il primo dei princìpi era che "*x*" non può avvenire immediatamente, mentre la teoria di Newton diceva che la forza era istantanea. E così Einstein dovette introdurre nelle leggi di Newton delle modifiche i cui effetti sono però molto piccoli. Uno di questi è che, siccome la luce ha energia, e l'energia è equivalente alla massa e tutte le masse cadono, così anche la luce deve cadere, ciò che significa che la luce che passa vicino al sole è deviata, come effettivamente è stato verificato. Anche la forza della gravitazione è leggermente modificata nella teoria di Einstein, cosicché la legge è lievemente cambiata, di quel tanto da giustificare la piccola irregolarità trovata nel movimento di Mercurio.

Infine, in connessione con le leggi della fisica su piccola scala, abbiamo trovato che il comportamento della materia a questa scala obbedisce a leggi molto diverse da quelle che si hanno su grande scala. Sorge quindi il problema seguente: come si comporta la gravità su piccola scala? Questa si chiama *teoria quantistica della gravità*, che però oggi non è stata ancora formulata in maniera soddisfacente. Non si è ancora riusciti a fare una teoria che sia in accordo con i princìpi di indeterminazione e con quelli della meccanica quantistica.

Voi mi direte: "D'accordo, lei ci ha detto quello che succede, ma che cos'è la gravità? da dove viene, e come fa? Ci vuol dire che un pianeta guarda il sole, vede quanto è distante, calcola l'inverso del quadrato della distanza e poi decide di muoversi secondo quella legge?" In altre parole, sebbene io abbia enunciato la legge matematica, non ho fatto alcun cenno al suo meccanismo. Discuterò la possibilità di fare questo nella prossima lezione, "La relazione tra matematica e fisica".

Alla fine di questa lezione, vorrei sottolineare certe caratteristiche che la gravità ha in comune con altre leggi a cui abbiamo accennato. Prima di tutto, essa è matematica nella sua espressione, e questo è vero anche per le altre. Inoltre non è esatta; Einstein la

dovette modificare e sappiamo che non è ancora del tutto a posto perché dobbiamo ancora metterci dentro la teoria dei quanti. Questo vale per tutte le altre nostre leggi; esse non sono esatte. C'è sempre un margine di mistero, un punto in cui resta ancora qualcosa da fare. Questa può o non può essere una proprietà della natura, ma è certamente comune a tutte le leggi, così come le conosciamo oggi. Forse si tratta solo di mancanza di conoscenza.

Ma il fatto più impressionante è che la gravità è semplice: è facile enunciare i princìpi in maniera completa senza lasciare nessuna incertezza. È semplice e perciò è meravigliosa. È semplice nel suo schema; non voglio dire che sia semplice nella sua azione (i moti dei vari pianeti e le perturbazioni dell'uno e dell'altro possono essere assai complicati da calcolare, e seguire come si muovono tutte quelle stelle in un ammasso globulare va ben al di là delle nostre possibilità). La legge è cioè complicata nelle sue azioni, ma il disegno di base, e la struttura che sta sotto il tutto, è semplice. Questo è comune a tutte le nostre leggi; risultano essere semplici, anche se nelle loro effettive azioni sono complesse.

E infine viene l'universalità della legge gravitazionale, e il fatto che essa si estende su distanze così enormi. Newton, occupandosi del sistema solare, *poté* predire quello che sarebbe successo nell'esperimento di Cavendish, dove il piccolo modello del sistema solare, due sfere che si attraevano, doveva essere ingrandito dieci milioni di volte per diventare il sistema solare. E poi, ingrandendo quel modello ancora dieci milioni di volte, troviamo galassie che si attraggono esattamente con la stessa legge. La natura usa solo i fili più lunghi per tessere i suoi disegni, di modo che ogni piccolo pezzo di stoffa rivela lo schema dell'intera tappezzeria.

Capitolo 2.
La relazione tra matematica e fisica

Quando si pensa alle applicazioni della matematica alla fisica, è perfettamente naturale credere che la matematica sarà utile quando sono coinvolti grandi numeri in situazioni complesse. In biologia, per esempio, l'azione di un virus su un batterio non è matematica. Se si osserva al microscopio un piccolo virus che si muove, si vede che certe volte trova un punto su un batterio di forma irregolare — hanno tutti forma diversa — e vi spinge dentro il suo DNA, mentre altre volte questo non avviene. Però, se facciamo l'esperimento con milioni e milioni di batteri e di virus, possiamo imparare molto su questi ultimi prendendo delle medie. Possiamo usare la matematica nel fare la media, per vedere quali nuovi caratteri i virus sviluppino nei batteri, e con quale percentuale; in questo modo possiamo studiare la genetica, le mutazioni e così via.

Per prendere un esempio più semplice, immaginate un'enorme scacchiera per giocare a dama. L'effettiva operazione di una qualsiasi mossa singola non è matematica (o per lo meno la sua matematica è molto semplice). Ma potreste immaginare che su una scacchiera immensa, con moltissime pedine, si potrebbe fare un'analisi delle mosse migliori, o delle mosse buone o di quelle cattive, con un ragionamento profondo che richiederebbe che qualcuno si fosse messo li e ci avesse pensato attentamente. Questa allora diventa matematica e implica il ragionamento astratto. Un altro esempio è l'uso dei calcolatori. Se avete un interruttore che è aperto o chiuso, non c'è niente di molto matematico, sebbene i matematici amino cominciare da lì i loro ragionamenti. Ma per calcolare che cosa farà un sistema molto grande con i suoi complicati circuiti, c'è bisogno della matematica.

Vorrei dire subito che la matematica ha un'applicazione importantissima in fisica nella discussione di fenomeni dettagliati in situazioni complicate, quando si conoscano le regole fondamentali del gioco. Questo è un punto cui dedicherei la maggior parte del tempo se stessi parlando solo della relazione della matematica e della fisica. Ma poiché questa fa parte di una serie di conferenze sul carattere della legge fisica, non ho tempo per discutere quello che accade in situazioni complicate, e passerò subito invece a un altro problema, cioè il carattere delle leggi fondamentali.

Se torniamo al nostro gioco di dama, le leggi fondamentali sono quelle secondo cui si muovono le pedine. La matematica può essere applicata nella situazione complessa per prevedere qual è una buona mossa da fare in una determinata circostanza. Però occorre ben poca matematica a causa del carattere fondamentalmente semplice delle leggi di base, che in questo caso possono essere espresse semplicemente in italiano.

La cosa strana della fisica è che anche per formulare le leggi fondamentali abbiamo bisogno della matematica. Darò due esempi, uno in cui non ne abbiamo bisogno, e uno in cui invece ne abbiamo bisogno. Primo: c'è una legge in fisica chiamata legge di Faraday,

che dice che nell'elettrolisi la quantità di materiale che è depositata è proporzionale alla corrente e al tempo in cui passa la corrente. Questo significa che la quantità di materiale depositato è proporzionale alla carica che attraversa il sistema. Tutto questo sembra molto matematico, ma quello che sta effettivamente accadendo è che gli elettroni che percorrono il filo portano ciascuno una carica. Per prendere un esempio particolare, per depositare un dato atomo è necessario che passi un elettrone, cosicché il numero di atomi depositati è necessariamente uguale al numero di elettroni che passano, dunque proporzionale alla carica che scorre lungo il filo. Così questa legge che sembra matematica non ha come sua base niente di molto profondo, e non richiede nessuna reale conoscenza di matematica. Che per depositare un atomo sia necessario un elettrone è in un certo senso una affermazione matematica, ma non è certamente il tipo di matematica di cui sto parlando qui.

D'altra parte, prendete la legge di Newton per la gravitazione, che ha gli aspetti che ho discusso la volta scorsa. Vi ho dato l'equazione

$$F = G\frac{mm'}{r^2}$$

proprio per rendervi evidente la velocità con cui i simboli matematici possono trasmettere l'informazione. Ho detto che la forza è direttamente proporzionale al prodotto delle masse dei due oggetti, e inversamente al quadrato della distanza tra loro. Ho anche detto che i corpi reagiscono alle forze cambiando di velocità, o cambiando il loro moto nella direzione della forza, proporzionalmente alla forza e inversamente alle loro masse. Queste sono certo parole esatte e non era strettamente necessario che scrivessi l'equazione. Ciò nonostante è in un certo senso matematica, e ci domandiamo come questa possa essere una legge fondamentale. Che cosa fa il pianeta? Guarda il sole, vede quanto è distante e decide di calcolare sulla sua addizionatrice interna l'inverso del quadrato della distanza, che gli dice come si deve muovere? Questa non è certamente una spiegazione del meccanismo della gravitazione! Potreste voler guardare più in là, e varie persone hanno cercato di farlo. A Newton fu detto, a proposito della sua teoria: “Ma non vuol dire niente, non ci dice niente.” Ed egli rispose così: “Vi dice *come* si muove. Questo dovrebbe esser sufficiente. Vi ho detto come si muove, e non perché.” Ma la gente spesso è insoddisfatta senza un meccanismo, e io vorrei descrivere una teoria, fra le tante che sono state inventate, proprio del tipo che potreste volere voi. Questa teoria suggerisce che l'effetto è il risultato di un gran numero di azioni, ciò che spiegherebbe perché è matematica.

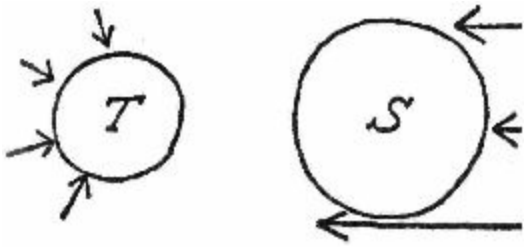


Figura 8

Supponiamo che nell'universo, in ogni parte, ci siano moltissime particelle, che ci

attraversano a grandissima velocità. Esse arrivano ugualmente da tutte le direzioni, passandoci vicino, e ogni tanto ci colpiscono come in un bombardamento. Noi e il sole siamo praticamente trasparenti per loro, praticamente ma non completamente, e alcune di esse ci colpiscono. Guardate dunque quello che succederebbe (fig. 8). *S* è il sole e *T* la terra. Se non ci fosse il sole, le particelle bombarderebbero la terra da tutte le parti, producendo con i loro urti degli impulsi. Questo non farebbe muovere la terra in una direzione particolare perché esse arriverebbero tanto da una parte come dall'altra, dall'alto come dal basso. Invece, essendoci il sole, le particelle che arrivano da quella direzione sono in parte assorbite dal sole, perché alcune lo colpiscono ma non lo attraversano. Perciò il numero di quelle che vengono dalla direzione del sole verso la terra è minore di quello delle particelle che vengono dalle altre parti, perché trovano un ostacolo, il sole. È facile vedere che più lontano è il sole, più piccola è la proporzione delle particelle provenienti da tutte le direzioni che vengono assorbite. Il sole apparirà più piccolo, anzi più piccolo proprio inversamente al quadrato della distanza. Perciò sulla terra ci sarà un impulso verso il sole che varia inversamente con il quadrato della distanza. E questo sarà il risultato di un gran numero di operazioni molto semplici, cioè dei colpi, uno dopo l'altro da tutte le direzioni. Per questo la stranezza della relazione matematica sarà molto ridotta, perché l'operazione è molto più semplice che il calcolare l'inverso del quadrato della distanza. Questo modello, con le particelle che colpiscono da tutte le direzioni, fa il calcolo per voi.

L'unico guaio in questo schema è che, per altre ragioni, non funziona. Ogni teoria che si inventa deve essere analizzata in *tutte* le sue possibili conseguenze, per vedere se predice qualche altra cosa, e questo schema predice invero qualcos'altro. Se la terra si muove, più particelle la colpiranno davanti che dietro. (Se correte nella pioggia, una maggiore quantità di acqua vi colpisce la faccia che la parte posteriore della testa, perché state correndo verso la pioggia.) Così, se la terra si muove, essa corre contro le particelle che vengono verso di essa, e via da quelle che la rincorrono dal di dietro. Così più particelle la colpiranno dalla parte anteriore che da quella posteriore, e ci sarà una forza che si oppone al suo moto. Questa forza rallenterebbe la terra nella sua orbita, e il suo moto non sarebbe certo durato i tre o quattro miliardi di anni (almeno) durante i quali essa ha ruotato intorno al sole. Così questa è la fine della teoria. “Era piuttosto buona — voi direte — e per un po' ci eravamo liberati della matematica. Forse noi potremmo inventarne una migliore.” Può darsi che possiate, perché nessuno conosce la risposta definitiva, ma finora, dal tempo di Newton, nessuno ha ancora inventato un'altra descrizione teorica del meccanismo matematico che sta dietro a questa legge che non dica la stessa cosa, o che non renda la matematica più difficile, o che non predica dei fenomeni errati. Oggigiorno, dunque, non esiste nessun altro modello della teoria della gravitazione in un'altra forma che non sia quella matematica.

Se questa fosse l'unica legge a carattere matematico, la cosa sarebbe curiosa e anche un po' fastidiosa. Ma quello che veniamo a scoprire è diverso: più investighiamo, più leggi troviamo, più profondamente penetriamo nella natura, più la malattia persiste: ognuna delle nostre leggi è un'affermazione puramente matematica, in un linguaggio piuttosto astruso e complesso. L'enunciato di Newton della legge della gravitazione è una

matematica abbastanza semplice. Diventa sempre più astrusa e difficile a mano a mano che andiamo avanti. Perché? Non ne ho la più pallida idea. Adesso il mio scopo è solamente di parlarvi di questo fatto. In questa lezione mi propongo solo di mettere in evidenza il fatto che è impossibile spiegare onestamente e fare apprezzare le bellezze delle leggi della natura a chi non ha una profonda conoscenza della matematica. Mi dispiace, ma sembra proprio essere così.

Voi mi potreste dire: “Allora, se non c'è nessuna spiegazione della legge, almeno ci dica *che cos'è* la legge. Perché non dirla a parole invece che a simboli? La matematica è solo un linguaggio, e noi vogliamo poterlo tradurre.” In effetti, con pazienza, posso farlo, e credo di averlo in parte fatto. Potrei andare un po' oltre e spiegare più dettagliatamente che l'equazione significa che se la distanza è doppia, la forza è un quarto e così via: potrei cambiare tutti i simboli in parole. In altre parole potrei essere gentile con i profani che se ne stanno lì ad aspettare che io spieghi loro qualcosa. Ci sono autori che si sono fatti una fama per la loro abilità nello spiegare al profano nel suo linguaggio questi argomenti difficili e astrusi. Così il profano passa da un libro all'altro nella speranza di evitare le complessità che alla fine subentrano, anche con il miglior espositore di questo tipo. Ma più si legge, più la confusione aumenta e ci si trova di fronte a un'affermazione complicata dopo l'altra, una cosa difficile da capirsi dopo l'altra, tutte apparentemente slegate fra di loro. Il tutto diventa oscuro, e il lettore spera che forse in un altro libro ci sarà una spiegazione... L'autore ce l'ha quasi fatta, forse un altro ce la farà del tutto.

Ma io non credo che sia possibile, perché la matematica *non* è semplicemente un'altra lingua. La matematica è un linguaggio più il ragionamento; un linguaggio più la logica, è cioè uno strumento per ragionare. In effetti è una grande raccolta dei risultati dell'attento ragionamento di varie persone. Per mezzo di essa è possibile collegare un'affermazione a un'altra. Per esempio, posso dirvi che la forza è diretta verso il sole, e posso anche dirvi, come ho già fatto, che il pianeta si muove in modo che, se traccio una retta dal sole al pianeta, e ne traccio un'altra dopo un tempo definito, come tre settimane, l'area che è percorsa dal pianeta è esattamente uguale a quella che sarà percorsa nelle tre settimane seguenti, e così via mentre ruota intorno al sole. Posso spiegare in dettaglio queste affermazioni, ma non posso spiegare perché dicono la stessa cosa. Le complessità evidentemente enormi della natura, con tutte le sue strane leggi e regole, ognuna delle quali vi è stata attentamente spiegata, sono in realtà legate in maniera molto stretta. Tuttavia se non apprezzate la matematica non potete capire, tra la grande varietà di fatti, che la logica vi permette di passare da uno all'altro.

Sembrerebbe incredibile che io possa dimostrare che aree uguali sono percorse in tempi uguali se le forze sono dirette verso il sole. Così, se me lo permettete, vi darò una dimostrazione per farvi vedere che le due cose sono veramente equivalenti, in modo da farvi comprendere più che il solo enunciato delle leggi.

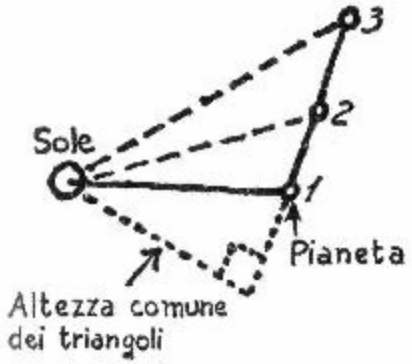


Figura 9

Vi farò vedere che le due leggi sono collegate in modo che il solo ragionamento vi porterà dall'una all'altra, e che la matematica è solo un ragionamento organizzato. Allora comprenderete la bellezza della relazione fra le due affermazioni. Dimostrerò che se le forze sono dirette verso il sole, aree uguali sono spazzate in tempi uguali.

Cominciamo dal sole e da un pianeta (fig. 9), e immaginiamo che a un certo momento il pianeta sia nella posizione 1. Esso si sta muovendo in modo tale, che, diciamo, un secondo più tardi esso è arrivato nella posizione 2; se il sole non esercitasse una forza sul pianeta, questo, per il principio d'inerzia di Galileo, continuerebbe ad andare in linea retta. Così, dopo lo stesso intervallo di tempo, nel secondo seguente esso percorrerebbe esattamente la stessa distanza, e arriverebbe nella posizione 3. Cominciamo a dimostrare che se la forza *non* c'è, aree uguali sono percorse in tempi uguali. Vi ricordo che l'area del triangolo è metà della base per l'altezza, e che l'altezza è la distanza del vertice dalla base. Se il triangolo è ottuso (fig. 10), allora l'altezza è la verticale *AD* e la base è *BC*. Ora confrontiamo le aree che sarebbero percorse se il sole non esercitasse nessuna forza (fig. 9). Le due distanze 1-2 e 2-3 sono uguali, ricordatelo.

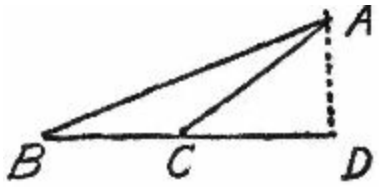


Figura 10

Resta da vedere se le due aree sono uguali. Considerate il triangolo formato dal sole e dai due punti 1 e 2. Qual è la sua area? È la base 1-2, moltiplicata per metà dell'altezza, cioè della perpendicolare dalla base a *S*. E per l'altro triangolo, quello del moto da 2 a 3? La sua area è la base 2-3 per la metà dell'altezza da *S*. Questi due triangoli hanno la stessa altezza, e, come ho fatto notare, la stessa base, per cui hanno la stessa area. Fin qui tutto bene. Se non ci fosse nessuna forza esercitata dal sole, aree uguali sarebbero percorse in tempi uguali. Ma la forza del sole *c'è*. Durante l'intervallo 1-2-3 il sole sta tirando e cambiando il moto in varie direzioni verso sé stesso. Per avere una buona approssimazione prenderemo la posizione centrale, o posizione media, in 2, e diremo che tutto l'effetto durante l'intervallo 1-3 è stato di cambiare il moto di una certa quantità nella direzione della linea 2-*S* (fig. 11).

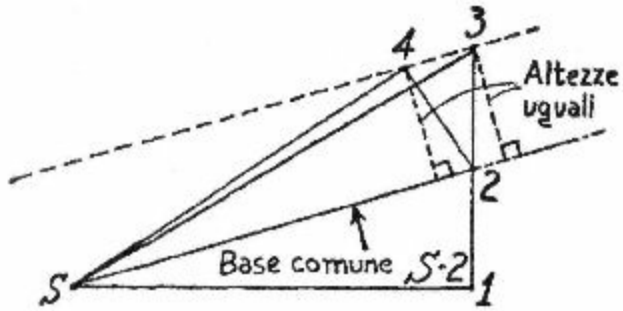


Figura 11

Ciò significa che le particelle che si sarebbero mosse sulla retta 1-2, e, se non ci fosse stata forza avrebbero continuato a muoversi sulla stessa linea nel secondo seguente, a causa dell'influenza del sole hanno alterato il loro moto di una certa quantità parallela alla retta 2-*S*; il moto seguente è dunque una composizione di quello che il pianeta vorrebbe fare e del cambiamento che gli è stato impresso dall'azione del sole. Così in effetti il pianeta non va a finire nella posizione 3, ma nella posizione 4. Ora vorremmo confrontare le aree dei triangoli *S*23 e *S*24, e vi farò vedere che sono uguali. Hanno la stessa base *S*-2. Hanno anche la stessa altezza? Certamente, perché sono compresi fra rette parallele. La distanza da 4 alla retta *S*-2 è uguale alla distanza da 3 alla retta *S*-2 (prolungata). Perciò l'area del triangolo *S*24 è uguale a quella di *S*23. Ho dimostrato prima che *S*12 e *S*23 hanno area uguale, così sappiamo ora che *S*12 = *S*24. Così nel moto orbitale effettivo dei pianeti le aree percorse nel primo secondo sono uguali a quelle percorse nel secondo seguente. Perciò, col ragionamento, possiamo vedere una connessione tra il fatto che la forza è in direzione del sole e il fatto che le aree sono uguali. Non è ingegnoso? L'ho preso direttamente da Newton: viene tutto dai *Principia*, il diagramma e il resto. Solo le lettere sono diverse, perché egli scriveva in latino, mentre io ho usato i numeri arabi.

Nel suo libro Newton dava tutte le sue dimostrazioni in forma geometrica. Oggi non usiamo questo tipo di ragionamento, ma piuttosto un ragionamento analitico con simboli. Richiede una notevole abilità tracciare i triangoli giusti, accorgersi delle aree, e calcolare come si deve fare. Ci sono però stati dei perfezionamenti nei metodi di analisi, che oggi sono più veloci e più efficienti. Voglio farvi vedere come procede la dimostrazione con la notazione della matematica moderna, dove per dedurre il risultato non si fa niente altro che scrivere un sacco di simboli.

Vogliamo parlare della velocità areolare, cioè la velocità a cui cambia l'area, e rappresenteremo questo con una *A* con un punto sopra. L'area cambia quando il raggio gira, ed è la componente della velocità perpendicolare al raggio, moltiplicata per il raggio, che ci dà la velocità areolare. Così questo è il prodotto dei vettori che rappresentano la distanza radiale e la velocità, ossia la velocità con cui cambia la distanza.

$$\dot{A} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}.$$

Il problema è se la velocità areolare varia essa stessa. Il principio è che la velocità areolare non dovrebbe cambiare, perciò deriviamo di nuovo la relazione precedente; tutto ciò si riduce a un piccolo trucco di mettere i punti al posto giusto, nient'altro.

Dovete imparare i trucchi, che sono solo una serie di regole che sono state trovate e

che sono molto utili per questo genere di cose. E allora scriviamo:

$$\ddot{A} = \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}/m$$

Il primo termine dice di prendere la componente della velocità perpendicolare alla velocità. Questa è zero perché la velocità è parallela a sé stessa. L'accelerazione, che è la derivata seconda, r con due punti, ossia la derivata della velocità, è la forza divisa per la massa.

Questo ci dice che la velocità con cui cambia la velocità areolare è la componente della forza perpendicolare al raggio. Se la forza è nella direzione del raggio,

$$\mathbf{r} \times \mathbf{F}/m = 0, \text{ cioè, } \ddot{A} = 0$$

come aveva detto Newton. Cioè non c'è nessuna forza perpendicolare al raggio, e questo significa che la velocità areolare non cambia. Questo esempio illustra la potenza delle notazioni dell'analisi moderna. Newton sapeva più o meno fare questo, con notazioni leggermente diverse; ma scrisse tutto in forma geometrica perché i suoi lavori fossero leggibili dai lettori dell'epoca. Inventò il calcolo differenziale, che è il tipo di matematica che ho illustrato in questo esempio.

Abbiamo qui una buona illustrazione del rapporto tra matematica e fisica. Quando i problemi in fisica diventano troppo difficili, ci rivolgiamo spesso ai matematici, che possono già aver studiato cose simili e possono aver già preparato una linea di ragionamento che noi possiamo seguire. Qualche volta essi possono non averla preparata, nel quale caso siamo noi che dobbiamo inventare una nuova linea di ragionamento, che poi passiamo ai matematici. Chiunque compie un ragionamento deduttivo su qualche problema contribuisce ad allargare la conoscenza della logica; i matematici poi, astraendo i caratteri generali di questi ragionamenti, creano nuovi rami della matematica, che è un metodo per passare da una serie di affermazioni a un'altra. È evidentemente utile in fisica, perché ci sono diversi modi di dire la stessa cosa, e la matematica ci permette di sviluppare le conseguenze, di analizzare le situazioni, e di cambiare le leggi in diversi modi per collegare le varie affermazioni. In effetti quello che un fisico sa è molto poco: egli deve solo ricordare le regole per andare da un punto all'altro ed è a posto, perché tutte le varie affermazioni sui tempi uguali, sulla forza che è nella direzione del raggio, e così via sono tutte interconnesse attraverso il ragionamento.

Sorge a questo punto un problema interessante: esiste un punto particolare da cui cominciare a dedurre tutto? C'è in natura un qualche particolare disegno o ordine dal quale possiamo capire che una serie di affermazioni è più fondamentale mentre un'altra ne è la conseguenza? Ci sono due modi di guardare la matematica, e per gli scopi di questa lezione li chiamerò la tradizione babilonese e la tradizione greca. Nelle scuole babilonesi di matematica lo studente imparava un argomento facendo un gran numero di esempi fino a che scopriva la regola generale. Egli conosceva anche una certa quantità di geometria, molte proprietà dei cerchi, il teorema di Pitagora, le formule per le aree dei cubi e dei triangoli, e inoltre un certo numero di procedimenti logici per passare da un

argomento all'altro. Aveva anche a sua disposizione tavole numeriche per risolvere equazioni abbastanza complicate; in una parola, tutto era indirizzato a risolvere i problemi. Euclide, invece, scoprì che c'era un modo in cui tutti i teoremi della geometria potevano essere derivati da un insieme di assiomi particolarmente semplici. L'atteggiamento babilonese — o quella che io chiamo matematica babilonese — consiste nel conoscere tutti i vari teoremi e molte delle connessioni tra di loro, senza però comprendere pienamente che tutti potrebbero dedursi da un piccolo numero di assiomi. La matematica più moderna si concentra sugli assiomi e le dimostrazioni entro una cornice ben definita di convenzioni su quello che è e su quello che non è accettabile come assioma. La geometria moderna parte da assiomi simili a quelli di Euclide, modificati per renderli più perfetti, e poi dimostra come il sistema si ricavi deduttivamente. Per esempio, non ci si aspetta che un teorema come quello di Pitagora (la somma delle aree dei quadrati costruiti sui cateti di un triangolo retto è uguale all'area del quadrato costruito sull'ipotenusa) sia un assioma. D'altra parte, da un altro punto di vista della geometria, quello di Descartes, il teorema di Pitagora è un assioma.

La prima cosa che dobbiamo accettare, dunque, è che anche in matematica si può partire da punti diversi. Se tutti questi vari teoremi sono interconnessi attraverso il ragionamento, non si può veramente dire “questi sono gli assiomi più fondamentali”, perché se invece vi dicessero che quelli fondamentali sono altri, potreste fare il ragionamento nell'altro senso. È come un ponte con moltissimi pezzi e connessioni sovrabbondanti: se dei pezzi cadono, lo potete rimettere insieme in un altro modo. Il metodo matematico di oggi è di cominciare da alcune idee particolari che sono scelte come assiomi secondo qualche convenzione, e poi di costruire la struttura a partire da lì. L'idea che io ho chiamato babilonese è quella di dire: “So questo, so quello e forse so anche quest'altro, e ricavo tutto da qui. Domani posso dimenticarmi che questo è vero, ma ricordarmi che qualche altra cosa è vera, e così posso ricostruire di nuovo tutto da capo. Non sono mai completamente sicuro di dove devo cominciare e di dove devo finire, però in ogni momento mi ricordo abbastanza risultati, così che se anche la memoria mi fallisce e qualche pezzo cade, posso rimettere tutto a posto.”

Il metodo di partire sempre dagli assiomi non è il modo più efficiente per ottenere dei nuovi teoremi. Se volete ricordare solo poche cose, cioè i pochi assiomi, potrete sempre, a partire da essi, arrivare ai risultati voluti, ma è però molto più efficiente farlo nell'altro modo. Decidere quali sono i migliori assiomi non è necessariamente il modo migliore per muoversi in questo campo. In fisica abbiamo bisogno del metodo babilonese, e non di quello euclideo o greco: vorrei spiegare perché.

Il problema del metodo euclideo è di rendere in qualche modo gli assiomi più interessanti o più importanti. Ma nel caso della gravitazione, per esempio, la domanda che ci stiamo ponendo è questa: è più importante, più fondamentale, cioè è un assioma migliore dire che la forza è in direzione del sole, o che aree uguali sono spazzate in tempi uguali? Da un certo punto di vista la prima affermazione è migliore: se dico come sono le forze, posso trattare un sistema con molte particelle in cui le orbite non sono più ellissi, perché la conoscenza della forza mi dice l'attrazione di una sull'altra. In questo caso il teorema delle aree uguali cade in difetto, per cui sono portato a credere che la legge della

forza debba essere presa come assioma invece dell'altra. D'altra parte, il principio dell'uguaglianza delle aree può essere generalizzato, per un sistema con un gran numero di particelle. È abbastanza complicato da dire, e non proprio bello come l'affermazione originaria sulle aree uguali, ma è ovviamente suo figlio. Prendete un sistema con un gran numero di particelle, per esempio Giove, Saturno, il sole e molte stelle, che tutte interagiscono le une sulle altre, e guardatelo da lontano, proiettato su un piano (fig. 12).

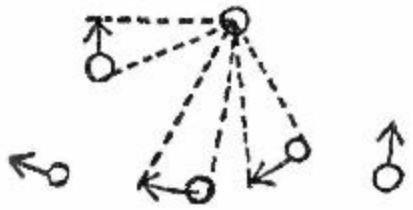


Figura 12

Le particelle si muovono tutte in varie direzioni, e noi prendiamo un punto qualunque e calcoliamo l'area che è spazzata dal raggio che va da questo punto a ognuna delle particelle, in questo calcolo le masse più pesanti contano di più: se una particella pesa il doppio di un'altra, allora la sua area conterà due volte tanto. Così contiamo ciascuna delle aree spazzate in proporzione alla massa che la sta spazzando, le sommiamo insieme, e il *totale risultante non cambia nel tempo*. Questo totale si chiama *momento angolare* (della quantità di moto), e questa legge si chiama conservazione del momento angolare. Conservazione significa soltanto che non cambia. Una delle conseguenze è la seguente: immaginate una grande quantità di stelle che cadono insieme per formare una nebulosa o una galassia. All'inizio sono molto distanti dal centro, e si muovono lentamente in modo da spazzare piccole aree. Mano a mano che si avvicinano, le distanze dal centro si accorciano, e quando saranno molto vicine, i raggi saranno molto piccoli, e così, per spazzare in ogni secondo la stessa area, dovranno muoversi assai più in fretta. Allora vedrete che quanto più le stelle si avvicinano, tanto più rapidamente si metteranno a ruotare, il che ci permette di capire qualitativamente la forma delle galassie spirali. Allo stesso modo possiamo comprendere come gira su sé stesso un pattinatore. Comincia con la gamba in fuori, muovendosi adagio, e a mano a mano che tira in dentro la gamba gira più in fretta. Quando la gamba è in fuori essa spazza una certa area al secondo, e quando rientra, essa deve girare molto più in fretta per produrre la stessa area. Veramente, non ho dimostrato questo nel caso del pattinatore: egli usa la forza muscolare, mentre la gravità è una forza diversa. Eppure *è* vero anche per il pattinatore.

Ora sorge un problema: spesso da una parte della fisica, come la legge della gravitazione, possiamo dedurre un principio che è molto più generale di quanto non sembri dal modo in cui è stato dedotto. Questo non accade in matematica dove i teoremi non saltano fuori da dove non dovrebbero essere. In altre parole, se dicessimo che il postulato della fisica è la legge dell'area uguale che vale per la gravitazione, potremmo dedurre la conservazione del momento angolare, ma solo per la gravitazione. Eppure scopriamo sperimentalmente che la conservazione del momento angolare è un principio molto più generale. Newton aveva altri postulati attraverso i quali poteva ottenere la legge

più generale della conservazione del momento angolare. Queste leggi newtoniane, però, erano tutte sbagliate: non c'è nessuna forza, è tutto un sacco di storie, le particelle non hanno orbite ecc. Eppure l'analogo, l'esatta trasformazione di questo principio sulle aree e la conservazione del momento angolare, è vero. Essa funziona per i moti atomici nella meccanica quantistica, e per quello che possiamo dire è ancora esatta oggi. Abbiamo dunque questi grandi princìpi che abbracciano leggi diverse, ma se prendiamo la deduzione troppo seriamente, e crediamo che una sia valida solo perché lo è un'altra, non possiamo capire le interconnessioni dei diversi rami della fisica. Un giorno, quando la fisica sarà completa e sapremo tutte le leggi, forse potremo cominciare dagli assiomi, e senza dubbio qualcuno studierà un modo particolare di farlo in modo che tutto possa essere dedotto. Ma fino a che non sappiamo tutte le leggi, possiamo usarne alcune per congetturare dei teoremi che hanno una validità più grande di quanto non appaia dalla dimostrazione. Per capire la fisica bisogna sempre mantenere un esatto equilibrio, e avere in mente tutte le varie proposizioni e le loro interrelazioni, perché le leggi spesso valgono oltre il campo delle loro deduzioni. Solo il giorno in cui tutte le leggi saranno conosciute, questo non avrà più importanza.

Un'altra cosa, molto strana e interessante nella relazione tra matematica e fisica è il fatto che con argomentazioni matematiche si può far vedere che è possibile cominciare da molti punti apparentemente diversi, e tuttavia trovare la stessa cosa. Questo è piuttosto chiaro. Se avete degli assiomi, potete usare al loro posto dei teoremi; ma effettivamente le leggi fisiche sono costruite in maniera così delicata che enunciati diversi ma equivalenti hanno caratteri qualitativamente molto diversi, e proprie questo li rende interessanti. Per illustrare questo enuncerò la legge della gravitazione in tre modi diversi, che sono tutti esattamente equivalenti pur sembrando completamente differenti.

Il primo enunciato è che ci sono forze tra i corpi, secondo l'equazione che vi ho dato prima

$$F = G\frac{mm'}{r^2}.$$

Ogni corpo soggetto alla forza accelera, ossia cambia il suo moto, di una certa quantità per secondo. È il modo solito di enunciare la legge, e io la chiamo legge di Newton. Questo enunciato dice che la forza dipende da qualche cosa che è a una distanza finita: esso ha un carattere che chiamerò non locale perché la forza su un corpo dipende dalla posizione in cui si trova un altro rispetto ad esso.

L'idea dell'azione a distanza può forse non piacervi. Infatti: come può questo corpo sapere quello che succede laggiù? E così c'è un altro modo assai strano di enunciare le leggi, chiamato *metodo dei campi di forza*. È difficile da spiegare, ma voglio darvi un'idea approssimativa di quello che è. Dice una cosa completamente diversa: in ogni punto dello spazio c'è un numero (so che è un numero, non un meccanismo: questo è il guaio della fisica, che deve essere espressa in forma matematica) e i numeri cambiano muovendosi da punto a punto. Se un oggetto è posto in un punto dello spazio, la forza che agisce su di esso sarà nella direzione in cui il numero cambia più rapidamente (gli darò il suo nome

solito, potenziale; la forza è nella direzione in cui varia il potenziale). Inoltre la forza è proporzionale alla rapidità con cui cambia il potenziale da un punto all'altro. Questa è una parte dell'affermazione, ma non è sufficiente, perché devo ancora dirvi come determinare il modo in cui varia il potenziale. Potrei dire che esso varia inversamente alla distanza da ogni oggetto, ma allora saremmo di nuovo all'idea dell'azione a distanza. Potete però enunciare la legge in un altro modo, secondo il quale non occorre sapere quello che sta accadendo all'esterno di una piccola sfera. Se volete sapere il potenziale al centro della sfera, dovete solo dirmi il suo valore sulla superficie, comunque piccola essa sia. Non c'è bisogno di guardare fuori, basta sapere il suo valore nelle vicinanze, e la massa all'interno della sfera. La regola è la seguente: il potenziale al centro è uguale alla media del potenziale sulla superficie della sfera, meno la stessa costante G, quella che avevamo nell'altra equazione, divisa per il doppio del raggio della sfera (che chiamiamo a) e poi moltiplicato per la massa all'interno, se la sfera è sufficientemente piccola.

$$\text{Potenziale al centro} = \text{Potenziale medio sulla sfera} - \frac{G}{2a} \times \text{(massa all'interno)}$$

Vedete che questa legge è diversa dall'altra, perché dice quello che accade in un punto in termini di quello che accade molto vicino. La legge di Newton dice quello che accade in un dato momento rispetto a quello che accade in un altro istante. Ci dice come calcolarlo da un istante all'altro, ma per quanto riguarda lo spazio fa intervenire due punti diversi. La seconda affermazione invece è locale tanto per il tempo come per lo spazio, perché dipende solo da quello che accade nelle vicinanze. Matematicamente, però, ambedue gli enunciati sono esattamente equivalenti.

Figura 13

C'è un altro modo completamente diverso di dire questo, diverso sia per la filosofia che per le idee qualitative che vi sono implicate. Se non vi piace l'azione a distanza vi ho fatto vedere che se ne può fare a meno. Ora vi voglio fare vedere un'affermazione che dal punto di vista filosofico è esattamente opposta. In questa non c'è nessuna discussione su come l'azione si propaghi da un punto all'altro; il tutto è contenuto in un'affermazione globale, nel modo seguente. Quando avete più particelle e volete sapere come ciascuna si muove da un punto a un altro, lo fate inventando un moto possibile che va da un punto all'altro in un dato tempo (fig. 13). Mettiamo che la particella voglia andare da X a Y in un'ora, e che voi vogliate sapere da quale strada può passare. Quello che voi fate è di inventare varie curve, e calcolare su ciascuna di esse una certa quantità. (Non voglio dirvi che cos'è la quantità, ma per quelli che hanno sentito parlare di questi termini, la quantità

su ogni cammino è la media della differenza tra energia cinetica e potenziale.) Se calcolate questa quantità prima per un cammino e poi per un altro, otterrete ogni volta un numero diverso. C'è un percorso, però, che dà il numero più piccolo possibile, e questo è proprio quello che viene scelto dalla particella in natura! Adesso stiamo descrivendo il moto effettivo, l'ellisse, dicendo qualche cosa su tutta la curva. Abbiamo perso l'idea della causalità, cioè che la particella senta l'attrazione e muova conformemente ad essa. Invece di quella, in qualche maniera straordinaria essa valuta tutte le curve, tutte le possibilità e decide quale prendere (scegliendo quella per cui la nostra quantità è minima).

Questo è un esempio dei molti bellissimi modi in cui si può descrivere la natura. Quando la gente dice che la natura deve essere causale, potete usare la legge di Newton; se invece vi dice che si deve parlare della natura in termini di un principio di minimo, voi ne parlate in quest'ultimo modo; se poi insiste che la natura deve avere un campo locale potete fare anche questo. Il problema è quale di questi punti di vista sia quello corretto. Se queste varie alternative non fossero tutte esattamente equivalenti dal punto di vista matematico, se cioè per alcune vi fossero conseguenze diverse che per altre, basterebbe sperimentare per scoprire quale modo effettivamente la natura sceglie di seguire. Qualcuno può saltare su, e dire che dal punto di vista filosofico preferisce un enunciato piuttosto che l'altro; ma per lunga esperienza abbiamo imparato che tutte le intuizioni filosofiche su quello che fa la natura falliscono. Bisogna semplicemente studiare tutte le possibilità e provare tutte le alternative. Tuttavia, nel caso particolare di cui sto parlando, le teorie *sono* esattamente equivalenti. Matematicamente, ognuna delle tre formulazioni diverse, la legge di Newton, il metodo del campo locale, e il principio di minimo danno esattamente le stesse conseguenze. E allora che cosa facciamo? Leggerete in tutti i libri che non possiamo decidere scientificamente sull'una o l'altra. Questo è vero poiché esse sono scientificamente equivalenti. È impossibile prendere una decisione, perché non c'è nessun modo sperimentale per distinguere l'una dall'altra se tutte le conseguenze sono uguali. Psicologicamente, però, sono molto diverse per due aspetti. Primo, dal punto di vista filosofico, vi piacciono o non vi piacciono, e la pratica è l'unico modo per combattere questa malattia. Secondo, psicologicamente, sono diverse perché non sono affatto equivalenti quando le prendete come punto di partenza per indovinare nuove leggi.

Fino a che la fisica è incompleta, e stiamo cercando di comprendere le nuove leggi, le diverse formulazioni possibili possono darci degli indizi su quello che potrebbe accadere in altre circostanze. In quel caso non sono più equivalenti, psicologicamente, nel suggerirci come estendere le leggi ad altre situazioni. Per dare un esempio, Einstein si accorse che i segnali *elettrici* non si propagano più rapidamente della luce, e congetturò che questo fosse un principio generale. (Questo è lo stesso gioco di congetture che facciamo quando prendiamo il momento angolare e lo estendiamo da un caso in cui l'abbiamo dimostrato al resto dei fenomeni dell'universo.) Egli postulò che fosse vero per tutto, e quindi anche per la gravitazione. Se i segnali non possono andare più in fretta della velocità della luce, allora viene fuori che il metodo di descrivere le forze istantaneamente è assai scadente. Così, nella generalizzazione compiuta da Einstein della legge della gravitazione, il metodo di Newton di descrivere la fisica è totalmente inadeguato ed enormemente complicato, mentre il metodo del campo è chiaro e semplice,

e così pure il principio di minimo. Tra gli ultimi due, però, non possiamo ancora scegliere.

In effetti, in meccanica quantistica nessuna delle due teorie è esattamente corretta nel modo in cui l'ho enunciata, ma l'esistenza di un principio di minimo viene a essere una conseguenza del fatto che su piccola scala le particelle obbediscono alla meccanica quantistica. La legge migliore, almeno come la si capisce oggi, è in effetti una combinazione delle due in cui usiamo princìpi di minimo più leggi locali. Oggi crediamo che le leggi della fisica debbano avere un carattere locale, e anche un principio di minimo, anche se non ne siamo veramente sicuri. Se avete una struttura che è solo parzialmente corretta, cioè in cui qualche cosa è sbagliato, allora può darsi che se potete formularla in termini degli assiomi corretti, uno solo di questi risulti falso mentre gli altri rimarranno in piedi, di modo che ci sarà da cambiare solo una piccola cosa. Se però la scrivete con un altro insieme di assiomi, può darsi che debbano cadere tutti, perché si appoggiano tutti proprio su quello che viene meno. Non possiamo dire in anticipo, senza un'intuizione, qual è il modo migliore di scriverla per estenderla a una nuova situazione. Dobbiamo sempre tenere in mente tutti i modi alternativi di guardare una cosa; così i fisici fanno della matematica babilonese, e prestano poca attenzione al ragionamento preciso dedotto da assiomi fissi.

Una delle caratteristiche sorprendenti della natura è la varietà dei possibili schemi interpretativi, dovuta al fatto che le leggi sono così speciali e delicate. Per esempio, il fatto che la legge sia quella dell'inverso del quadrato è ciò che le permette di essere locale; se fosse l'inverso del cubo non si potrebbe fare in quel modo. All'altra estremità dell'equazione, il fatto che la forza sia legata alla rapidità di cambiamento della velocità è quello che consente di scrivere le leggi con il principio di minimo. Se, per esempio, la forza fosse proporzionale alla rapidità di cambiamento della posizione invece che della velocità, non si sarebbe potuta scrivere così. Se modificate profondamente le leggi, trovate che potete solo scriverle in un minor numero di modi. Io lo trovo sempre misterioso, e non capisco il motivo per cui le leggi della fisica sembrano essere esprimibili in una così gran varietà di modi. Sembra che siano capaci di passare attraverso varie porte allo stesso tempo.

Vorrei dire alcune cose un po' più generali sulle relazioni tra matematica e fisica. I matematici trattano solo della struttura del ragionamento, e non si interessano veramente di quello di cui stanno parlando. Non devono neppure *sapere* quello di cui stanno parlando, o, come essi stessi dicono, se quello di cui parlano è vero. Voglio spiegarmi: voi enunciate gli assiomi: la tale cosa è così, e la tale altra e in quell'altro modo. E poi? La deduzione logica può applicarsi anche se non si sa quello che significano quelle tali parole. Se le affermazioni sugli assiomi sono accuratamente formulate e sufficientemente complete non è necessario che chi compie la deduzione abbia alcuna conoscenza del significato delle parole per dedurre nuove conclusioni espresse nello stesso linguaggio. Se uso la parola “triangolo” in uno degli assiomi, nella conclusione ci sarà un'affermazione sui triangoli, ma chi compie la deduzione può anche non sapere che cosa sia un triangolo. Io, però, posso leggere il suo ragionamento e dire: “Triangolo, cioè un affare a tre lati, fatto così e così,” e in questo modo capisco i suoi nuovi risultati. In altre parole i matematici preparano un ragionamento astratto pronto per essere usato

appena si ha una serie di assiomi sul mondo reale. Il fisico invece dà un significato a tutte le sue frasi. Questa è una cosa assai importante che molte persone che giungono alla fisica attraverso la matematica non apprezzano. La fisica non è matematica, e la matematica non è fisica. Una aiuta l'altra, ma in fisica si deve capire la connessione tra le parole e il mondo reale. Alla fine è necessario tradurre, quello che si è dedotto, in italiano, cioè nel mondo, nei blocchi di rame e di vetro con cui si faranno gli esperimenti: solo in questo modo potremo vedere se le conseguenze sono giuste. Questo è un problema che in matematica non esiste affatto.

Naturalmente è ovvio che i ragionamenti matematici che sono stati sviluppati hanno una notevole efficacia e sono molto utili per i fisici. D'altra parte qualche volta i metodi dei fisici sono utili ai matematici.

Questi ultimi amano i ragionamenti più generali possibile. Se io dico loro: "Voglio parlare del normale spazio a tre dimensioni," essi mi rispondono: "Se avete uno spazio a n dimensioni, eccovi i vostri teoremi." "Ma io voglio solo il caso con tre," "Bene, allora sostituisci $n = 3$..." Così viene fuori che molti dei loro complicati teoremi sono molto più semplici quando sono adattati a un caso speciale. Il fisico è sempre interessato al caso speciale, mai a quello generale; egli parla di qualche cosa, ma non di qualche cosa di astratto. Vuole discutere la legge della gravità in tre dimensioni, mai invece il caso arbitrario della forza in n dimensioni. Così occorre particolarizzare i loro ragionamenti, perché i matematici hanno preparato queste cose per un campo più vasto di problemi. Questo è molto utile, e più tardi succede sempre che il povero fisico deve tornare indietro e dire: "Scusatemi, quando volevate parlarmi delle quattro dimensioni..."

Quando sapete quello di cui state parlando, che alcuni simboli rappresentano le masse, altri le forze, l'inerzia, e così via, allora potete usare abbondantemente il buon senso, e i ragionamenti terra-terra. Avete visto varie cose e sapete più o meno come il fenomeno si comporterà. Ma il povero matematico lo traduce in equazioni, e poiché i simboli non gli dicono niente, non ha nessuna guida nella deduzione se non la precisione del rigore matematico. Il fisico, invece, che sa più o meno quale risultato verrà fuori, può all'incirca tirare a indovinare per una parte, e così procedere abbastanza rapidamente. L'assoluta precisione del rigore matematico non è molto utile in fisica. Tuttavia non bisogna criticare i matematici per questo: non è necessario che solo perché una cosa sarebbe utile in fisica la debbano fare in quel modo; essi fanno il loro mestiere, e se volete qualche altra cosa dovete farvela da soli.

Il problema seguente è se per cercare di indovinare una nuova legge si debbano usare argomenti preconcetti e princìpi filosofici, come per esempio: "Non mi piace il principio di minimo," oppure: "Mi piace il principio di minimo," "Non mi piace l'azione a distanza," oppure: "Mi piace l'azione a distanza." Fino a che punto servono i modelli? È interessante il fatto che molto spesso essi in effetti aiutano, e molti professori di fisica cercano di insegnare a usare i modelli, e ad avere un buon senso fisico per predire come le cose andranno a finire. Ma succede sempre che le scoperte più grandi sono ottenute astraendo dal modello, e che questo non serve mai a niente. La scoperta di Maxwell dell'elettrodinamica fu fatta prima servendosi di molte ruote e ingranaggi immaginari nello spazio. Ma quando vi liberate da tutti gli ingranaggi e gli aggeggi nello spazio tutto

va bene. Dirac,[9] scoprì le leggi giuste della meccanica quantistica relativistica semplicemente indovinando l'equazione. Il metodo di cercare di indovinare l'equazione sembra essere un modo piuttosto efficace di scoprire nuove leggi. Questo fa di nuovo vedere che la matematica è un modo profondo di esprimere la natura, mentre qualsiasi tentativo di esprimerla in princìpi filosofici o affermazioni vagamente meccanicistiche non è un mezzo efficiente.

Mi lascia sempre perplesso il fatto che, secondo le leggi come le comprendiamo oggi, ci vuole una macchina calcolatrice e un infinito numero di operazioni logiche per calcolare quello che accade in una regione dello spazio e del tempo per quanto piccole siano. Come può accadere tutto quello in quel piccolissimo spazio? Perché c'è bisogno di una quantità infinita di logica per calcolare quello che accadrà in un piccolissimo pezzo di spaziotempo? Così ho spesso fatto l'ipotesi che alla fine la fisica non avrà più bisogno di un'enunciazione matematica, che alla fine il meccanismo sarà svelato e le leggi appariranno semplici, come una scacchiera con tutte le sue difficoltà solo apparenti. Ma questa speculazione è dello stesso tipo di quella che fanno gli altri, “mi piace”, “non mi piace”, e non è bene avere troppi pregiudizi su queste cose.

Per riassumere, vorrei usare le parole di Jeans, che disse che “il Grande Architetto sembra essere un matematico”. Per quelli che non conoscono la matematica è difficile arrivare al vero apprezzamento della bellezza, la grandissima bellezza della natura. Charles P. Snow parlava di due culture. Credo proprio che quelle due culture separino coloro che hanno avuto questa esperienza della comprensione della matematica in maniera sufficiente per apprezzare almeno una volta la natura, da coloro che non hanno mai avuto questa esperienza.

È un peccato che debba essere la matematica, e che questa sia difficile per certe persone. Si dice — non so se sia vero — che un certo re, il quale stava cercando di imparare la geometria da Euclide, si lamentasse che era difficile. E questi gli rispose: “Non c'è una via regia per la geometria.” E in effetti non c'è nessuna via regia: i fisici non possono tradurre in nessun'altra lingua. Se volete conoscere e apprezzare la natura è necessario capire la lingua che parla. Essa offre la sua informazione solo in una forma; noi non dobbiamo essere così superbi da pretendere che essa cambi prima di prestarle attenzione.

Tutte le disquisizioni intellettuali che potete fare non riusciranno a comunicare a orecchie sorde quella che è veramente l'esperienza della musica. Allo stesso modo tutte le disquisizioni intellettuali del mondo non daranno una comprensione della natura a quelli dell'“altra cultura”. I filosofi possono cercare di insegnarvela parlandovi qualitativamente della natura, io invece cerco di descriverla. Tuttavia non ci riesco perché è impossibile. Forse è perché i loro orizzonti sono così limitati, che alcuni possono immaginare che il centro dell'universo sia l'uomo.

Capitolo 3.
I grandi princìpi di conservazione

Quando studiamo la fisica, troviamo che c'è un gran numero di leggi complicate e particolari: quelle della gravitazione, dell'elettricità, del magnetismo, delle interazioni nucleari, e così via. Al di sopra della varietà di queste leggi ci sono però dei grandi princìpi generali che tutte le leggi sembrano seguire. Esempi di questo sono i princìpi di conservazione, certi tipi di simmetria, la forma generale dei princìpi della meccanica quantistica, e per sfortuna, o per fortuna, come abbiamo visto l'altra volta, il fatto che tutte le leggi sono matematiche. In questa lezione voglio parlare dei princìpi di conservazione.

Il fisico usa parole ordinarie ma attribuisce loro un significato particolare. Per lui una legge di conservazione significa che esiste un numero che si può calcolare a un dato momento, e che, quando è misurato a un tempo successivo, dopo che la natura è passata attraverso una serie di cambiamenti, è restato lo stesso. Un esempio è la conservazione dell'energia. C'è una quantità che si può calcolare secondo una certa regola, e il risultato viene sempre lo stesso, qualsiasi cosa accada.

Ora, vi renderete facilmente conto che una cosa del genere è utile. Supponiamo che la fisica, o piuttosto la natura, sia considerata analoga a un grande gioco di scacchi con milioni di pezzi, e che noi stiamo cercando di scoprire le leggi secondo le quali questi pezzi si muovono. I grandi dèi che giocano questa partita di scacchi lo fanno molto rapidamente, ed è difficile seguire e vedere bene. Tuttavia riusciamo a capire alcune delle leggi, e fra queste ce ne sono alcune che non richiedono che guardiamo ogni mossa. Per esempio, supponiamo che sulla scacchiera ci sia solo un alfiere, un alfiere nero. Dal momento che esso si può muovere solo diagonalmente, e perciò il colore del suo quadrato non cambia mai, se per un momento voltiamo lo sguardo mentre gli dèi giocano, e poi guardiamo di nuovo, possiamo aspettarci che ci sia sempre un alfiere nero, magari in un punto diverso, ma sempre su un quadrato dello stesso colore. La natura di una legge di conservazione è proprio questa: non dobbiamo guardare in dettaglio per conoscere almeno qualche cosa del gioco.

È vero che negli scacchi questa particolare legge non è necessariamente del tutto valida. Se rimanessimo per un tempo sufficientemente lungo senza guardare, potrebbe essere accaduto che nel frattempo l'alfiere fosse stato mangiato, che un pedone fosse arrivato dalla parte opposta, e che il dio avesse deciso di prendere un alfiere invece di una regina al posto del pedone che si trovava su un quadrato bianco. Sfortunatamente, può benissimo accadere che alcune delle leggi che vediamo oggi non siano perfette, ma io ve ne parlerò così come le conosciamo oggi.

Ho detto che usiamo parole ordinarie in un significato tecnico. Una delle parole del titolo è “grande”: “I grandi princìpi di conservazione.” Essa però non ha un significato

tecnico: è stata messa lì solo per rendere più clamoroso il titolo, e avrei benissimo potuto dire “Le leggi di conservazione.” Ci sono però alcune leggi di conservazione che non funzionano troppo bene: esse sono solo approssimativamente giuste, ma certe volte sono utili, e potremmo chiamarle “piccole” leggi di conservazione. Parlerò più tardi di una o due di quelle che non funzionano, ma quelle principali di cui discuterò sono, almeno per quello che sappiamo oggi, assolutamente precise.

Comincio con quella che è più facile da capire, che è la conservazione della carica elettrica. C'è un numero, la carica elettrica totale nel mondo, che, qualsiasi cosa accada, non cambia. Se la perdete da una parte la ritroverete dall'altra. La conservazione vale per la carica elettrica totale, e fu scoperta sperimentalmente da Faraday.[10] L'esperimento consisteva nell'entrare in una grande sfera di metallo, all'esterno della quale c'era un delicatissimo galvanometro per misurare la carica sulla sfera in modo che una piccola carica avesse un grande effetto. All'interno della sfera Faraday costruì ogni sorta di strani apparecchi elettrici. Produsse delle cariche strofinando bacchette di vetro con pelli di gatto, e costruì grosse macchine elettrostatiche cosicché l'interno della sua sfera sembrava uno di quei laboratori dei film dell'orrore. Ma durante tutti questi esperimenti nessuna carica si sviluppava alla superficie; non c'era nessun cambiamento della carica totale. Sebbene la bacchetta di vetro poteva essere diventata positiva dopo che era stata caricata strofinandola sulla pelle di gatto, questa diventava negativa nella stessa quantità, e la carica totale era sempre nulla, perché, se si fosse sviluppata all'interno della sfera, il suo effetto sarebbe apparso sul galvanometro all'esterno. E così la carica totale è conservata.

Questo è facile da capire, e un modello semplicissimo, che non richiede nessuna matematica, basterà a spiegarlo. Supponiamo che il mondo sia fatto solo di due tipi di particelle, elettroni e protoni — c'è stato un periodo in cui si credeva che le cose fossero proprio così semplici — e supponiamo che i protoni portino una carica positiva e gli elettroni una negativa, in modo che li possiamo separare. Possiamo prendere un pezzo di materia e aggiungere o togliere degli elettroni; ma supponendo che gli elettroni siano permanenti e non si disintegrino né spariscano — questa è una proposizione semplice, neppure matematica — allora il numero totale dei protoni meno quello degli elettroni non cambierà. In questo modello particolare il numero totale dei protoni non cambierà, e neppure quello degli elettroni. Ma ora ci stiamo occupando della carica. Il contributo dei protoni è positivo e quello degli elettroni negativo, e se queste particelle non sono mai create o distrutte da sole la carica totale sarà conservata. A mano a mano che vado avanti voglio elencare le proprietà delle grandezze conservate, e comincio dalla carica (tab. 1). Alla domanda se la carica è conservata rispondo “sì”.

Tabella 1. Nella stesura finale, alla fine della conferenza

	Carica	Numero barionico	Stranezza	Energia	Momento angolare
Conservato localmente	Sì	Sì	Quasi	Sì	Sì
Compare in unità	Sì	Sì	Sì	No	Sì

Dà un campo	Sì	?	?	Sì	—

L'interpretazione teorica è molto semplice. Più tardi però fu scoperto che gli elettroni e i protoni non sono permanenti; per esempio, una particella chiamata neutrone può disintegrarsi in un protone e un elettrone, più qualche altra cosa a cui arriveremo. Ma il neutrone, si scopre, è elettricamente neutro, e così, sebbene i protoni non siano permanenti e neppure gli elettroni lo siano, nel senso che possono essere creati da un neutrone, la carica torna ancora; all'inizio avevamo una carica zero, e dopo abbiamo più uno e meno uno, che sommati insieme danno carica zero.

Un altro esempio simile è il fatto che esiste un'altra particella oltre il protone che è carica positivamente. Si chiama positrone ed è una specie di immagine dell'elettrone. È proprio come quest'ultimo per molti aspetti, ma ha invece carica di segno opposto, e, più importante ancora, è chiamata un'antiparticella perché, quando incontra un elettrone, ambedue si distruggono e si disintegrano, e viene fuori solo della luce. Così gli elettroni non sono permanenti neanche da soli. Un elettrone più un positrone darà solo luce. In effetti questa “luce” è invisibile per l'occhio: vengono fuori raggi gamma, ma per il fisico è la stessa cosa, soltanto la lunghezza d'onda è diversa. Dunque, abbiamo detto che una particella e la sua antiparticella si possono distruggere; la luce non ha carica elettrica, ma in questo modo abbiamo eliminato una carica positiva e una negativa, di modo che la carica totale non è cambiata. La teoria della conservazione della carica è perciò un po' più complicata ma non è ancora molto matematica. Si somma semplicemente il numero dei protoni e quello dei positroni e si sottrae quello degli elettroni. In effetti ci sono delle altre particelle che bisogna controllare, per esempio gli antiprotoni che contribuiscono negativamente, i mesoni π^+ che sono positivi, anzi, in generale, ogni particella fondamentale in natura ha una carica (eventualmente zero). Quello che si deve fare è sommare il numero totale, e, qualsiasi cosa accada in una reazione, la carica totale da una parte deve bilanciare quella che sta dall'altra.

Questo è un aspetto della conservazione della carica. Ora viene un problema interessante: è sufficiente dire che la carica è conservata, o dobbiamo dire di più? Se essa fosse conservata perché è una particella reale che si muove essa avrebbe una proprietà molto speciale. La carica totale in una scatola può rimanere la stessa in due modi diversi: potrebbe darsi che la carica si muova all'interno della scatola da un punto all'altro, ma ci sarebbe anche la possibilità che sparisca da una parte e che simultaneamente si manifesti da un'altra, in relazione istantanea, in modo che la carica totale non cambi. Questa seconda possibilità per la conservazione è di un tipo diverso dalla prima, nella quale, se una carica sparisce in un punto e appare in un altro, qualche cosa deve propagarsi nello spazio intermedio. La seconda forma di conservazione della carica si chiama conservazione locale della carica ed è assai più dettagliata della semplice affermazione che la carica totale non cambia. Così vedete che stiamo precisando la nostra legge, chiedendoci se è vero che la carica sia conservata localmente. In effetti è vero: ho cercato di farvi vedere di volta in volta alcune delle possibilità di ragionare, cioè di connettere un'idea con un'altra, e ora vorrei descrivere un argomento, essenzialmente dovuto a

Einstein, che fa vedere che se qualche cosa è conservata (e in questo caso lo applico alla carica) essa deve essere conservata localmente. Questo argomento si fonda sul fatto che se due persone si passano accanto su delle astronavi, il problema di chi si muove e di chi sta fermo non può essere risolto con nessun esperimento. Questo si chiama il principio di relatività, e dice che il moto uniforme su una retta è relativo, di modo che possiamo guardare ogni fenomeno da due punti di vista, e non possiamo dire quale dei due è fermo e quale dei due si muove.

Supponiamo di avere due astronavi, *A* e *B* (fig. 14). Sceglierò il punto di vista che sia *A* a passare vicino a *B*. Ricordatevi che questa è solo un'opinione, e che potete anche guardare nell'altro modo e otterrete lo stesso fenomeno. Ora, supponiamo che l'uomo che è fermo voglia decidere se ha visto o no una carica sparire a una estremità della sua astronave e allo stesso istante un'altra apparire all'altra estremità. Per essere sicuro che è proprio lo stesso istante non si può sedere nella parte anteriore della navicella, perché le vedrebbe una prima dell'altra, a causa del tempo impiegato dalla luce per propagarsi; e così supponiamo che sia un tipo molto preciso e che si sieda proprio nel centro della nave. C'è un altro tizio che fa la stessa osservazione sull'altra nave. Ora arriva un fulmine e si crea una carica nel punto *x*, e nello stesso istante in un punto *y* all'altra estremità della nave una carica è distrutta, cioè sparisce.

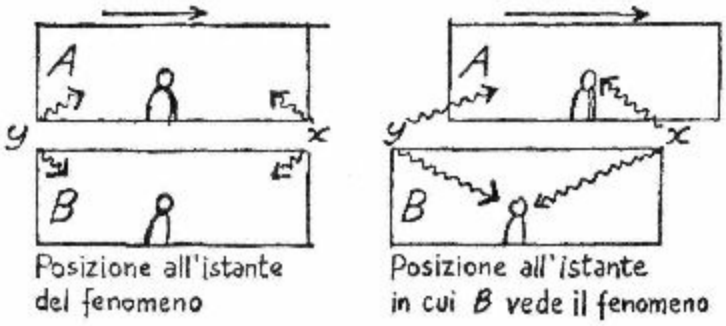


Figura 14

Allo stesso istante, si noti, e cioè perfettamente in accordo con la nostra idea che la carica è conservata. Se perdiamo un elettrone da una parte, ne otteniamo un altro da un'altra, ma niente si propaga tra i due punti. Supponiamo che quando la carica si crea o sparisce ci sia un lampo, in modo che possiamo vedere quello che succede. *B* dirà che i due avvenimenti accadono contemporaneamente, perché egli sa di essere in centro e perché la luce dal lampo che crea *x* gli giunge allo stesso istante in cui gli giunge la luce di quello che accompagna la sparizione a *y*. Allora *B* dirà: “Sì, quando una sparisce l'altra si crea.” Ma che cosa succede al nostro amico sull'altra astronave? Dirà: “No, caro mio, ti sbagli. Io ho visto *x* essere creato prima di *y*.” Questo è perché egli si muove verso *x*, cosicché la luce da *x* dovrà percorrere una distanza minore che la luce da *y*, poiché egli si allontana da *y*. Egli potrebbe dire: “No, *x* è stato creato prima, e poi *y* è sparito, così per un breve periodo dopo che *x* è stato creato e prima che sparisse *y* ho avuto un po' di carica. Questa non è la conservazione della carica, è contro la legge.” Ma il primo tizio dice: “Sì, ma tu ti stai muovendo.” Allora l'altro risponde: “Come fai a saperlo? Io invece credo che sia tu a muoverti,” e così via. Se non siamo capaci, attraverso nessun esperimento, di

scoprire una differenza nelle leggi fisiche dovuta al nostro moto, allora se la conservazione della carica non fosse locale, solo un certo tipo di persona potrebbe vederlo funzionare bene, cioè il tipo che se ne sta fermo in senso assoluto. Ma una cosa simile è impossibile secondo il principio di relatività di Einstein, perciò è impossibile avere conservazione non locale della carica. La località della conservazione della carica è in accordo con la teoria della relatività, e si scopre che questo è vero per tutte le leggi di conservazione. Potete rendervi conto che se qualche cosa è conservata vale lo stesso principio.

C'è anche un'altra cosa interessante a proposito della carica, una cosa molto strana per la quale oggi non abbiamo nessuna vera spiegazione. Non ha niente a che fare con la legge di conservazione, ed è indipendente da essa. La carica appare sempre in multipli di una unità fissa. Quando abbiamo una particella carica essa ha sempre una o due cariche, o meno uno o meno due. Tornando alla nostra tabella 1 sebbene questo non abbia niente a che fare con la conservazione della carica, devo scrivere che la cosa che è conservata appare sempre in multipli di una unità fissa. Questo è molto bello, perché rende assai facile capire la teoria della conservazione della carica. È solo una *cosa* che possiamo contare che si muove da un punto all'altro.

Ancora un'ultima proprietà: la carica totale di una cosa è facile da determinare elettricamente perché ha una caratteristica molto importante, cioè è la sorgente del campo elettrico e magnetico. La carica è la misura dell'interazione di un oggetto con l'elettricità, cioè con un campo elettrico. Così un'altra cosa che dobbiamo aggiungere alla lista è che la carica è la sorgente di un campo, in altre parole l'elettricità è legata alla carica. Così la particolare quantità che è conservata qui, ha altri due aspetti che non sono direttamente connessi con la conservazione, ma che sono tuttavia interessanti. Una è che appare sempre come multipla di una quantità fissa, e l'altra è che è la sorgente di un campo.

Ci sono molte leggi di conservazione, e qui voglio darvi qualche altro esempio di leggi dello stesso tipo di quella della conservazione della carica, cioè leggi le quali ci riducono essenzialmente a contare. C'è una legge di conservazione chiamata conservazione dei barioni. Un neutrone si può trasformare in un protone. Se contiamo ognuno di questi come una unità, o barione, la legge dice che non si perde nessun barione. Il neutrone porta una carica barionica uno, ossia rappresenta un barione, e anche un protone rappresenta un barione — stiamo solo contando e inventando grandi parole — così, se avviene la reazione di cui sto parlando in cui un neutrone decade in un protone, un elettrone e un antineutrino, il numero totale di barioni non cambia. Tuttavia ci sono delle altre reazioni in natura: un protone più un altro protone può produrre una gran quantità di strani oggetti, per esempio un lambda, un protone e un K positivo. Lambda e K positivo sono nomi per particelle particolari.

$$\text{(rapida) } p+p \rightarrow \Lambda+p+K^{+}.$$

In questa reazione sappiamo di mettere dentro due barioni, ma ne vediamo venire fuori solo uno, così o il lambda o il K^{+} contiene un barione. Se studiamo il lambda,

scopriamo che più tardi si disintegra molto lentamente in un protone e un pi greco, e poi che quest'ultimo si disintegra in elettroni e altre cose.

$$\text{(lenta) } \Lambda \rightarrow p+\pi.$$

Qui, dunque, abbiamo di nuovo il barione che viene fuori nel protone, e così crediamo che il lambda abbia numero barionico 1, mentre il K^+ ha numero barionico zero.

Sulla nostra tabella della legge di conservazione (tab. 1) abbiamo dunque, accanto alla carica elettrica, una situazione simile per i barioni, con la regola speciale che il numero barionico è il numero di protoni, più quello dei neutroni, più quello dei lambda meno quello degli antiprotoni, quello degli antineutroni e così via; è solo questione di contare un certo numero di particelle. Il numero barionico si conserva, appare sempre in multipli di una unità fissa, e nessuno lo sa con certezza ma tutti vogliono pensare per analogia che sia la sorgente di un campo. La ragione per cui facciamo queste tabelle è che stiamo cercando di indovinare le leggi d'interazione nucleare, e questo è uno dei modi più rapidi per cercare d'indovinare come si comporta la natura. Se la carica è la sorgente di un campo, e il barione fa le stesse cose sotto altri aspetti, anch'esso dovrebbe essere la sorgente di un campo. Peccato che finora non sembra esserlo: può darsi, ma non ne sappiamo abbastanza per essere sicuri.

Ci sono ancora una o due di queste leggi di conservazione additive, per esempio i numeri leptonici, e così via, ma l'idea è la stessa che per i barioni. Ce n'è tuttavia una che è un po' diversa. Ci sono in natura, tra queste strane particelle, numerose reazioni: alcune sono molto veloci e avvengono facilmente, altre invece sono lente e avvengono con difficoltà. Non sto dicendo facile e difficile in un senso tecnico, nel fare effettivamente l'esperimento. Queste parole riguardano le velocità a cui avvengono le reazioni quando le particelle sono presenti. C'è una distinzione netta tra i due tipi di reazione che ho menzionato sopra, il decadimento di una coppia di protoni e il decadimento molto più lento del lambda. Accade che se prendete solo le reazioni veloci e facili, c'è un'altra legge di conservazione additiva, in cui al lambda si assegna il valore meno 1, al K più 1, e al protone zero. Questo numero si chiama stranezza, o carica iperonica, e sembra che la legge secondo la quale esso è conservato sia valida per ogni reazione rapida, ma sia violata per quelle lente. Sulla nostra tabella 1 dobbiamo dunque aggiungere la legge chiamata conservazione della stranezza, o conservazione del numero iperonico, che è quasi corretta. Questo è un fatto assai strano e giustifica il nome di “stranezza” dato a questa quantità. È quasi vero che essa è conservata ed è vero che essa viene in multipli di una unità fissa. Il fatto che nelle interazioni forti dalle quali dipendono le forze nucleari, la stranezza sia conservata ha indotto qualcuno a proporre che essa sia la sorgente del campo delle interazioni forti; anche qui però non sappiamo con certezza come stiano le cose. Ho parlato di questi argomenti per far vedere come le leggi di conservazione possano essere usate per indovinare nuove leggi.

Sono state proposte altre leggi dello stesso tipo di quelle di conservazione additive. Per esempio i chimici una volta credevano che, qualsiasi cosa accadesse, il numero degli atomi di sodio restasse invariato. Invece gli atomi di sodio non sono permanenti. È

possibile trasmutare gli atomi da un elemento a un altro in modo che l'elemento originario sparisca totalmente. Un'altra legge che per un po' si credette vera era quella che la massa totale di un oggetto rimanesse la stessa. Questo dipende da come si definisce la massa e se si coinvolge l'energia. Le legge di conservazione della massa è contenuta nella prossima legge che discuterò, la legge di conservazione dell'energia. Di tutte le leggi di conservazione, quella che si riferisce all'energia è la più difficile e astratta, eppure è la più utile. È più difficile da capire di quelle che ho descritto finora, perché nel caso della carica e negli altri casi, il meccanismo è chiaro, cioè è più o meno la conservazione di oggetti. Non è proprio così, per il fatto che otteniamo cose nuove da quelle vecchie, ma in ultima analisi è solo questione di contare.

La conservazione dell'energia è un po' più difficile, perché questa volta abbiamo un numero che non cambia col tempo, ma questo numero non rappresenta nessuna cosa particolare. Vorrei portare un paragone terra-terra per cercare di rendere la cosa più chiara.

Immaginatevi una madre che lascia un bambino solo in una camera con 28 cubi assolutamente indistruttibili. Il bambino gioca con i suoi cubi tutto il giorno, e, quando la madre ritorna, trova che ci sono effettivamente 28 cubi; essa controlla sempre la conservazione dei cubi! Questo va avanti per qualche giorno fino a che una volta, quando entra, scopre che ce ne sono solo 27. Tuttavia ne trova uno fuori della finestra, il bambino l'ha gettato fuori. La prima cosa che dovete osservare a proposito delle leggi di conservazione è che bisogna fare attenzione che la roba che si vuole controllare non esca fuori attraverso il muro. La stessa cosa potrebbe accadere, in senso inverso, se un amico venisse a giocare con il bambino portando con sé dei cubi. Ovviamente queste sono cose che vanno controllate quando si parla delle leggi di conservazione. Supponiamo che un giorno la madre venga a contare i cubi e trovi che ce ne sono solo più 25, ma che sospetti che il bambino abbia nascosto i rimanenti tre in una scatola vuota. E così dice: “Adesso apro la scatola.” “No — risponde il bambino — non la puoi aprire.” Essendo una madre molto astuta ella dirà: “So che quando la scatola è vuota pesa 480 grammi, e che ogni cubo pesa 90 grammi, così adesso peserò la scatola.” Così, facendo il totale del numero dei cubi, otterrebbe

$$\text{N. dei cubi visti} + \frac{\text{Peso della scatola} - 480\text{g}}{90\text{g}}$$

e questo dà 28. Questo funziona per un po′, ma poi un giorno il conto non torna più. Tuttavia nota che l'acqua sporca nel lavandino ha cambiato livello. Sa che l'acqua è profonda 12 centimetri quando non c'è nessun cubo, e che se ci fosse un cubo salirebbe di mezzo centimetro, così aggiunge un altro termine e ottiene

$$\text{N. dei cubi visti} + \frac{\text{Peso della scatola} - 480\text{g}}{90\text{g}} + \frac{\text{Altezza dell'acqua} - 12\,\text{cm}}{0{,}5\,\text{cm}},$$

e questo da di nuovo 28. A mano a mano che il bambino diventa più ingegnoso anche

la madre diventa ugualmente ingegnosa, e così nel conto deve aggiungere sempre più termini che rappresentano i cubi, ma che, da un punto di vista matematico, sono calcoli astratti, perché i cubi non si vedono.

Ora vorrei dirvi quello che c'è in comune tra questa mia analogia e la legge della conservazione dell'energia, e quello che c'è invece di diverso. Prima supponiamo che in tutta la vicenda non si siano mai visti i cubi. Il termine “N. dei cubi visti” non è mai incluso. Allora la madre dovrebbe sempre calcolare un sacco di termini come “cubi nella scatola”, “cubi nell'acqua” e così via. Per l'energia c'è questa differenza, che non ci sono cubi, almeno per quello che ne sappiamo. E, a differenza del caso dei cubi, per l'energia i numeri che vengono fuori non sono interi. Forse alla povera madre, quando sta calcolando un termine, potrebbe venir fuori 6 e 1/8 cubi, e quando ne calcola un altro 7/8 di cubo, e il resto 21, in modo che il totale restasse 28. Con l'energia le cose vanno pressappoco così.

Quello che abbiamo scoperto per l'energia è che abbiamo uno schema con un insieme di leggi. Per ogni insieme diverso possiamo calcolare un numero per i vari tipi di energia. Quando sommiamo insieme tutti questi numeri per tutte le forme di energia, otteniamo sempre lo stesso totale. Ma per quanto ne sappiamo, non c'è nessuna unità reale, nessuna pallina unitaria. È una cosa astratta, puramente matematica, che ci sia un numero tale che ogni volta che lo si calcola non cambia mai. Non riesco a spiegarvelo meglio di così.

Questa energia ha ogni sorta di forme, analoghe ai blocchi nella scatola, nell'acqua e così via. C'è l'energia dovuta al moto chiamata energia cinetica, l'energia dovuta all'interazione gravitazionale (energia potenziale gravitazionale), l'energia termica, l'energia elettrica, l'energia luminosa, l'energia elastica nelle molle ecc., l'energia chimica, l'energia nucleare, e poi c'è anche l'energia che una particella ha a causa della sua stessa esistenza, e che dipende direttamente dalla sua massa. Quest'ultima è un contributo di Einstein, come indubbiamente saprete. $E = mc^2$ è la famosa legge di cui sto parlando.

Fra le numerose forme di energia che ho menzionato esistono varie relazioni sulle quali sappiamo diverse cose. Per esempio, quella che chiamiamo energia termica è per una gran parte semplicemente l'energia cinetica del moto delle particelle che sono all'interno di un corpo. L'energia elastica e quella chimica hanno ambedue la stessa origine, cioè le forze tra gli atomi. Quando gli atomi si riordinano in una nuova struttura, una parte dell'energia cambia, e se questa quantità varia, significa che anche un'altra quantità deve variare. Per esempio, se si brucia qualche cosa, l'energia chimica varia, e si trova calore dove prima non ce n'era, perché la somma deve rimanere la stessa. L'energia elastica e quella chimica derivano ambedue da interazioni fra atomi, e ora sappiamo che queste interazioni sono una combinazione di due cose, l'una energia elettrica e l'altra di nuovo energia cinetica; questa volta però la formula viene dalle leggi della meccanica quantistica. L'energia luminosa non è altro che energia elettrica, perché la luce è stata interpretata come un'onda elettromagnetica.

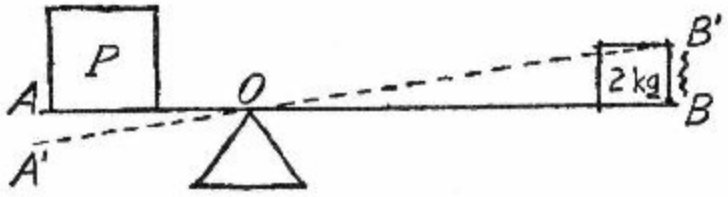


Figura 15

L'energia nucleare non può essere rappresentata in termini delle altre; in questo momento non posso dire altro se non che è il risultato delle forze nucleari. Non sto solo parlando soltanto dell'energia liberata. Nel nucleo dell'uranio c'è una certa quantità di energia, e quando esso si disintegra, varia l'energia che rimane nel nucleo; l'energia totale del mondo però non cambia, e perciò in quel processo si produce un sacco di calore e di altra roba per pareggiare il bilancio.

Questa legge di conservazione è molto utile e vi darò ora alcuni esempi semplici per far vedere come, conoscendo la legge di conservazione dell'energia e le formule per calcolare l'energia, possiamo comprendere altre leggi. In altre parole, molte altre leggi non sono indipendenti, ma sono solo modi nascosti di parlare della conservazione dell'energia. La più semplice è la legge della leva (fig. 15). Abbiamo una leva su un perno. La lunghezza di un braccio è 20 centimetri e dell'altro 80 centimetri. Per prima cosa, devo darvi la legge per l'energia gravitazionale: se si ha un certo numero di pesi, si prende il peso di ciascuno, lo si moltiplica per l'altezza da terra, si fa la somma di questi prodotti su tutti i pesi e questo dà l'energia gravitazionale totale. Supponiamo di avere un peso di due chili sul braccio più lungo, e sull'altro un misterioso peso sconosciuto: l'incognita si chiama sempre *X*, ma noi, per far credere di saperne di più la chiameremo *P*! Ora il problema è il seguente: come deve essere *P* per fare in modo che la leva sia equilibrata e oscilli liberamente su e giù? Se oscilla liberamente su e giù, ciò significa che l'energia e la stessa sia che la bilancia sia parallela al terreno, o inclinata in modo che il peso di due chili sia, diciamo, a 1 cm da terra. Se l'energia è la stessa, alla leva non importa molto in che posizione sia, e quindi non cade giù. Se il peso di due chili sale di un centimetro, di quanto scende *P*? Dal diagramma (fig. 15) si può vedere che se *AO* è 20 cm e *OB* è 80 cm, allora quando *BB'* è 1 cm, *AA'* sarà 1/4 cm. Adesso applichiamo la legge per l'energia gravitazionale. Prima che succedesse qualche cosa, tutte le altezze erano zero, così l'energia totale era zero. Dopo che c'è stato il movimento, per avere l'energia di gravità, moltiplichiamo il peso 2 kg per l'altezza 1 cm e lo sommiamo al peso sconosciuto P per l'altezza che è —1/4 cm. La somma di questo deve dare la stessa energia di prima, cioè zero. Così:

$$2-\frac{P}{4}=0,$$ dunque *P* deve essere 8.

Ecco un modo di capire la semplice legge della leva, che naturalmente conoscevate già. È interessante però che non solo questa, ma centinaia di altre leggi della fisica possano essere collegate alle varie forme di energia, e vi ho mostrato questo esempio solo per farvi vedere come la cosa è utile.

L'unico inconveniente, però, è che in pratica le cose non sono così semplici, a causa dell'attrito del fulcro. Se qualcosa si muove, per esempio una sfera che rotola a un'altezza costante, si fermerà a causa dell'attrito. Che. cosa è successo all'energia cinetica della sfera? La risposta è che l'energia del moto della sfera è andata nell'energia necessaria per accelerare gli atomi del pavimento e della sfera. Il mondo come lo vediamo su grande scala sembra una bella palla rotonda lucidata ma in realtà, quando lo guardiamo più in dettaglio, è assai più complicato, fatto com'è di miliardi di piccolissimi atomi con ogni sorta di forme irregolari. Quando lo si guarda molto attentamente, è come un masso molto ruvido, perché è fatto di piccole palline. Il pavimento è la stessa cosa, un affare ineguale fatto di palline. Quando rotolate questo masso enorme sul pavimento ingrandito potete vedere i piccoli atomi saltellare da tutte le parti. Dopo che esso è passato, gli atomi rimasti continuano ancora a muoversi un po' a causa dei movimenti cui sono stati sottoposti; così sul pavimento rimane un certo movimento, ossia dell'energia termica. A prima vista sembrava che la legge di conservazione fosse falsa, ma sappiamo che l'energia ha una tendenza a nascondersi, per cui abbiamo bisogno di termometri e di altri strumenti per accertarci che sia ancora lì. Il risultato di tutte queste osservazioni è che l'energia è conservata, per quanto complicato sia il processo, e anche quando non conosciamo in dettaglio le leggi.

La prima dimostrazione della legge di conservazione dell'energia non fu data da un fisico, ma da un medico. La dimostrò per i topi; se si brucia del cibo si può trovare quanto calore è generato. Se si dà da mangiare la stessa quantità di cibo a dei topi, essa si cambia, con l'ossigeno, in anidride carbonica, nello stesso modo che nella combustione. Quando si misura l'energia, si trova sempre che le creature viventi si comportano esattamente come le cose inanimate. La legge della conservazione dell'energia è vera tanto per la vita quanto per gli altri fenomeni. Incidentalmente, è interessante che ogni legge o principio che conosciamo per le cose “morte”, funziona altrettanto bene quando lo possiamo provare sul grande fenomeno della vita. Non c'è nessuna prova che quello che accade negli esseri viventi sia necessariamente diverso, almeno per quello che concerne le leggi fisiche, da quello che accade nelle cose inanimate, anche se gli esseri viventi possono essere assai più complicati.

La quantità di energia del cibo, che dice quanto calore, lavoro meccanico ecc. esso può generare, è misurata in calorie. Quando sentite parlare di calorie, non state mangiando una cosa chiamata calorie: questa è solo una misura della quantità di energia termica del cibo. I fisici spesso si sentono così superiori e intelligenti che agli altri piacerebbe qualche volta prenderli in castagna. Ora vi dirò qualche cosa per aiutarvi. Dovrebbero vergognarsi del modo in cui prendono l'energia e la misurano in un sacco di modi diversi, con nomi diversi. È assurdo che l'energia possa essere misurata in calorie, in erg, in elettronvolt, in chilogrammetri, in cavalli vapore ora, in chilowattora, tutto per misurare la stessa cosa. È come avere il denaro in dollari, sterline e così via; ma a differenza dal sistema economico, in cui il rapporto può variare, queste strane cose hanno dei rapporti assolutamente garantiti. Un'analogia più vicina è quella con le sterline e gli scellini, dove ci sono sempre 20 scellini in una sterlina. Ma per complicare le cose il fisico invece di avere un numero come 20 usa magari dei rapporti irrazionali come 1,6183178 scellini per sterlina. Si

potrebbe credere che almeno i moderni fisici teorici di alta classe usino un'unità comune, invece si trovano lavori con gradi Kelvin per misurare l'energia, megacicli, e adesso Fermi alla meno uno, l'ultima invenzione. Per quelli che vogliono una prova che i fisici sono dopotutto umani, la prova sta nell'idiozia di tutte le diverse unità che usano per misurare l'energia.

In natura ci sono numerosi fenomeni interessanti che pongono dei problemi curiosi riguardanti l'energia. Recentemente si sono scoperti degli oggetti chiamati *quasar*, che sono estremamente lontani e che irradiano una tale quantità di energia sotto forma di luce e onde radio che ci si chiede da dove venga. Se la conservazione dell'energia è vera, la condizione del *quasar* dopo che ha irradiato questa enorme quantità di energia deve essere diversa dalla sua condizione precedente. Ci si può chiedere se questa energia venga dall'energia gravitazionale, cioè se l'oggetto abbia subito un collasso gravitazionale, e si trovi quindi in una diversa condizione. Oppure questa grande emissione proviene da energia nucleare? Nessuno lo sa. Potreste forse proporre che la legge della conservazione dell'energia è violata. Però, se in un oggetto studiato in maniera così incompleta come i *quasar* — essi sono talmente distanti che gli astronomi non riescono a vederli bene — qualcosa sembra essere in disaccordo con le leggi fondamentali, è molto improbabile che le leggi siano sbagliate; è più facile che siano i dettagli a essere sconosciuti.

Un altro interessante esempio dell'utilità della legge della conservazione dell'energia è nella reazione in cui un neutrone si disintegra in un protone, un elettrone, e un antineutrino. All'inizio si credeva che un neutrone diventasse un protone più un elettrone. Ma si poteva misurare l'energia di ogni particella, e quelle del protone e dell'elettrone insieme non davano quella del neutrone. C'erano due possibilità: poteva darsi che la legge della conservazione dell'energia non fosse giusta; e difatti Bohr,[11] per un po', suggerì che la legge funzionasse solo statisticamente, cioè in media. Ma adesso appare che l'altra possibilità è quella giusta, e cioè che il conto dell'energia non torni per la presenza di un'altra cosa che viene fuori, una cosa che ora chiamiamo un antineutrino. Questo antineutrino porta con sé dell'energia. Potreste dire che l'unica ragione di essere per l'antineutrino è per far tornare la legge della conservazione dell'energia. Tuttavia fa tornare anche molte altre cose, come la conservazione dell'impulso e altre leggi di conservazione, e molto recentemente è stato dimostrato che tali neutrini esistono veramente.

Questo esempio illustra un punto interessante. Com'è possibile che riusciamo a estendere le nostre leggi in regioni di cui non siamo sicuri? Come mai siamo così fiduciosi che, quando osserviamo un nuovo fenomeno, esso debba soddisfare la legge di conservazione che abbiamo verificato in altri fenomeni? Ogni tanto si legge sul giornale che i fisici hanno scoperto che una delle loro leggi preferite è errata. È dunque sbagliato dire che una legge vale anche in una regione in cui non la si è provata? Se non si dice che una legge vale in una regione in cui non si è verificata non si saprà mai nulla. Se le sole leggi che si trovano sono quelle che si è finito di osservare non si potranno mai fare delle predizioni. Ora, l'unica utilità della scienza è di andare avanti e cercare di indovinare. Così quello che facciamo sempre è di rischiare; nel caso dell'energia la cosa più probabile è che essa sia conservata anche in altre circostanze.

Naturalmente, questo significa che la scienza è incerta; quando si enuncia una proposizione riguardante un campo di esperienza non direttamente conosciuto, allora necessariamente c'è un margine di incertezza. Tuttavia dobbiamo pur fare delle affermazioni in campi non ancora conosciuti, altrimenti l'intera faccenda sarebbe inutile. Per esempio, a causa della conservazione dell'energia, la massa di un oggetto cambia quando esso si muove. Infatti, in virtù della relazione tra massa ed energia, l'energia che è associata al moto appare come una massa addizionale, di modo che gli oggetti diventano più pesanti quando si muovono. Newton, invece, credeva che le masse rimanessero costanti, e, quando si scoprì che questa idea era falsa, tutti si scandalizzarono che i fisici avessero sbagliato. Come mai essi avevano creduto di avere la risposta giusta? Perché l'effetto è molto piccolo, e appare solo quando si è vicini alla velocità della luce. Se si fa girare una trottola, essa pesa lo stesso di quando è ferma con l'approssimazione di una frazione piccolissima. Avrebbero allora dovuto dire: “Se non ci si muove con velocità maggiore di un tanto, la massa non cambia?” Questa almeno sarebbe un'affermazione sicura. No, perché se l'esperimento fosse stato fatto solo con trottole di legno, rame e acciaio, avrebbero dovuto dire: “Trottole di rame, legno e acciaio quando non si muovono con velocità maggiore di un tanto...” Vedete, non sappiamo tutte condizioni di cui abbiamo bisogno per un esperimento: per esempio, non si sa se la massa di una trottola radioattiva si conservi. Così, perché la scienza sia utile dobbiamo cercare di indovinare, e in modo da evitare di semplicemente descrivere gli esperimenti che abbiamo fatto, dobbiamo proporre nuove leggi oltre i limiti che abbiamo osservato. Non c'è niente di male in questo, anche se rende incerta la scienza. Se credevate che questa fosse per sua natura sicura, be', era semplicemente un errore da parte vostra.

Per ritornare, allora, alla nostra lista delle leggi di conservazione (tab. 1) possiamo aggiungere quella dell'energia. Per quanto ne sappiamo, essa è conservata perfettamente, ma non si presenta in multipli di unità fisse. Possiamo chiederci se sia sorgente di un campo. La risposta è sì. Einstein interpretò la gravitazione come generata dall'energia. Quest'ultima a sua volta è equivalente alla massa, e così l'interpretazione di Newton che la massa è quella che produce la gravità ha dovuto essere modificata e oggi si dice che è l'energia a produrre la gravità.

Ci sono altre leggi simili alla conservazione dell'energia, nel senso che si tratta di conservazione di numeri. Una di esse è la conservazione dell'impulso. Se si prendono tutte le masse di un sistema, si moltiplicano per le loro velocità, e si sommano tutte insieme, il risultato è l'impulso delle particelle, e quest'ultimo è conservato. Adesso si sa che l'energia e l'impulso sono legati molto strettamente, per cui le ho messe nella stessa colonna della nostra tabella.

Figura 16

Un altro esempio di una quantità conservata è il momento angolare, di cui abbiamo già discusso. Il momento angolare è l'area generata ogni secondo da oggetti che si

muovono. Per esempio, se abbiamo un corpo che si muove, e prendiamo un centro qualunque, la velocità a cui cresce l'area (fig. 16) spazzata da una retta dal centro all'oggetto, moltiplicata per la massa del corpo, e sommata su tutti i corpi, si chiama momento angolare. Questa grandezza non varia, e perciò si parla di conservazione del momento angolare. Incidentalmente, a prima vista, se sapete troppa fisica potreste credere che esso non sia conservato. Il fatto è che, come l'energia, esso appare in diverse forme. Sebbene i più credano che appaia solo nei corpi in rotazione, esso, come illustrerò, appare anche in altre forme. Se avete un filo metallico e gli avvicinate una calamita, aumentando così il campo magnetico, e quindi il flusso attraverso il filo, si produce una corrente elettrica; i generatori elettrici funzionano così. Immaginate che, invece di un filo, io abbia un disco, sul quale ci siano cariche elettriche analoghe agli elettroni sul filo (fig. 17). Adesso avvicino la calamita al centro, lungo l'asse, da molto lontano, molto velocemente fino al disco, così che si produce un cambiamento di flusso. Allora, proprio come nel filo, le cariche cominceranno a girare, e se il disco fosse su un ruota, mentre io avvicino la calamita esso si metterebbe a girare. Questo fatto sembra violare la conservazione del momento angolare, perché, quando la calamita è lontana dal disco, questo non gira, quando invece si avvicina esso ruota. Abbiamo avuto la rotazione senza spendere niente, e questo è contro la legge.

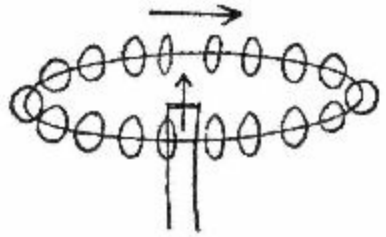


Figura 17

“Ah, sì, lo so — direte voi — deve esserci un altro tipo di interazione che fa ruotare la calamita nella direzione opposta.” Invece non accade così. Non c'è nessuna forza elettrica sulla calamita che tenda a farla ruotare nella direzione opposta. La spiegazione è che il momento angolare appare in due forme: una è il momento angolare del moto, e l'altro è il momento angolare dei campi elettrici e magnetici. C'è un momento angolare nel campo intorno alla calamita, anche se non appare come moto, e questo ha il segno opposto a quello della rotazione. Se prendiamo il caso inverso, la cosa è ancora più chiara (fig. 18). Se abbiamo solo le particelle, e la calamita vicina, e tutto sta fermo, dirò che c'è un momento angolare nel campo, in una forma nascosta che non appare come un'effettiva rotazione. Quando allontanate la calamita dal disco, il campo diminuisce così che il momento angolare deve apparire mettendo in rotazione il disco. La legge che lo fa girare è quella dell'induzione elettrica.

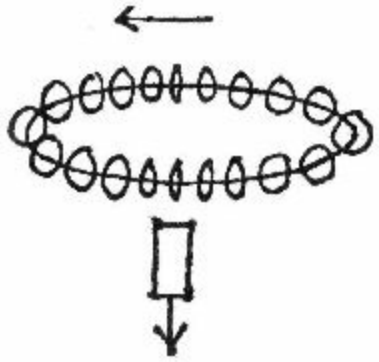


Figura 18

Mi è molto difficile rispondere se il momento angolare viene in multipli di una unità fissa. A prima vista sembra che questo sia assolutamente impossibile perché il momento angolare dipende dalla direzione in cui si proietta la figura. Poiché si tratta di un cambiamento di area, ovviamente questo sarà diverso a seconda che lo si guardi da un certo angolo o frontalmente. Se il momento angolare apparisse come multiplo di unità fisse, e se, per esempio, steste guardando una cosa che vale otto in queste unità, e poi la guardaste sotto un angolo leggermente differente, il numero di unità sarebbe un po' diverso, magari un pochino meno di otto. Ma sette non è un pochino meno di otto; è una quantità ben definita meno di otto. Così il momento angolare non può assolutamente presentarsi come multiplo di una unità fissa. Tuttavia questa dimostrazione viene meno a causa delle sottigliezze e delle particolarità della meccanica quantistica, e, se si misura il momento angolare intorno a un asse, stranamente appare sempre come multiplo di una unità fissa. Non è un tipo di unità, come una carica elettrica, che si possa contare. Il momento angolare viene sempre in multipli di una unità nel senso matematico che il numero che otteniamo in qualsiasi misura è un intero definito moltiplicato per l'unità di misura. Non possiamo, però, interpretare questo nello stesso modo come le unità di carica elettrica, unità immaginabili che si possono contare, una, poi un'altra, e poi un'altra ancora. Nel caso del momento angolare non possiamo immaginarle come unità separate; però, esso è sempre un numero intero... una cosa davvero molto strana.

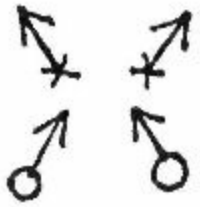


Figura 19

Ci sono anche altre leggi di conservazione, che non sono così interessanti come quelle che ho descritto, e che non corrispondono esattamente alla conservazione di numeri. Supponiamo di avere un congegno con particelle che si muovono con una certa simmetria definita, e supponiamo per esempio che i loro movimenti siano bilateralmente simmetrici (fig. 19). Allora, secondo le leggi della fisica, con tutti i movimenti e le collisioni, c'è da prevedere che guardando la stessa figura più tardi essa sia ancora bilateralmente

simmetrica. Ecco dunque un tipo di conservazione, la conservazione del carattere di simmetria. Dovrei aggiungerlo alla mia tabella, ma non corrisponde a un numero che si misura, e lo discuteremo più in dettaglio nella prossima lezione. Il motivo per cui questa legge di conservazione non ha molta importanza nella fisica classica è che è raro trovare questa bella situazione simmetrica iniziale. Ma in meccanica quantistica, quando trattiamo sistemi molto semplici, come gli atomi, la loro costituzione interna spesso ha un tipo di simmetria, come la simmetria bilaterale, e tale carattere si conserva. Questa è perciò una legge importante per comprendere i fenomeni quantici.

Possiamo domandarci se ci sia una ragione più profonda per queste leggi di conservazione, o se invece dobbiamo prenderle come sono. Discuterò questo problema nella prossima lezione, ma c'è un punto che vorrei trattare adesso. Parlando di queste cose a un livello accessibile a tutti, può sembrare che si introducano molti concetti slegati; ma uno studio più completo dei vari princìpi fa apparire profonde interconnessioni tra concetti diversi, ognuno dei quali in un modo o nell'altro ne implica altri. Un esempio di questa connessione è la relazione tra la relatività e la necessità della conservazione locale. Se lo avessi affermato senza dimostrazione, sarebbe apparso quasi miracoloso che il non poter decidere a che velocità ci si sta muovendo implichi che se qualcosa è conservato, lo debba essere localmente, e cioè senza saltare da un punto all'altro.

A questo punto vorrei far vedere come la conservazione del momento angolare, la conservazione dell'impulso, e alcune altre cose sono in qualche modo legate tra loro. La prima ha a che fare con l'area spazzata da particelle in movimento. Se si hanno molte particelle (fig. 20), e si prende il centro x molto lontano, le distanze di ogni corpo da x sono quasi uguali. In questo caso l'unica cosa che conta nello spazzare le aree, o nella conservazione del momento angolare, è la componente del moto che nella figura 20 è verticale.

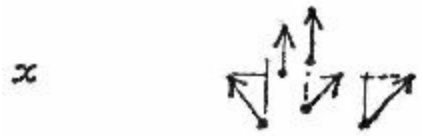


Figura 20

Scopriamo allora che la somma delle masse, ognuna moltiplicata per la componente verticale della velocità, deve essere una costante; infatti il momento angolare intorno a qualsiasi punto è costante, e, se il punto scelto è sufficientemente lontano, solo le masse e le velocità hanno importanza. In questo modo la conservazione del momento angolare implica la conservazione dell'impulso. Questo a sua volta implica un'altra cosa, cioè la conservazione di una grandezza tanto strettamente legata alle altre che non mi sono preoccupato di metterla nella tabella. Si tratta del principio di conservazione del moto del baricentro (fig. 21).

Una massa, in una scatola, non può semplicemente sparire da una posizione e muoversi in un'altra da sola. Questo non ha niente a che vedere con la conservazione della massa; avete ancora la massa, solo spostata da un punto all'altro. La carica potrebbe farlo, ma non la massa. Lasciatemi spiegare perché. Le leggi della fisica non sono

influenzate dal moto, così possiamo supporre che la scatola stia lentamente salendo. Adesso prendiamo il momento angolare rispetto a un punto non troppo lontano, *x*. Mano a mano che la scatola sale, se la massa se ne sta tranquillamente ferma, nella posizione 1 produrrà una data area a una data velocità. Dopo che la massa è arrivata nella posizione 2, l'area crescerà a una velocità maggiore, perché, sebbene l'altezza sia la stessa dato che la scatola continua a salire, la distanza da *x* alla massa è cresciuta. Per la conservazione del momento angolare, non si può cambiare la velocità areolare, e perciò non si può semplicemente muovere una massa da un punto a un altro, a meno che non si muova qualche altra cosa per bilanciare il momento angolare. Questo è il motivo per cui i razzi nello spazio vuoto non possono muoversi... mentre invece tutti sanno che si muovono. La ragione è che quando avete molte masse, se ne muovete una in avanti, dovete muovere le altre indietro, cosicché il moto totale avanti e indietro delle masse sia nullo. È così che un razzo funziona. All'inizio se ne sta fermo, diciamo nello spazio, e poi lancia fuori del gas dalla parte posteriore e perciò si muove in avanti.

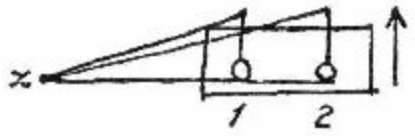


Figura 21

Il fatto è che il centro di massa, ossia la media di tutta la massa di tutta la roba che c'è al mondo, è ancora dove era prima. La parte interessante è andata avanti, e una parte non interessante di cui non ci curiamo è andata indietro. Non c'è nessun teorema che dica che le cose interessanti siano conservate, solo la somma di tutto è conservata.

Scoprire le leggi della fisica è come cercare di mettere insieme i pezzi di un incastro. Abbiamo tutti questi pezzi diversi, e oggi stanno proliferando rapidamente. Molti stanno lì e non possono essere collegati con gli altri. Come facciamo a sapere che devono stare insieme? Come facciamo a sapere che sono veramente parte di una sola figura ancora incompleta? Non siamo sicuri, e questo ci preoccupa un po', ma traiamo incoraggiamento dalle caratteristiche comuni di vari pezzi. Hanno tutti del cielo azzurro, oppure sono tutti fatti dello stesso legno. Tutte la varie leggi fisiche obbediscono agli stessi princìpi di conservazione.

Capitolo 4.
La simmetria nella legge fisica

La simmetria sembra affascinare la mente umana: ci piace guardare le cose simmetriche che ci sono in natura, le sfere perfette come il sole e i pianeti, i cristalli dei fiocchi di neve, o i fiori che anch'essi sono quasi simmetrici. Tuttavia non è tanto la simmetria degli oggetti in natura che voglio discutere qui, quanto piuttosto la simmetria delle leggi fisiche stesse. È facile comprendere come un oggetto possa essere simmetrico, ma come può una legge fisica avere una simmetria? Certamente non ce l'ha, ma ai fisici piace usare parole ordinarie per esprimere altri concetti. In questo caso essi sentono che c'è qualcosa nelle leggi fisiche che è molto vicino alla simmetria negli oggetti, e la chiamano simmetria delle leggi. È di questo argomento che voglio parlare.

Che cos'è la simmetria? Se mi guardate, io sono simmetrico, a destra e a sinistra, almeno esternamente. Un vaso può essere simmetrico in questo senso, o anche in altri. Come si può definire la simmetria? Il fatto che io sia simmetrico a destra e a sinistra significa che se si mette tutto quello che è da una parte dall'altra, e viceversa, cioè se si scambiano semplicemente le due parti, io apparirò esattamente lo stesso. Un quadrato ha una simmetria di un tipo speciale, perché se lo faccio ruotare di 90 gradi apparirà uguale a prima. Il matematico Weyl,[12] ha dato questa eccellente definizione di simmetria: una cosa è simmetrica se è possibile cambiare in essa qualche cosa lasciandone immutato l'aspetto. In questo senso possiamo dire che le leggi della fisica sono simmetriche; ci sono delle cose che possiamo fare ad esse, o al nostro modo di rappresentarle, che non producono nessuna differenza e che lasciano tutto invariato nei suoi effetti. È di questo aspetto delle leggi fisiche che tratteremo in questa lezione.

L'esempio più semplice di questo tipo di simmetria — vedrete che non è quello che avreste potuto credere, cioè la simmetria rispetto alla destra e alla sinistra, o qualcosa del genere — è la simmetria chiamata *traslazione spaziale*. Questa ha il significato seguente: se costruite qualsiasi tipo di apparecchio, o fate un qualunque esperimento con certi oggetti e poi andate a costruire lo stesso apparecchio per fare lo stesso esperimento, con oggetti simili, ma posti qui invece che là, cioè semplicemente traslati da un punto all'altro dello spazio, allora nell'esperimento traslato accadranno le stesse cose che accadevano nell'esperimento originario. In effetti *qui* non è vero. Se costruissimo un apparecchio e poi lo muovessimo a cinque metri a sinistra del punto in cui mi trovo, entreremmo nel muro, e allora sorgerebbero delle difficoltà. È necessario, per definire quest'idea, prendere in considerazione tutto quello che potrebbe influenzare la situazione, di modo che, quando si muove una cosa, si deve muovere tutto. Per esempio, se nel sistema ci fosse un pendolo, e io mi spostassi a trentamila chilometri alla mia destra non funzionerebbe più bene perché il funzionamento del pendolo dipende dall'attrazione della terra. Tuttavia, se immagino di muovere la terra insieme all'apparecchiatura, esso si comporterebbe nella

stessa maniera. Il problema in questa situazione è che si deve traslare tutto quello che potrebbe avere un'influenza sull'andamento del fenomeno. La cosa può apparire priva di senso, perché sembra che quando un esperimento traslato non funziona si possa sempre pensare di non aver traslato abbastanza roba, e che quindi si debba aver ragione in ogni caso. In effetti non è così, perché non è affatto evidente che si debba aver ragione. La cosa notevole della natura è che è possibile traslare abbastanza roba in modo che essa si comporta nello stesso modo, e questa è un'affermazione positiva.

Vorrei far vedere che ciò è vero. Prendiamo come esempio la legge della gravitazione, che dice che la forza tra i corpi varia in maniera inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza; vorrei ricordarvi che un corpo reagisce a una forza cambiando nel tempo la sua velocità in direzione della forza. Se io ho una coppia di oggetti, come un pianeta che ruota intorno al sole, e li muovo ambedue, la distanza tra i due ovviamente non cambia, e quindi le forze non cambiano. Inoltre, quando sono nella situazione spostata, continueranno ad andare alla stessa velocità e tutti i cambiamenti rimarranno in proporzione, e la rotazione nei due sistemi è esattamente la stessa. Il fatto che la legge dica “la distanza tra i due oggetti”, anziché la distanza assoluta dall'occhio centrale dell'universo, significa che le leggi si possono traslare nello spazio.

Questa dunque è la prima simmetria: la traslazione nello spazio. Quella che viene dopo potrebbe essere chiamata traslazione nel tempo; è forse meglio dire che uno spostamento nel tempo non ha nessuna importanza. Cominciamo a far girare un pianeta intorno al sole in una certa direzione; se potessimo farlo ricominciare due ore o due anni dopo, ma con il sole e il pianeta esattamente nello stesso modo, allora tutto andrebbe esattamente come prima, perché anche qui la legge parla della velocità, ma mai del tempo assoluto da cui bisogna cominciare a misurare le cose. In questo esempio particolare, in effetti, non siamo del tutto sicuri. Quando abbiamo discusso la gravitazione, abbiamo parlato della possibilità che la forza di gravità cambiasse con il tempo. Questo significa che la traslazione nel tempo potrebbe non essere una proposizione valida, perché se la costante di gravitazione fosse più debole fra un miliardo di anni di quello che è adesso, non sarebbe vero che il moto del nostro sole e pianeta sperimentale sarebbe uguale tra un miliardo di anni. Per quello che ne sappiamo oggi (ho solo discusso le leggi come le conosciamo oggi; come desidererei conoscere le leggi così come le conosceremo domani!) per quello che ne sappiamo, dicevo, un ritardo nel tempo non fa nessuna differenza.

A rigore, sappiamo che almeno per una cosa questo non è del tutto vero. È vero per quelle che adesso chiamiamo leggi fisiche; sembra però (benché la cosa possa anche essere diversa) che l'universo abbia avuto inizio a un tempo ben definito, e che tutto stia esplodendo. Potreste chiamar questa una condizione di geografia, analoga a quella che si ha quando, facendo una traslazione nello spazio, si deve traslare tutto. Nello stesso senso si potrebbe dire che le leggi per il tempo sono uguali e che dobbiamo muovere l'espansione dell'universo assieme a tutto il resto. Avremmo potuto fare un'altra analisi in cui facevamo cominciare l'universo più tardi; ma non siamo noi a far cominciare l'universo e non abbiamo nessun controllo sulla situazione e nessun modo per definire sperimentalmente l'idea. Quindi, per quello che riguarda la scienza, non c'è nessun modo per distinguere tra le due cose. Il nocciolo della questione è che sembra che le condizioni

dell'universo stiano cambiando nel tempo, che le galassie si stiano separando le une dalle altre, di modo che se doveste svegliarvi, come in un racconto di fantascienza, a un tempo sconosciuto, potreste dire misurando le distanze medie tra le galassie in che epoca siete. Ciò significa che il mondo non sarà lo stesso con il passare del tempo.

Oggi si è soliti separare le leggi fisiche, che dicono come si muoveranno gli oggetti se date loro l'avvio in una certa condizione, dall'affermazione di come effettivamente è cominciato il mondo, perché sappiamo così poco su questo argomento. Di solito si considera che la storia astronomica, o storia cosmologica, è un po' diversa dalla legge fisica. Eppure, se dovessi definire la differenza, mi troverei in imbarazzo. La migliore caratteristica della legge fisica è la sua universalità, e se c'è qualcosa di universale, questa è proprio l'espansione di tutte le nebulose. Non ho perciò nessun modo per definire la differenza. Tuttavia, se mi limito a trascurare l'origine dell'universo e considero solo le leggi fisiche conosciute, un ritardo nel tempo non fa nessuna differenza.

Prendiamo degli altri esempi di leggi di simmetria. Uno è la rotazione nello spazio, attorno a un punto fisso. Se faccio degli esperimenti con un'apparecchiatura costruita in un punto, e poi ne prendo un'altra (possibilmente traslata in modo che non imbrogli) esattamente uguale, ma girata in modo che tutti gli assi siano in una direzione diversa, essa funzionerà nello stesso modo. Di nuovo dobbiamo girare tutto quello che ha influenza. Se questo affare è un orologio a pendolo, e lo si mette orizzontalmente, il pendolo si appoggerà semplicemente alla parete della sua cassa e non funzionerà affatto. Ma se si gira anche la terra (cosa che sta accadendo tutto il tempo) l'orologio continua a funzionare.

La descrizione matematica di questa possibilità di girare è piuttosto interessante. Per descrivere quello che accade in una data situazione, usiamo dei numeri per dire dove si trova un dato oggetto. Questi si chiamano le coordinate di un punto, e certe volte usiamo tre numeri, per descrivere l'altezza del punto sopra un dato piano, la distanza in avanti (per esempio, con numeri positivi), o indietro (in numeri negativi) e lo spostamento a sinistra o a destra. Nel caso presente non mi preoccupo della coordinata che dà la distanza dal piano orizzontale perché, per le rotazioni, mi basta usare due di queste tre coordinate. Chiamiamo la distanza davanti a me x, e chiamiamo y a distanza alla mia sinistra. Allora posso individuare qualsiasi corpo dicendo a che distanza si trova in avanti e a che distanza alla mia sinistra. Quelli che sono stati a New York sanno che i numeri delle strade funzionano molto bene in questo modo, o almeno lo sapevano fino a che hanno cambiato il nome della Sesta Strada! L'idea matematica della rotazione è questa: se io individuo un punto nel modo che ho descritto, dando le sue coordinate x e y, e qualcun altro, che guarda nella stessa direzione individua lo stesso punto nello stesso modo, ma calcolando x' e y' in relazione alla sua posizione, allora si può vedere che la mia coordinata x è una mescolanza delle due coordinate calcolate dall'altro individuo. La connessione della trasformazione è che x si mescola in x' e y', e y in y' e x'. Le leggi della natura devono essere scritte in modo tale che, se si fa questa mescolanza e si ricostituisce nelle equazioni, queste ultime mantengano la stessa forma. Questo è il modo in cui la simmetria appare in forma matematica. Si scrivono cioè le equazioni con certe lettere, e poi si usa una formula per cambiare le lettere da x e y a un diverso x, x', e un diverso y, y';

le equazioni che si ottengono hanno la stessa forma di quelle di partenza ma tutte le lettere hanno ora gli apici. Ciò significa che l'altro individuo vedrà accadere il fenomeno nel suo apparecchio nello stesso modo in cui io lo vedo nel mio, che è però girato dall'altra parte (fig. 22).

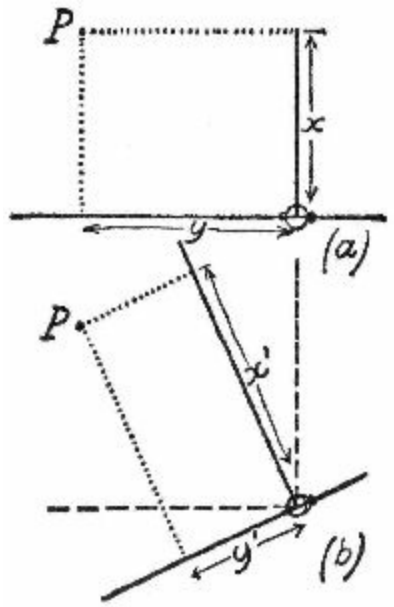


Fig. 22. (*a*) La relazione tra il punto *P* e l'osservatore è descritta da due numeri *x*, *y*; *x* dice la distanza di *P* nella direzione di fronte all'osservatore, *y* dice la sua distanza verso sinistra, (*b*) Lo stesso punto P è descritto da due nuovi numeri *x'*, *y'* quando l'osservatore si trova nella stessa posizione ma è ruotato di un certo angolo.

Adesso darò un altro interessantissimo esempio di legge di simmetria in cui interviene la velocità uniforme su una retta. Si pensa che le leggi della fisica non cambiano quando ci si muove a velocità uniforme su una linea retta: questo si chiama principio di relatività. Se abbiamo un'astronave con degli apparecchi che fanno qualche cosa, e abbiamo un altro apparecchio simile qui a terra, allora, se l'astronave si muove a velocità uniforme, chi è all'interno di essa e guarda quello che succede alle sue apparecchiature, non può vedere nulla di diverso dagli effetti che vedo sui miei apparecchi io che sono fermo. Naturalmente se egli guarda fuori, o se va a sbattere contro un muro, o fa qualche altra cosa del genere, allora la cosa è diversa; ma fino a che si muove a velocità uniforme su una linea retta, le leggi della fisica gli appaiono esattamente come appaiono a me. Poiché le cose stanno così non posso dire chi si sta muovendo.

Devo mettere ben in chiaro, prima di andare avanti, che in tutte queste trasformazioni e in tutte queste simmetrie non stiamo parlando di muovere tutto l'universo. Nel caso del tempo non dico niente se immagino di muovere tutti i tempi dell'intero universo. Così pure non ci sarebbe nessun contenuto nell'affermazione che se prendessi tutto nell'intero universo e lo muovessi nello spazio esso si comporterebbe nello stesso modo. La cosa straordinaria è che, se prendo un apparecchio e lo sposto, purché controlli molte condizioni e includa sufficienti apparecchiature, posso prendere un pezzo del mondo e muoverlo relativamente alla media del resto delle stelle, senza che ciò produca alcuna differenza. Nel caso della relatività, significa che qualcuno che si muove liberamente a velocità uniforme su una retta, relativamente alla media del resto delle nebulose, non vede nessun effetto. Detto in modo diverso, è impossibile determinare dai risultati di

esperimenti compiuti dentro un'automobile, senza guardare fuori, se ci sta muovendo rispetto a tutte le stelle.

Questa proposizione fu per la prima volta enunciata da Newton. Prendiamo la sua legge di gravitazione che dice che le forze sono inversamente proporzionali ai quadrati delle distanze, e che una forza produce un cambiamento di velocità. Ora, supponiamo che io abbia calcolato quello che succede quando un pianeta ruota intorno a un sole fisso, e che poi voglia calcolare quello che succede quando un pianeta ruota intorno a un sole alla deriva. Le velocità che ho nel primo caso sono tutte differenti da quelle del secondo perché devo sommare una velocità costante. La legge, però, è enunciata in termini di *variazioni* di velocità, di modo che la forza sul pianeta con il sole fisso è uguale a quella sul pianeta con il sole alla deriva, per cui anche i cambiamenti di velocità dei due pianeti saranno identici. Così, qualunque sia la velocità addizionale con cui è partito il secondo pianeta, essa si mantiene, e tutti i cambiamenti vanno contati a partire da quella velocità. Il risultato finale di questa analisi è che se si aggiunge una velocità costante le leggi saranno esattamente uguali, di modo che non possiamo, studiando il sistema solare e il modo in cui i pianeti girano intorno al sole, determinare se il sole sta andando alla deriva nello spazio. Secondo la legge di Newton non c'è nessun effetto di questo andare alla deriva nello spazio sul moto dei pianeti intorno al sole; così Newton aggiunse che “Il moto relativo dei corpi nello spazio è lo stesso sia che questo sia fermo rispetto alle stelle fisse, o che si muova a velocità uniforme su una retta.”

Col passare del tempo, nuove leggi furono scoperte dopo quella di Newton, e tra esse le leggi dell'elettricità trovate da Maxwell.[13] Una delle conseguenze delle leggi dell'elettricità era che ci dovevano essere delle onde, onde elettromagnetiche — la luce ne è un esempio — che si muovono esattamente a 300000 chilometri al secondo. Con questo voglio dire 300000 chilometri al secondo, qualsiasi cosa accada. Perciò doveva essere possibile stabilire chi era in quiete, perché la legge che la luce si muove alla velocità di 300000 chilometri al secondo non è certamente tale, a prima vista, da permettere a un osservatore di muoversi senza un qualche effetto. Se siete su un'astronave che viaggia a 150000 chilometri al secondo in una certa direzione, e io che sto fermo vi sparo contro un fascio di luce a 300000 chilometri al secondo attraverso un piccolo foro nell'astronave, dal momento che viaggiate a 150000 chilometri al secondo e la luce a 300000, a voi sembrerà che la luce passi a 150000 chilometri al secondo. Ma se fate effettivamente questo esperimento vi sembrerà che la luce vi passi vicino a 300000 chilometri al secondo, e anche a me sembrerà che mi passi vicino alla stessa velocità!

Spesso i fatti della natura non sono così facili da capire, e questo esperimento in particolare è così contrario al buon senso, che ci sono ancora delle persone che non credono al risultato.

Ogni nuovo esperimento però dimostra che la velocità della luce è di 300 000 chilometri al secondo, a qualsiasi velocità ci si muova. Occorre tuttavia spiegare come ciò possa accadere. Sia Einstein, sia Poincaré,[14] si accorsero che l'unica spiegazione dell'uguaglianza delle velocità misurate da un osservatore in moto e da uno fermo sta nella loro diversa sensazione del tempo, ossia nel fatto che gli orologi in un'astronave battono il tempo a una velocità diversa da quelli a terra, e così via. Voi potreste dire: “Ah,

ma se l'orologio batte il tempo e io guardo l'orologio che c'è nell'astronave, mi accorgo che va più piano." No, anche il vostro cervello va più piano! Allora, assicuratisi che nell'astronave tutto va normalmente, è stato possibile inventare un sistema secondo il quale nell'astronave si misurano 300000 chilometri-astronave al secondo-astronave, mentre qui misuriamo 300000 miei chilometri al mio secondo. Questa è una cosa molto ingegnosa e, stranamente, risulta essere davvero fattibile.

Ho già menzionato una delle conseguenze di questo principio di relatività, cioè che non si può dire a che velocità ci si muove su una retta; ricordate il caso che avevamo nell'ultima lezione in cui c'erano due automobili *A* e *B* (fig. 23).

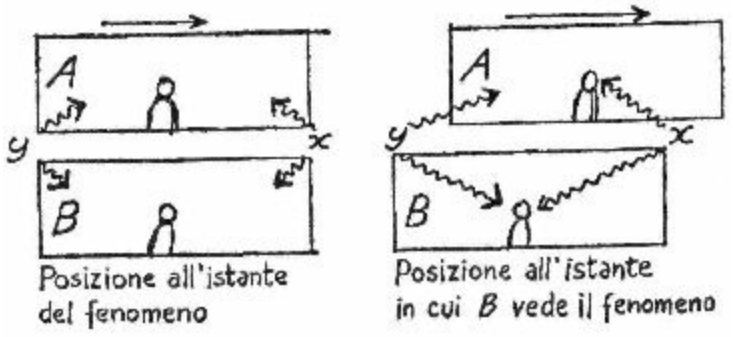


Figura 23

C'era un evento che accadeva alle due estremità di *B*. Un uomo stava nel mezzo della macchina, e gli avvenimenti (x e y) accadevano alle due estremità della sua vettura a un certo istante, che egli sosteneva fosse lo stesso per ambedue gli avvenimenti perché, stando nel centro, vedeva la luce di ambedue nello stesso istante. Ma il signore della macchina *A*, che si muoveva a velocità uniforme rispetto a *B*, vedeva le stesse due cose non allo stesso tempo, ma prima x perché la luce gli giungeva prima che quella da y, perché si stava muovendo in avanti. Vedete che una delle conseguenze del principio di simmetria per la velocità uniforme su una linea retta — la parola simmetria significa che non si può dire quale punto di vista sia quello corretto — è che parlare di qualche cosa che sta accadendo nell'universo "ora" non vuol dire niente. Se vi state muovendo a velocità uniforme in linea retta, le cose che appaiono simultanee a voi non sono le stesse che appaiono simultaneamente a me, anche se ci passiamo vicino nell'istante in cui io credo che sia accaduto l'avvenimento simultaneo. Non possiamo accordarci a distanza su quello che significa "adesso". Ciò significa una profonda trasformazione delle nostre idee di spazio e tempo, necessaria per mantenere il principio che la velocità uniforme su una retta non possa essere osservata. Ne vien fuori che due avvenimenti che da un punto di vista appaiono simultanei, guardati da un altro punto di vista non lo sono affatto, a condizione che non avvengano nello stesso punto, ma a grande distanza tra loro.

Potete vedere che questo è molto simile alla faccenda degli x e y nello spazio. Se io sto guardando un uditorio, i due lati del palcoscenico su cui io sto sono al mio stesso livello. Hanno lo stesso x ma diverso y. Ma se io mi giro di 90 gradi, e guardo lo stesso paio di muri, ma da un diverso punto di vista, allora uno è davanti a me e l'altro dietro, cioè hanno diverso x'. Così, nello stesso modo i due avvenimenti che da un certo punto di vista possono accadere allo stesso tempo (stesso t), da un altro possono accadere a due tempi

diversi (diverso t'). Così si è generalizzata la rotazione a due dimensioni di cui ho parlato prima, al caso dello spazio e del tempo, aggiungendo il tempo allo spazio per fare un mondo a quattro dimensioni. Non è semplicemente un'aggiunta artificiale, come la spiegazione che se ne dà nella maggior parte dei libri di divulgazione, che dicono: “Sommiamo lo spazio al tempo, perché non si può solo localizzare un punto; bisogna anche darne il tempo.” Questo è vero, però non lo renderebbe ancora un vero spaziotempo a quattro dimensioni, ma aggiungerebbe solo una cosa all'altra. Lo spazio reale ha, in un certo senso, la caratteristica che la sua esistenza è indipendente dal particolare punto di vista, cioè che una certa quantità di “avanti-indietro”, guardata da punti di vista diversi, può essere confusa con “destra-sinistra”. In modo analogo una certa quantità di tempo “futuro-passato” può essere mescolato con una certa quantità di spazio. Spazio e tempo devono essere completamente amalgamati; dopo questa scoperta Minkowski disse che “Lo spazio e il tempo da soli diventeranno semplici ombre, e solo una specie di unione tra i due sopravviverà.”

Ho portato questo esempio in dettaglio perché esso è realmente l'inizio dello studio delle simmetrie nelle leggi fisiche. Fu Poincaré a suggerire di analizzare quello che si può fare alle equazioni senza modificarle, ossia di studiare le simmetrie delle leggi fisiche. La simmetria di traslazione nello spazio e nel tempo e le altre simili non erano molto profonde, mentre la simmetria della velocità rettilinea uniforme è molto interessante, e ha ogni sorta di conseguenze. Inoltre queste conseguenze si possono estendere a leggi che non conosciamo. Per esempio, ammettendo che questo principio sia vero per la disintegrazione di un mesone μ, possiamo affermare che è impossibile, neppure usando mesoni μ, dire a che velocità stiamo andando su un'astronave; in questo modo impariamo almeno qualcosa sulla disintegrazione dei mesoni μ, anche se non sappiamo il motivo per cui essi si disintegrano.

Ci sono molte altre simmetrie alcune delle quali di un tipo molto diverso. Ne menzionerò solo alcune. Una di queste asserisce che si può sostituire un atomo con un altro dello stesso tipo, senza che questo produca alcuna differenza in nessun fenomeno. Adesso mi potreste chiedere: “Che cosa intende quando dice *dello stesso tipo*?” Posso solo rispondere che voglio dire un atomo che, quando è sostituito dall'altro, non produce nessuna differenza! Sembra che i fisici stiano sempre dicendo delle sciocchezze, non è vero? Ci sono molti diversi tipi di atomi, e se ne sostituite uno con un altro di tipo diverso la differenza c'è, mentre invece, se lo sostituite con uno dello stesso tipo non c'è nessuna differenza: il che ha tutta l'aria di un circolo vizioso. Ma il vero significato dell'affermazione è che ci *sono* atomi dello stesso tipo, cioè che *è* possibile trovare gruppi, ossia classi di atomi, tali che potete sostituirne uno con un altro dello stesso tipo in modo che non ci sia nessuna differenza. Dal momento che il numero di atomi in qualsiasi piccolo pezzo di materiale è 1 seguito da 23 zeri, è molto importante che siano tutti uguali, e non tutti diversi. È realmente molto interessante che li si possa classificare in un numero limitato di poche centinaia di tipi diversi di atomi, e così l'affermazione che possiamo sostituire un atomo con un altro dello stesso tipo ha un contenuto reale. Essa ha un significato molto importante in meccanica quantistica, ma mi è impossibile spiegarlo qui in dettaglio, in parte, ma solo in parte, perché questa lezione è indirizzata a

un pubblico che non ha una cultura matematica; ad ogni modo è una questione piuttosto sottile. In meccanica quantistica l'affermazione che si può sostituire un atomo con un altro dello stesso tipo ha delle conseguenze meravigliose: produce dei fenomeni particolari nell'elio liquido, il liquido che scorre nei tubi senza alcuna resistenza, che cioè continua a scorrere per sempre; più ancora è l'origine di tutta la tavola periodica degli elementi, e della forza che impedisce che io sprofondi attraverso il pavimento. Non posso entrare in tutti questi dettagli, ma voglio chiarire quanto sia importante studiare questi princìpi.

Ormai sarete probabilmente convinti che tutte le leggi della fisica sono simmetriche rispetto a qualsiasi tipo di cambiamento, e così adesso voglio farvene vedere qualcuna che non funziona. La prima è quella del cambiamento di scala. Se costruite un apparecchio, e poi ne costruite un altro, fatto esattamente nello stesso modo, dello stesso materiale, ma grande il doppio, non è vero che esso funzionerà nello stesso modo. Voi che siete familiari con gli atomi lo capirete facilmente, perché se costruissi l'apparecchiatura dieci miliardi di volte più piccola, avrei solo in essa cinque atomi, e non posso, per esempio, fare una macchina utensile con cinque atomi. È perfettamente ovvio che se andiamo così avanti, non possiamo cambiare la scala; anche prima che si sviluppasse completamente il modello atomico della materia però divenne chiaro che questa legge non era giusta. Avrete probabilmente visto nei giornali che qualcuno di tanto in tanto costruisce una cattedrale con fiammiferi, con vari piani, e con tutto più gotico e più delicato di qualsiasi chiesa gotica. Perché non costruiamo mai delle grandi cattedrali così, con grandi tronchi, e lo stesso enorme numero di dettagli? La risposta è che se ne costruissimo una, sarebbe così alta e così pesante che crollerebbe. Ah! ma avete dimenticato che quando confrontate due cose dovete cambiare tutto quello che c'è nel sistema. La piccola cattedrale di fiammiferi è attratta dalla terra, così, per poter fare il paragone, la cattedrale grande dovrebbe essere attratta da una terra ancora più grande. Peccato: una terra più grande la attirerebbe ancora di più, ed è ancora più sicuro che i travi si romperebbero!

Il fatto che le leggi della fisica non rimanessero invariate sotto cambiamento di scala, fu scoperto per primo da Galileo. Discutendo la resistenza delle aste e delle ossa, diceva che, se si vuole un osso per un animale più grande — diciamo un animale il doppio per altezza, lunghezza e spessore, cioè che pesi otto volte di più — bisognerà che sia capace di sostenere un peso otto volte maggiore. Ma quello che un osso può sostenere dipende dalla sua sezione, e se si facesse l'osso grande due volte tanto, avrebbe solo quattro volte la sezione, e potrebbe solo sopportare un peso quadruplo. Nel suo libro *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, vedrete figure di ossa immaginarie di enormi cani, completamente sproporzionati. Penso che Galileo considerasse la scoperta che le leggi di natura non sono invariate sotto cambiamento di scala tanto importante quanto le sue leggi del moto, perché nel suo libro sono messe insieme.

Un altro esempio di una trasformazione che non lascia invariate le leggi, si ha nella rotazione di un'astronave con velocità angolare uniforme. Non è vero che in questo caso non si possa decidere se si stia ruotando: lo si può benissimo, perché, tra l'altro, ci si accorge di avere il capogiro. Ma ci sono anche altri effetti: per esempio gli oggetti vengono

gettati verso le pareti dalla forza centrifuga (o comunque lo vogliate descrivere, e spero che non ci siano tra gli ascoltatori degli insegnanti di fisica del primo anno che mi possano correggere!). Così è possibile accorgersi che la terra sta ruotando, con un pendolo o con un giroscopio, e probabilmente sapete che vari osservatori e musei hanno i cosiddetti pendoli di Foucault[15] che mostrano, anche senza guardare le stelle, che la terra sta ruotando. È possibile, stando sulla terra e senza guardare fuori, accorgersi che ci stiamo muovendo a una velocità angolare uniforme perché le leggi della fisica non rimangono invariate rispetto a tale moto.

È stato molte volte proposto che la terra stia veramente ruotando rispetto alle galassie, e che, se facessimo ruotare anche le galassie ciò non produrrebbe nessuna differenza. Be', non so che cosa accadrebbe se facessimo girare l'intero universo, e fino a questo momento non abbiamo nessun modo per dirlo. E neppure, per adesso, abbiamo una teoria che descriva l'influenza di una galassia sulle cose che sono qui, una teoria cioè da cui venga fuori, in modo diretto, senza trucchi o forzature, che l'inerzia per rotazione, cioè l'effetto della rotazione, che fa sì che l'acqua in un secchio rotante abbia una superficie concava, sia il risultato di una forza prodotta dagli oggetti che sono intorno. Il principio di Mach afferma proprio questo, ma che ciò sia vero non è ancora stato dimostrato. Dal punto di vista più strettamente sperimentale, ci si può chiedere se si veda qualche effetto quando ruotiamo a una velocità uniforme relativamente alle nebulose. La risposta è sì. Vediamo qualche effetto se ci stiamo muovendo su un'astronave a velocità uniforme su una retta relativamente alle nebulose? La risposta in questo caso è no. Sono due cose diverse, cioè non possiamo dire che ogni moto sia relativo: questo non è il contenuto della relatività che afferma solo che la velocità uniforme su una retta relativamente alle nebulose è inosservabile.

La prossima legge di simmetria che voglio discutere è interessante sia per il suo contenuto che per la sua storia. Si tratta del problema della riflessione spaziale. Io costruisco un meccanismo, diciamo un orologio, e poi a breve distanza un altro orologio, che è un'immagine speculare del primo. I due vanno assieme come due guanti, il destro e il sinistro; ogni molla che in uno è caricata in un modo, nell'altro orologio è caricata in senso inverso, e così via. Carico i due orologi, li metto in posizioni corrispondenti, e li lascio andare. Ci si domanda se andranno sempre d'accordo, cioè se tutti i meccanismi di un orologio saranno l'immagine speculare di quelli dell'altro. Non so che cosa voi possiate pensare. Probabilmente penserete che sia vero, come del resto aveva creduto la maggior parte della gente. Naturalmente trascuriamo le particolarità della geografia, perché questa permette facilmente di distinguere la destra dalla sinistra. Per esempio, se siamo in Florida e guardiamo verso New York possiamo dire che l'oceano è alla nostra destra. Questo distingue la destra dalla sinistra, e se l'orologio funzionasse con l'acqua del mare, uno di essi non funzionerebbe perché sarebbe lontano dall'acqua. In questo caso dovremmo immaginare che anche la geografia della terra fosse girata verso l'altro orologio come qualsiasi altra cosa influenzi il fenomeno. Così pure dobbiamo prescindere dagli accidenti storici: se prendiamo una vite in un negozio di ferramenta, avremo grandi probabilità di prendere una vite destra e così potreste dire che l'altro orologio non sarebbe lo stesso perché sarebbe più difficile trovare le viti. Ma se prescindiamo da queste

differenze accidentali a prima vista sembra doversi concludere che i due orologi marceranno di pari passo. Risulta in effetti che le leggi della gravitazione sono tali che così sarebbe davvero se l'orologio funzionasse a gravità. Anche le leggi dell'elettricità e del magnetismo sono tali che se oltre al resto i nostri orologi avessero all'interno elettromagneti, correnti e fili e che so io, funzionerebbero ancora ugualmente. E neppure ci sarebbe alcuna differenza se gli orologi funzionassero con normali reazioni nucleari. C'è però qualcosa che può produrre una differenza, e ci arriverò tra un momento. Forse sapete che è possibile misurare la concentrazione dello zucchero in acqua facendovi passare luce polarizzata. Facciamo arrivare della luce polarizzata da un polaroide in una certa direzione su dell'acqua zuccherata. Osserviamo che perché la luce passi attraverso un altro polaroide, questo deve ruotare tanto più verso destra quanto più è grande lo spessore di acqua zuccherata attraversata. Anche se si fa passare la luce attraverso la soluzione nell'altro senso bisognerà ancora girare il polaroide verso destra. Qui, dunque, c'è una differenza tra destra e sinistra. Potremmo usare acqua zuccherata e luce negli orologi. Supponiamo di avere un serbatoio di acqua e di farci passare attraverso la luce girando il nostro pezzo di polaroide in modo che la luce passi appena; poi supponiamo di fare la cosa corrispondente nel nostro secondo orologio, sperando che la luce giri a sinistra. E invece non succede così: la luce continua a girare a destra e non riesce a passare. Usando acqua zuccherata i nostri due orologi possono essere resi diversi.

Questo è un fatto molto notevole e sembra a prima vista che le leggi fisiche non siano simmetriche per riflessione. Tuttavia lo zucchero che abbiamo usato questa volta era zucchero di barbabietola; lo zucchero però ha una molecola abbastanza semplice, e lo si può fare in laboratorio con anidride carbonica e ossigeno, passando attraverso molti stadi intermedi. Se provate con lo zucchero artificiale, che chimicamente sembra essere lo stesso sotto tutti gli aspetti, trovate che esso non fa ruotare il piano di polarizzazione della luce. Mettete ora nell'acqua con zucchero artificiale dei batteri che mangiano lo zucchero; essi ne mangiano solo metà e, quando hanno finito, la luce polarizzata che passa attraverso la rimanente acqua zuccherata devia a *sinistra*. La spiegazione del fenomeno è la seguente. Lo zucchero è una molecola complessa, cioè una serie di atomi disposti in maniera complicata. Se si riproduce esattamente la stessa disposizione ma con la sinistra al posto della destra, tutte le distanze tra ogni coppia di atomi saranno le stesse nei due casi, cioè l'energia delle molecole è esattamente la stessa, e quindi tutti i fenomeni chimici in cui non interviene la vita avverranno nello stesso modo. Ma gli esseri viventi scoprono la differenza. I batteri mangiano un tipo e non l'altro. Lo zucchero che viene dalla barbabietola è di un tipo, tutte molecole destrogire, cioè che ruotano la luce a destra. I batteri possono solo mangiare quel tipo di molecole. Quando facciamo lo zucchero con sostanze che non sono di per sé stesse asimmetriche, ma semplici gas, produciamo ambedue i tipi in quantità uguali. Se poi introduciamo i batteri, essi elimineranno il tipo che possono mangiare e rimarrà l'altro. Questo è il motivo per cui la luce ruota nell'altra direzione. È possibile distinguere i due tipi di molecole guardando i cristalli con una lente di ingrandimento, come scoprì Pasteur.[16] Si può dimostrare che tutto questo ha perfettamente senso, e se vogliamo possiamo separare lo zucchero da soli, senza aspettare i batteri. Ma la cosa interessante è che i batteri *possano* farlo. Significa forse che i processi

viventi non obbediscono alle stesse leggi? Apparentemente no. Sembra che negli esseri viventi ci siano moltissime molecole complicate che hanno tutte lo stesso tipo di filettatura. Alcune delle molecole più caratteristiche degli esseri viventi sono le proteine, che hanno le proprietà di una vite destrorsa. Per quello che ne sappiamo, se potessimo costruire chimicamente queste cose, ma girate verso sinistra anziché verso destra, non funzionerebbero biologicamente perché incontrando le altre proteine non si adatterebbero ad esse. Una spirale sinistra si adatta a una spirale sinistra, ma una sinistra a una destra no. I batteri, che hanno una spirale destra nel loro interno chimico, possono distinguere lo zucchero levogiro da quello destrogiro.

Come hanno fatto a diventare così? La fisica e la chimica non possono distinguere i due tipi di molecole, e quindi possono solo costruire ambedue i tipi. La biologia invece riesce a separare la destra dalla sinistra. La spiegazione più facile è che molto tempo fa, quando cominciò il processo della vita, una molecola accidentalmente asimmetrica si sia propagata riproducendosi, e il processo sia poi continuato fino a che, dopo moltissimi anni, questi strani oggetti con protuberanze e corna si siano attaccati e uniti gli uni agli altri... E noi non siamo altro che i figli delle poche prime molecole, ed è un caso che quelle si siano formate in questo modo invece che nell'altro. Doveva essere o uno o l'altro modo, o destra o sinistra, e questo poi si è riprodotto, e ha continuato a propagarsi. È molto simile alle viti nelle officine, dove si usano viti destre per fare nuove viti destre, e così via. Questo fatto, cioè che tutte le molecole negli esseri viventi hanno esattamente la stessa filettatura, è forse una delle dimostrazioni più profonde dell'uniformità della discendenza della vita, su su fino al livello molecolare.

Per controllare meglio questo fatto, se cioè le leggi fisiche sono uguali rispetto alla destra e alla sinistra, possiamo porci il problema in questo modo. Supponiamo di essere in conversazione telefonica con un marziano o un abitante della stella Arturo, e di volergli descrivere le cose che sono sulla terra. Prima di tutto, come potrebbe comprendere il nostro linguaggio? Il problema è stato studiato intensamente a Cornell, dal professor Morrison,[17] secondo il quale uno dei modi per cominciare sarebbe di dire: “tic, uno: tic tic, due: tic tic tic, tre” e così via. Dopo un po' il tizio comprenderebbe i numeri. Una volta che ha compreso il sistema numerico si potrebbe scrivere tutta una sequenza di numeri che rappresentano i pesi, o meglio, i pesi proporzionali dei diversi atomi in successione, e poi dirgli: “idrogeno, 1,008”, poi il deuterio, l'elio ecc. Dopo essere stato un po' lì a guardare questi numeri, scoprirebbe che i rapporti matematici sono uguali ai rapporti tra i pesi degli elementi e che perciò quei nomi devono essere i nomi degli elementi. Piano piano in questo modo si potrebbe costruire un linguaggio comune. Adesso si presenta un problema. Supponiamo che dopo avere fatto amicizia con quel marziano, vi dica: “Ehi, voi, siete molto simpatici. Vorrei sapere come siete fatti.” E allora voi cominciate: “Siamo alti più o meno centottanta centimetri,” e lui domanderà: “Centottanta centimetri... quanto è un centimetro?” Questo è molto facile: “Centottanta centimetri sono diciassettemila milioni di atomi di idrogeno messi uno sopra l'altro.” Non è uno scherzo — è un modo possibile per descrivere centottanta centimetri a uno che non ha nessuna misura — supponendo di non potergli mandare nessun campione, e di non poter guardare gli stessi oggetti. Se vogliamo dirgli quanto siamo alti lo possiamo fare. Questo è dovuto al fatto

che le leggi della fisica non sono invarianti per cambiamento di scala, il che ci permette di usare questo fatto per determinare la scala. Possiamo continuare a descriverci: siamo alti centottanta centimetri, all'esterno siamo bilaterali così e così, e ci sono queste protuberanze che sporgono fuori ecc. E allora lui dice: “Questo è molto interessante, ma dentro come siete fatti?” Così descriviamo il cuore e così via e poi diciamo: “Adesso metti il cuore a sinistra.” Il problema è di come possiamo dirgli quale parte è la sinistra. “Oh, direte voi, prendiamo zucchero di barbabietola, lo mettiamo in acqua e quello fa ruotare...”, ma il guaio è che lassù non hanno le barbabietole. Inoltre non abbiamo nessun modo per sapere se gli accidenti dell'evoluzione su Marte, anche se hanno prodotto proteine corrispondenti a quelle che ci sono qui, non le abbiano prodotte con la filettatura opposta. Non c'è nessun modo per saperlo. Dopo averci pensato a lungo, vi accorgerete di non riuscirvi, e perciò concluderete che è impossibile.

Circa cinque anni fa,[18] tuttavia, certi esperimenti diedero origine ad ogni sorta di difficoltà. Non entrerò nei dettagli, ma vi dirò solo che ci siamo trovati in situazioni sempre più difficili e paradossali, fino a che Lee e Yang,[19] suggerirono che forse il principio della simmetria rispetto alla destra e alla sinistra, cioè che la natura è uguale a destra e a sinistra non fosse corretto, il che avrebbe aiutato a spiegare alcuni misteri. Lee e Yang proposero degli esperimenti più diretti per decidere la validità del principio, e io accennerò al più semplice fra tutti quelli fatti.

Prendiamo una disintegrazione radioattiva, nella quale, per esempio, sono emessi un elettrone e un neutrino come nel caso già menzionato della disintegrazione di un neutrone in un protone, un elettrone e un antineutrino; ci sono del resto molte altre disintegrazioni radioattive in cui la carica del nucleo aumenta di uno, e viene fuori un elettrone. La cosa interessante è che se si misura lo spin, cioè il senso in cui gli elettroni stanno ruotando quando vengono fuori, si trova che ruotano verso sinistra (visti da dietro, e cioè, se vanno a sud, ruotano nella stessa direzione della terra). Ha un significato ben definito dire che l'elettrone, quando viene fuori dalla disintegrazione, giri sempre nella stessa direzione, cioè che ruoti verso sinistra. È come se nel decadimento beta il cannone che spara fuori l'elettrone fosse a canna rigata. Ci sono due modi di rigare una canna; la direzione “fuori” è data, ma avete la scelta se fare girare a destra o a sinistra il proiettile quando esce. L'esperimento mostra che l'elettrone viene da un cannone rigato, e rigato a sinistra. Usando questo fatto, perciò, potremmo attaccarci al telefono e dire al nostro marziano: “Stai a sentire, prendi un affare radioattivo, un neutrone per esempio, e guarda l'elettrone che viene fuori da tale decadimento beta. Se l'elettrone, quando viene fuori, entra nel corpo dalla schiena, la direzione del suo spin è verso *sinistra*. Questo definisce la sinistra, e lì deve andare il cuore.” Perciò è possibile distinguere la destra dalla sinistra, e così la legge secondo la quale il mondo è simmetrico rispetto alla destra e alla sinistra è crollata.

La prossima cosa di cui vorrei parlare è la relazione tra le leggi di conservazione e quelle di simmetria. Nell'ultima lezione abbiamo parlato dei princìpi di conservazione dell'energia, dell'impulso, del momento angolare e così via. È estremamente interessante il fatto che sembra esserci una profonda connessione tra le leggi di conservazione e quelle di simmetria. Questa connessione ha la sua vera interpretazione, almeno come la

comprendiamo oggi, solo nel quadro della meccanica quantistica. Ciò nonostante ve ne farò vedere una dimostrazione.

Se supponiamo che le leggi della fisica siano descrivibili con un principio di minimo, possiamo far vedere che se una legge è tale che si può spostare in una direzione tutta l'apparecchiatura, cioè in altre parole se si può traslarla nello spazio, allora deve esserci conservazione dell'impulso. C'è una connessione profonda tra i princìpi di simmetria e le leggi di conservazione, ma essa richiede che sia valido il principio di minimo. Nella seconda lezione abbiamo discusso un modo di descrivere le leggi fisiche immaginando che una particella vada da un punto a un altro in un dato intervallo di tempo lungo diversi possibili tragitti. Esiste una certa quantità chiamata, con nome forse non troppo ben scelto, azione, tale che se la si calcola per i vari percorsi, si trova che per quello effettivamente scelto essa assume il valore più piccolo. Questo modo di descrivere le leggi della natura dice che l'azione, calcolata con certe formule matematiche, è minore per il percorso effettivo che per tutti gli altri possibili. Un altro modo per stabilire che questa grandezza è minima è di dire che una deformazione piccolissima della traiettoria non provoca nessuna differenza. Infatti supponiamo di camminare su delle colline — ma colline lisce, perché gli oggetti matematici di cui stiamo trattando corrispondono a cose lisce — e di arrivare al punto più basso possibile; è chiaro che se si fa un piccolo passo in avanti il livello non cambia. Quando si è al punto più basso o più alto, un passo non produce, in prima approssimazione, nessun cambiamento di livello, mentre invece, se si è su un pendio, un passo in giù fa scendere mentre un passo nella direzione opposta fa salire. La ragione essenziale per cui, nel punto più basso, fare un passo non produce apprezzabile innalzamento è che, se lo producesse, allora facendo un passo nella direzione opposta, si scenderebbe.

Figura 24

Dal momento che quello è il punto più basso e quindi non si può scendere, dobbiamo concludere che in prima approssimazione fare un passo non produce nessuna differenza. Perciò, tornando al nostro caso, una deformazione piccolissima del percorso non fa cambiare in prima approssimazione l'azione. Tracciamo ora un cammino da *A* a *B* (fig. 24), e consideriamo il seguente percorso possibile: da *A* ci spostiamo a un punto vicino, *C*, e poi ci muoviamo sul cammino esattamente corrispondente fino a un altro punto che chiameremo *D*, che è, naturalmente, a distanza uguale da *B* perché si tratta del cammino corrispondente. Ora, abbiamo appena scoperto che le leggi della natura sono tali che la quantità totale di azione sul percorso *ACDB* è uguale in prima approssimazione a quella

sul percorso originale *AB*; questo viene dal principio di minimo, quando *AB* è il cammino reale. Ma vi dirò anche un'altra cosa: l'azione sul cammino originale, da *A* a *B*, è la stessa di quella da *C* a *D*, purché il mondo resti uguale quando si sposta ogni cosa, perché la differenza fra i due percorsi è soltanto uno spostamento generale. Così, se è valido il principio di simmetria per le traslazioni spaziali, l'azione sul cammino diretto tra *A* e *B* è uguale a quella sul cammino tra *C* e *D*. D'altra parte l'azione totale sul percorso indiretto *ACDB* è praticamente uguale a quella sul percorso *AB*, ed è perciò uguale a quella su *CD*. Questa azione sul percorso indiretto è la somma di tre parti, l'azione da *A* a *C*, quella da *C* a *D*, più quella da *D* a *B*. Così, sottraendo i termini uguali, potete vedere che i contributi da *A* a C e quello da *D* a *B* devono dare zero. Ora, su uno di questi tratti ci muoviamo in un senso, e sull'altro in quello opposto. Se prendiamo il contributo da *A* a *C*, considerandolo come effetto del moto in un senso, e il contributo da *D* a *B* con segno opposto a quello da *BD* per tener conto che il moto avviene nell'altro senso, se ne deduce che c'è una quantità che deve essere uguale nei tratti *AC* e *BD* affinché i due contributi si elidano. Questa quantità, cioè l'effetto sull'azione di un piccolo spostamento a destra, è uguale sia all'inizio (da *A* a *C*) che alla fine (da *B* a *D*). C'è una quantità, dunque, che non cambia col passare del tempo, purché valga il principio di minimo, e purché per gli spostamenti nello spazio sia corretto il principio di simmetria. Questa quantità che non cambia (l'effetto sull'azione di un piccolo spostamento da una parte) è proprio esattamente l'impulso di cui abbiamo parlato nell'ultima lezione. Ecco così illustrata la relazione tra le leggi di simmetria e di conservazione, pur di ammettere che le leggi obbediscano al principio di minima azione. Del resto si scopre che esse soddisfano effettivamente a questo principio perché discendono dalla meccanica quantistica, ed è per questa ragione che avevo detto prima che in ultima analisi la connessione tra le leggi di conservazione e quelle di simmetria viene dalla meccanica quantistica.

Il discorso corrispondente per il ritardo nel tempo dà luogo alla conservazione dell'energia. Così pure il fatto che la rotazione nello spazio non produca nessuna differenza porta alla conservazione del momento angolare. Invece il fatto che possiamo fare una riflessione senza cambiare niente, non conduce, nel caso classico, a nulla di semplice. La si è chiamata parità, e si parla di una legge di conservazione della parità, ma queste, però, sono solo parole complicate. Ho voluto menzionare questa legge, perché forse avrete letto sui giornali che è stato dimostrato che essa è violata. Sarebbe stato molto più facile da capire se fosse stato scritto che era stato dimostrato falso il principio secondo il quale non si può distinguere la destra dalla sinistra.

Dato che sto parlando di simmetrie, vorrei anche dirvi che ci sono alcuni nuovi problemi. Per esempio, per ogni particella c'è un'antiparticella: per l'elettrone c'è il positrone, per il protone c'è l'antiprotone. In teoria, possiamo fare quella che chiamiamo antimateria, in cui ogni atomo ha i suoi corrispondenti anti-pezzi messi insieme. L'atomo di idrogeno è un protone e un elettrone; se prendiamo un antiprotone che è elettricamente negativo, e un positrone e li mettiamo insieme, anch'essi faranno una specie di atomo di idrogeno, un atomo di antidrogeno. Gli atomi di antidrogeno in effetti non sono mai stati fatti, ma si è calcolato che in teoria la cosa dovrebbe funzionare, e che potremmo fare ogni sorta di antimateria nello stesso modo. Adesso vogliamo chiederci se

l'antimateria si comporta allo stesso modo che la materia; per quello che ne sappiamo, succede proprio così. Una delle leggi di simmetria è che se facciamo degli oggetti di antimateria, essi si comportano nello stesso modo degli oggetti corrispondenti fatti di materia. Naturalmente, se venissero a contatto, si distruggerebbero a vicenda e ne verrebbero fuori delle scintille.

Si è sempre creduto che la materia e l'antimateria abbiano le stesse leggi; tuttavia, adesso che sappiamo che la simmetria rispetto alla destra e alla sinistra appare sbagliata, si' presenta un problema importante. Se guardiamo la disintegrazione del neutrone, ma con l'antimateria in cui un antineutrone si disintegra in un antiprotone, più un antielettrone (chiamato anche positrone), più un neutrino, ci possiamo domandare: tutto avviene come prima, nel senso che il positrone viene fuori ruotando verso sinistra, o le cose vanno in modo contrario? Fino a qualche mese fa pensavamo che si comportasse nel modo opposto, e che l'antimateria (positrone) ruotasse a destra laddove la materia (elettrone) ruota a sinistra. In questo caso non possiamo veramente dire al marziano qual è la destra e quale la sinistra, perché, se per caso è fatto di antimateria, quando fa l'esperimento i suoi elettroni saranno positroni, e verranno fuori ruotando nel senso sbagliato e lui metterà il cuore dalla parte sbagliata. Supponete di telefonare al marziano e di spiegargli come costruire un uomo; lui ne fa uno che funziona bene. Allora gli spiegate anche le nostre convenzioni sociali. E infine, dopo che lui vi dice come costruire un'astronave sufficientemente buona, voi andate a trovare quest'uomo, gli andate incontro e gli tendete la destra per stringergli la mano. Se lui vi tende la destra, va bene, ma se vi tende la sinistra, attenzione... voi due vi distruggerete!

Vorrei potervi dire di più sulle simmetrie, ma mi imbarcherei in cose più difficili da spiegare. Ci sono delle proprietà molto notevoli: cioè le quasi-simmetrie. Per esempio, la caratteristica strana del fatto che possiamo distinguere la destra dalla sinistra è che lo possiamo fare solo attraverso un effetto molto debole, cioè con questa disintegrazione beta. Ciò significa che la natura è per il 99,99 per cento indistinguibile rispetto alla destra e alla sinistra, ma che c'è solo un pezzettino, un piccolo fenomeno caratteristico che è completamente differente, nel senso che è assolutamente sbilenco. Questo è un mistero sul quale nessuno ha ancora la più pallida idea.

Capitolo 5.
La distinzione tra passato e futuro

È ovvio a tutti che i fenomeni del mondo sono chiaramente irreversibili. Ciò significa che le cose accadono in un verso, e non in un altro. Se lasciate cadere una tazza e questa si rompe, avrete da star lì seduti per lungo tempo se aspettate che i pezzi ritornino insieme e vi saltino di nuovo in mano. Se guardate le onde del mare rompersi, avrete da aspettare un pezzo prima che arrivi il grande momento in cui la spuma si raccoglie insieme, sorge fuori dal mare e ricade indietro più distante dalla riva. Sarebbe molto bello!

Nelle lezioni la dimostrazione di questo è di solito data facendo vedere un pezzo di un film in cui sono ripresi vari fenomeni, facendolo girare nel senso inverso, e poi aspettando le risate. Queste significano semplicemente che tali cose non accadono nel mondo reale. Ma effettivamente, questo è un metodo piuttosto debole di dimostrare una cosa tanto ovvia e fondamentale come la differenza tra passato e futuro; perché anche senza un esperimento le nostre esperienze interiori sono completamente diverse rispetto al passato e al futuro. Ci ricordiamo del passato ma non del futuro e abbiamo un diverso tipo di consapevolezza riguardo a quanto potrà accadere e a quanto probabilmente è accaduto.

Alla nostra mente, passato e presente sembrano completamente diversi, con concetti come la memoria e l'apparente libero arbitrio, nel senso che ci sembra di poter fare qualche cosa per influenzare il futuro, ma nessuno di noi, o almeno molto pochi, credono che ci sia qualche modo per influenzare il passato. Rimorso, rimpianto, speranza e così via sono tutte parole che distinguono in maniera perfettamente ovvia il passato dal futuro.

Ora, se il mondo della natura è fatto di atomi, e anche noi siamo fatti di atomi e obbediamo alle leggi fisiche, l'interpretazione più ovvia di questa evidente distinzione tra passato e futuro e di questa irreversibilità di tutti i fenomeni, sarebbe che alcune delle leggi del moto degli atomi vanno in un senso solo, e non in tutte e due. Deve esserci da qualche parte un principio secondo il quale certe cose accadono in un certo modo e non viceversa, cosicché il mondo passa continuamente da uno stato a un altro; questa faccenda a senso unico delle interazioni tra le cose dovrebbe essere proprio quella che fa sembrare a senso unico tutti i fenomeni del mondo.

Questo principio, però, non lo abbiamo ancora trovato. Cioè, in tutte le leggi della fisica che abbiamo scoperto finora non sembra esserci nessuna distinzione tra passato e futuro. Il film dovrebbe funzionare allo stesso modo nei due sensi, e il fisico che sta a guardarlo non dovrebbe ridere.

Prendiamo la legge della gravitazione come nostro esempio tipico. Se ho il sole e un pianeta, e comincio a far girare quest'ultimo in una certa direzione intorno al sole, che cosa succede se filmo il moto e poi proietto la pellicola girandola alla rovescia? Il pianeta continua a girare intorno al sole, nel senso opposto, ma ancora su un'orbita ellittica. La velocità del pianeta è tale che l'area spazzata dal raggio è sempre uguale in tempi uguali.

In effetti va esattamente come dovrebbe, e non può essere distinto da quando va nel senso opposto. Così la legge della gravitazione è di un tipo tale che la direzione del tempo non produce differenza; se si fa vedere un qualsiasi fenomeno in cui interviene solo la gravitazione, anche guardandolo alla rovescia sulla pellicola, la cosa apparirà completamente soddisfacente. Si può dirlo più precisamente in questo modo. Se tutte le particelle di un sistema anche complicato dovessero improvvisamente invertire le loro velocità, il sistema si srotolerebbe semplicemente attraverso tutti gli stati attraverso i quali si era avvolto. Se ci sono delle particelle che fanno qualcosa e se s'invertono improvvisamente le velocità, esse disferanno completamente quello che hanno fatto prima.

Questo è contenuto nella legge di gravitazione che dice che la velocità cambia per effetto delle forze. Se io inverto il tempo, le forze non cambiano, e le variazioni di velocità a distanze corrispondenti non sono alterate. Ogni velocità dunque passa per una successione di valori esattamente opposti a quelli di prima, ed è facile così dimostrare che la legge della gravitazione è reversibile rispetto al tempo.

E le leggi dell'elettricità e del magnetismo? Anch'esse sono reversibili nel tempo. Le leggi d'interazione nucleare? Per quello che ne possiamo dire, anch'esse sono reversibili nel tempo. E le leggi di decadimento beta di cui abbiamo parlato precedentemente? Sono anch'esse reversibili nel tempo? Le difficoltà di esperimenti recenti, che hanno fatto vedere che c'è qualcosa che non va, qualcosa di sconosciuto nelle leggi, suggerisce la possibilità che in effetti il decadimento beta può anche non essere reversibile nel tempo, e si dovranno aspettare nuovi esperimenti. Ad ogni modo è assodato che il decadimento beta (che può essere o no reversibile nel tempo) non è un fenomeno affatto importante nella maggior parte delle circostanze ordinarie. La possibilità che io sia qui a parlarvi non dipende dal decadimento beta, ma dipende invece dalle interazioni chimiche, dalle forze elettriche, non molto dalle forze nucleari presenti, e dipende anche dalla gravitazione.

Io però sono unilaterale — parlo, e la voce va fuori nell'aria, e non viene succhiata nella mia bocca quando la apro — e questa irreversibilità non si può imputare al fenomeno del decadimento beta. In altre parole, si pensa che la maggior parte dei normali fenomeni del mondo, che sono prodotti da moti atomici, avvengano secondo leggi che possono essere completamente invertite. Perciò dovremo cercare altrove per trovare una spiegazione dell'irreversibilità.

Se guardiamo più attentamente i nostri pianeti ruotare intorno al sole, vediamo subito che non tutto è a posto. Per esempio, la rotazione della terra intorno al suo asse sta leggermente rallentando. Questo è dovuto all'attrito delle maree, e potete vedere che l'attrito è una cosa che è ovviamente irreversibile. Se metto un peso sul pavimento e gli do una spinta, esso scivolerà, e dopo un po' si fermerà. Ma ho un bello stare lì ad aspettare: non lo vedrò certo ricominciare a muoversi, accelerare e venirmi in mano. Così, l'effetto di attrito sembra essere irreversibile. Ma l'effetto di attrito, come abbiamo già detto un'altra volta, è il risultato dell'enorme complessità delle interazioni tra il peso e il legno del pavimento, cioè del moto degli atomi all'interno. Il movimento organizzato del peso è trasformato in un moto irregolare e disorganizzato degli atomi nel legno. Dobbiamo dunque guardare più da vicino la cosa.

In effetti abbiamo qui la chiave dell'evidente irreversibilità. Voglio prendere un esempio semplice. Supponiamo di avere in un serbatoio dell'acqua blu, con dell'inchiostro, e dell'acqua bianca, cioè senza inchiostro, separate da una leggera parete che poi togliamo molto delicatamente. All'inizio, l'acqua rimane separata, blu da una parte e bianca dall'altra. Ma aspettate: a poco a poco il blu si mescola con il bianco, e dopo un po' l'acqua diventa azzurra, voglio dire che è all'incirca metà e metà, cioè il colore è distribuito uniformemente. Ma possiamo aspettare quanto vogliamo: i colori non si separano più da soli. (Si potrebbe *fare* qualche cosa per separare di nuovo il blu: si potrebbe far evaporare l'acqua e poi farla condensare da qualche altra parte, e raccogliere il colore blu e scioglierlo in metà dell'acqua, e rimettere il tutto come prima. Ma mentre fate tutto questo, voi stessi stareste causando fenomeni irreversibili da qualche altra parte.) Da sola, però, la cosa non ritorna indietro.

Questo fenomeno ci offre la chiave del problema. Guardiamo le molecole. Supponiamo di filmare l'acqua blu e quella bianca che si mescolano. Sarebbe piuttosto ridicolo se facessimo girare il film nel senso inverso, perché cominceremmo con acqua uniforme, e gradualmente la cosa si separerebbe, il che è ovviamente assurdo. Adesso ingrandiamo la figura, di modo che ogni fisico possa guardare, atomo per atomo, per capire quello che accade irreversibilmente, per vedere dove la legge della simmetria fra avanti e indietro viene meno. Così cominciate a guardare la figura. Avete atomi di due tipi diversi (è ridicolo, ma chiamiamoli blu e bianchi) che si agitano continuamente per il moto termico. All'inizio, avremmo quasi esclusivamente atomi di un tipo da una parte, e atomi dell'altro tipo dall'altra. Ora questi miliardi e miliardi di atomi si agitano continuamente e se partiamo con un tipo tutto da una parte e l'altro tipo dall'altra, vediamo che nei loro perpetui moti irregolari essi si mescolano, e questo è il motivo per cui l'acqua diventa più o meno uniformemente blu.

Osserviamo una collisione qualsiasi fra quelle del nostro film, in cui gli atomi si urtano in una direzione e rimbalzano in un'altra. Ora, se fate girare all'indietro quella sezione del film, vedete quella coppia di molecole che si urtano venendo dalla seconda direzione e rimbalzano nella prima. Il fisico guarda con il suo occhio attento, misura tutto e dice: “Questo va bene, è secondo le leggi della fisica: se due molecole si urtassero in questo modo rimbalzerebbero in questo modo.” Il fenomeno è reversibile, cioè le leggi della collisione molecolare sono reversibili.

Così, se guardate troppo attentamente non potete affatto comprendere l'irreversibilità, perché ognuna delle collisioni è assolutamente reversibile; tuttavia l'intero film fa vedere qualche cosa di assurdo, e cioè che nel film fatto girare alla rovescia, le molecole cominciano in una condizione mescolata — blu, bianco, blu, bianco, blu, bianco — e con il passare del tempo, attraverso tutte le collisioni, il blu si separa dal bianco. Ma sappiamo bene che non possono farlo, perché non sembra naturale che gli accidenti della vita debbano essere tali che i blu si separino dai bianchi. E tuttavia, se guardate molto attentamente questo film rovesciato, vedrete che ogni collisione è corretta.

Ebbene, vedete, il succo di tutto è che l'irreversibilità è causata dagli accidenti generali della vita. Se cominciate da qualche cosa che è separata e producete dei cambiamenti irregolari, essa diventa più uniforme. Ma se comincia uniforme e producete dei

cambiamenti irregolari, non si separa. *Potrebbe* però separarsi. Non è contrario alle leggi della fisica che le molecole rimbalzino in modo tale da separarsi. È semplicemente improbabile e non accadrebbe mai in un milione di anni. Questa è la risposta. Le cose sono irreversibili solo nel senso che l'andare in una direzione è probabile, mentre l'andare nell'altra, anche se è possibile ed è in accordo con le leggi della fisica, non accadrebbe in un milione di anni. È semplicemente ridicolo aspettarsi che, se ve ne state lì a guardare abbastanza a lungo, il movimento degli atomi separi, da una miscela uniforme di inchiostro e acqua, inchiostro da una parte e acqua dall'altra.

Ora, se avessi messo una scatola intorno al mio esperimento, in modo che ci fossero solo quattro o cinque molecole di ogni tipo nella scatola, con il passare del tempo si mescolerebbero. Ma credo che non abbiate difficoltà a immaginare che, se continuaste a guardare, vedreste che queste molecole nelle perpetue collisioni irregolari, dopo un po' di tempo — non necessariamente un milione di anni, anzi forse in uno solo — ritornerebbero più o meno alla loro posizione originaria, almeno nel senso che mettendo una barriera in mezzo, tutte le bianche si troverebbero da una parte e le blu dall'altra. Questo non è impossibile. Tuttavia, gli oggetti con cui effettivamente lavoriamo non hanno solo quattro o cinque molecole blu e bianche. Hanno invece quattro o cinque milioni di milioni di milioni di milioni di molecole che si separeranno tutte in questo modo. E così, l'evidente irreversibilità della natura non proviene dall'irreversibilità delle leggi fondamentali della fisica; deriva invece dalla proprietà che, partendo da un sistema ordinato, il fenomeno avviene in una certa direzione a causa delle irregolarità della natura, cioè per gli urti delle molecole.

A questo punto ci possiamo addirittura chiedere: come hanno fatto a ordinarsi? Cioè, perché è possibile cominciare con le particelle ordinate? La difficoltà è che si comincia con una cosa ordinata, ma non si finisce poi con una cosa ordinata. Una delle regole dell'universo è dunque che si passa da una condizione ordinata a una disordinata. Incidentalmente, questa parola ordine, come quella disordine, è un altro di quei termini della fisica che non hanno esattamente lo stesso significato di quelli della vita comune. L'ordine non è necessariamente quello che piace a voi come esseri umani; si tratta semplicemente di una situazione definita, tutto da una parte e tutto dall'altra, oppure tutto mescolato, e questo è l'ordine o il disordine.

Ci si domanda allora come le cose abbiano potuto essere ordinate all'inizio, e perché, quando si guarda una situazione ordinaria, che è solo in parte ordinata, si possa concludere che probabilmente deriva da una che era più ordinata. Se vedo che in un serbatoio l'acqua è di un blu intenso da una parte, di un bianco molto chiaro dall'altra, e di un colore bluastro in mezzo, e so che è stata lì per venti o trenta minuti, concludo che è diventata così perché la separazione era più completa in passato. Se aspetto ancora, il blu e il bianco si mescoleranno di più, e se so che la cosa è rimasta indisturbata per un tempo sufficientemente lungo, posso concludere qualcosa sulla sua condizione passata. L'uniformità ai lati, può solo derivare dal fatto che nel passato era più completamente separata; se non fosse stata meglio separata in passato, si sarebbe mescolata ancora di più. È dunque possibile, guardando il presente, stabilire qualche cosa sul passato.

In effetti i fisici di solito non fanno così. Essi amano pensare che l'unica cosa da fare

sia di dire: “Queste sono le condizioni, e ora che cosa succederà?” Ma tutte le scienze sorelle, la storia, la geologia, e la storia astronomica, hanno un problema completamente diverso. Mi pare infatti che siano capaci di fare previsioni di natura molto differente da quello che fa il fisico. Questi dice: “In questa condizione, io predico quello che accadrà dopo.” Il geologo invece dice più o meno questo: “Ho scavato il terreno e ho trovato certi tipi di ossa. Predico che se si scava ancora, si troveranno ossa simili.” Lo storico, sebbene parli del passato, lo può fare parlando del futuro. Quando dice che la Rivoluzione Francese è stata nel 1789, vuol dire che, se si guarda in un altro libro, si troverà la stessa data. Egli fa, cioè, una specie di predizione su una cosa che non ha mai visto prima, cioè dei documenti che devono ancora essere trovati. Predice che i documenti in cui si parla di Napoleone coincideranno con quello che è scritto in altri documenti. Il problema è di come questo possa avvenire, e l'unico modo possibile è di suggerire che il passato del mondo era più organizzato in questo senso del presente.

Alcuni hanno suggerito che il mondo si è ordinato nel modo seguente: all'inizio nell'intero universo vi erano soltanto dei moti irregolari, come l'acqua mescolata. Abbiamo visto che aspettando abbastanza a lungo purché ci siano pochissimi atomi, l'acqua potrebbe per caso separarsi. Così alcuni fisici (un secolo fa) suggerirono che il mondo, cioè questo sistema che ha sempre continuato ad andare avanti e avanti, ha semplicemente subito una fluttuazione. (Questo è il termine che si usa quando qualcosa si scosta dalla normale condizione di uniformità.) Il mondo ha dunque subito una fluttuazione, e noi adesso stiamo vedendo la fluttuazione disfarsi. Potreste dire: “Ma per vedere una fluttuazione del genere bisogna aspettare troppo.” Lo so, ma se non avesse fluttuato abbastanza per produrre l'evoluzione, cioè per produrre una persona intelligente, noi non lo avremmo notato. E così abbiamo dovuto aspettare di essere vivi per osservarlo, cioè si è dovuto avere almeno una fluttuazione sufficiente a questo. Io credo però che questa teoria sia sbagliata, anzi addirittura ridicola per il motivo seguente. Supponiamo infatti che il mondo sia molto più grande, e gli atomi dappertutto siano partiti da una condizione completamente mescolata; allora, se io, guardando solo gli atomi in un posto, li trovassi separati, non avrei nessun motivo per concludere che gli atomi da qualche altra parte debbano essere anch'essi separati. In effetti se si trattasse di una fluttuazione, e io notassi da una parte qualche cosa di strano, la cosa più probabile sarebbe ritenere che sia così perché non c'è nulla di strano da nessun'altra parte. Cioè, per così dire, dovrei prendere a prestito delle improbabilità, per ottenere l'asimmetria, e non c'è nessun vantaggio a prendere a prestito troppo. Nell'esperimento dell'acqua blu e di quella bianca, quando alla fine le poche molecole della scatola si sono separate, la condizione più probabile del resto dell'acqua sarebbe ancora quella mescolata. Perciò, sebbene quando osserviamo le stelle e guardiamo il mondo vediamo tutto ordinato, se ciò fosse dovuto a una fluttuazione dovremmo predire che guardando in un punto dove non abbiamo ancora guardato dovremmo trovarlo nel più completo disordine. Sebbene la separazione della materia che abbiamo già visto in stelle calde e spazio freddo potrebbe essere una fluttuazione, dovremmo tuttavia aspettarci di trovare, nei posti in cui non abbiamo ancora guardato, che le stelle non sono separate dallo spazio. Invece, facciamo sempre la predizione che, anche in un punto in cui non abbiamo ancora guardato,

troveremo le stelle in una condizione simile, o troveremo la stessa affermazione su Napoleone, o vedremo ossa come quelle che abbiamo già visto. Il successo di tutte queste scienze indica che il mondo non è derivato da una fluttuazione, ma da una condizione più separata, più organizzata nel passato che nel presente. Io penso perciò che sia necessario aggiungere alle leggi fisiche l'ipotesi che nel passato l'universo fosse più ordinato, nel senso tecnico, di oggi: credo cioè che questa sia l'affermazione supplementare necessaria a dare un senso a tutto, e a rendere comprensibile l'irreversibilità.

Questa stessa affermazione è naturalmente asimmetrica rispetto al tempo; dice che in qualcosa il passato è diverso dal futuro. Ma ciò esula dal campo di quelle che di solito chiamiamo leggi fisiche, perché con essa cerchiamo di distinguere tra la formulazione delle leggi fisiche che governano lo sviluppo dell'universo e la legge che stabilisce la condizione in cui si trovava in passato il mondo. Questa oggi è considerata storia astronomica, ma forse un giorno farà anch'essa parte della legge fisica.

Ora, vi sono alcuni aspetti interessanti dell'irreversibilità che vorrei illustrare. Uno di questi è di vedere esattamente come funziona una macchina irreversibile.

Supponiamo di costruire un meccanismo che sappiamo dover funzionare solo in una direzione, per esempio una ruota con denti a sega, dritti da una parte e arrotondati dall'altra, e munita di un dente di arresto. La ruota è fissata a un asse, e il dente d'arresto è imperniato e tenuto giù da una molla (fig. 25).

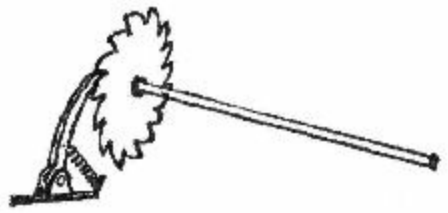


Figura 25

La ruota può allora girare solo in una direzione. Se si cerca di girarla nell'altro senso, le parti dritte dei denti si incastrano contro il nottolino e la ruota non si muove, mentre se si gira nell'altro senso, esso salta liberamente da un dente all'altro. (È un aggeggio ben noto: lo si usa negli orologi, che così si possono caricare girando solo in un senso, e una volta caricati la molla resta tesa.) Il meccanismo è completamente irreversibile nel senso che la ruota può girare solo in un senso.

Ora si è pensato che questa macchina irreversibile, questa ruota che può girare solo in un senso, potrebbe essere usata per una cosa molto utile e interessante. Come sapete, le molecole sono in perpetuo moto irregolare, e se si costruisce uno strumento molto delicato, esso si muoverà sempre un pochino perché è bombardato irregolarmente dalle molecole dell'aria nelle vicinanze. Bene, allora colleghiamo la ruota con un asse con quattro palette, come nella figura 26. Esse sono in una scatola con del gas, e sono bombardate tutto il tempo irregolarmente da molecole, in modo che le palette sono spinte qualche volta in un senso e qualche volta nell'altro. Ma quando le palette sono spinte in un senso l'affare è bloccato dal nottolino, mentre quando le palette sono spinte nell'altro esso è libero; la ruota gira così perpetuamente, e abbiamo ottenuto una specie di moto perpetuo. Questo perché la ruota con il dente d'arresto è irreversibile.

In effetti, però, dobbiamo guardare alla cosa più in dettaglio.

Il meccanismo funziona così: quando la ruota va in un senso essa alza il nottolino il quale poi ricade contro il dente. Esso rimbalza, e, se è perfettamente elastico, continuerà a rimbalzare per sempre, e la ruota può così tranquillamente girare nell'altro senso quando il nottolino per caso rimbalza. E perciò la cosa non funzionerà, a meno che non succeda che quando il dente ricade non resti attaccato o rimbalzi un poco e poi si fermi.

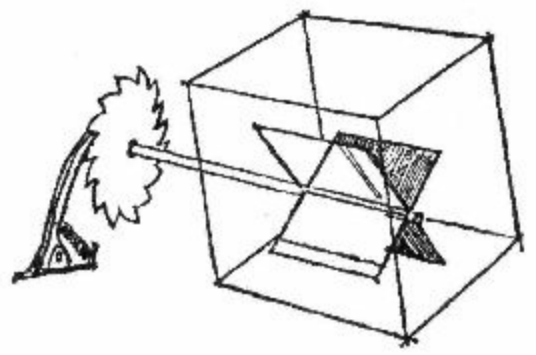


Figura 26

Se rimbalza e si ferma ci deve essere quello che noi chiamiamo smorzamento, o attrito, e in questo cadere e rimbalzare e poi fermarsi, che è l'unico modo in cui l'aggeggio funzionerà in una sola direzione, si genera calore attraverso l'attrito, così che la ruota diventerà sempre più calda. Tuttavia, quando comincia a diventare molto calda, accade un'altra cosa. Come c'è il moto browniano, cioè il moto irregolare nel gas intorno alle palette così, le particelle di cui sono fatte la ruota e il dente d'arresto, a mano a mano che questi diventano più caldi cominciano a muoversi in modo più irregolare. Poi viene il momento in cui la ruota è così calda che il dente d'arresto continua a muoversi a causa del moto delle sue molecole, e perciò rimbalza su e giù sulla ruota per effetto di quello stesso moto che faceva girare le palette. Nel rimbalzare su e giù sulla ruota sta in su tanto tempo quanto sta in giù, e la ruota può girare nei due sensi. Non abbiamo più dunque un congegno a senso unico. Anzi, l'affare può addirittura girare all'indietro! Se la ruota è calda e la parte delle palette è fredda, la ruota che credevate potesse girare solo da una parte girerà dall'altra, perché ogni volta che il dente d'arresto viene giù scende sul piano inclinato della ruota dentata e così spinge la ruota “all'indietro”. Poi rimbalza di nuovo in su e ricade su un altro piano inclinato, e così via. E così se la ruota è più calda delle palette essa girerà nella direzione sbagliata.

Che cosa ha a che fare questo con la temperatura del gas intorno alle palette? Supponiamo di non avere affatto quella parte. Allora, se la ruota è spinta in avanti dal nottolino che cade su un piano inclinato, capiterà che la parte dritta verticale del dente della ruota rimbalzerà contro il nottolino e la ruota rimbalzerà indietro. Per impedire alla ruota di rimbalzare all'indietro, vi metteremo sopra qualcosa che aumenti l'attrito, e metteremo delle palette in aria, in modo che la ruota sia rallentata e non rimbalzi liberamente. Allora andrà solo in un senso, ma in quello sbagliato; si conclude così che in qualsiasi modo la studiate, una ruota come questa andrà in una direzione se è più calda una parte, e nell'altra direzione se è più calda l'altra. Ma dopo che c'è stato uno scambio di calore tra le due parti e tutto si è calmato, in modo che la paletta e la ruota siano alla

stessa temperatura, la ruota non girerà in media né in una direzione né nell'altra. Questo è il modo in cui i fenomeni della natura vanno in un dato verso fino a che sono fuori equilibrio, fino cioè a che una parte è più quieta dell'altra, o, nel nostro esempio precedente, fino a che una parte è più blu dell'altra.

La conservazione dell'energia potrebbe farci pensare che abbiamo a disposizione tutta l'energia che vogliamo. La natura non perde né guadagna mai energia. Eppure l'energia del mare, per esempio, cioè il moto termico di tutti i suoi atomi, è praticamente inutilizzabile per noi. Per organizzare quell'energia, per raggrupparla, per renderla disponibile all'uso, dobbiamo avere una differenza di temperatura, perché altrimenti, sebbene l'energia sia lì, non possiamo usarla. C'è una grande differenza tra l'energia e la disponibilità dell'energia. L'energia del mare è immensa, ma non è per noi utilizzabile.

La conservazione dell'energia significa che l'energia totale del mondo resta costante. Ma nei movimenti irregolari, quell'energia può distribuirsi in maniera talmente uniforme che, in certe circostanze non c'è nessun modo per farne andare di più da una parte che dall'altra, cioè non la si può più controllare.

Credo di poter dare un'idea di questa difficoltà con un'analogia. Non so se avete mai fatto l'esperienza che ho fatto io di stare sulla spiaggia con vari asciugamani quando improvvisamente comincia un acquazzone. Afferrate gli asciugamani più velocemente possibile e correte alla cabina. Allora cominciate ad asciugarvi e trovate che l'asciugamano è un po' bagnato, ma è anche più asciutto di voi. Continuate ad asciugarvi con questo fino a che trovate che anch'esso è troppo bagnato, vi sta bagnando tanto quanto vi sta asciugando e allora ne provate un altro; presto però scoprite una cosa terribile, cioè che tutti gli asciugamani sono bagnati come voi. Non c'è nessun modo di asciugarvi anche se avete molti asciugamani, perché in un certo senso non c'è nessuna differenza tra come siete bagnati voi e gli asciugamani. Potrei inventare una quantità che chiamerò “facilità di togliere l'acqua”. L'asciugamano ha la stessa facilità di togliere l'acqua che avete voi, di modo che, quando vi toccate con l'asciugamano, tanta acqua viene da esso su di voi quanta da voi va all'asciugamano. Ciò non significa che c'è la stessa quantità di acqua su di voi e sull'asciugamano — un asciugamano grande conterrà più acqua di uno piccolo — ma hanno lo stesso grado di umidità. Quando le cose giungono allo stesso grado di umidità non c'è più niente da fare.

L'acqua è come l'energia, perché la quantità totale non cambia. (Se la porta della cabina è aperta e potete correre fuori al sole e asciugarvi o trovare un altro asciugamano, allora siete salvi, ma supponiamo che tutto sia chiuso e che non possiate allontanarvi da quegli asciugamani e che non possiate trovarne altri.) Allo stesso modo, se immaginate una parte dell'universo chiusa e aspettate sufficientemente a lungo, l'energia, come l'acqua, si distribuirà uniformemente fino a che non rimarrà più traccia della direzione dell'evoluzione, e del vero interesse del mondo così come lo sperimentiamo noi.

Così nel caso del dente d'arresto, della ruota e delle palette, che è una situazione limitata in cui non è implicato nient'altro, la temperatura a poco a poco diventa uguale da tutt'e due le parti e la ruota non gira in nessuno dei due sensi. Allo stesso modo accade che, se lasciate stare un sistema per un tempo sufficientemente lungo, l'energia si mescola completamente, e non è più disponibile per nulla.

Tra parentesi, quello che corrisponde all'umidità o “facilità di togliere l'acqua” si chiama temperatura, e, sebbene abbia detto che quando due corpi sono alla stessa temperatura c'è equilibrio, ciò non significa che hanno la stessa energia; significa che è altrettanto facile togliere l'energia dall'uno quanto dall'altro. La temperatura è come la “facilità di togliere l'energia”. E così se si pongono i due corpi l'uno accanto all'altro, non succede niente; si passano l'energia avanti e indietro ma il risultato netto è nullo. Quando le cose sono tutte alla stessa temperatura non c'è più energia disponibile per fare niente. Il principio dell'irreversibilità è che se le cose sono a temperature diverse e sono lasciate a loro stesse, con il passare del tempo esse tendono ad assumere la stessa temperatura, e la disponibilità di energia diminuisce sempre.

Questo è un altro nome per quella che è chiamata *legge dell'entropia*, che dice che l'entropia cresce continuamente. Ma non preoccupatevi delle parole; enunciata nell'altro modo, la disponibilità dell'energia decresce sempre. E questa è la caratteristica del mondo, nel senso che è dovuta al caos dei moti irregolari delle molecole. Oggetti, con temperature diverse, se lasciati a sé, tendono a raggiungere la stessa temperatura. Se due oggetti sono alla stessa temperatura, come dell'acqua su una normale stufa senza il fuoco sotto, l'acqua non gelerà, né la stufa si scalderà. Ma se si ha una stufa calda con del ghiaccio, succede il contrario. E così il procedimento a senso unico è sempre nella direzione della perdita di disponibilità dell'energia.

Non dirò altro a proposito di questo argomento, ma voglio ancora aggiungere alcune osservazioni. Abbiamo qui un esempio in cui un effetto ovvio, l'irreversibilità, non è una conseguenza ovvia delle leggi, ma è anzi piuttosto lontana dalle leggi fondamentali. Occorre svolgere un'analisi approfondita per capirne la ragione. L'effetto è di prima importanza nell'economia del mondo, nel suo vero comportamento in tutti i casi comuni. La mia memoria, le mie caratteristiche, la differenza tra passato e futuro, dipendono completamente da questo, e tuttavia la sua spiegazione non può a prima vista dedursi dalla conoscenza delle leggi.

Si verifica spesso che le leggi della fisica non hanno un'evidente relazione diretta con l'esperienza, ma corrispondono a vari gradi di astrazione da essa. Ne abbiamo qui un esempio particolare nel fatto che le leggi siano reversibili anche se i fenomeni non lo sono.

Spesso vi è una grande distanza tra le leggi specifiche e i principali aspetti dei fenomeni reali. Per esempio, se si osserva un ghiacciaio da una certa distanza, e si vedono i massi cadere nel mare e il modo in cui si muove il ghiaccio e così via, non è veramente essenziale ricordarsi che esso è fatto di piccoli cristalli esagonali di ghiaccio. Eppure, il moto del ghiacciaio, se fosse capito veramente bene, sarebbe in effetti conseguenza delle caratteristiche dei cristalli esagonali. Ma ci vuole un bel po' per comprendere il comportamento generale del ghiacciaio (in effetti nessuno ne sa ancora abbastanza sul ghiaccio, sebbene si sia studiato il cristallo con gran cura). Tuttavia resta la speranza che una volta compreso a fondo il cristallo del ghiaccio, si potrà alla fine comprendere anche il ghiacciaio.

Sebbene in queste lezioni abbiamo parlato dei fondamenti delle leggi fisiche, devo dire subito che, anche conoscendo tutte le leggi fondamentali così come le conosciamo oggi,

non se ne deduce immediatamente la spiegazione di ogni fenomeno specifico. Ci vuole un po′ di tempo, e anche allora la comprensione è solo parziale perché la natura, in effetti, sembra essere congegnata in modo che le cose più importanti del mondo reale appaiono come un complicato risultato accidentale di un gran numero di leggi.

Per dare un esempio, i nuclei, che contengono varie particelle nucleari, protoni e neutroni, sono molto complicati. Hanno quelli che si chiamano livelli energetici, cioè possono stare in stati o condizioni di energia differente, e nuclei diversi hanno livelli energetici diversi. Trovare la posizione dei livelli energetici è un complicato problema matematico, che solo in parte possiamo risolvere. L′esatta posizione dei livelli è ovviamente una conseguenza di un′enorme complessità, per cui non c′è nessun particolare mistero nel fatto che l'azoto, con 14 particelle, abbia un livello a 2,4 milioni di volt, e un altro a 7,1 e così via. Ma la cosa strana della natura è che l'intero universo nel suo carattere dipende precisamente dalla posizione di un particolare livello di un particolare nucleo. Nel nucleo del carbonio-12 c'è un livello a 7,82 milioni di volt, e questo ha delle conseguenze enormi.

La situazione è la seguente. Se cominciamo con l'idrogeno, e pare che all'inizio il mondo fosse praticamente tutto idrogeno, allora a mano a mano che questo si addensa sotto l'effetto della gravità e si riscalda, possono aver luogo delle reazioni nucleari, e può formarsi l'elio, e poi questo può combinarsi solo parzialmente con l'idrogeno e può produrre qualche altro elemento un po' più pesante. Ma questi elementi più pesanti si disintegrano di nuovo immediatamente in elio. Perciò per un certo tempo l'origine di tutti gli altri elementi dell'universo restò completamente misteriosa perché, partendo dall'idrogeno, il processo di cottura che avviene nelle stelle non avrebbe potuto dare molto più che l'elio e neanche una mezza dozzina di altri elementi. Messi di fronte a questo problema, Hoyle e Salpeter,[20] proposero una via d'uscita. Tre atomi di elio possono unirsi per formare il carbonio, e si può facilmente calcolare quante volte questo dovrebbe accadere in una stella. Viene fuori che ciò non accadrebbe praticamente mai, tranne che in un caso speciale, cioè se esiste nel carbonio un livello energetico a 7,82 milioni di volt, nel qual caso i tre atomi di elio, incontrandosi, starebbero insieme, prima di staccarsi, un po' più, in media, di quanto starebbero se non ci fosse un livello a 7,82. E stando lì un po' più a lungo, ci sarebbe abbastanza tempo perché accadesse qualche altra cosa, e perché si formassero degli altri elementi. Dunque, se ci fosse un livello a 7,82 milioni di volt nel carbonio, allora potremmo comprendere da dove sono venuti tutti gli altri elementi della tavola periodica. Così, con un ragionamento alla rovescia, fu predetto che doveva esserci nel carbonio un livello a 7,82 milioni di volt, e gli esperimenti in laboratorio mostrarono che effettivamente c'è. Perciò l'esistenza nel mondo di tutti questi altri elementi è strettamente legata al fatto che esista questo particolare livello nel carbonio. Ma la posizione di questo particolare livello nel carbonio sembra, a noi che conosciamo le leggi fisiche, un complicatissimo accidente di un sistema di dodici particelle che interagiscono. Questo esempio è un'ottima dimostrazione del fatto che una comprensione delle leggi fisiche non dà necessariamente in maniera diretta una comprensione delle cose importanti nel mondo. I dettagli dell'esperienza reale sono spesso assai lontani dalle leggi fondamentali.

La nostra descrizione del mondo è fatta di diverse gerarchie o livelli di idee. Ora non voglio essere molto preciso, e dividere il mondo in livelli definiti, ma indicherò, con qualche esempio, quello che intendo per gerarchia di idee.

Per esempio, a un estremo abbiamo le leggi fondamentali della fisica. Poi inventiamo altri termini per concetti che sono approssimati e che hanno, almeno così crediamo, la loro spiegazione ultima in termini delle leggi fondamentali. Per esempio, il “calore”. Esso dovrebbe essere movimento, e il dire che una cosa è calda è un modo di indicare una massa di atomi in movimento. Spesso, però, se parliamo del calore, ci dimentichiamo degli atomi che si muovono, così come quando parliamo del ghiacciaio non pensiamo sempre ai cristalli esagonali e ai fiocchi di neve che sono originariamente caduti. Un altro esempio è un cristallo di sale. Dal punto di vista fondamentale, quel cristallo è un insieme di protoni, neutroni ed elettroni; ma abbiamo questo concetto di “cristallo di sale” che sintetizza in sé il risultato di interazioni fondamentali. Il concetto di pressione è della stessa natura.

Se passiamo da questo a un altro livello abbiamo le proprietà delle sostanze, per esempio l'“indice di rifrazione”, cioè di quanto la luce è deflessa quando attraversa qualche cosa; oppure la “tensione superficiale”, cioè il fatto che l'acqua tenda a stare insieme; ambedue questi concetti sono descritti da numeri. Vi ricordo che dobbiamo passare attraverso varie leggi per trovare che ciò avviene a causa dell'azione degli atomi e così via. Tuttavia continuiamo a dire tensione superficiale, e raramente ci preoccupiamo, quando ne parliamo, di come le cose funzionino al livello più profondo.

Ancora un passo in su nella gerarchia. Dopo introdotto il concetto di acqua, ecco che viene quello di onda e quello di tempesta, dove quest'ultima parola rappresenta un'enorme massa di fenomeni; similmente parliamo di “macchia solare”, o “stella”, concetti che sintetizzano un gran numero di cose. Ma non vale la pena di ripartire sempre dall'inizio. Anzi, non possiamo farlo, perché più in alto andiamo, e più numerosi sono i passi intermedi, ognuno dei quali è un po' più confuso. Non abbiamo ancora definito completamente ognuno di essi.

E mano a mano che saliamo in questa gerarchia di complessità arriviamo a cose come “contrazione muscolare”, o “impulso nervoso”, che è una cosa enormemente complicata dal punto di vista fisico, che implica un'organizzazione della materia di enorme complessità. Poi vengono concetti come “rana”.

Poi andiamo più avanti ancora, e arriviamo a parole e concetti come “uomo” e “storia”, o “necessità politica” e così via, una serie di concetti che usiamo per descrivere cose a livelli sempre più alti.

E andando avanti arriviamo a concetti come male, bellezza e speranza...

Se posso usare una metafora religiosa, quale delle due estremità è più vicina a Dio: la bellezza e la speranza o le leggi fondamentali? Secondo me, il modo giusto è dire che quello a cui dobbiamo guardare è l'intera interconnessione strutturale dei concetti, e che tutte le scienze, e non solo le scienze, ma tutto lo sforzo intellettuale deve tendere a vedere le connessioni fra le gerarchie, cioè connettere la bellezza alla storia, questa alla psicologia del l'uomo, questa a sua volta al funzionamento del cervello, il cervello all'impulso nervoso, l'impulso nervoso alla chimica, e così via, in su e in giù, in ambedue i

sensi. Non c'è nessuna ragione di fingere di poter tracciare una linea precisa da un estremo di questi concetti all'altro perché solo ora abbiamo incominciato a vedere che esiste una gerarchia relativa.

E secondo me nessuna delle due parti è più vicina a Dio. Stare a uno degli estremi, e partire da esso soltanto, sperando che proprio in quella direzione si arrivi alla comprensione completa, è un errore. E partire dalla bellezza e dal male e dalla speranza, o invece dalle leggi fondamentali, sperando in tal modo di giungere a una comprensione profonda di tutto il mondo, con quell'aspetto solo, è anch'esso un errore. Non è giusto che quelli che si specializzano a un estremo ignorino completamente quelli che si specializzano all'altro (in effetti non si ignorano, ma così si dice). La grande massa di lavoratori che sono in mezzo, che collegano un passo all'altro, migliorano continuamente la nostra comprensione dell'universo, sia lavorando alle estremità che nel mezzo, e in questo modo aiutano a comprendere a poco a poco questo immenso mondo di gerarchie interconnesse.

Capitolo 6.
Probabilità e indeterminazione: la natura dal punto di vista della meccanica quantistica

All'inizio della storia dell'osservazione sperimentale, o di qualsiasi altro tipo di osservazione su problemi scientifici, c'è l'intuizione, la quale è effettivamente basata sulla semplice esperienza degli oggetti di tutti i giorni, e suggerisce delle spiegazioni plausibili per le cose. Ma a mano a mano che cerchiamo di ampliare e di rendere più logica la descrizione di ciò che vediamo, e a mano a mano che questa diventa più ampia e copre una maggior varietà di fenomeni, dalle semplici spiegazioni passiamo a quelle che chiamiamo leggi. Una caratteristica strana è che esse sembrano diventare sempre più stravaganti e sempre più lontane dall'intuizione ovvia. Per esempio, secondo la teoria della relatività l'affermare che due eventi avvengono allo stesso tempo è solo una nostra opinione, mentre un altro osservatore potrebbe concludere che uno degli avvenimenti si è prodotto prima dell'altro; la simultaneità perciò è solo un'impressione soggettiva.

Non c'è nessuna ragione per cui dovremmo aspettarci che le cose vadano in altro modo, perché i fenomeni dell'esperienza quotidiana implicano un grande numero di particelle, o movimenti molto lenti, o altre condizioni che sono del tutto particolari e rappresentano in effetti una limitata esperienza della natura. Il campo di fenomeni naturali di cui abbiamo diretta esperienza è molto limitato, ed è perciò soltanto attraverso precise misurazioni e attente sperimentazioni che si può giungere a una visione più larga. E allora si vedono cose impreviste cioè ben lontane da quelle che si sarebbero immaginate. La nostra immaginazione va estesa al massimo, non come nei romanzi per immaginare cose che non esistono realmente, ma solo per comprendere le cose che *effettivamente ci sono*. È proprio questo tipo di situazione che voglio discutere.

Cominciamo con la storia della luce. All'inizio si pensava che questa si comportasse come una pioggia di particelle o di corpuscoli, ossia come i proiettili di un fucile. Poi, in seguito ad altre ricerche, divenne chiaro che ciò era errato, e che la luce in effetti si comportava come delle onde, per esempio come le onde dell'acqua. Più tardi nel ventesimo secolo, ulteriori ricerche mostrarono che la luce effettivamente si comportava, sotto molti aspetti, come delle particelle. Nell'effetto fotoelettrico si potevano contare queste particelle, che ora chiamiamo fotoni. Gli elettroni, quando furono scoperti, si comportavano proprio come particelle o proiettili, in maniera cioè molto semplice. Seguirono altre ricerche, come per esempio gli esperimenti sulla diffrazione degli elettroni, che mostrarono che gli elettroni si comportavano come onde. Col passare del tempo nacque una confusione crescente sul modo in cui queste cose si comportavano: onde o particelle, particelle o onde? Tanto la luce quanto gli elettroni assomigliavano ad ambedue.

Questa crescente confusione fu risolta nel 1925 o 1926 con l'avvento delle equazioni

della meccanica quantistica. Adesso sappiamo come si comportano gli elettroni e la luce. Ma come posso dire? Se dico che si comportano come particelle, do l'impressione errata, e lo stesso se dico che si comportano come onde. Essi si comportano nel loro modo inimitabile, che tecnicamente potrei chiamare quantistico, che non è simile a nulla di quanto avete visto finora. La vostra esperienza basata sugli oggetti che avete visto finora è incompleta, perché il comportamento delle cose su una scala molto piccola è semplicemente diverso. Un atomo non si comporta come un peso attaccato a una molla che oscilla, né come una rappresentazione in miniatura del sistema solare, con dei piccoli pianeti che ruotano in orbite, né assomiglia un po' a una nuvola o a una nebbia che circonda il nucleo. Non si comporta come nessuna cosa che avete visto finora.

C'è almeno una semplificazione. Gli elettroni si comportano sotto questo aspetto esattamente nello stesso modo dei fotoni, sono ambedue bizzarri, ma esattamente nello stesso modo.

Ci vuole dunque una grande immaginazione per comprendere quello che sto per descrivere, che è così diverso da quello a cui siete abituati. Da questo punto di vista, almeno, questa è la lezione più difficile di questa serie, nel senso che è lontana dall'esperienza comune. Non posso però evitarlo, perché questa serie di conferenze sul carattere delle leggi fisiche sarebbe assolutamente incompleta se escludessi questo argomento. Il comportamento quantistico è una caratteristica essenziale e universale di tutte le particelle della natura, così che, se volete sentir parlare del carattere della legge fisica, è essenziale discutere di questo aspetto peculiare.

Sarà una cosa difficile. La difficoltà però è veramente di natura psicologica, e risiede nel perpetuo tormento che deriva dal chiedersi: “Ma come può essere così?” e questo è un riflesso del desiderio incontrollabile ma totalmente vano di vedere le cose in termini un po' più familiari. *Non* ve le descriverò in termini dell'analogia con qualcosa di familiare, ma ve le descriverò semplicemente. C'era un tempo in cui sui giornali si leggeva che solo dodici persone al mondo comprendevano la teoria della relatività. Per parte mia non credo che ci sia mai stato tale periodo: può esserci stato un momento in cui solo una persona l'aveva capita, perché, prima di scrivere il suo lavoro, era l'unico che ci era arrivato. Ma dopo che questo fu letto, diverse persone, certamente più di dodici, capirono in un modo o nell'altro la teoria della relatività. Invece credo di poter dire con sicurezza che nessuno ancora comprende la meccanica quantistica. E così non prendete troppo seriamente questa lezione, credendo di dover capire in termini di modelli quello che descriverò, ma rilassatevi e godetevela. Vi dirò come si comporta la natura. Se ammetterete semplicemente che essa si comporta in questo modo, la troverete una cosa incantevole e meravigliosa. Se ci riuscite, cercate di non chiedervi: “Ma come può essere così?” perché entrerete in un vicolo cieco da cui nessuno è ancora uscito. Nessuno sa come possa essere così. Allora, dunque, lasciate che vi descriva come si comportano gli elettroni o i fotoni secondo la meccanica quantistica. Lo farò con un miscuglio di analogia e di contrasto, perché, se usassi solo l'analogia, non potrei riuscirci; dovrò usare sia l'analogia che il contrasto con cose che vi sono familiari. Partirò dal comportamento delle particelle, per cui userò come analogia i proiettili, e poi da quello delle onde, per cui userò le onde dell'acqua. Quello che farò sarà di inventare un particolare esperimento cominciando dal

dirvi come sarebbe il suo andamento usando le particelle, poi quello che succederebbe se invece ci fossero delle onde, e infine quello che succede quando nel sistema ci sono effettivamente gli elettroni e i fotoni. Prenderò questo solo esperimento che è stato formulato in modo da contenere tutti i misteri della meccanica quantistica, così da mettervi interamente di fronte ai misteri, ai paradossi e alle particolarità della natura. Qualsiasi altra situazione della meccanica quantistica può sempre essere spiegata dicendo: "Vi ricordate il caso dell'esperimento dei due fori? È la stessa cosa." E adesso vi parlerò dell'esperimento dei due fori. Esso contiene un mistero generale; non voglio nascondervi nulla, ma voglio mostrarvi la natura nella sua forma più difficile ed elegante. Cominciamo con i proiettili (fig. 27).

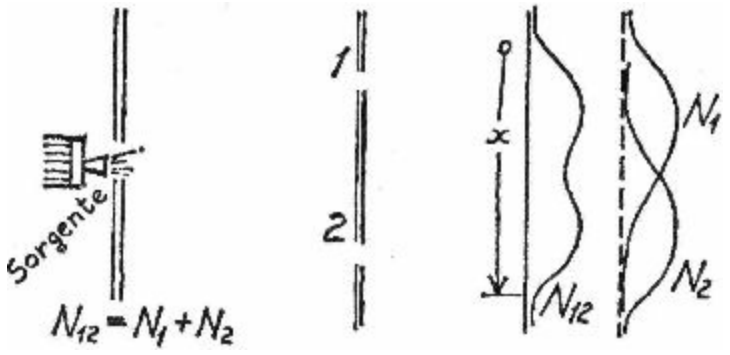


Figura 27

Supponiamo di avere una sorgente di proiettili, una mitragliatrice, per esempio, e davanti ad essa una lastra corazzata con un foro attraverso cui passano le pallottole. A gran distanza abbiamo un'altra lastra con due fori (è la famosa faccenda dei due fori). Siccome dovrò continuamente riferirmi ad essi, li chiamerò N. 1 e N. 2. Potete immaginarli rotondi, in tre dimensioni (il disegno è solo una sezione). A una certa distanza abbiamo un altro schermo che è solo un punto d'arresto sul quale possiamo mettere in vari punti un rivelatore, che nel caso dei proiettili è una scatola di sabbia nella quale essi si arrestano in modo da poter poi essere contati. Farò degli esperimenti in cui conto quanti proiettili arrivano nel rivelatore quando è in diverse posizioni, e per descrivere questo misurerò la distanza, che chiamerò x, della scatola da un qualche punto, e parlerò di quello che succede quando si cambia x, il che significa solo che si muove la scatola rivelatore in su e in giù. Comincerò con l'idealizzare sotto tre aspetti la situazione rispetto a quella dei proiettili veri. Per prima cosa la mitragliatrice scuote e oscilla, i proiettili vanno in varie direzioni, e non esattamente dritti, e possono rimbalzare sui bordi dei buchi della lastra. In secondo luogo vogliamo, anche se questo non è molto importante, che le pallottole abbiano tutte la stessa velocità ed energia. Ma l'idealizzazione più importante in cui le pallottole del nostro esperimento differiscono da quelle reali è che voglio che esse siano assolutamente indistruttibili, in modo che quello che troviamo nella scatola non sono i pezzi di piombo, di qualche pallottola che si è rotta, ma la pallottola intera. Immaginiamole indistruttibili, oppure molto dure e la lastra morbida.

La prima cosa che osserviamo a proposito delle pallottole è che quello che arriva, arriva in unità singole. Quando l'energia arriva, si tratta di una raffica di pallottole, cioè,

se le contate, ci sono una, due, tre, quattro pallottole. Supponete che siano di dimensioni uguali, e che quando una di esse arriva nella scatola è o dentro ad essa o fuori. Inoltre, se metto due scatole non ricevo mai dentro due pallottole allo stesso tempo, ammesso che la mitragliatrice non spari troppo in fretta e che io abbia abbastanza tempo per contare fra due colpi successivi. Rallentate la mitragliatrice di modo che spari molto lentamente, e guardate rapidamente nei rivelatori: non otterrete mai due pallottole allo stesso tempo nelle due scatole, perché una pallottola è una singola unità identificabile.

Ora misuriamo quante pallottole arrivano in media in un certo intervallo di tempo. Aspettiamo dunque un'ora, contiamo quante pallottole ci sono nella sabbia e facciamo la media. Prendiamo il numero di pallottole che arrivano in un'ora, che chiamiamo probabilità di arrivo, perché dà semplicemente la probabilità che una pallottola che attraversa il foro vada in una particolare scatola. Il numero di pallottole che arrivano nella scatola varierà naturalmente al variare di x. Sul diagramma ho rappresentato orizzontalmente il numero di pallottole che ottengo tenendo la scatola in ciascuna posizione per un'ora. Otterrò una curva che assomiglierà più o meno alla curva N_{12} perché, quando la scatola è dietro uno dei fori, riceve molte pallottole, e se è un po' fuori dalla linea retta ne riceve un po' meno, perché i proiettili devono rimbalzare sui bordi dei fori e alla fine la curva si annulla. La curva reale assomiglia alla curva N_{12}, e chiamerò N_{12} il numero che otteniamo in un'ora quando ambedue i fori sono aperti, il che significa solo il numero che arriva attraverso il foro N. 1 e il N. 2.

Devo ricordarvi che il numero che ho rappresentato non è necessariamente intero, ma può avere qualsiasi valore. Può essere per esempio due pallottole e mezzo all'ora, nonostante il fatto che queste siano indivisibili. Quello che voglio dire con due e mezzo è che, se facciamo sparare la mitragliatrice per dieci ore, si otterranno venticinque pallottole, di modo che la media è due e mezzo. Sono sicuro che tutti conoscete la barzelletta sulla famiglia media degli Stati Uniti, che ha due figli e mezzo. Questo non significa che nella famiglia c'è un mezzo figlio: i bambini arrivano tutti interi. Tuttavia quando si prende la media per famiglia, questa può essere un numero qualsiasi, allo stesso modo in cui questo N_{12}, che è il numero di pallottole che arrivano all'ora, in media, nella scatola, non deve necessariamente essere intero. Quello che noi misuriamo è la probabilità di arrivo, che è un termine tecnico per il numero medio che arriva in un dato intervallo di tempo.

Infine, se analizziamo la curva N_{12}, la possiamo interpretare molto bene come la somma di due curve, una delle quali rappresenterà quello che chiamo N_1, il numero che passa se il foro N. 2 è chiuso, e N_2, il numero che passa attraverso il foro N. 2 se è chiuso l'altro. Scopriamo allora una legge molto importante, e cioè che il numero che arriva quando i due fori sono aperti è il numero che arriva passando attraverso il N. 1 più quello delle pallottole che passano attraverso il N. 2. Questa proposizione, il fatto che si tratta solo di sommare insieme i due numeri, la chiamo “senza interferenza”

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{ (senza interferenza).}$$

Questo è quello che succede con le pallottole, e adesso che abbiamo finito con queste ricominciamo con le onde dell'acqua (fig. 28). La sorgente è ora costituita da una massa grande che si muove in su e in giù nell'acqua.

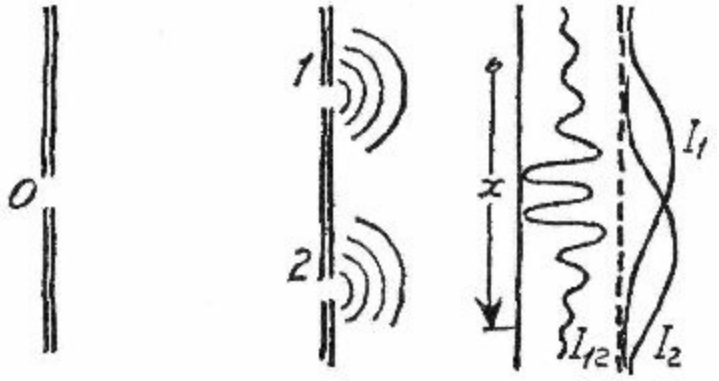


Fig. 28. In queste condizioni si ha: $h_1+h_2 = h_{12}$; $I_1+I_2 \neq I_{12}$; $I_{12} = (h_{12})^2$.

La lastra corazzata ora diventa una lunga fila di zattere o un molo con un'interruzione. Forse sarebbe meglio fare l'esperimento con onde piccole piuttosto che con quelle grandi dell'oceano. Io scuoto il dito in su e in giù per produrre delle onde, e ho un piccolo pezzo di legno come barriera, con un foro per lasciare passare le ondicelle. Poi ho una seconda barriera con due fori e infine un rivelatore. A che cosa serve il rivelatore? Esso mostra di quanto l'acqua si alza o si abbassa. Per esempio, posso mettere un pezzo di sughero nell'acqua e misurare di quanto si muove in su e in giù: così misurerò l'energia del moto di questo pezzo di sughero, che è esattamente proporzionale all'energia trasportata dalle onde. Un'altra cosa: l'agitazione dell'acqua deve essere molto regolare, di modo che le onde siano tutte alla stessa distanza l'una dall'altra. Una cosa importante è che ciò che stiamo misurando in questo caso può avere qualsiasi valore. Misuriamo l'intensità delle onde, ossia l'energia del pezzo di sughero, e se le onde sono molto tranquille, cioè se il mio dito si muove poco, ci sarà pochissimo moto nel sughero. Qualunque sia l'energia dell'onda, quella del sughero sarà sempre proporzionale ad essa. Può avere qualsiasi valore perché non viene in unità singole, a differenza dell'esempio precedente, in cui la pallottola c'era o non c'era.

Ora, misureremo l'intensità delle onde, o per essere precisi, l'energia generata dalle onde in un certo punto. Che cosa accade se misuriamo questa intensità, che chiamerò I per ricordarvi che è un'intensità e non un numero di particelle di un certo tipo? La curva I_{12} che si ottiene quando ambedue i fori sono aperti è rappresentata sul diagramma (fig. 28). È una curva interessante e complicata. Se mettiamo il rivelatore in punti diversi otteniamo un'intensità che varia molto rapidamente in modo assai strano. Conoscete probabilmente il motivo di questo fatto, cioè che le onde, quando arrivano, hanno massimi e minimi che si propagano dal foro N. 1 e similmente massimi e minimi che si propagano dal foro N. 2. Se siamo in un punto che è esattamente in metà tra i due fori, in modo che le due onde arrivino allo stesso tempo, le creste saranno una sopra l'altra e il pezzo di sughero si muoverà molto. Nel centro abbiamo cioè un movimento molto ampio. Se ora muovo il rivelatore a un punto più lontano dal foro N. 2 che dal N. 1, ci vuole un po'

più di tempo perché le onde arrivino da 2 che da 1, e quando un massimo arriva da 1, il massimo da 2 non è ancora arrivato, anzi è arrivato solo il minimo da 2, per cui l'acqua cerca di alzarsi e di abbassarsi a causa dell'influenza delle onde che arrivano dalle due direzioni, e il risultato netto è che non si muove affatto, o almeno molto poco. Così, in quel punto, si ha un piccolo movimento. Se poi si sposta il rivelatore ancora di più in quella direzione, si ha un ritardo sufficiente a far sì che le creste arrivino insieme dai due fori, sebbene una di esse sia in effetti indietro di tutta un'onda, e così si ha un movimento grande e poi di nuovo uno piccolo, uno grande e uno piccolo... a seconda del modo in cui i massimi e i minimi delle onde "interferiscono". Anche qui la parola "interferenza" è usata in un modo strano nel linguaggio scientifico. Possiamo avere quella che chiamiamo interferenza costruttiva, come quando ambedue le onde interferiscono così da rendere l'intensità più grande. La cosa importante è che I_{12} non è uguale a I_1 più I_2; possiamo dire che mostra un'interferenza costruttiva o distruttiva. Per vedere come sono I_1 e I_2 chiudiamo il foro N. 2 per trovare I_2 o chiudiamo il foro N. 1 per trovare I_2. L'intensità che otteniamo se uno dei fori è chiuso è semplicemente quella delle onde che arrivano da uno dei fori, senza interferenza, e le curve corrispondenti sono raffigurate nella figura 28. Noterete che I_1 è uguale a N_1, che I_2 è uguale a N_2, mentre I_{12} è completamente diverso da N_{12}.

La matematica della curva I_{12} è assai interessante. L'altezza dell'acqua, che chiamiamo h, quando ambedue i fori sono aperti è uguale all'altezza che si otterrebbe se il foro N. 1 fosse aperto più quella dovuta al foro N. 2. Per esempio, se l'onda proveniente da 2 è a un minimo, la sua altezza è negativa e annulla l'altezza di quella da 1. Possiamo certo parlare dell'altezza dell'acqua, però l'intensità, che è la cosa più importante, non è uguale all'altezza, ma è proporzionale al suo quadrato. Ed è proprio perché stiamo trattando con i quadrati che otteniamo questa interessantissima curva.

$$h_{12} = h_1 + h_2,$$

ma

$$I_{12} \neq I_{12} + I_{12}(\text{interferenza}), I_{12} = (h_{12})^2,$$
$$I_1 = (h_1)^2,$$
$$I_2 = (h_2)^2.$$

Ora che abbiamo finito con l'acqua possiamo ricominciare da capo con gli elettroni (fig. 29).

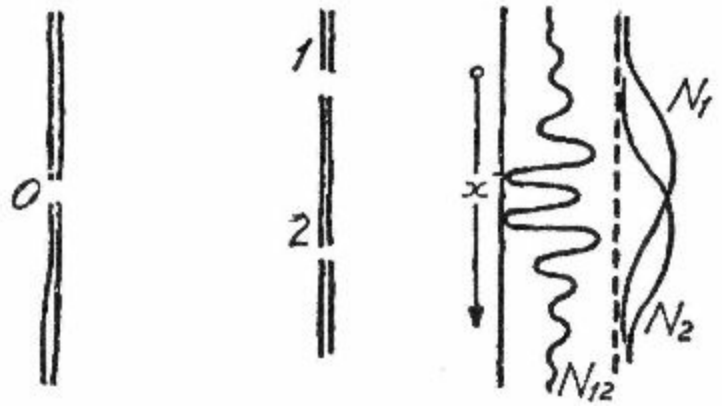


Fig. 29. In queste condizioni si ha: $N_{12} \neq N_1 + N_2$; $a_{12} = a_1 + a_2$; $N_{12} = (a_{12})^2$; $N_1 = (a_1)^2$; $N_2 = (a_2)^2$.

La sorgente è un filamento, le barriere sono placche di tungsteno con dei fori, e come rivelatore abbiamo un qualsiasi sistema elettrico abbastanza sensibile da raccogliere la carica di un elettrone che arriva con una energia che dipende dalla sorgente. Se preferite, si possono usare fotoni, e della carta nera al posto della placca di tungsteno (in effetti la carta nera non è molto adatta perché a causa delle fibre non si possono avere dei fori precisi, e perciò dovremmo usare qualche cosa di meglio) e come rivelatore un fotomoltiplicatore capace di rivelare i singoli fotoni quando arrivano. Che cosa succede in ambedue i casi? Discuterò solo il caso degli elettroni, dal momento che quello dei fotoni è esattamente uguale.

Prima di tutto notiamo che nel rivelatore elettrico riceviamo, se abbiamo dietro ad esso un amplificatore abbastanza potente, dei segnali di intensità costante, assolutamente costante. Quando il segnale arriva, ha una certa intensità, e questa è sempre uguale. Se si indebolisce la sorgente, i segnali sono più distanziati, ma sono sempre uguali a quelli di prima. Se invece la si rende più intensa, i segnali arrivano così in fretta che bloccano l'amplificatore; si deve perciò regolare la sorgente in modo che non ce ne siano troppi per l'apparecchio che si usa come rivelatore. Inoltre, se si mette un altro rivelatore in un punto diverso e si ascoltano ambedue i segnali, non se ne sentiranno mai due insieme, almeno se la sorgente è abbastanza debole e la precisione con cui si misura il tempo sufficientemente buona. Se si riduce molto l'intensità della sorgente in modo che arrivino pochi elettroni e a grande distanza gli uni dagli altri, non si avrà mai contemporaneamente un segnale su ambedue gli indicatori. Ciò significa che quello che arriva viene in unità singole (ha cioè un dato valore, e arriva solo in un punto per volta). Dunque, poiché gli elettroni o i fotoni arrivano come unità singole, possiamo fare la stessa cosa che abbiamo fatto per i proiettili, cioè misurare la probabilità di arrivo. Ora poniamo il rivelatore in vari punti — anzi, se volessimo, anche se sarebbe un po' costoso, potremmo mettere dei rivelatori in ogni punto, e tracciare l'intera curva contemporaneamente — e teniamolo in ciascun punto, diciamo, per un'ora, e misuriamo alla fine dell'ora quanti elettroni sono arrivati e facciamo la media. Che cosa otteniamo per il numero di elettroni che arrivano? Lo stesso tipo di N_{12} come per le pallottole? La figura 29 ci fa vedere la forma di N_{12}, quando ambedue i fori sono aperti. La cosa straordinaria è che si ottiene una curva che è uguale a quella che si otterrebbe per l'interferenza delle onde. Che cosa rappresenta questa curva? Non l'energia di un'onda,

ma la probabilità di arrivo di una di queste unità singole.

La matematica di questo procedimento è semplice. Si cambia I in N, e così si deve cambiare h in qualche cosa d'altro che non è l'altezza di niente — e per cui inventiamo il nome di *ampiezza di probabilità*, a, perché non sappiamo che cosa significa. In questo caso a_1 è l'ampiezza di probabilità per l'arrivo dal foro N. 1, e a_2 è l'ampiezza di probabilità per l'arrivo dal foro N. 2. Per ottenere l'ampiezza di probabilità totale di arrivo, si sommano insieme i due e se ne prende il quadrato. Facciamo così per analogia con quanto accade per le onde, perché, dovendo ottenere la stessa curva, dobbiamo usare la stessa matematica.

Devo però controllare un punto, quello sull'interferenza. Non ho detto quello che accade se chiudiamo uno dei fori. Cerchiamo di analizzare questa interessante curva, supponendo che gli elettroni siano passati o da un foro o dall'altro. Chiudiamo un foro e misuriamo quanti elettroni sono passati attraverso il foro N. 1, e otteniamo la curva N_1. Oppure possiamo chiudere l'altro foro e misurare quanti passano attraverso il N. 2 e otteniamo la curva N_2. Ma la somma di queste due non è uguale a $N_1 + N_2$ perché vi è interferenza. In effetti la relazione è data dalla strana formula che dice che la probabilità di arrivo è il quadrato di un'ampiezza che, a sua volta, è la somma di due pezzi, $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. Ci si chiede ora come possa accadere che quando gli elettroni passano attraverso il foro N. 1 si distribuiscano in un modo, e quando passano attraverso il foro N. 2 si distribuiscano in un altro, e tuttavia quando sono aperti ambedue non si ottenga la somma dei due. Per esempio, se tengo il rivelatore nel punto q con ambedue i fori aperti non ottengo praticamente niente, mentre se chiudo uno dei fori ottengo moltissimo, e se chiudo l'altro ottengo un poco. Lascio tutt'e due i fori aperti e non ottengo niente, cioè lascio venire gli elettroni da ambedue i fori e loro non arrivano più. Oppure prendiamo il punto al centro; si può vedere che in quel punto la curva è più alta della somma delle due curve per i fori singoli. Forse potreste pensare che con un po' di abilità si riuscirebbe a escogitare una spiegazione del fenomeno: una spiegazione in cui gli elettroni vanno avanti e indietro attraverso fori facendo qualche cosa di complicato, o magari uno si spezza in due parti in modo da passare attraverso i due fori, o qualche cos'altro di simile. Nessuno, tuttavia, è mai riuscito a dare una spiegazione soddisfacente, perché tanto la matematica di questo esperimento quanto la curva sono estremamente semplici (fig. 29).

Riassumendo, gli elettroni arrivano in unità singole come le particelle, ma la probabilità di arrivo è determinata dall'interferenza come nel caso dell'intensità delle onde. È in questo senso che l'elettrone si comporta certe volte come una particella e certe volte come un'onda, cioè si comporta in due modi diversi allo stesso tempo (tab. 2).

Tabella 2

Proiettili	Onde nell'acqua	Elettroni (fotoni)
Compaiono in unità	Possono avere qualsiasi dimensione	Compaiono in unità

Misura della probabilità del loro arrivo: $N_{12} = N_1+N_2$	Misura dell'intensità dell'onda: $I_{12} \neq I_1+I_2$	Misura della probabilità del loro arrivo: $N_{12} \neq N_1+N_2$
Senza interferenza	Interferenza	Interferenza

Questo è tutto ciò che c'era da dire e se vi dessi una rappresentazione matematica per calcolare in qualsiasi circostanza la probabilità d'arrivo degli elettroni, questa potrebbe essere in teoria la fine della lezione. Ci sono però alcune sottigliezze, alcune cose strane dovute al fatto che la natura funziona in questo modo, che vorrei discutere perché a questo punto possono non essere evidenti.

Per mostrare queste sottigliezze, cominciamo ad analizzare una proposizione che avremmo creduto ragionevole, visto che queste cose vengono in unità singole. Siccome quello che arriva è sempre in una quantità intera, in questo caso un elettrone, è ovvio supporre che esso passi o attraverso il foro N. 1 o attraverso il foro N. 2; sembra completamente evidente che non possa fare nient'altro, poiché si tratta di una unità singola. Voglio dare un nome a questa proposizione, la chiamerò “proposizione A”.

> PROPOSIZIONE A Un elettrone passa o attraverso il foro N. 1, o attraverso il foro N. 2.

Abbiamo già in parte discusso quello che succede con la proposizione A. Se fosse vero che un elettrone passa o attraverso il foro N. 1 o attraverso il N. 2, il numero totale di arrivi sarebbe la somma dei due contributi, cioè il numero totale di elettroni che arrivano sarebbe uguale al numero di quelli che passano attraverso il foro N. 1 più quelli che passano attraverso il foro N. 2. Poiché la curva effettiva non può essere facilmente espressa come la somma di due pezzi, e poiché gli esperimenti che determinano quanti elettroni arriverebbero se solo uno dei due fori fosse aperto non danno come risultato totale la somma dei due pezzi, è ovvio che si deve concludere che questa proposizione è falsa. Se non è vero che l'elettrone o passa dal primo foro o passa dal secondo, può darsi che esso si divida temporaneamente a metà o che faccia qualche cosa di simile. Perciò la logica ci dice che la proposizione A è falsa. Sfortunatamente, o forse fortunatamente, possiamo controllare la logica con l'esperimento. Dobbiamo trovare se è vero o no che gli elettroni passano o attraverso l'uno o attraverso l'altro foro, o se invece passano attraverso ambedue i fori e si spaccano temporaneamente in due.

L'unica cosa che dobbiamo fare è di osservarli, e per questo abbiamo bisogno di luce. Allora mettiamo dietro ai fori una sorgente di luce molto intensa. La luce è diffusa dagli elettroni, cioè rimbalza su di essi, di modo che se essa è abbastanza forte si possono vedere gli elettroni quando passano. Ce ne stiamo lì, allora, e guardiamo se, quando un elettrone è contato, oppure un istante prima che sia contato, si vede un lampo dietro il foro 1 o dietro il foro 2, o magari una specie di mezzo lampo in ambedue i punti contemporaneamente. Osservando capiremo come funziona. Accendiamo la luce, guardiamo e vediamo che ogni volta che il rivelatore conta c'è un lampo o dietro il N. 1 o

dietro il N. 2. Quello che vediamo è che l'elettrone passa al cento per cento, completo, attraverso o l'uno o l'altro, quando noi guardiamo. Eccoci dunque di fronte a un paradosso!

Allora cerchiamo di mettere la natura in difficoltà nel modo seguente. Terremo la luce accesa e conteremo quanti elettroni passano; faremo due colonne, una per il foro N. 1 e una per il N. 2, e a mano a mano che un elettrone arriva al rivelatore annoteremo nella colonna appropriata da quale foro è passato. Come appare la colonna per il foro N. 1 quando sommiamo i risultati che si ottengono con il rivelatore in diverse posizioni? Ossia, che cosa vedo guardando dietro il foro N. 1? Vedo la curva N_1 (fig. 29). La colonna è cioè distribuita proprio come pensavamo dovesse esserlo quando abbiamo chiuso il foro N. 2, ossia tutto va nello stesso modo sia che guardiamo sia che non guardiamo.

Chiudendo il foro N. 2 otteniamo una distribuzione degli arrivi uguale a quella che otterremmo se stessimo guardando il foro N. 1; allo stesso modo il numero che è arrivato attraverso il N. 2 è anch'esso una curva semplice N_2. Ora notate che il numero totale di elettroni che arrivano *deve essere* la somma del numero N_1 più N_2 perché ognuno di quelli che passano è stato segnato o sulla colonna 1 o sulla 2. Badate: il numero totale che arriva *deve assolutamente essere* la somma di questi due, ossia deve essere distribuito come N_1+N_2. Ma ho detto prima che è distribuito come la curva N_{12}, e invece no, è proprio come deve essere, cioè distribuito come $N_2 + N_2$. Se segniamo con un apice i risultati ottenuti con la luce accesa, troviamo che N_1' è praticamente uguale a N_1, senza la luce, e che N_2' è quasi uguale a N_2. Invece il numero N_{12}', che vediamo con la luce accesa e ambedue i fori aperti, *è* uguale al numero che vediamo attraverso il foro 1 più quello che vediamo attraverso il foro 2. Questo è il risultato che otteniamo quando la luce è accesa. Dunque concludiamo che si ottiene un risultato diverso a seconda che la luce è accesa o spenta. Se è accesa, la distribuzione è la curva $N_1 + N_2$. Se è spenta, la distribuzione è N_{12}. Accendete la luce, ed ecco che è di nuovo $N_1 + N_2$. E così vedete che la natura è riuscita a cavarsela. Potremmo dire allora che la luce influenza il risultato perché se la luce è accesa il risultato è diverso da quando è spenta. Si può anche dire che la luce influenza il comportamento degli elettroni. Se si parla del moto degli elettroni durante l'esperimento, il che è un po' impreciso, si può dire che la luce influenza il moto, e fa sì che quelli che avrebbero potuto arrivare al massimo, in qualche modo siano deviati o scacciati dalla luce e arrivino invece al minimo, arrotondando la curva così da produrre la curva semplice $N_1 + N_2$.

Gli elettroni sono molto delicati. Se si guarda una palla da *baseball* e si fa risplendere la luce su di essa, questa non produce nessun effetto, ossia la palla continua sempre ad andare nello stesso modo. Quando invece si invia la luce su un elettrone, questa lo mette in vibrazione di modo che l'elettrone, per effetto della luce che lo ha colpito, si comporta in maniera differente. Supponiamo di farla diventare sempre più debole, e di usare dei rivelatori molto sensibili che riescono a vedere una luce anche debolissima. Quando la luce è diventata debolissima, non si può pensare che essa influenzi l'elettrone in maniera così completa da cambiare il risultato del cento per cento facendoci passare dalla curva N_{12} a quella $N_1 + N_2$. In poche parole, a mano a mano che la luce si affievolisce, il

comportamento dell'elettrone deve, in qualche modo, avvicinarsi a quello che avrebbe in mancanza di luce. Come dunque una curva si trasforma in un'altra? Naturalmente, la luce non è come un'onda nell'acqua, non dobbiamo dimenticarci che essa ha anche certe proprietà fisiche delle particelle, e diminuendo l'intensità della luce non si diminuisce l'effetto, ma si riduce solo il numero di particelle, che chiamiamo fotoni, che arriva dalla sorgente. A mano a mano che abbasso la luce, ottengo sempre meno fotoni. Il minimo che posso diffondere da un elettrone è un solo fotone, e se ho troppo pochi fotoni ogni tanto un elettrone passerà dove non c'è nessun fotone, e in quel caso non lo vedrò. Una luce molto debole, perciò, non significa un piccolo disturbo, ma solo un piccolo numero di fotoni, e perciò, con una luce molto debole, devo inventare una terza colonna sotto il titolo di "non visti". Quando la luce è molto forte, vi saranno pochi eventi in questa colonna, e quando essa è molto debole, la maggior parte va a finire lì. Così ci sono ora tre colonne: foro N. 1, foro N. 2, e "non visti", e non è difficile immaginare quello che succede. Gli eventi che vedo sono distribuiti secondo la curva $N_1 + N_2$. Quelli invece che non vedo sono distribuiti secondo la curva N_{12}. Mano a mano che faccio diventare sempre più debole la luce vedo sempre meno elettroni, e una frazione più grande passa inosservata. In ogni modo, la curva effettiva è una mescolanza tra le due, e a mano a mano che la luce diventa più debole, la curva si approssima a N_{12} in maniera continua.

Non posso qui discutere molti altri modi differenti con cui si potrebbe suggerire di trovare da quale foro è passato l'elettrone. Tuttavia risulta sempre che è impossibile disporre la luce in modo che si possa vedere attraverso quale foro passa l'elettrone senza con questo disturbare la distribuzione degli arrivi degli elettroni, cioè senza distruggere l'interferenza. Non solo con la luce, ma con qualsiasi altro mezzo si voglia usare, è impossibile, in linea di principio, riuscirci. Se si vuole, si possono inventare molti modi per stabilire da quale foro passa l'elettrone, e allora risulta che passa o da uno o dall'altro. Ma se si cerca di immaginare uno strumento in modo che allo stesso tempo non disturbi il moto dell'elettrone, succede che non si può più decidere da quale foro quest'ultimo sia passato e si ottiene di nuovo il risultato complicato.

Heisenberg,[21] quando scoprì le leggi della meccanica quantistica, notò che le nuove leggi della natura erano compatibili solo se fosse esistita una limitazione fondamentale, fino ad allora sconosciuta, delle nostre possibilità sperimentali. In altre parole non è possibile compiere esperimenti tanto accurati quanto si vorrebbe. Heisenberg propose il suo principio di indeterminazione che, nel caso del nostro esperimento, è il seguente (egli lo enunciò in un altro modo, ma le due forme sono esattamente equivalenti e l'una può essere ottenuta dall'altra): "È impossibile costruire una qualsiasi apparecchiatura, per determinare attraverso quale foro passa l'elettrone, la quale non disturbi allo stesso tempo l'elettrone tanto da distruggere la figura di interferenza." Nessuno è riuscito ad aggirare questa difficoltà. Sono sicuro che ognuno di voi è pronto a suggerire qualche dispositivo per rivelare il foro da cui è passato l'elettrone: ma dopo un'attenta analisi, vi renderete conto che c'è qualche cosa che non funziona. Potreste pensare di farlo senza disturbare l'elettrone, ma alla fine c'è sempre qualche cosa che non va, e la differenza delle figure sarà in ultima analisi attribuibile alla perturbazione causata dagli strumenti usati per determinare attraverso quale foro arriva l'elettrone.

Questa è una caratteristica fondamentale della natura, valida in ogni caso. Se domani si trova una nuova particella, il mesone K (in effetti il mesone K è già stato trovato, ma per darle un nome chiamiamola così), e la si fa interagire con gli elettroni per determinare attraverso quale foro essi passano, sono convinto di conoscere già abbastanza il suo comportamento per dire che non può essere di un tipo tale da rivelare il foro attraverso il quale passerebbe l'elettrone senza allo stesso tempo produrre su di esso una perturbazione e cambiare la figura dall'interferenza alla non interferenza. Il principio di indeterminazione può dunque essere usato come principio generale per predire molte delle caratteristiche degli oggetti sconosciuti.

Ritorniamo ora alla nostra proposizione A: “gli elettroni devono passare o attraverso un foro o attraverso l'altro”. È vera o no? I fisici hanno un modo di evitare questo genere di trappole. Essi formulano le loro regole logiche nel modo seguente: se si ha un'apparecchiatura capace di dire attraverso quale foro passa l'elettrone (e *si può* avere tale apparecchiatura) allora si può dire che esso passa o da uno o dall'altro. È vero: quando si guarda, passa sempre o da uno o dall'altro. Ma quando non si ha nessuna apparecchiatura, per determinare questo, non si può più dire che passa o da uno o dall'altro. (Lo si può sempre *dire*, purché a questo punto si smetta subito di pensare e non se ne tragga nessuna conseguenza. I fisici preferiscono non dirlo, piuttosto di smettere subito di pensare.) Concludere che passa o da un foro o dall'altro quando non si guarda, equivale a fare un errore nella predizione. Questo è il sottile filo logico su cui dobbiamo camminare se vogliamo interpretare la natura.

La proposizione di cui sto parlando è generale. Essa non vale solo nel caso dei due fori, ma in ogni caso e può essere formulata nel modo seguente: la probabilità di un qualsiasi evento in un esperimento ideale (cioè un esperimento in cui tutto è specificato nella migliore maniera possibile) è il quadrato di qualche cosa, che in questo caso ho chiamato ampiezza di probabilità a. Quando un avvenimento può accadere in vari modi alternativi, l'ampiezza di probabilità, cioè il numero a, è la somma di tutti gli a per ognuna delle varie alternative. Se si fa un esperimento capace di determinare quale alternativa è stata presa, la probabilità dell'evento è cambiata, divenendo la somma delle probabilità di ogni alternativa. Cioè, si perde l'interferenza.

Ci si può chiedere come questo avvenga realmente, cioè a quale meccanismo sia dovuto. Nessuno però conosce questo meccanismo, e nessuno può darvi una spiegazione più profonda, di questo fenomeno, di quella che vi ho dato io, cioè semplicemente una descrizione di esso. Si può darne una spiegazione più esauriente, nel senso che si possono fare più esempi per mostrare che è impossibile decidere il foro da cui passa l'elettrone senza allo stesso tempo distruggere la figura dell'interferenza. È possibile discutere altri esperimenti, oltre a quello dell'interferenza delle due fenditure. Questo è però solo ripetere la stessa cosa per farvela capire meglio, e non è più profondo, ma solo più ampio. Si può rendere più precisa la matematica; si può menzionare il fatto che ci sono dei numeri complessi invece dei numeri reali, e un paio di altri punti minori che non hanno però niente a che vedere con l'idea centrale. Ma il mistero profondo è quello che ho descritto io, e nessuno oggi può andare più in là.

Finora abbiamo calcolato la probabilità di arrivo di un elettrone. Ma ora vogliamo

domandarci se esiste un modo per determinare da dove realmente arriva un singolo elettrone. Naturalmente non abbiamo nulla contro l'uso della teoria della probabilità, che generalmente si usa quando si ha a che fare con una situazione molto complicata. Tiriamo i dati in aria, e con le varie resistenze e gli atomi e tutte le cose complicate, siamo perfettamente disposti a riconoscere che non conosciamo abbastanza i particolari per fare una predizione precisa; così calcoliamo la probabilità dei vari risultati. Ma quello che stiamo proponendo qui è che ci sia probabilità fin dall'inizio, cioè che le leggi fondamentali della fisica siano probabilistiche.

Supponiamo di avere un esperimento disposto in maniera che con la luce spenta si ottenga interferenza. Allora dico che anche con la luce accesa non posso predire attraverso quale foro passerà l'elettrone. So solo che ogni volta che guardo passerà o da un foro o dall'altro ma non c'è nessun modo di sapere in anticipo quale dei due sarà. Il futuro, in altre parole, è imprevedibile, cioè è impossibile predire in alcun modo attraverso quale foro l'elettrone passerà o dietro a quale foro sarà visto. Ciò significa che la fisica si è in un certo senso arresa, ammesso che il suo scopo originario fosse, come tutti credevano, di saperne abbastanza per predire, date le condizioni iniziali, quello che sarebbe successo dopo. Queste sono le condizioni iniziali del nostro esperimento: una sorgente di elettroni, un'intensa sorgente di luce, una lastra di tungsteno con due fori: ora ditemi dietro a quale foro vedrò l'elettrone. Un modo per spiegare la nostra incapacità di predire attraverso quale foro si vedrà l'elettrone è di supporre che il suo moto sia determinato da cose molto complicate nella sorgente, che per esempio possieda delle ruote e degli ingranaggi interni e altri aggeggi del genere che determinino il foro dal quale passerà. Si ha così una probabilità del cinquanta per cento, perché come un dado essa è disposta in maniera casuale; la fisica è cioè incompleta, ma se un giorno riusciremo a raggiungere un grado abbastanza completo di conoscenza, potremo predire attraverso quale foro l'elettrone passerà. Questa si chiama la teoria della variabile nascosta; essa, però, non può essere vera, ossia, il fatto che non possiamo fare una previsione non è dovuto alla mancanza di conoscenza dettagliata.

Ho detto che se non accendo la luce ottengo interferenza. Se ho una condizione in cui ottengo quella figura di interferenza, è impossibile analizzarla dicendo che l'elettrone passa attraverso il foro N. 1 o il N. 2, perché quella curva d'interferenza è così semplice e matematicamente del tutto diversa dal contributo delle altre due curve di probabilità. Se fosse stato possibile determinare attraverso quale foro sarebbe passato l'elettrone con la luce accesa, l'accenderla o lo spegnerla non fa nessuna differenza. Infatti, quali che siano i meccanismi nella sorgente che permettono di dire se l'elettrone passerà attraverso il N. 1 o il N. 2, li si potrebbe osservare anche quando la luce è spenta e si potrebbe così determinare da quale foro sarà passato l'elettrone. Ma se potessimo fare questo, la curva risultante dovrebbe essere rappresentata come la somma di quelli che passano attraverso il foro N. 1 e quelli che passano attraverso il foro N. 2, mentre questo non avviene. Deve dunque essere impossibile avere in anticipo informazioni sul foro da cui passerà l'elettrone, sia con la luce spenta che accesa, purché l'esperimento sia disposto in modo da produrre l'interferenza quando la luce è spenta. Non è la nostra ignoranza degli ingranaggi e delle complicazioni interne che fa apparire nella natura la probabilità, la quale sembra

invece essere una caratteristica intrinseca di essa. Qualcuno ha espresso questa idea così: “La natura stessa non sa da che parte andrà l'elettrone.”

Una volta un filosofo ha detto: “È necessario per l'esistenza stessa della scienza che le stesse condizioni producano sempre gli stessi risultati.” Be', non è vero. Anche quando le condizioni rimangono uguali, non si può predire dietro a quale foro si vedrà l'elettrone. Eppure la scienza, nonostante tutto, continua ad andare avanti, anche se le stesse condizioni non producono sempre gli stessi risultati. Certo, il fatto di non poter predire esattamente quello che succederà ci rende un po' infelici. Per esempio, potremmo pensare a un caso molto pericoloso e serio in cui l'uomo *deve* assolutamente sapere, mentre la scienza non gli permette di prevedere. Per esempio potremmo escogitare uno schema (meglio non farlo, ma si potrebbe) in cui si ha una cellula fotoelettrica attraverso la quale passa un elettrone, e se lo vediamo dietro al foro N. 1 facciamo partire una bomba atomica e cominciamo la terza guerra mondiale, mentre se lo vediamo dietro il foro N. 2 facciamo sondaggi di pace e allontaniamo la guerra ancora di un poco. Allora il futuro dell'uomo dipenderebbe da una cosa che la scienza non può in alcun modo predire. Il futuro è imprevedibile. Quello che è necessario “per l'esistenza stessa della scienza” e quelle che sono le caratteristiche della natura non devono essere determinate da pretenziose condizioni aprioristiche, ma dal materiale con cui lavoriamo, cioè dalla natura. Noi guardiamo, vediamo quello che troviamo, e non possiamo decidere in precedenza quello che deve essere. Le possibilità più plausibili spesso risultano non essere vere. Per il progresso della scienza occorre la capacità di sperimentare, l'onestà nel riferire i risultati (che vanno riportati senza tener conto di come avremmo voluto che fossero) e infine, cosa importante, l'intelligenza per interpretarli. L'essenziale è che questa intelligenza non deve essere sicura in anticipo di come le cose devono essere. È chiaro che si possono avere pregiudizi che ci portano a dire: “Questo è molto improbabile; questo non mi piace.” Pregiudizi di tal fatta sono però diversi dalla certezza assoluta, indicano soltanto un'inclinazione. Fino a che si è solo disposti sfavorevolmente ma non si ha un pregiudizio assoluto, si finirà prima o poi per tener conto degli esperimenti anche se i risultati sono diversi dalle nostre aspettative. Se invece si è assolutamente certi in anticipo di qualche precondizione che la scienza deve soddisfare si arriverà addirittura a trascurare i risultati. Per l'esistenza stessa della scienza è necessario che esistano delle menti che non ammettono che la natura debba soddisfare delle condizioni preconcette, come quelle poste dal nostro filosofo.

Capitolo 7.
Alla ricerca di nuove leggi

Quello di cui voglio parlare in questa lezione non si riferisce in senso stretto al carattere delle leggi fisiche. Si potrebbe immaginare che quando si parla del carattere delle leggi fisiche si parli della natura; io però non voglio parlare della natura, ma piuttosto della posizione in cui stiamo rispetto ad essa in questo momento. Voglio dirvi quello che crediamo di sapere, quello che resta ancora da scoprire e come avviene il processo di scoperta. Qualcuno ha suggerito che la cosa ideale sarebbe che io, andando avanti, vi spiegassi lentamente come scoprire una nuova legge e finissi poi per crearne davanti a voi una nuova. Non so, però, se sarò capace di farlo.

Per prima cosa, voglio parlarvi di quella che è la situazione presente, cioè di quello che sappiamo della fisica. Forse potreste pensare che vi abbia già detto tutto perché nelle lezioni precedenti vi ho parlato di tutti i grandi princìpi conosciuti. Ma questi princìpi sono princìpi che riguardano *qualche cosa*; il principio di conservazione dell'energia si riferisce all'energia di *qualche cosa*, e così pure le leggi della meccanica quantistica. Tutti questi princìpi sommati insieme, però, non ci danno ancora il contenuto della natura di cui stiamo parlando. Vi parlerò dunque un po' della materia per la quale valgono tutti questi princìpi.

Prima di tutto c'è la materia, e, per quanto straordinario possa sembrare, essa è dappertutto la stessa. Si sa che la materia di cui sono fatte le stelle è la stessa che costituisce la terra. Il carattere della luce che esse emettono porta con sé una specie di impronta digitale che ci permette di dire che ci sono là degli atomi uguali a quelli che ci sono sulla terra. Lo stesso tipo di atomi appare negli esseri viventi e in quelli non viventi; le rane sono fatte della stessa roba di cui sono fatte le pietre, solo con sistemazioni diverse. Questo, così, rende più semplice il nostro problema perché da ogni parte non abbiamo altro che atomi tutti uguali.

Sembra anche che gli atomi abbiano tutti la stessa costituzione generale, con un nucleo attorno al quale stanno degli elettroni. Possiamo allora fare una lista delle particelle esistenti di cui crediamo di sapere qualcosa (tab. 3). Prima ci sono gli elettroni, che sono quelle più esterne sull'atomo.

TABELLA 3

Elettroni Fotoni Gravitoni Neutrini	 Neutroni Protoni

+ Antiparticelle

Poi ci sono i nuclei; oggi, però, si sa che a loro volta questi sono composti da altre due particelle chiamate neutroni e protoni. Vediamo le stelle e i loro atomi che emettono luce,

e la luce stessa è descritta da particelle chiamate fotoni. All'inizio abbiamo parlato della gravitazione; e se la teoria dei quanti è corretta, allora anche la gravitazione dovrebbe avere un tipo di onde che anch'esse si comportano come particelle chiamate gravitoni. Se non ci credete chiamatela semplicemente gravità. E infine ho menzionato quello che si chiama decadimento beta, nel quale un neutrone può disintegrarsi in un protone, un elettrone e un neutrino, anzi, in un antineutrino; ecco un'altra particella, il neutrino. Oltre a tutte le particelle che ho elencato ci sono naturalmente tutte le antiparticelle, il che è semplicemente un modo di dire che il loro numero raddoppia.

Per quello che ne sappiamo, tutti i fenomeni a bassa energia, anzi tutti i normali fenomeni che accadono in ogni punto dell'universo, possono essere spiegati con le particelle che ho elencato. Ci sono delle eccezioni, per esempio quando una particella ad altissima energia produce qualche cosa di strano, come talvolta avviene in laboratorio. Ma se lasciamo stare questi casi speciali, tutti i fenomeni ordinari possono essere spiegati con le azioni e i moti di queste particelle. Per esempio, la vita stessa sembra in teoria poter essere spiegata con i movimenti degli atomi che sono fatti di neutroni, protoni ed elettroni. Devo dire subito che quando affermiamo di comprenderlo in teoria, vogliamo solo dire che pensiamo che, se potessimo calcolare tutto, non avremmo bisogno di scoprire nessuna nuova legge fisica per capire il fenomeno della vita. Per dare un altro esempio, il fatto che il sole e le stelle emettano energia si può presumibilmente comprendere in termini di reazioni nucleari tra queste particelle. Per quel che ne sappiamo oggi, tutti i dettagli del modo in cui si comportano gli atomi sono accuratamente descritti da questo tipo di modello. Anzi, posso dire che nell'insieme dei fenomeni, almeno per quanto ne so io, non ce n'è nessuno che sicuramente non possa venir spiegato in questo modo, o intorno al quale esista ancora un profondo mistero.

Questo non è sempre stato possibile. C'è per esempio un fenomeno chiamato superconduttività, per cui, a basse temperature, i metalli conducono l'elettricità senza resistenza. Da principio non era evidente che questa fosse una conseguenza delle leggi conosciute, ma adesso, dopo che ci si è pensato a sufficienza, si è visto che è completamente spiegabile in termini delle nostre conoscenze presenti. Ci sono altri fenomeni, come la percezione extrasensoria, che non possono essere spiegati con le nostre conoscenze di fisica. Tuttavia questo fenomeno non è stato ancora ben stabilito e non possiamo garantire che esista veramente. Se potesse essere dimostrato, naturalmente questo proverebbe che la fisica è incompleta, ed è dunque molto interessante per i fisici stabilire se ciò è vero o falso. Esistono molti esperimenti che mettono in dubbio l'esistenza di questa percezione extrasensoria. E lo stesso vale per le influenze astrologiche. Se fosse vero che le stelle possono influenzare il giorno in cui è più conveniente andare dal dentista — in America abbiamo questo tipo di astrologia — la fisica si dimostrerebbe errata, perché non c'è nessun meccanismo dipendente dal comportamento delle particelle che potrebbe in teoria spiegarlo. Questo è il motivo per cui tra gli scienziati c'è un certo scetticismo riguardo a tali idee.

Diverso è il caso dell'ipnosi: all'inizio, quando era ancora descritta in maniera incompleta, sembrava che anche questa fosse impossibile. Ora che è conosciuta meglio, si comprende che non è assolutamente escluso che essa possa avvenire attraverso processi

fisiologici normali, anche se per ora sconosciuti; non è cioè completamente ovvio che essa richieda un nuovo tipo di forza.

Oggi, la nostra conoscenza di ciò che succede fuori del nucleo dell'atomo sembra abbastanza precisa e completa, nel senso che, dato un tempo sufficiente, possiamo calcolare qualsiasi cosa tanto accuratamente quanto la possiamo misurare; invece le forze tra i neutroni e i protoni che costituiscono il nucleo sono non completamente conosciute e molto male capite. Voglio dire che noi oggi non conosciamo le forze tra i neutroni e i protoni a tal punto da potere, con abbastanza tempo e sufficienti macchine calcolatrici, calcolare esattamente i livelli energetici del carbonio o cose simili. Non ne sappiamo abbastanza. Mentre possiamo fare la cosa corrispondente per i livelli energetici degli elettroni esterni dell'atomo, non possiamo farlo per il nucleo, poiché le forze nucleari non sono comprese abbastanza bene.

Per capire meglio questo problema, gli sperimentatori sono passati a studiare i fenomeni a energia altissima. Fanno urtare insieme neutroni e protoni ad altissima energia per produrre cose strane, studiando le quali si spera di comprendere meglio le forze tra neutroni e protoni.

TABELLA 4

Elettroni Fotoni Gravitoni Neutrini Mesoni μ (muoni) Neutrini μ	Neutroni Protoni (e altre 4 dozzine e più)

+ Tutte le antiparticelle

Il vaso di Pandora è stato aperto da questi esperimenti! Volevamo solo farci un'idea migliore delle forze tra neutroni e protoni, ma quando li abbiamo fatti urtare insieme abbiamo scoperto che nel mondo ci sono delle altre particelle. Sono state così trovate più di quattro dozzine di altre particelle nel tentativo di comprendere queste forze; metteremo queste quattro dozzine nella colonna dei neutroni e dei protoni (tab. 4) perché interagiscono con i neutroni e i protoni, e hanno qualche cosa a che fare con le forze che agiscono fra essi. Oltre a questo, mentre la draga stava scavando in tutto questo fango, essa ha tirato su anche un paio di pezzi che sono irrilevanti per il problema delle forze nucleari. Uno di essi si chiama mesone μ, o muone, e l'altro è un neutrino che va insieme ad esso. Ci sono due tipi di neutrini, uno che va con l'elettrone e uno che va con il mesone μ. Incidentalmente, cosa molto strana, tutte le leggi del muone e del suo neutrino sono adesso conosciute, per quanto possiamo dire sperimentalmente; secondo queste leggi essi si comportano esattamente come l'elettrone e il suo neutrino, eccetto che la massa del muone è 207 volte più grande di quella dell'elettrone; questa però è l'unica differenza nota tra quegli oggetti, il che è piuttosto strano. Altre quattro dozzine di particelle sono una quantità spaventosa e a queste bisogna aggiungere le antiparticelle. Hanno vari nomi, mesoni K, pioni, lambda, sigma... che non hanno però grande importanza... con quattro dozzine di particelle bisogna per forza trovare molti nomi! Risulta però che queste

particelle si presentano in famiglie, il che semplifica un po' la cosa. Anzi alcune di queste cosiddette particelle vivono così poco tempo, che è in discussione addirittura se sia possibile definire la loro stessa esistenza; qui però non discuterò questo argomento. Per illustrare l'idea delle famiglie, prenderò il caso di un neutrone e di un protone. Questi due hanno la stessa massa entro circa l'uno per mille. Uno è 1,836 volte più pesante dell'elettrone, e l'altro 1,839. Ancora più notevole è il fatto che per le forze nucleari, cioè le intense forze entro il nucleo, la forza tra due protoni è uguale a quella tra un protone e un neutrone e a quella tra due neutroni. In altre parole, con le sole intense forze nucleari non si può distinguere un protone da un neutrone. Si tratta dunque di una legge di simmetria; i neutroni possono essere sostituiti ai protoni senza che niente cambi, purché si parli solo delle forze forti. Tuttavia, se si cambia un neutrone con un protone si produce una differenza tremenda, perché il secondo porta una carica elettrica, mentre l'altro è neutro. Con una misura elettrica si può subito vedere la differenza tra i due, e così questa simmetria, per la quale si può sostituire uno all'altro si chiama simmetria approssimata. Essa è valida per le interazioni forti delle forze nucleari, ma non è però una simmetria profonda della natura, perché non funziona per l'elettricità. La chiamiamo perciò una simmetria parziale ed è con questo tipo di simmetria che dobbiamo lottare.

Oggi il concetto di famiglia è stato esteso, e si è visto che le sostituzioni del tipo di quella di un neutrone a un protone possono essere applicate a un più vasto gruppo di particelle. La precisione però è ancora più bassa. L'affermazione che i neutroni possono sempre essere sostituiti dai protoni è solo approssimata — non è cioè vera per l'elettricità — ma le più ampie sostituzioni che sono state trovate possibili danno una simmetria ancora più povera. Tuttavia queste simmetrie parziali hanno aiutato a raccogliere le particelle in famiglie e a trovare i punti in cui mancano particelle e a scoprirne altre.

Questo tipo di gioco, il cercare di indovinare all'inarca le parentele familiari, illustra le schermaglie preliminari che si fanno con la natura prima di scoprire veramente una legge profonda e fondamentale. Vi sono esempi importanti nella precedente storia della scienza. Per esempio la scoperta di Mendeleev,[22] della tavola periodica degli elementi è analoga a questo gioco. Essa rappresentò il primo passo, ma la descrizione completa della ragione della tavola atomica venne più tardi, con la teoria atomica. Allo stesso modo, Maria Mayer e Hans Daniel Jensen,[23] alcuni anni fa organizzarono, in quello che essi chiamarono il modello a gusci del nucleo, le nostre conoscenze dei livelli nucleari; la fisica è oggi impegnata in un gioco analogo in cui si cerca di ridurre la complessità tentando di indovinare delle simmetrie approssimate.

Oltre a queste particelle abbiamo tutti quei princìpi di cui abbiamo parlato prima, cioè i princìpi di simmetria, di relatività, e quello secondo il quale le cose devono comportarsi in maniera quantistica; e infine, combinando questi princìpi con la relatività, quello secondo cui tutte le leggi di conservazione devono essere locali.

Se mettiamo insieme tutti questi princìpi scopriamo che ce ne sono troppi, cioè che essi sono incompatibili gli uni con gli altri. Sembra che se prendiamo la meccanica quantistica, più la relatività, più la proposizione che tutto deve essere locale, più un certo numero di ipotesi sottintese, ne viene fuori qualche cosa di incompatibile perché quando calcoliamo vari processi otteniamo un risultato infinito, che certo non può essere in

accordo con la natura. Un esempio delle ipotesi sottintese che ho menzionato, sulla quale abbiamo troppi pregiudizi per comprenderne il vero significato, è una proposizione del tipo seguente: se calcoliamo la probabilità per ogni possibilità, e per esempio c'è il 50 per cento di probabilità che accada questo, il 25 per cento che accada quello ecc., la somma di queste probabilità deve essere 1. Cioè noi supponiamo che sommando tutte le alternative si ottenga la probabilità del 100 per cento. Questa sembra un'ipotesi ragionevole, ma la difficoltà sta sempre nelle cose ragionevoli. Un'altra proposizione del genere è che l'energia di qualche cosa deve sempre essere positiva, mai negativa. E un'altra proposizione, che probabilmente si introduce prima di ottenere l'incompatibilità, è la cosiddetta causalità, che è un po' come l'idea secondo la quale gli effetti non possono precedere le cause. A dire il vero nessuno ha fatto un modello in cui si trascura la proposizione sulla probabilità, o la causalità, e che sia anche conforme alla meccanica quantistica, alla relatività, alla località e così via. Perciò non sappiamo esattamente qual è, fra le ipotesi fatte, quella che dà la difficoltà che produce l'infinito. È un bel problema! Tuttavia è possibile nascondere, per così dire, sotto il tappeto gli infiniti, con una serie di abili regole, così che in qualche modo si possano fare i conti.

Bene, questa è la situazione presente. Adesso voglio discutere come si cerca una nuova legge.

In genere, per cercare una nuova legge usiamo il seguente procedimento. Anzitutto tiriamo a indovinare la forma della legge e poi calcoliamo le conseguenze della nostra supposizione per vedere quello che ne deriverebbe se la legge che abbiamo cercato di indovinare fosse giusta. Poi confrontiamo il risultato del calcolo con la natura, per mezzo di esperimenti, paragonandolo direttamente con l'osservazione e vediamo se funziona. Se non concorda con l'esperimento, allora la nostra legge è sbagliata, e in questa semplice affermazione sta la chiave della scienza. Non importa che l'ipotesi sia bellissima, né importa quanto geniale sia chi l'ha proposta, e neppure il suo nome ha importanza: se è in disaccordo con l'esperienza, è sbagliata. È proprio così. Naturalmente si deve controllare con cura che sia sbagliata, perché chi ha fatto l'esperimento può avere riferito erroneamente, o ci può essere stata una caratteristica dell'esperimento che è passata inosservata, della polvere o qualche altra cosa; oppure quello che ha calcolato le conseguenze, anche se è quello che ha fatto le ipotesi, potrebbe aver compiuto qualche errore nell'analisi. Queste sono osservazioni ovvie, e così quando dico che l'esperimento è sbagliato, intendo che questo è stato controllato, che i calcoli sono stati verificati, e che l'intera cosa è stata riguardata avanti e indietro un paio di volte per assicurarsi che le conseguenze derivano logicamente dall'ipotesi, e che in effetti è in disaccordo con un esperimento accuratamente esaminato.

Questo può darvi forse un'impressione errata della scienza, facendovi pensare che noi continuiamo a indovinare delle possibilità e a confrontarle con l'esperienza, il che sminuisce in un certo senso la posizione di quest'ultima. Gli sperimentatori invece hanno una loro individualità ben spiccata, e amano fare gli esperimenti anche se nessuno ha fatto ipotesi, anzi spesso li fanno in un campo in cui si sa che il teorico non ne ha fatte. Per esempio, noi conosciamo moltissime leggi, ma non sappiamo se funzionano veramente ad alta energia, anche se è verosimile che debbano funzionare. Gli

sperimentatori hanno dunque provato a fare esperimenti ad alte energie, e in effetti ogni tanto viene fuori qualche difficoltà, cioè si scopre che una delle cose che credevamo corrette è invece errata. In questo modo l'esperimento può produrre dei risultati inaspettati, obbligandoci di nuovo a fare delle ipotesi. Un esempio di risultato inatteso è quello del mesone μ e del suo neutrino, che non era stato immaginato da nessuno prima di essere scoperto, e anche oggi nessuno conosce alcuna ipotesi che spieghi naturalmente questo risultato.

È facile vedere come con questo metodo possiamo cercare di dimostrare errata qualunque teoria definita. In linea di principio si può sempre eliminare una data teoria calcolandone le conseguenze e paragonandole con l'esperienza. C'è dunque sempre la possibilità di dimostrare errata qualsiasi teoria definita, ma è da notare che non si può mai dimostrare che essa è corretta. Immaginiamo di inventare una buona ipotesi, di calcolarne le conseguenze e di scoprire che ogni volta queste si accordano con l'esperimento. La teoria è dunque giusta? No, non si è dimostrato che è errata. In futuro si potrebbero calcolare ulteriori conseguenze, si potrebbero fare altri esperimenti e si potrebbe allora scoprire che essa è sbagliata. Questo è il motivo per cui leggi come quella di Newton sul moto dei pianeti durano così a lungo. Egli intuì la legge della gravitazione, calcolò ogni sorta di conseguenze per il sistema e così via, le confrontò con l'esperienza e ci sono volute varie centinaia di anni prima che fosse poi osservato il piccolo errore del moto di Mercurio. Durante tutto quel tempo non si era dimostrato che la teoria era errata per cui poteva essere supposta temporaneamente corretta. Ma non poteva mai essere dimostrata vera, perché l'esperimento di domani poteva provare sbagliato quello che si pensava essere giusto. Non possiamo mai essere definitivamente sicuri di avere una teoria giusta, mentre possiamo essere sicuri di averne una sbagliata. È tuttavia piuttosto notevole che si possano avere delle idee che durano così a lungo.

Uno dei modi per fermare la scienza sarebbe di fare esperimenti solo nella regione in cui si conoscono le leggi. Gli sperimentatori, invece, cercano molto diligentemente e con i più grandi sforzi proprio in quei punti in cui sembra più probabile dimostrare che le nostre teorie sono errate. In altre parole, noi tentiamo al più presto possibile di dimostrare di avere sbagliato, perché solo in tal modo possiamo compiere dei progressi. Per esempio, oggi non sappiamo dove cercare delle difficoltà tra i normali fenomeni a bassa energia, dove crediamo che tutto vada bene e perciò non c'è nessun particolare programma per trovare delle magagne nelle reazioni nucleari o nella superconduttività. In queste lezioni mi sto concentrando sulla scoperta delle leggi fondamentali, benché l'intero campo della fisica, il che è piuttosto interessante, includa anche una comprensione a un altro livello di fenomeni come la superconduttività e le reazioni nucleari in termini delle leggi fondamentali. Qui però sto parlando della ricerca di qualche cosa di errato in queste leggi, e poiché nessuno sa dove cercarlo tra i fenomeni a bassa energia, oggi tutti gli esperimenti nel campo della ricerca di una nuova legge sono nelle alte energie.

Un'altra cosa che vorrei far notare è che non si può dimostrare errata una teoria vaga. Se l'ipotesi è imprecisa e mal formulata, e il metodo che si usa per dedurre le conseguenze è un po' vago, cioè non si è sicuri e si dice “credo che tutto vada bene perché è tutto dovuto a questo e a quell'altro, e la tale cosa fa all'incirca la tal altra, e posso più o meno

spiegare come funziona...", allora può sembrare che questa teoria sia valida, perché non si può dimostrare che è sbagliata! Inoltre, se il procedimento per calcolare le conseguenze è indefinito, con un po' di abilità qualsiasi risultato sperimentale può essere girato in modo da farlo sembrare una conseguenza prevista. Siete probabilmente familiari con questo tipo di argomenti in altri campi. "A" odia sua madre: il motivo ovviamente è perché essa non lo ha accarezzato o amato abbastanza quando era bambino. Ma se si va a cercare, si trova in effetti che essa lo ha amato moltissimo, e che tutto andava bene. Ebbene, allora è perché essa è stata troppo indulgente quando lui era bambino! Con una teoria vaga si possono avere ambedue i risultati. La cura per questo caso è la seguente: se fosse possibile stabilire esattamente a priori quanto amore non è sufficiente e quanto invece è esagerato, ci sarebbe una teoria perfettamente legittima che potrebbe essere sottoposta a dei controlli. Di solito quando si fa presente questo, viene risposto: "Dove si tratta di problemi psicologici le cose non possono essere definite in maniera così precisa." Va bene, ma allora non si dovrebbe pretendere di saperne qualcosa.

Vi farà orrore sapere che in fisica abbiamo esempi esattamente dello stesso tipo. Abbiamo queste simmetrie approssimate che funzionano all'incirca così. Si ha una simmetria approssimata e si calcola una serie di conseguenze, supponendo che sia perfetta, ma quando la si confronta con gli esperimenti non funziona. È ovvio: la simmetria che ci si deve aspettare è approssimata, di modo che se l'accordo è piuttosto buono si dice: "Bello!" mentre se invece è scadente si dice: "Be', questa data cosa deve essere particolarmente sensibile alla rottura della simmetria." Ridete pure, ma siamo obbligati a procedere in questo modo. In un campo nuovo, e appunto queste particelle sono nuove per noi, questo giostrare, questo modo di andare avanti a tastoni per cercare i risultati è l'inizio di ogni scienza. La stessa cosa si verifica per la proposizione della simmetria in fisica e per la psicologia, e perciò non ridete troppo forte. All'inizio è necessario essere molto attenti, perché è facile cadere nei pasticci con questo tipo di teoria vaga: è difficile dimostrare che è errata, e ci vuole una certa abilità ed esperienza per non soccombere nel gioco.

In questo processo di cercare di indovinare, di calcolare le conseguenze e di confrontarle con l'esperienza possiamo arenarci in vari punti. Ci si può arenare al primo stadio, quando cioè non si hanno idee, oppure ci si può arenare allo stadio dei calcoli. Per esempio, Yukawa,[24] nel 1934, propose un'ipotesi per la forma delle forze nucleari, ma nessuno poté calcolare le conseguenze perché la matematica necessaria era troppo difficile, cosicché non fu possibile confrontare la sua idea con l'esperienza. La teoria rimase perciò per molto tempo in quello stato fino a che furono scoperte tutte queste altre particelle che non erano contemplate nello schema di Yukawa, cosicché la situazione non è certo semplice come egli aveva immaginato. Un altro punto in cui ci si può arenare è la parte sperimentale. Per esempio la teoria quantistica della gravitazione procede molto lentamente, ammesso che proceda, perché tutti gli esperimenti che si possono fare non fanno mai intervenire la gravitazione e la meccanica quantistica allo stesso tempo, dato che la forza di gravità è molto più debole di quella elettrica.

Poiché io sono un fisico teorico e mi appassiono di più a questa parte del problema, voglio concentrarmi adesso sul modo in cui si inventano le ipotesi.

Come ho detto prima, non ha nessuna importanza da dove viene l'ipotesi; l'unica cosa importante è che essa sia in accordo con l'esperienza, e che sia il più definita possibile. “Allora — direte voi — è molto semplice. Si prepara una grande macchina, una macchina calcolatrice, in cui c'è una ruota casuale che fa una serie di supposizioni, e ogni volta che fa un'ipotesi su come funziona la natura, calcola immediatamente le conseguenze, e fa un confronto con una lista di risultati sperimentali che ha dall'altra parte.” In altre parole, fare delle ipotesi è una cosa che possono fare tutti. In effetti è esattamente il contrario, e voglio spiegare perché.

Anzitutto c'è il problema di decidere da dove partire. Voi direte: “Io comincerei da tutti i princìpi conosciuti.” Però tutti i princìpi conosciuti sono incompatibili tra di loro, e quindi qualche cosa deve essere eliminato. A questo proposito molto spesso riceviamo lettere da gente che sostiene che dobbiamo eliminare qualcuna delle nostre ipotesi, per fare posto per una nuova. Qualcuno per esempio dice: “Voi fisici dite sempre che lo spazio è continuo. Come fate a sapere che quando si arriva a una dimensione sufficientemente piccola ci sono sempre abbastanza punti in mezzo, e che non ci sono invece molti punti separati da piccole distanze?” Oppure qualcun altro ci scrive: “Quelle ampiezze di meccanica quantistica di cui mi avete parlato sono talmente complicate e assurde: che cosa vi fa pensare che siano corrette? Forse non lo sono.” Queste osservazioni sono ovvie e perfettamente chiare a chiunque lavora su questo problema, e non serve a niente farglielo notare. Il problema non è solo di decidere che cosa è sbagliato, ma che cosa precisamente gli può essere sostituito. Nel caso dello spazio continuo, supponiamo che la proposizione giusta sia quella secondo la quale lo spazio consiste effettivamente in una serie di punti, e che lo spazio che sta in mezzo non significhi nulla e che i punti siano disposti secondo un cubo. Allora possiamo dimostrare subito che questo è errato, perché non funziona. Il problema non è soltanto di dire quello che è sbagliato, ma anche di sostituirlo con qualche altra cosa, e questo non è così facile. Appena si sostituisce ad esso un'idea veramente definita, diventa subito chiaro che non funziona.

La seconda difficoltà è che c'è un numero infinito di possibilità di questi tipi semplici. Le cose vanno pressappoco così: voi siete lì da molto tempo che cercate disperatamente di aprire una cassaforte a combinazione, e a un certo momento arriva un tizio che non sa nulla di quello che state facendo, se non che state cercando di aprirla. E allora vi dice: “Perché non prova il numero 10.20.30?” Non lo proviamo perché siamo molto occupati, abbiamo già provato un sacco di cose, e forse anche 10.20.30. Oppure sappiamo già in partenza che il numero di mezzo è 32 e non 20, o che la combinazione è composta di cinque gruppi di cifre... E così, per favore, non mandatemi nessuna lettera dicendomi come la cosa dovrebbe funzionare. Io le leggo — le leggo sempre per essere sicuro di aver già pensato a quello che mi si suggerisce — ma ci vuole troppo tempo per rispondere perché sono di solito del tipo “Provi 10.20.30.” Come al solito, l'immaginazione della natura supera di gran lunga la nostra, come abbiamo visto con le altre teorie che sono sottili e profonde. Arrivare a una ipotesi così sottile e profonda non è facile: bisogna essere molto astuti per questo, e non lo si può fare alla cieca con una macchina.

Voglio adesso discutere l'arte di indovinare le leggi della natura, perché è veramente un'arte. Come si fa? Un metodo che si potrebbe suggerire sarebbe di guardare la storia per

vedere come hanno fatto gli altri. Diamo dunque un'occhiata alla storia.

Cominciamo da Newton. Egli si trovava in una situazione in cui aveva una conoscenza incompleta, e fu capace di indovinare le leggi mettendo insieme idee che erano tutte relativamente vicine all'esperienza perché non c'era una grande distanza tra le osservazioni e le verifiche. Questo è stato il primo modo, ma oggi non funziona più così bene.

Il primo che dopo di lui fece qualche cosa di veramente grande fu Maxwell, che scoprì le leggi dell'elettricità e del magnetismo. Ecco come fece: mise insieme le leggi dell'elettricità di Faraday, e di altri che erano venuti prima di lui, le esaminò e si accorse che erano matematicamente incompatibili. Per rimettere tutto a posto dovette aggiungere un termine a un'equazione. Fece questo inventandosi un modello meccanico per lo spazio, e trovò la nuova legge; ma nessuno ci fece molta attenzione perché non si credeva nel suo modello meccanico. Neppure noi oggi crediamo al suo modello meccanico, ma le equazioni che egli ottenne erano corrette. E questo fa vedere che la logica può essere errata ma il risultato giusto.

Nel caso della relatività la scoperta fu completamente diversa. C'era un accumulo di paradossi, e le leggi conosciute conducevano a risultati incompatibili. Questo era un nuovo modo di pensare, basato sull'analisi delle possibili simmetrie delle leggi. Era particolarmente difficile anche perché ci si accorse per la prima volta che una cosa come la legge di Newton poteva durare molto a lungo, e in definitiva essere errata. Era anche molto difficile ammettere che le idee ordinarie di spazio e di tempo, che sembrano così istintive, potessero essere sbagliate.

La meccanica quantistica fu scoperta in due modi indipendenti, e questo deve servirci di lezione. Anche qui, e in misura ancora maggiore che per la relatività, furono scoperti sperimentalmente un'enorme quantità di paradossi, cioè di cose che assolutamente non potevano essere spiegate con quello che si sapeva. Non era che si avesse una conoscenza incompleta, ma piuttosto una conoscenza troppo completa. Si prediceva che qualche cosa sarebbe dovuta accadere, mentre invece non accadeva. Le due strade diverse furono percorse una da Schrödinger che indovinò l'equazione, e l'altra da Heisenberg che sostenne che bisogna analizzare solo quello che si misura. I due diversi metodi filosofici alla fine condussero alla stessa scoperta.

Più recentemente, la scoperta delle leggi (del resto solo parzialmente conosciute) del decadimento debole in cui un neutrone si disintegra in un protone, un elettrone e un antineutrino è avvenuta in una situazione un po' differente. Questa volta era il caso di una conoscenza incompleta, e si riuscì a indovinare solo l'equazione. La vera difficoltà stava nel fatto che tutti gli esperimenti erano errati. Come si fa a indovinare la risposta giusta se, quando si calcola il risultato, esso non concorda con l'esperimento? Ci va del coraggio per dire che gli esperimenti devono essere sbagliati. Spiegherò più tardi da dove viene quel coraggio.

Oggi forse non abbiamo nessun paradosso. È vero che abbiamo quell'infinito che viene fuori quando mettiamo assieme tutte le leggi, ma quelli che nascondono le difficoltà sono così astuti che certe volte si è portati a credere che questo non sia un paradosso serio. Inoltre, il fatto che abbiamo trovato tutte queste particelle non ci dice nulla, se non che la

nostra conoscenza è incompleta. Sono sicuro che in fisica la storia non si ripete, come potete vedere dagli esempi che ho dato. La ragione è che qualsiasi schema, come “pensate alle leggi della simmetria” o “mettete quello che sapete in forma matematica” o “provate a indovinare le equazioni” è noto a tutti ed è continuamente tentato. Quando ci si arena, la soluzione non può essere in nessuno di questi, perché sono già stati tutti sperimentati. La prossima volta ci deve essere un'altra via d'uscita e se ci troviamo in questa confusione con tutte queste difficoltà è perché i metodi che stiamo usando sono proprio come quelli che abbiamo usato prima. Il nuovo schema, la nuova scoperta verrà fuori in un modo completamente diverso, di modo che la storia non ci aiuta molto.

Vorrei discutere brevemente l'idea di Heisenberg secondo la quale non bisogna parlare di quello che non si può misurare, perché molti la citano senza comprendere veramente che cosa significa. Si può interpretarla nel senso che le costruzioni e invenzioni che si fanno devono essere tali che le conseguenze che si calcolano siano confrontabili con l'esperimento, cioè non si può calcolare una conseguenza come “*a* deve essere tre volte *b*” quando nessuno sa che cosa siano *a* e *b*. Ovviamente questo non direbbe nulla. Tuttavia, se le conseguenze possono essere confrontate con l'esperimento, questo è sufficiente. Non vuol dire che gli “*a*” e i “*b*” non possono apparire nelle ipotesi: in questa si può avere tutto quello che si vuole, purché le conseguenze possano essere confrontate con l'esperienza. Questo punto non è sempre sufficientemente compreso. Spesso ci si lamenta dell'ingiustificata estensione dei concetti di particelle, e traiettorie ecc. al regno atomico: non è affatto così, e non c'è nulla di ingiustificato nell'estensione. Al contrario, dobbiamo estendere le nostre idee, e lo facciamo sempre, il più lontano possibile oltre quello che sappiamo già, cioè, al di là di quelle idee che abbiamo già ottenuto. È pericoloso? Sì. È incerto? Sì. Ma è l'unico modo per progredire. Anche se è incerto è necessario per rendere utile la scienza, la quale serve solo se parla di qualche esperimento che non è stato fatto, mentre non vale nulla se dice solo quello che è accaduto. È necessario estendere le idee al di là di dove sono state sperimentate. Per esempio, la legge della gravitazione, che fu sviluppata per capire il moto dei pianeti, non sarebbe stata affatto utile se Newton avesse semplicemente detto: “Adesso ho capito i pianeti,” e non si fosse sentito in grado di confrontarla con l'attrazione della terra sulla luna, e se quelli che sono venuti dopo di lui non avessero detto: “Forse quello che tiene insieme le galassie è proprio la gravitazione.” Dobbiamo provare anche quello. Voi potreste dire: “Quando arrivate alle dimensioni delle galassie, dal momento che non ne sapete nulla, potrebbe succedere qualsiasi cosa.” Lo so, ma non c'è scienza se si accettano simili limitazioni. Non c'è una conoscenza completa delle galassie. D'altra parte, se si suppone che l'intero comportamento è dovuto solo alle leggi conosciute, questa ipotesi è molto limitata e ben definita e facilmente confutabile con l'esperienza. Quello che noi cerchiamo sono proprio ipotesi del genere, ben definite e facili da confrontare con l'esperimento. Il fatto è che il modo in cui si comportano le galassie, finora non sembra essere contrario a questa proposizione.

Posso dare un altro esempio, ancora più interessante e importante. Probabilmente l'ipotesi singola che maggiormente contribuisce al progresso della biologia è quella secondo la quale tutto quello che fanno gli animali lo possono fare anche gli atomi, cioè che tutte le cose che si vedono nel mondo biologico sono il risultato del comportamento

di fenomeni fisici e chimici, senza niente in più. Potreste sempre dire che quando si arriva agli esseri viventi può accadere qualsiasi cosa, ma se si accetta questa affermazione non si capiranno mai gli esseri viventi. È molto difficile credere che l'agitarsi di un tentacolo di un polipo non sia altro che un movimento di atomi secondo le leggi fisiche conosciute. Quando però si va a investigare il tentacolo, con questa ipotesi si possono fare delle predizioni piuttosto accurate su come funziona, e in questo modo la nostra comprensione compie grandi progressi. Finora il tentacolo non è stato tagliato, cioè non si è scoperto che questa idea sia sbagliata.

Non è vero che sia poco scientifico fare delle ipotesi, anche se molti non scienziati la pensano a questo modo. Alcuni anni fa ebbi una conversazione con un profano sui dischi volanti, perché siccome sono uno scienziato, dovrei sapere tutto su di essi! Dissi: "Non credo che esistano i dischi volanti," ed egli ribatté: "È impossibile che esistano? Lo si può provare?" "No — gli risposi — non posso dimostrare che è impossibile, ma è molto improbabile." Al che lui mi disse: "Non sei affatto scientifico. Se non puoi dimostrare che è impossibile, come fai a dire che è molto improbabile?" Al contrario, è proprio in questo modo che *è* scientifico: è scientifico dire solo quello che è più probabile e quello che lo è meno, e non il dimostrare sempre quello che è possibile e quello che è impossibile. Per chiarire quello che intendo, avrei potuto dirgli: "Ascoltami, voglio dire che dalla conoscenza del mondo che mi vedo intorno, credo che sia molto più probabile che le notizie sui dischi volanti siano il risultato delle note caratteristiche irrazionali dell'intelligenza terrestre che non di sforzi razionali di qualche sconosciuta intelligenza extraterrestre." È semplicemente più probabile, e nient'altro. È una supposizione buona, e noi cerchiamo sempre di proporre la spiegazione più probabile, tenendo però presente il fatto che se non funziona si possono discutere le altre possibilità.

Come possiamo decidere quello che dobbiamo tenere e quello che dobbiamo invece abbandonare? Abbiamo tutti questi bei princìpi e i fatti conosciuti, ma abbiamo dei guai: o otteniamo degli infiniti, oppure non otteniamo una descrizione abbastanza accurata, il che vuol dire che ci mancano delle parti. Certe volte ciò significa che dobbiamo abbandonare qualche preconcetto particolarmente radicato, o almeno così si è sempre verificato in passato. Il problema è quali idee bisogna tenere e quali bisogna lasciare. Se si rigetta tutto, si esagera, e non rimane molto con cui lavorare. Dopo tutto la conservazione dell'energia, per esempio, sembra funzionare ed è bella, e non voglio quindi gettarla via. Per sapere che cosa bisogna tenere e che cosa invece si deve lasciare ci vuole una notevole abilità. In effetti è probabilmente solo questione di fortuna, ma sembra però che la cosa richieda anche una considerevole abilità.

Le ampiezze di probabilità sono molto strane, e la prima cosa a cui si pensa è che queste nuove bizzarre idee siano chiaramente storte. Eppure tutto quello che si può dedurre dall'esistenza di ampiezze di probabilità quantistiche, per quanto strane esse siano, funziona al cento per cento attraverso tutta la lunga lista di particelle strane. Perciò non credo che quando troveremo i veri fondamenti della composizione del mondo scopriremo che queste idee sono sbagliate. Io penso che questa parte sia giusta, ma sto solo facendo una supposizione, cioè vi dico quello che credo io.

D'altra parte, credo che la teoria secondo la quale lo spazio è continuo sia errata,

perché otteniamo questi infiniti e altre difficoltà, e ci rimangono dei problemi aperti su quello che determina le dimensioni di tutte le particelle. Ho il sospetto che le semplici idee della geometria, estese allo spazio infinitamente piccolo siano errate. Qui naturalmente sto solo eliminando un'idea, senza però dire che cosa si debba sostituirvi. Se lo dicessi finirei la lezione con una nuova legge.

Alcuni hanno usato l'incoerenza interna dei princìpi per sostenere che esiste solo un possibile mondo coerente, e che mettendo insieme tutti i princìpi e calcolando con grande precisione, si potrà non solo derivarne i princìpi stessi, ma anche scoprire che questi sono gli unici possibili per assicurare la coerenza del sistema. Questo mi sembra un programma troppo ambizioso, un po' come cercare di agitare un cane dalla coda. Credo che bisogna ammettere che certe cose esistono, non certo tutte quelle cinquanta e più particelle, ma almeno alcune cose più elementari come gli elettroni ecc.; da questi, per mezzo dei princìpi generali, si potrà probabilmente derivare come conseguenza unica tutte le complessità della natura. Non credo invece che si possa ottenere tutto da discussioni sulle coerenze.

Un altro dei problemi che si pongono è il significato delle simmetrie parziali. Queste simmetrie, come l'affermazione che i neutroni e i protoni sono quasi la stessa cosa eccetto che per l'elettricità, o come il fatto che la legge della simmetria per riflessione è esatta fuorché in una reazione, sono piuttosto importune. Tutto è quasi simmetrico, ma non lo è completamente. Su questo problema esistono duo scuole di pensiero diverse: secondo l'una la natura è realmente semplice e simmetrica, ma c'è una piccola complicazione che la fa diventare un po' storta. Secondo l'altra scuola, invece, che ha solo un rappresentante, io stesso, la cosa può essere complicata e diventa semplice solo in virtù della complicazione. I greci credevano che le orbite dei pianeti fossero dei cerchi, mentre invece sono ellissi, cioè non sono proprio simmetriche, sebbene siano molto vicine a cerchi. Ci possiamo domandare: perché sono così vicine a cerchi? Perché sono quasi simmetriche? A causa di un complicato effetto di attrito delle maree che è un'idea molto complicata. È possibile che la natura in fondo sia completamente asimmetrica in queste cose, ma che nelle complessità della realtà appaia approssimativamente simmetrica, come nel caso delle ellissi che sembrano quasi cerchi. Questa è un'altra possibilità, ma nessuno conosce la verità e possiamo fare solo supposizioni.

Supponiamo di avere due teorie, A e B, che dal punto di vista psicologico sembrano completamente diverse, con idee diverse e così via, ma tali che tutte le conseguenze dedotte da esse siano esattamente uguali, e ambedue concordino con l'esperimento. Le due teorie, anche se all'inizio sembrano diverse, hanno tutte le conseguenze uguali, il che è facile da dimostrare matematicamente, facendo vedere che logicamente da A e da B si arriva sempre a conseguenze corrispondenti. Supponiamo dunque di avere queste due teorie. Come facciamo a decidere quale delle due è quella giusta? Non vi è nessun modo scientifico, perché concordano ambedue allo stesso grado con l'esperimento. Così due teorie, anche se hanno dietro di loro due idee completamente diverse, possono essere matematicamente identiche, e non c'è nessun modo scientifico per distinguerle.

Tuttavia, dal punto di vista psicologico, le due teorie possono non essere affatto equivalenti quando si vogliano trovare nuove teorie, perché una può suggerire idee

diverse dall'altra. Mettendo la teoria in una certa cornice ci si può fare un'idea di che cosa vada modificato. Ci sarà per esempio un punto nella teoria “A” che parla di una data cosa, e allora verrà in mente di dire: “Voglio cambiare quest'idea qui.” Ma trovare la cosa corrispondente da modificare in “B” può essere molto complicato, perché quello che va cambiato può non essere affatto un'idea semplice. In altre parole, sebbene le due teorie siano identiche prima di essere cambiate, ci sono certi modi di modificarle che appariranno naturali in una ma non nell'altra. Perciò, psicologicamente, dobbiamo tenere in mente tutte le teorie, e qualunque fisico teorico, che valga qualche cosa, conosce sei o sette rappresentazioni teoriche diverse che conducono esattamente alla stessa fisica. Sa benissimo che sono tutte equivalenti e che nessuno potrà mai decidere, a quel livello, qual è giusta, ma le tiene tutte in mente, sperando che gli suggeriscano idee diverse per altre ipotesi.

Questo mi fa venire in mente un altro punto, cioè che la filosofia, ossia le idee che stanno alla base di una teoria, possono cambiare enormemente quando in essa si introducono dei cambiamenti piccolissimi. Per esempio, le idee di Newton sul tempo e lo spazio concordavano perfettamente con l'esperienza, ma per ottenere il moto corretto dell'orbita di Mercurio, che implicava una correzione piccolissima, occorreva cambiare profondamente il carattere della teoria. Il motivo è che le leggi di Newton erano così semplici e perfette che conducevano a risultati completamente definiti, e per ottenere un risultato leggermente diverso si richiedeva qualche cosa di completamente differente. Nell'enunciare una nuova legge non si possono produrre imperfezioni da una cosa perfetta, ma bisogna avere un'altra cosa perfetta. Così le differenze tra le idee filosofiche delle teorie della gravitazione di Einstein e di Newton sono enormi.

Che cosa sono queste idee filosofiche? Esse sono in realtà un modo complicato per calcolare rapidamente le conseguenze. Un'idea filosofica, che talvolta si chiama un modo di comprendere la legge, è in fondo solo un metodo per ricordare le leggi per trarne rapidamente le conseguenze. Alcuni hanno detto (e questo è vero per casi come quello dell'equazione di Maxwell): “Lasciamo stare la filosofia e tutte le cose di questo tipo, cerchiamo solo di indovinare le equazioni giuste. Il problema è solo quello di calcolare i risultati in modo che si accordino con l'esperimento, e non c'è bisogno di avere una particolare filosofia, né di fare lunghe discussioni sull'equazione.” Questo ha il vantaggio che se si cerca solo di indovinare l'equazione, non ci si forma dei pregiudizi, e si potranno indovinare meglio le leggi giuste. D'altra parte, può darsi che la filosofia possa rendere più facile il processo di indovinare. È molto difficile decidere quale dei due metodi sia il migliore.

Per quelli che insistono che la sola cosa importante è che la teoria sia in accordo con l'esperimento, vorrei immaginare una discussione tra un astronomo maya e un suo studente. I maya riuscivano a predire con grande precisione le eclissi, la posizione della luna e di Venere ecc. Tutto questo era fatto aritmeticamente, contando un certo numero, sottraendone un altro e così via, ma senza discutere in nessun modo che cosa fosse la luna, e neppure utilizzando l'idea che essa si muovesse. Essi calcolavano semplicemente il tempo in cui ci sarebbe stata un'eclissi, quello in cui la luna sarebbe stata piena, e così via. Supponiamo che un giovane fosse andato dall'astronomo e gli avesse detto: “Io ho

un'idea: forse quelle cose sono come delle palle di pietra che si muovono intorno alla terra, e se ne può calcolare il movimento in un modo completamente diverso che non semplicemente calcolando il tempo in cui appaiono in cielo." "Sì — dice l'astronomo — e con che accuratezza si possono predire le eclissi?" E lo studente risponde: "Non ho ancora sviluppato a fondo questa teoria." "Ebbene — ribatte l'astronomo — noi possiamo calcolare le eclissi molto più accuratamente di quello che puoi fare tu con il tuo modello, e perciò lascia da parte la tua idea perché il metodo matematico è ovviamente molto migliore." C'è una tendenza molto forte, quando qualcuno viene fuori con un'idea e dice: "Supponiamo che il mondo sia fatto in questo modo", a rispondergli: "Che risultato otterresti per questo dato problema?" Al che lui dice: "Non ho ancora sviluppato abbastanza questo punto", e gli altri gli rispondono: "Noi l'abbiamo già sviluppato molto più a fondo, e possiamo ottenere dei risultati assai accurati." Esiste dunque il problema se ci si debba o no preoccupare della filosofia che sta dietro le idee.

Un altro modo per procedere è naturalmente quello di indovinare dei princìpi nuovi. Einstein, nella sua teoria della gravitazione, suppose che, oltre a tutti gli altri princìpi, valesse anche quello che afferma che le forze sono sempre proporzionali alle masse. Secondo questo principio, non è possibile distinguere, in un'automobile che accelera, l'effetto dell'accelerazione da quello di un campo gravitazionale. Aggiungendo questo agli altri princìpi, egli riuscì a dedurre le leggi corrette della gravitazione.

Quello che ho detto mostra schematicamente un certo numero di possibili modi di formulare delle ipotesi. Vorrei adesso passare ad alcuni altri punti che riguardano il risultato finale. Prima di tutto, che cosa si può fare quando abbiamo finito, e abbiamo una teoria matematica con la quale possiamo calcolare le conseguenze? È una cosa veramente sorprendente: per indovinare quello che farà un atomo in una determinata situazione noi stabiliamo delle regole con dei segni sulla carta, le portiamo a una macchina che ha degli interruttori che si aprono e chiudono in qualche modo complicato, e il risultato ci dice quello che farà l'atomo! Se il modo in cui gli interruttori si aprono e si chiudono fosse una specie di modello dell'atomo, se cioè credessimo che l'atomo ha degli interruttori, potrei dire che comprendo più o meno quello che succede. Trovo però veramente sorprendente il fatto che sia possibile predire quello che accadrà, attraverso la matematica che segue delle regole che in realtà non hanno nulla a che fare con la cosa originale. L'aprirsi e il chiudersi degli interruttori è veramente assai diverso da quello che accade in natura.

Una delle cose più importanti in questo processo di "fare un'ipotesi, calcolare le conseguenze, confrontare con l'esperienza", è di sapere quando si è arrivati al risultato giusto. In effetti si può sapere molto prima di avere controllato tutte le conseguenze, perché la verità si può riconoscere dalla sua bellezza e semplicità. È sempre facile, quando si è fatta un'ipotesi e si sono fatti un paio di brevi calcoli, essere sicuri di non avere sbagliato in maniera ovvia, cioè capire che si ha il risultato giusto. Quando lo si ha, è ovvio che è quello giusto, almeno se si ha un po' di esperienza, perché di solito succede che si ottengono più risultati di quanta informazione si sia messa nelle ipotesi. L'ipotesi, dunque, è che qualche cosa è molto semplice, e se non si può vedere subito che è errata, e se è più semplice della teoria precedente allora vuol dire che è giusta. Gli inesperti, i pazzi e gente del genere fanno delle supposizioni semplici, ma si vede subito che sono errate, e

quindi non contano. Altri, gli studenti inesperti per esempio, fanno delle ipotesi molto complicate, e sembra quasi che tutto vada bene, ma io capisco che non è vero, perché la verità risulta sempre essere più semplice di quello che si crede. Abbiamo solo bisogno di immaginazione, ma questa è una terribile camicia di forza. Dobbiamo trovare una nuova visione del mondo che deve concordare con tutto quello che si conosce, ma deve in qualche punto scostarsi dalle predizioni consuete, altrimenti non è interessante. E in questo disaccordo deve concordare con la natura. Se si scopre una visione del mondo che è in accordo con tutto quello che è già stato osservato, ma che è in disaccordo, in qualche altra parte, con la concezione precedente, si è fatta una grande scoperta. È quasi, ma non del tutto, impossibile trovare una teoria che sia in accordo con l'intera serie di esperimenti su cui tutte le altre teorie sono state controllate, e che tuttavia dia conseguenze diverse in qualche altro campo, anche se si tratta di una teoria le cui conseguenze diverse risultano in disaccordo con la natura. È molto difficile scoprire una nuova idea, e per questo ci vuole un'immaginazione fantastica.

Quale sarà il futuro di quest'avventura? Che cosa accadrà alla fine? Noi procediamo scoprendo nuove leggi, ma quante ne dobbiamo ancora scoprire? Non lo so. Alcuni dei miei colleghi pensano che questo aspetto fondamentale della nostra scienza andrà avanti per sempre; io invece non credo che possano continuare a esserci, diciamo per mille anni, delle novità perpetue. Il processo non può durare all'infinito con la scoperta di leggi nuove e se fosse così, diventerebbe noioso il trovare sempre nuovi livelli uno al di sotto dell'altro. A me sembra che quello che può accadere in futuro sia l'una di queste due cose: o tutte le leggi un giorno saranno conosciute, cioè avremo sufficienti leggi per poter calcolare tutte le conseguenze, trovandole sempre in accordo con l'esperienza, il che rappresenterebbe la fine della ricerca; oppure potrà accadere che gli esperimenti diventeranno sempre più difficili, sempre più costosi, di modo che si otterrà il 99,9 per cento dei fenomeni, ma ce ne sarà sempre qualcuno appena scoperto, molto difficile da misurare, in disaccordo con le leggi; e appena se ne sarà trovata la spiegazione, ne verrà fuori un altro, e il procedimento diventerà sempre più lento e sempre meno interessante. Anche questo è un modo di finire, e, secondo me, o in questa maniera o in un'altra deve proprio finire.

Possiamo considerarci molto fortunati di vivere nell'età in cui si stanno ancora facendo scoperte. È un po' come la scoperta dell'America, che si scopre una volta sola. L'epoca in cui viviamo è quella in cui stiamo scoprendo le leggi fondamentali della natura, e questa non ritornerà mai più. È molto emozionante, è meraviglioso, ma l'emozione è destinata a passare. Naturalmente in futuro ci saranno altri interessi. Ci sarà l'interesse di studiare la connessione di un livello di fenomeni all'altro, per esempio dei fenomeni biologici e così via, o se si parla dell'esplorazione, ci sarà l'esplorazione dei pianeti, ma non ci saranno più le cose che stiamo facendo adesso.

Anche un'altra cosa accadrà alla fine: se tutto sarà conosciuto o diventerà molto monotono, la vigorosa attività di ricerca e l'interesse per le cose di cui ho parlato, gradualmente sparirà. I filosofi che se ne stanno sempre lì pronti a fare osservazioni stupide, si faranno sotto perché non potremo più scacciarli dicendo loro: “Se le vostre teorie fossero giuste, potreste indovinare tutte le altre leggi;” infatti quando tutte le leggi

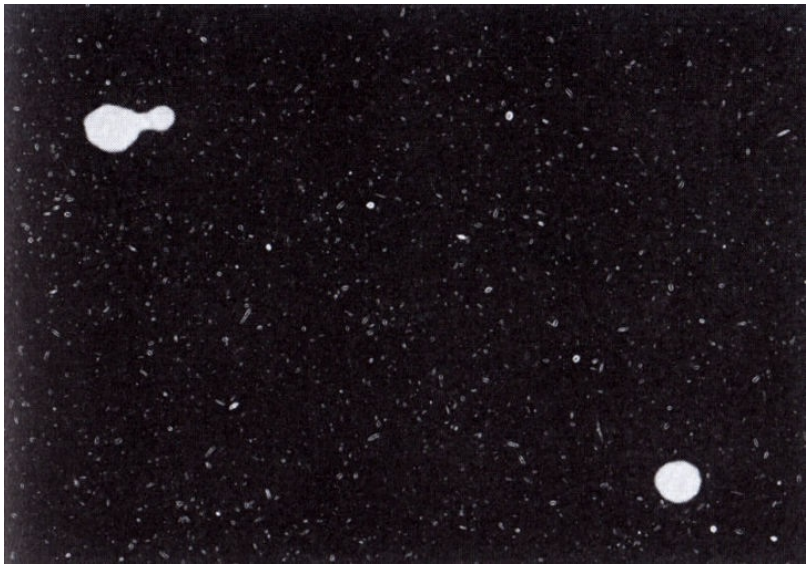
saranno conosciute, essi avranno trovato una spiegazione. Per esempio ci sono sempre state delle spiegazioni del perché il mondo ha tre dimensioni. Be', siccome c'è un mondo solo, è molto difficile dire se quella spiegazione è giusta o no, e così, se tutto fosse conosciuto, si troverebbe qualche spiegazione della validità di quelle leggi. Ma essa sarebbe su un piano che non potremo criticare dicendo che quel tipo di ragionamento non ci permette di andare più avanti. Ci sarà una degenerazione di idee, la stessa degenerazione la cui esistenza è avvertita dai grandi esploratori quando essi si accorgono che i turisti cominciano a invadere un territorio.

In questa epoca gli uomini stanno provando l'esperienza emozionante che si ha quando si cerca di indovinare il modo in cui la natura si comporterà in una nuova situazione mai vista prima. Da esperimenti e informazioni in un certo campo si può indovinare quello che accadrà in una regione che nessuno ha ancora esplorato. È un po' diverso dalla esplorazione normale per il fatto che sulla terra esplorata ci sono già abbastanza indizi per indovinare come sarà quella non ancora scoperta. Queste ipotesi, invece, sono spesso molto diverse da quello che si è già visto, e richiedono un grande sforzo di pensiero.

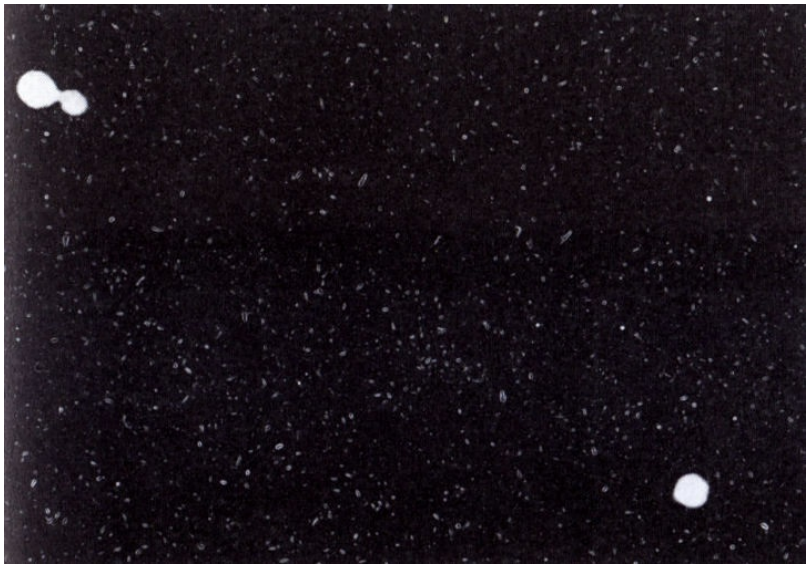
Che cosa c'è nella natura che permette che questo accada, rendendo possibile indovinare, conoscendo una parte, come si comporterà il resto? Questa è una domanda non scientifica, cui non so come rispondere, e perciò darò una risposta non scientifica: io credo che è perché la natura ha in sé una grande semplicità e perciò una grande bellezza.

Tavole

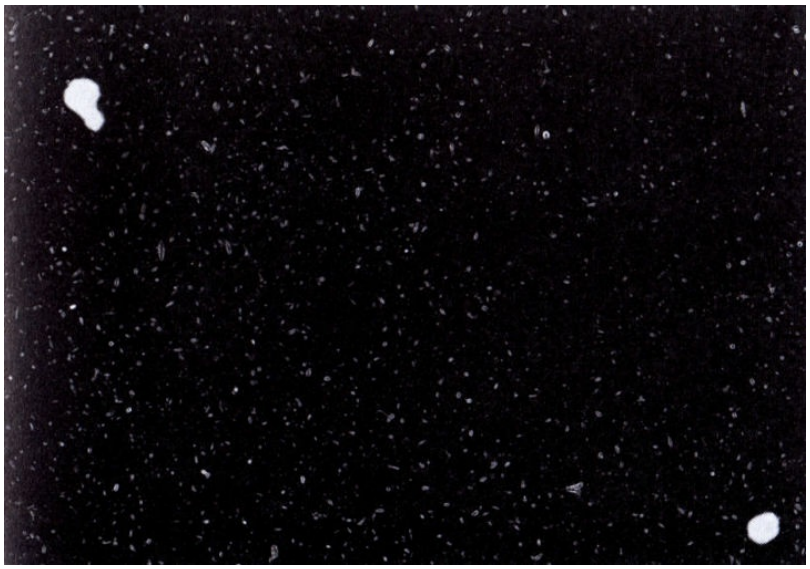
Tavola 1. Tre fotografie dello stesso sistema solare, una stella doppia, scattate in date diverse.



21 luglio 1908



settembre 1915

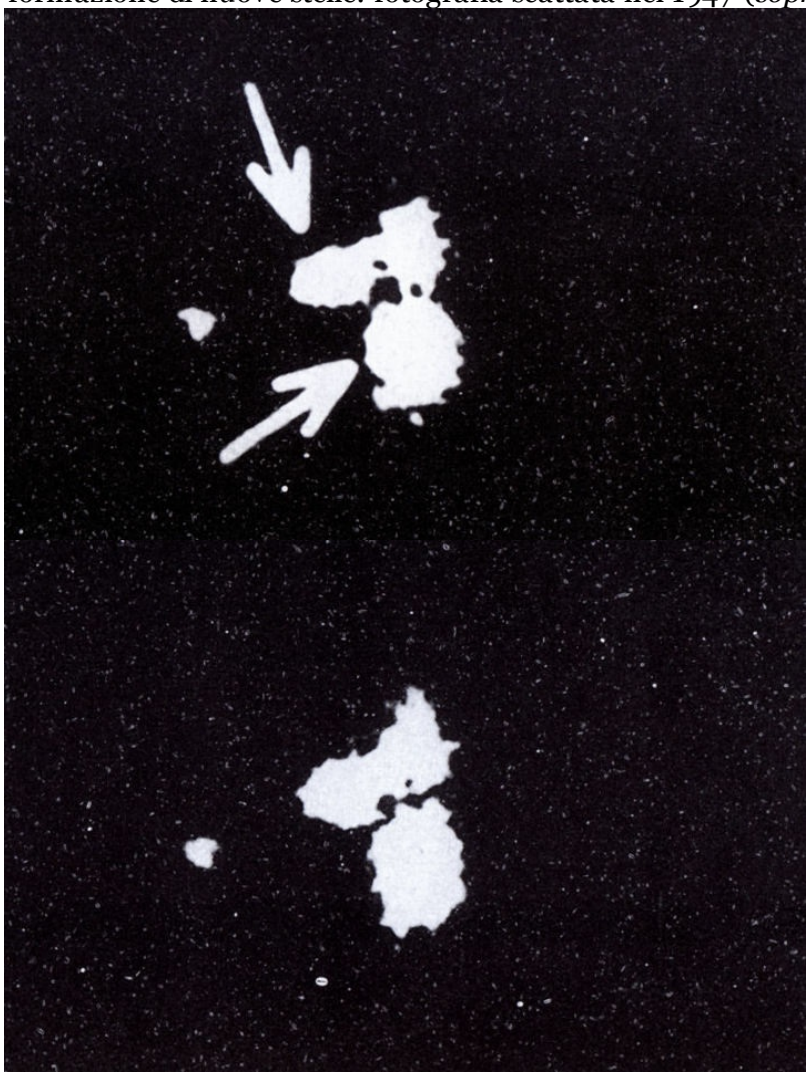


10 luglio 1920

Tavola 2. Un ammasso globulare (*sopra*), una galassia a spirale (*sotto*).

Tavola 3. Un ammasso di galassie (*sopra*), una nebulosa (*sotto*).

Tavola 4. Testimonianza della formazione di nuove stelle: fotografia scattata nel 1947 (*sopra*), nel 1954 (*sotto*).



In questo ciclo di conferenze, il premio Nobel Richard Feynman, parlando a braccio sulla scorta di poche note, racconta a studenti di varia provenienza, con scarse conoscenze matematiche, in che cosa consiste il lavoro del fisico teorico. Il suo intento non è però di divulgare i contenuti della fisica (che, tanto, senza equazioni nessuno «potrà mai far capire la natura a quelli dell'altra cultura») ma di mostrare il modo in cui essa procede e di rendere in qualche misura consapevoli anche i profani del valore intellettuale dell'impresa. E lo fa col suo stile immediato e antiretorico, senza vaghe affermazioni qualitative, sulla base di esempi concreti tratti dalla fisica di ieri e di oggi, analizzati quanto basta per mettere in luce l'essenza del metodo. Al lettore più esperto non sfuggiranno le osservazioni sottili, le intuizioni profonde di cui questo libretto, come ogni scritto di Feynman, è ricco: dalla dimostrazione einsteiniana della località delle leggi di conservazione all'analisi del significato della termodinamica, alle considerazioni finali sul futuro della fisica.

Richard Feynman (1918-1988) è noto soprattutto per i suoi fondamentali contributi alla elettrodinamica quantistica - che gli valsero il premio Einstein nel 1954 e nel 1965 il Nobel per la fisica - e per importanti lavori sulle basse temperature e sul decadimento beta. Tra le sue opere tradotte in italiano: *La fisica di Feynman* (1965); *QED. La strana storia della luce e della materia* (1989); *Il senso delle cose* (1999); *Sei pezzi facili* (2000); *Il piacere di scoprire* (2002).

)

[Dale R. Coulson, presentando Feynman al pubblico in occasione di queste conferenze, aveva detto: “Nella Prefazione del volume del suo corso di fisica, c'è una foto di Feynman che suona allegramente il tamburo *bongo*. I miei conoscenti dell'Istituto di Tecnologia della California mi hanno riferito che qualche volta fa un salto nei locali notturni di Los Angeles e prende il posto del batterista, ma il professor Feynman mi assicura che non è vero.”] □

:)

Tycho Brahe (1546-1601), astronomo danese. □

3)

Johann Kepler (1571-1630), astronomo e matematico tedesco, assistente di Brahe. □

.)

Olaus Roemer (1644-1710), astronomo danese. □

:)

John Couch Adams (1819-92), astronomo matematico; Urbain Leverrier (1811-77), astronomo francese. □

)

Henry Cavendish (1731-1810), fisico e chimico inglese. □

)

Roland von Eötvös (1848-1919), fisico ungherese. □

5)

Robert Henry Dicke, fisico americano. □

)

Paul Dirac, fisico inglese, premio Nobel nel 1933 con Erwin Schrödinger, fisico austriaco. □

o)

Michael Faraday (1791-1867), fisico inglese. □

1)

Niels Bohr, fisico danese. □

2)

Hermann Weyl (1885-1955), matematico tedesco. □

3)

James Clerk Maxwell (1831-79), primo professore di fisica sperimentale a Cambridge.□

4) Jules-Henri Poincaré (1854-1912), scienziato francese. □

5)

Jean Bernard Leon Foucault (1819-68), fisico francese. □

6)

Louis Pasteur (1822-95), batteriologo francese. □

7)

Philip Morrison, professore di fisica americano. □

8)

[Alla data in cui furono tenute queste lezioni, cioè nel 1964.] □

9) Tsung Dao Lee e Chen Ning Yang, fisici cinesi, premio Nobel 1957.

□

:o)

Fred Hoyle, astronomo inglese, Cambridge; Edwin Salpeter, fisico americano, Cornell University. □

:1)

Werner Heisenberg, fisico tedesco, premio Nobel per la fisica nel 1932. □

2)

Dmitrij Ivanovič Mendeleev (1834-1907), chimico russo. □

3)

Maria Mayer, scienziata americana, premio Nobel 1963, professoressa di fisica alla University of California dal 1960; Hans Daniel Jensen, fisico tedesco, premio Nobel 1963, direttore dell'Istituto di fisica teorica a Heidelberg dal 1949. □

:4)

Hideki Yukawa, fisico giapponese, direttore del Research Institute for Fundamental Physics a Kioto. Premio Nobel nel 1949. □

Indice

Prefazione di L. A. Radicati

La legge fisica

Capitolo 1. La legge della gravitazione, esempio di legge fisica

Capitolo 2. La relazione tra matematica e fisica

Capitolo 3. I grandi princìpi di conservazione

Capitolo 4. La simmetria nella legge fisica

Capitolo 5. La distinzione tra passato e futuro

Capitolo 6. Probabilità e indeterminazione: la natura dal punto di vista della meccanica quantistica

Capitolo 7. Alla ricerca di nuove leggi

Tavole