

**CIRCOLO DI PSICOBIOFISICA
AMICI DI MARCO TODESCHINI**

presenta:

FRANK WILCZEK

Premio Nobel



**Una nuova concezione dell'etere cosmico:
ETERE (Maxwell) = SPAZIO-TEMPO (Einstein) = GRIGLIA (Wilczek)**

a cura di
Fiorenzo Zampieri
Circolo di Psicobiofisica

PREMESSA

Nel panorama scientifico odierno, anche ad altissimo livello, sembra vi siano scienziati che, senza troppo “rumore” stiano adottando nelle loro Teorie, concetti e speculazioni che, pur apparendo nuovi ed originali, si rifanno a concezioni scientifiche ritenute sorpassate che, poste invece sotto una luce “moderna”, trovano nuova vita.

Uno di questi, e non certo il meno importante, è Frank Wilczek, Premio Nobel statunitense.

Egli, infatti, nei suoi studi ripropone, in modo chiaro e senza patemi, il “vecchio” etere cosmico, dandogli una nuova veste ed un nuovo nome: GRIGLIA Spaziale.

Certo si tratta di una concezione dello spazio nuova e diversa da quella dell’etere “classico”, ma, ritenere lo Spazio “pieno” anziché “vuoto”, è davvero un fatto, oggi, non trascurabile!

Per i nostri lettori, proponiamo dal suo magnifico libro « *La leggerezza dell'essere. La massa, l'etere e l'unificazione delle forze* », il capitolo ottavo dal titolo: La Griglia (persistenza dell’etere), con il quale è possibile farsi un’idea piuttosto esauriente di questa nuova rappresentazione dello Spazio.

Ovviamente invitiamo tutti alla completa lettura del volume, per una comprensione più approfondita dell’intera questione.

Al solo scopo di dare una piccolissima immagine di come può essere rappresentato lo Spazio secondo Wilczek, proponiamo questo significativo paragrafo:

Ciò che i nostri sensi percepiscono come spazio vuoto è in verità un ambiente fluttuante di particelle virtuali, che risplendono e muoiono su scale estremamente piccole di spazio e di tempo, un po' come una sorta di nebbia che permea l'intera dimensione spaziale e detta le proprietà delle particelle elementari. Con una metafora di questa nuova visione della realtà, si può immaginare un pesce intelligente all'interno di un mondo circondato di acqua. Una simile creatura percepirebbe l'acqua circostante come uno spazio vuoto, o come il vuoto stesso. “L’idea che voglio trasmettere è semplice: noi siamo come questi pesci”, ha detto il fisico. Quello che i nostri sensi decifrano come spazio vuoto è in realtà una sostanza, è materia. Proprio come il mondo fatto di acqua del pesce intelligente può cambiare il suo stato da ghiaccio a vapore, anche il vuoto è capace di transizioni analoghe.

Per gli Amici di Marco Todeschini, l’associazione di questa concezione spaziale a quella fluidodinamica del “Nostro” è immediata! Siamo perciò convinti, che questa nuova visione dello Spazio, per molti aspetti rivoluzionaria, sia finalmente giunta in vista della sua definitiva consacrazione.

BIOGRAFIA

Frank Wilczek ,

nato a New York il 15 maggio 1951, da padre polacco e madre italiana (la famiglia della madre è originaria di Sant'Angelo dei Lombardi), è un fisico statunitense.

Laureato in matematica nel 1970 all'Università di Chicago, nel 1972 ha ottenuto il Master in matematica e nel 1974 il PhD in fisica, entrambi all'Università di Princeton.

Nel 1973, lavorando insieme a David Gross, è giunto alla scoperta della libertà asintotica, importante avanzamento per una più approfondita comprensione della cromodinamica quantistica (QCD), che ha permesso di completare il quadro del Modello standard, la teoria di riferimento delle interazioni fondamentali. Per tali studi ha ricevuto, unitamente a Gross e Hugh David Politzer, il premio Nobel per la fisica nel 2004.

Ricopre la cattedra di Herman Feshbach Professor of Physics al Massachusetts Institute of Technology

Bibliografia

- Frank Wilczek, Una bellissima domanda. Scoprire il disegno profondo della natura, 2016, Giulio - Einaudi Editore
- Frank Wilczek, La musica del vuoto, 2007, Di Renzo Editore
- Frank Wilczek, La leggerezza dell'essere. La massa, l'etere e l'unificazione delle forze, 2009 Mondadori

(tratto da Wikipedia – l'enciclopedia libera)

Capitolo ottavo

La Griglia (persistenza dell'etere)

Che cos'è lo spazio? Un palcoscenico vuoto, dove il mondo fisico della materia rappresenta il suo dramma? Un partecipante dello stesso livello, che fornisce lo sfondo e ha altresì una vita tutta sua? O è la realtà primaria, di cui la materia è una manifestazione secondaria? I punti di vista su tale questione si sono evoluti, e molte volte sono cambiati radicalmente, nella storia della scienza. Oggi è il terzo a trionfare. Là dove i nostri occhi non vedono nulla, il nostro cervello, considerando le rivelazioni di esperimenti messi a punto con grande precisione, scopre la Griglia che alimenta la realtà fisica.

Le idee filosofiche e scientifiche sugli elementi che compongono il mondo continuano a cambiare. Nei migliori modelli del mondo dei nostri giorni rimangono molte questioni insolute e alcuni grossi misteri. È chiaro che l'ultima parola non è ancora stata detta. Ma è anche vero che ne sappiamo molto – abbastanza da trarre alcune conclusioni sorprendenti che vanno al di là dei fatti frammentari. I problemi che queste conclusioni affrontano, e a cui offrono qualche soluzione, tradizionalmente sono stati giudicati di pertinenza della filosofia e persino della teologia.

Per la filosofia naturale, la lezione più importante che si ricava dalla QCD è che ciò che percepiamo come spazio vuoto in realtà è un mezzo potente la cui attività modella il mondo. Altri sviluppi della fisica moderna rafforzano e arricchiscono questa lezione. Più avanti, quando esploreremo le attuali frontiere del sapere, vedremo come il concetto di spazio «vuoto» come mezzo ricco e dinamico dia pieni poteri alle nostre migliori riflessioni su come raggiungere l'unificazione delle forze.

Allora, di che cos'è fatto il mondo? Suscettibile di aggiunte e di correzioni, come sempre, ecco la sfaccettata risposta fornita dalla fisica moderna:

- L'ingrediente primario della realtà fisica, da cui si forma ogni altra cosa, riempie lo spazio e il tempo.
- Ogni frammento, ogni elemento dello spaziotempo, ha le stesse proprietà fondamentali di ogni altro frammento.
- L'ingrediente primario della realtà brulica di attività quantistica. L'attività quantistica ha caratteristiche speciali. È spontanea e imprevedibile. Per osservarla, inoltre, è necessario perturbarla.
- L'ingrediente primario della realtà contiene anche componenti materiali durevoli. Ciò fa dell'universo un superconduttore multicolore multistrato.
- L'ingrediente primario della realtà contiene un campo metrico che dà rigidità allo spaziotempo e provoca la gravità.
- L'ingrediente primario della realtà ha un peso e la sua densità è universale.

Sono affermazioni che inquadrano aspetti diversi della risposta. Tra i vecchi concetti, l'*etere* è quello più simile, però ha il marchio delle idee morte e sepolte e gliene mancano molte di quelle nuove. Lo *spaziotempo* è logicamente appropriato per descrivere qualcosa che è ineluttabilmente *presente*, ovunque e sempre, con proprietà uniformi dappertutto, ma ha più bagagli ancora, compreso un pesante accenno alla vuotezza. *Campo quantistico* è un'espressione tecnica che riassume i primi tre aspetti, ma non include gli ultimi tre e ha l'aria troppo tecnica e minacciosa per essere usata nella filosofia naturale.

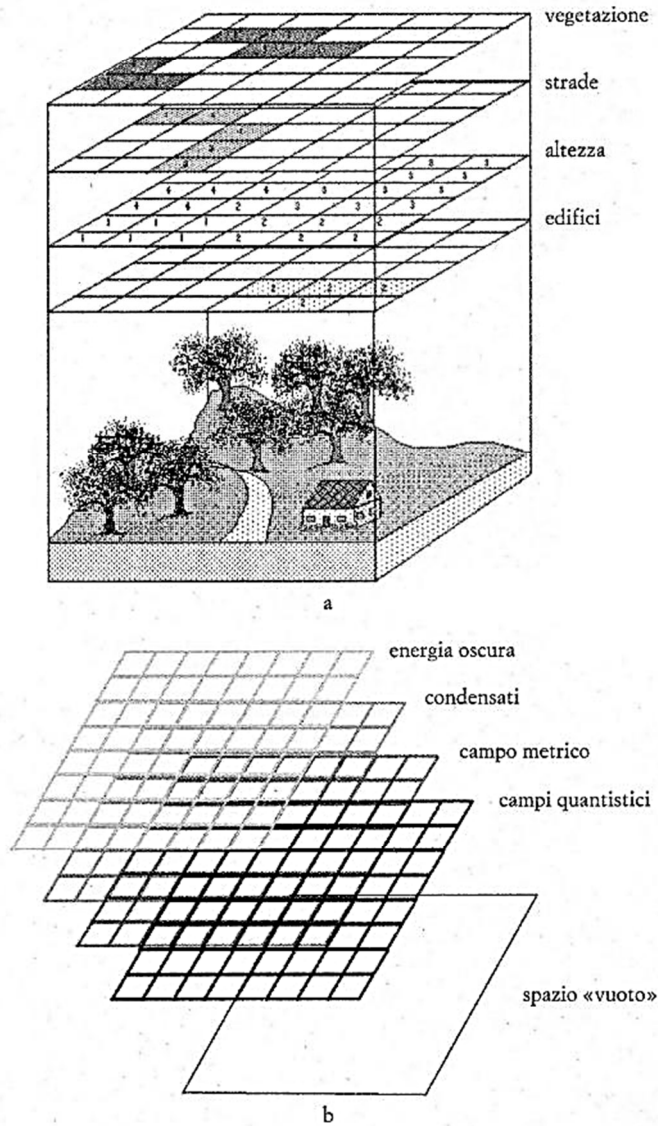
Per indicare l'elemento primario del mondo userò la parola *Griglia* (*Grid*), che presenta diversi vantaggi:

- È pratica comune usare griglie matematiche per localizzare i livelli di una struttura, come nella Figura 10.
- Le apparecchiature, l'illuminazione e i computer sono alimentati dalla rete (*grid*) elettrica. Il mondo fisico dell'apparenza è alimentato, in generale, dalla Griglia (*Grid*).
- Un grande progetto in via di sviluppo, motivato anche dalle esigenze della fisica¹, sta realizzando la tecnologia per integrare molti computer sparsi in unità funzionali, alla cui po-

¹ Come discuteremo più avanti.

Figura 10.

La Griglia, vecchia e nuova. a) Per descrivere la distribuzione di oggetti vari nello spazio si usa spesso una griglia. b) La Griglia, che sta alla base del nostro modello piú accreditato del mondo, ha diversi aspetti. La Griglia, insieme a questi aspetti, è presente sempre e ovunque. La materia ordinaria è una manifestazione secondaria della Griglia, che registra il suo livello di eccitazione.



tenza complessiva si possa accedere quando necessario da qualsiasi punto. Questa tecnologia è una griglia di calcolo, difatti il suo nome è Grid. It's hot and it's cool.

- *Griglia* è una parola corta.
- La *Griglia* non è *Matrix*. Mi dispiace, ma i sequel hanno infangato il candidato. E non è neanche *Star Trek*.

Una breve storia di

Il dibattito sulla vuotezza dello spazio risale alla preistoria della scienza moderna, per lo meno ai filosofi dell'antica Grecia. Secondo Aristotele, «la natura aborrisce il vuoto», mentre gli atomisti suoi avversari ritenevano, come scrisse uno di loro, il poeta Lucrezio, che

Tutta la natura dunque, come è per sé stessa,
consiste di due cose: ci sono infatti i corpi e il vuoto,
in cui quelli son posti e attraverso cui si muovono per diverse vie².

Questo antico dibattito speculativo riecheggiò all'alba della scienza moderna, nella Rivoluzione Scientifica del secolo XVII. René Descartes propose di fondare la descrizione scientifica del mondo naturale sulle qualità che definì primarie: l'estensione (fondamentalmente, la forma) e il movimento. Si supposeva che la materia non avesse altre proprietà oltre a queste. Una conseguenza importante è che l'influenza di un pezzetto di materia su un altro può avvenire soltanto per contatto; non avendo altre proprietà oltre l'estensione e il movimento, un pezzetto di materia non ha altra possibilità di sapere qualcosa di un altro pezzetto se non essendo in contatto con esso. Pertanto, per descrivere (per esempio) il movimento dei pianeti, Descartes dovette introdurre un invisibile «pieno» di materia invisibile che riempie lo spazio, immaginando un mare complesso di gorghi e vortici, su cui navigano i pianeti.

Isaac Newton superò tutte queste potenziali complessità formulando equazioni matematiche corrette e precise per il moto

² Lucrezio, *De rerum natura*, Libro I.

dei pianeti, usando le sue leggi del moto e della gravità. La legge di gravitazione di Newton non è in accordo con la concezione di Descartes: ipotizza un'azione a distanza e non un'influenza per contatto. In base alla legge di Newton, per esempio, il Sole esercita una forza gravitazionale sulla Terra pur non essendo in contatto con la Terra. Nonostante la capacità delle sue equazioni di fornire una spiegazione eccellente e particolareggiata del movimento dei pianeti, Newton non era soddisfatto dell'azione a distanza:

[...] che un corpo possa agire a distanza su di un altro attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualche altra cosa in virtù della quale, e per mezzo della quale, l'azione a distanza o la forza possa essere trasportata da un corpo all'altro, è per me un'assurdità così grande da farmi credere che nessun uomo il quale abbia una reale consapevolezza nelle materie filosofiche possa mai farla propria³.

Ciò malgrado, Newton lasciò che le sue equazioni si commentassero da sole:

Non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni le ragioni delle proprietà della gravità e non invento ipotesi. Qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni va chiamata ipotesi, e nella filosofia sperimentale le ipotesi, siano esse metafisiche o fisiche, occulte o meccaniche, non trovano posto.

I seguaci di Newton, naturalmente, non mancarono di osservare che il suo sistema aveva vuotato lo spazio. Avendo meno scrupoli, divennero più newtoniani di Newton. Ecco Voltaire:

Un francese che capiti a Londra trova che le cose sono molto cambiate nella filosofia, come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo pieno e lo trova vuoto⁴.

I fisici e i matematici, grazie alla propria familiarità con l'argomento e al suo spettacolare successo, si sentirono sempre più a loro agio con l'azione a distanza. La situazione rimase uguale, in sostanza, per più di centocinquanta anni. Poi James Clerk Maxwell, consolidando tutto ciò che si sapeva dell'elettricità e del magnetismo, si rese conto che le equazioni risultanti erano

³ Lettera di Isaac Newton a Mr Bentley, 25 febbraio 1692-93.

⁴ Voltaire, *Lettres philosophiques*, in *Scritti filosofici*, vol. I, Laterza, Bari 1972, pp. 50-51.

incompatibili. Nel 1864, Maxwell scoprì di poter porre rimedio all'incompatibilità introducendo nelle equazioni un ulteriore termine – in altre parole, ipotizzando l'esistenza di un nuovo effetto fisico. Qualche anno prima, Michael Faraday aveva scoperto che i campi magnetici, quando cambiano nel corso del tempo, producono campi elettrici. Per determinare le sue equazioni, Maxwell dovette ipotizzare l'effetto opposto, cioè che campi elettrici variabili producono campi magnetici. Con questa aggiunta, i campi possono iniziare ad avere una vita tutta loro. Campi elettrici variabili producono campi magnetici (variabili), che producono campi elettrici variabili e così via, in un ciclo autorigenerante.

Maxwell scoprì che le sue nuove equazioni – oggi note come equazioni di Maxwell – hanno soluzioni di solo campo che viaggiano nello spazio alla velocità della luce. Portando al punto culminante una sintesi grandiosa, concluse che queste perturbazioni autorigeneranti dei campi elettrici e magnetici *sono* luce, una conclusione che ha retto alla prova del tempo. Per Maxwell, questi campi che riempiono tutto lo spazio e hanno una vita tutta loro erano un simbolo tangibile della gloria di Dio:

Le estese regioni interplanetarie e interstellari non saranno più considerate come territori superflui nell'universo, che il Creatore non aveva ritenuto adatte a essere riempite con i simboli dell'ordine molteplice del Suo regno. Noi le troveremo già piene di questo meraviglioso medium; così piene, che nessun potere umano può rimuoverlo dalla più piccola porzione dello spazio, o produrre la più piccola fessura nella sua infinita continuità³.

La relazione di Einstein con l'etere fu complessa e mutò nel corso del tempo. Si può anche dire, credo, che sia scarsamente compresa, persino dai suoi biografi e dagli storici della scienza (o forse da me). Nel suo primo articolo del 1905 sulla relatività speciale⁴, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*, Einstein scrisse:

L'introduzione di un «etere luminifero» si rivelerà superflua in quanto la concezione che viene qui sviluppata non richiede uno «spazio asso-

³ J. C. Maxwell, «On Action at a Distance» in W. D. Niven (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, Cambridge 1890, p. 322.

⁴ Nel secondo, Einstein derivò la sua seconda legge.

lutamente stazionario» dotato di proprietà speciali né assegna alcun vettore velocità ad un punto dello spazio vuoto dove hanno luogo i processi elettromagnetici⁷.

Questa energica dichiarazione di Einstein mi ha sconcertato per anni, poiché nel 1905 il problema per la fisica non era la mancanza di una teoria della relatività, bensì la presenza di *due teorie della relatività incompatibili*. Da una parte vi era la teoria della relatività della meccanica, a cui obbedivano le equazioni di Newton, e dall'altra la teoria della relatività dell'elettromagnetismo, a cui obbedivano le equazioni di Maxwell.

Nell'una e nell'altra teoria le equazioni presentano una simmetria di boost – in altre parole, le equazioni assumono la stessa forma quando si aggiunge una stessa velocità complessiva a ogni cosa. In termini fisici più precisi, le leggi della fisica (così come sono enunciate nelle equazioni) appaiono identiche a qualsiasi coppia di osservatori che si muovano a velocità costante l'uno rispetto all'altro. Per passare dalla descrizione del mondo di un osservatore a quella dell'altro, tuttavia, è necessario rietichettare le posizioni e i tempi. Un osservatore su un aereo in volo da New York a Chicago, per esempio, un paio d'ore dopo la partenza classifica Chicago come «distanza 0», mentre Chicago continuerebbe a essere «800 chilometri a ovest» (più o meno) per l'osservatore a terra. Il problema era che la nuova etichettatura richiesta dalla relatività meccanica era diversa da quella richiesta dalla relatività elettromagnetica. Secondo la relatività meccanica, occorre rietichettare le posizioni spaziali, ma non i tempi, mentre per la relatività elettromagnetica occorre rietichettare le une e gli altri, in un modo piuttosto complicato che mescola insieme spazio e tempo. Per inciso, nel 1905 le equazioni della relatività elettromagnetica erano già state derivate da Hendrik Lorentz e perfezionate da Henri Poincaré; oggi sono note come trasformazioni di Lorentz. La grande innovazione di Einstein fu affermare il primato della relatività elettromagnetica e comprenderne le conseguenze per il resto della fisica.

⁷ Albert Einstein, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento* («Annalen der Physik», 17, 1905) [trad. it. in Enrico Bellone, *La relatività da Faraday ad Einstein*, Loescher, Torino 1980, pp. 192-93].

Quindi era la venerabile teoria della meccanica newtoniana e non l'ultima arrivata, la teoria dell'elettromagnetismo, ad aver bisogno di modifiche. Fu la teoria fondata su particelle che si muovono nello spazio vuoto a cedere, non la teoria basata su campi continui che riempiono lo spazio. Le equazioni di campo di Maxwell non venivano modificate dalla teoria della relatività speciale; al contrario, ne costituivano il fondamento. Si continuavano ad avere i campi elettrici e magnetici ricoprenti lo spazio e potenzialmente autorigeneranti che mandavano in estasi Maxwell. Di fatto, si può quasi dire che le idee della relatività speciale *richiedano* l'esistenza di campi che riempiono lo spazio e, in quel senso, spiegano perché tali campi esistono, come discuteremo tra poco.

Perché, allora, Einstein affermò così decisamente il contrario? È pur vero che aveva minato le vecchie idee su un etere meccanico, fatto di particelle che seguono le leggi di Newton – di fatto le aveva del tutto minate. Ma la sua nuova teoria, lungi dall'eliminare i campi che riempiono lo spazio, ne elevava la condizione. Avrebbe potuto dire più correttamente (ho sempre pensato) che l'idea di un etere che appare diverso a osservatori in movimento è sbagliata, ma che un etere riformato, che appare identico a osservatori che si muovono a velocità costante l'uno rispetto all'altro, è lo scenario naturale per la relatività speciale.

All'epoca in cui stava elaborando la relatività speciale, nel 1905, Einstein meditava anche sul problema di quelli che in seguito divennero noti come quanti di luce. Qualche anno prima, nel 1899, Max Planck aveva proposto la prima idea della teoria che in seguito divenne la meccanica quantistica. Planck ipotizzò che gli atomi potessero scambiare energia con i campi elettromagnetici – ovvero emettere e assorbire radiazione elettromagnetica, come la luce – solamente in unità discrete, o quanti. Grazie a questa idea, riuscì a spiegare alcuni fatti sperimentali sulla radiazione del corpo nero. (In termini molto approssimativi, il problema è capire in che modo il colore di un corpo caldo, come un attizzatoio rovente o una stella incandescente, dipende dalla sua temperatura. In termini meno grossolani, ma comunque ben lontani dalla precisione, un corpo caldo emette tutta una gamma di colori, con diverse intensità. La sfida era

descrivere tutto lo spettro delle intensità e il modo in cui cambia al variare della temperatura). L'idea di Planck funzionava, dal punto di vista empirico, ma da quello intellettuale non era molto soddisfacente. Non derivava dalle altre leggi della fisica, era stata semplicemente aggiunta. In realtà, come capì chiaramente Einstein (ma non Planck), l'idea di Planck era *incompatibile* con le altre leggi.

In altre parole, quella di Planck era un'altra di quelle idee – come l'originario modello a quark, o i partoni – che funzionano in pratica, ma non in teoria. Non sarebbe stata giudicata accettabile dall'Università di Chicago, e tale non la considerò Einstein. Egli, tuttavia, rimase molto impressionato dalla sua capacità di spiegare i risultati sperimentali, e la ampliò in una nuova direzione: all'ipotesi che gli atomi emettano e assorbano luce (e in generale radiazione elettromagnetica) in unità discrete di energia aggiunse l'ipotesi che la luce stessa si presenti sempre in unità discrete di energia e viaggi portando unità discrete di quantità di moto. Con questi ampliamenti, Einstein riuscì a spiegare altri fatti e persino a predirne di nuovi – compreso l'effetto fotoelettrico, che era il lavoro fondamentale citato nella motivazione del premio Nobel, che gli fu assegnato nel 1921. Ai suoi occhi, Einstein aveva tagliato il nodo gordiano: l'idea di Planck è incompatibile con le leggi fisiche note, però funziona – quindi le leggi devono essere sbagliate!

E se la luce viaggia in blocchetti di energia e di quantità di moto, che cosa potrebbe essere più naturale che considerare questi blocchetti – e la luce stessa – come particelle dell'elettromagnetismo? I campi avrebbero potuto essere più comodi, come vedremo, ma Einstein non diede mai più importanza alla comodità che ai principî. Suppongo che Einstein, con questo problema che gli occupava la mente, valutò da una prospettiva insolita quale lezione trarre dalla relatività speciale. L'idea di un'entità che riempie lo spazio e appare identica quando la si supera a velocità finita (quale deve essere l'«etere luminifero» secondo la relatività speciale) per Einstein era contraria all'intuizione, quindi sospetta. Questa prospettiva, che gettava un'ombra sulla teoria elettromagnetica della luce di Maxwell, rafforzò le sue intuizioni, stimolate dal lavoro di Planck, e dal proprio, sul-

la radiazione del corpo nero e sull'effetto fotoelettrico. Einstein pensò che tali sviluppi – l'etere diventato contrario all'intuizione e che sembrava prendere forma, fisicamente, solo in blocchi – costituivano congiuntamente un buon motivo per abbandonare i campi e tornare alle particelle.

In una conferenza del 1909, Einstein considerò l'argomento in pubblico:

Ad ogni modo, questa è la concezione che mi pare più naturale: la manifestazione delle onde elettromagnetiche della luce è vincolata nei punti di singolarità, come la manifestazione dei campi elettrostatici nella teoria dell'elettrone. Non si può escludere che, in una tale teoria, tutta l'energia del campo elettromagnetico si possa considerare localizzata in queste singolarità, proprio come nella vecchia teoria dell'azione a distanza. Immagino ciascuno di questi punti singolari circondato da un campo che ha essenzialmente lo stesso carattere di un'onda piana e la cui ampiezza diminuisce al crescere della distanza tra i punti singolari. Se vi sono molte singolarità di questo tipo separate da una distanza piccola rispetto alle dimensioni del campo di uno dei punti singolari, i loro campi saranno sovrapposti e formeranno nella loro totalità un campo oscillante che è solo leggermente diverso dal campo oscillante nella nostra attuale teoria elettromagnetica della luce.

In altre parole, già nel 1909 – e anche, sospetto, nel 1905 – Einstein *non* riteneva che le equazioni di Maxwell esprimessero la realtà più profonda della luce. Non pensava che i campi avessero davvero una vita tutta loro: emergevano dai «punti di singolarità». Non pensava che i campi riempissero davvero lo spazio: erano concentrati in pacchetti vicino ai punti di singolarità. Queste idee di Einstein, com'è ovvio, erano collegate al suo concetto che la luce è composta da unità discrete: i *fotoni* di oggi.

Proprio come Newton era preoccupato dell'implicazione naturale della sua teoria (vuotava lo spazio), così anche Einstein nutriva dubbi sull'implicazione naturale della sua teoria (riempiva lo spazio). Proprio come Colombo, che trovò un Nuovo Mondo mentre cercava una via per arrivare al Vecchio, gli esploratori che approdano su un imprevisto continente di idee spesso sono impreparati ad accettare ciò che hanno scoperto. Continuano a tentare di trovare ciò che stavano cercando.

Nel 1920, dopo aver sviluppato la teoria della relatività ge-

nerale, l'atteggiamento di Einstein era ormai cambiato: «Una piú attenta riflessione ci insegna, tuttavia, che la teoria speciale della relatività non ci costringe a rifiutare l'etere». Per la verità, la teoria generale della relatività è una teoria della gravitazione molto «eterea», cioè basata sull'etere (esiste una dichiarazione dello stesso Einstein a questo riguardo che userò piú avanti in questo stesso capitolo). Ciò nonostante, Einstein non rinunciò mai al tentativo di eliminare l'etere elettromagnetico:

Se consideriamo il campo gravitazionale e il campo elettromagnetico dal punto di vista dell'ipotesi dell'etere, troviamo una differenza notevole tra i due. Non vi può essere spazio né parte dello spazio senza potenziali gravitazionali; infatti questi conferiscono allo spazio le sue qualità metriche, senza le quali non può neanche essere immaginato. L'esistenza del campo gravitazionale è inseparabilmente legata all'esistenza dello spazio. *D'altro canto, si può ben immaginare una parte di spazio senza un campo elettromagnetico...*⁸

Intorno al 1982, ebbi una memorabile conversazione con Feynman a Santa Barbara. Di solito, quanto meno con le persone che non conosceva bene, Feynman era sempre «sul palcoscenico» – dava spettacolo. Dopo un giorno di sfoggi di bravura, però, iniziò a sentirsi un poco stanco e si rilassò. Rimasti soli per un paio d'ore, prima di cena, intavolammo una discussione di ampio respiro sulla fisica. La nostra conversazione finì inevitabilmente per toccare l'aspetto piú misterioso del nostro modello del mondo, nel 1982 come oggi: l'argomento della costante cosmologica (la costante cosmologica è, essenzialmente, la densità dello spazio vuoto; anticipando un poco, vorrei accennare al fatto che il motivo per cui lo spazio vuoto pesa così poco nonostante tutto ciò che contiene è un enigma della fisica moderna).

Domandai a Feynman: «Non ti dà fastidio il fatto che la gravità sembra ignorare tutto ciò che abbiamo scoperto sulle complicazioni del vuoto?» D'acchito, rispose: «Un tempo pensavo di averlo risolto, quello».

Poi si fece pensieroso. Di solito Feynman ti guardava dritto negli occhi e ti presentava lentamente, ma in maniera meravi-

⁸ Il corsivo è mio.

gliosa, un flusso regolare di frasi o interi periodi ben strutturati. In quel momento invece sembrava rapito dai suoi pensieri; aveva lo sguardo fisso lontano e per un po' non disse nulla.

Riprendendo la conversazione, Feynman spiegò di essere stato deluso dal risultato del proprio lavoro sull'elettrodinamica quantistica. Era una dichiarazione davvero sorprendente, poiché quel lavoro geniale era ciò che aveva fruttato al mondo i grafi di Feynman, insieme a molti tra i metodi ancora usati per effettuare calcoli difficili nella teoria quantistica dei campi. È anche il lavoro per cui ha vinto il premio Nobel.

Feynman mi disse che quando si rese conto che la sua teoria dei fotoni e degli elettroni è matematicamente equivalente alla teoria usuale, le sue speranze più profonde andarono in frantumi. Aveva sperato che formulando la sua teoria direttamente in termini di percorsi di particelle nello spaziotempo – i grafi di Feynman – avrebbe evitato il concetto di campo e costruito qualcosa di essenzialmente nuovo. Per un po', pensò di esserci riuscito.

Perché voleva sbarazzarsi dei campi? «Avevo uno slogan», disse. Alzando il tono della voce e calcando il suo accento di Brooklyn⁹, lo canticchiò:

Il vuoto non pesa nulla [pausa drammatica] *perché non vi è proprio un bel nulla!*

Poi sorrise, apparentemente soddisfatto, ma trattenuto. La sua rivoluzione non aveva avuto il successo previsto, ma era stato un tentativo assolutamente meraviglioso.

La relatività speciale e la Griglia.

La teoria della relatività speciale, storicamente, derivò dallo studio dell'elettricità e del magnetismo, che culminò nella teoria dei campi di Maxwell. Quindi la relatività speciale scaturisce da una descrizione del mondo basata sul concetto di entità – i campi elettrici e magnetici – che riempiono lo spazio.

⁹ In realtà, del profondo Queens; Feynman era di Far Rockaway.

Una tale descrizione rappresentava una netta rottura con il modello del mondo allora dominante, ispirato dalla meccanica classica e dalla teoria della gravitazione di Newton. Il modello newtoniano del mondo si basava su particelle che esercitano forze l'una sull'altra nello spazio vuoto.

Le tesi della relatività speciale, tuttavia, vanno al di là dell'elettromagnetismo. L'essenza della relatività speciale è un postulato di simmetria: le leggi della fisica dovrebbero assumere la stessa forma se si aumenta la velocità di tutto ciò che vi compare di una stessa quantità costante. Questo postulato è una tesi universale, che si è sviluppata al di là delle sue radici elettromagnetiche. In altre parole, la simmetria di boost della relatività speciale si applica a *tutte* le leggi della fisica. Come abbiamo osservato poc'anzi, Einstein dovette modificare le leggi newtoniane della meccanica in modo che obbedissero alla stessa simmetria di boost dell'elettromagnetismo.

Appena terminata la stesura dell'articolo sulla relatività speciale, Einstein iniziò a cercare un modo per includere la gravità nella nuova struttura di riferimento. Fu l'inizio di un decennio di ricerche, di cui più tardi Einstein scrisse:

[...] gli anni di ricerca nel buio di una verità che si percepisce, ma non si sa esprimere, l'intenso desiderio e l'alternarsi di fiducia e dubbi, fino a quando si conquista la chiarezza e la comprensione, sono noti soltanto a chi ne abbia un'esperienza diretta.

Alla fine Einstein produsse una teoria della gravità basata sui *campi*, la relatività generale. Più avanti in questo stesso capitolo esamineremo molte altre considerazioni su questa teoria. Alla caccia partecipò anche un gruppo di altri ingegni brillanti, in particolare Poincaré, il grande matematico tedesco Hermann Minkowski e il fisico finlandese Gunnar Nordström, cercando di costruire teorie della gravità in accordo con i concetti della relatività speciale. Tutti approdarono a teorie dei campi.

Vi è una buona ragione generale per aspettarsi che una teoria fisica in accordo con la relatività speciale sia necessariamente una teoria dei campi. Cercherò di spiegarla.

Uno dei risultati più importanti della teoria della relatività speciale è che esiste una velocità limite: la velocità della luce,

che di solito si indica con c . L'influenza di una particella sull'altra non può essere trasmessa a una velocità superiore a c . La legge di Newton per la forza gravitazionale, secondo la quale la forza dovuta a un corpo distante è proporzionale all'inverso del quadrato della distanza *proprio adesso*, non obbedisce a questa regola, quindi non è in accordo con la relatività speciale. Per la verità, il concetto stesso di «proprio adesso» è problematico. Eventi che paiono simultanei a un osservatore fermo non sembreranno tali a un osservatore che si muove a velocità costante. Demolire il concetto di un «adesso» universale fu di gran lunga, secondo lo stesso Einstein, il passo piú difficile per arrivare alla relatività speciale:

[Q]ualsiasi tentativo di chiarire in modo soddisfacente questo paradosso era condannato al fallimento, finché l'assioma del carattere assoluto del tempo, cioè della simultaneità, fosse rimasto ancorato nell'inconscio senza che noi ce ne accorgessimo. Riconoscere chiaramente questo assioma e il suo carattere arbitrario significa appunto risolvere il problema¹⁰.

È un argomento affascinante, che però è trattato in modo esauriente in decine e decine di libri divulgativi sulla relatività, quindi non è il caso di approfondirlo qui. Per quelli che sono i nostri scopi, ciò che importa è semplicemente il fatto che esiste una velocità limite, c .

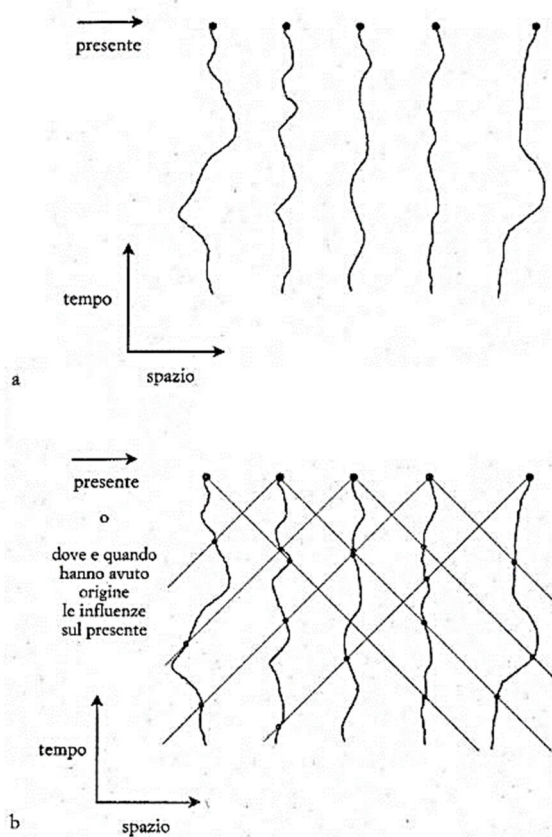
Consideriamo ora la Figura 11. Nella Figura 11a, abbiamo le linee di universo di alcune particelle. La posizione nello spazio è indicata sull'asse orizzontale e il valore del tempo è indicato sull'asse verticale. Con il passare del tempo, la posizione delle particelle cambia. Le posizioni di una certa particella, seguite nel tempo, formano la sua linea di universo. Com'è ovvio, in realtà dovremmo avere tre dimensioni spaziali, ma già due sono troppe per stare su un foglio di carta e per fortuna per rendere l'idea ne basta una. Nella Figura 11b, vediamo che, se l'influenza si propaga a una velocità finita, allora l'influenza della particella A (poniamo) sulla particella B dipende da dove si trovava in precedenza la particella A. Per determinare la for-

¹⁰ Albert Einstein, *Autobiografia scientifica*, in *Opere scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988.

za totale su una particella, dobbiamo quindi sommare le influenze di tutte le altre particelle, provenienti da diversi tempi precedenti. Ciò porta a una descrizione complicata, come mette in rilievo la Figura 11b. Un'alternativa, mostrata nella Figura 11c, consiste nel trascurare di tenere traccia delle singole posizioni

Figura 11a-b.

I diagrammi illustrano come la relatività speciale conduce ai campi. a) Qui abbiamo le linee di universo di alcune particelle, che indicano come cambiano le loro posizioni (asse orizzontale) nel corso del tempo (asse verticale). b) Se esiste una velocità limite, la forza totale avvertita da una data particella dipenderà da dove si trovavano le altre particelle in passato. Sono abbozzate le «linee di influenza» corrispondenti alla propagazione dell'influenza alla velocità limite c .



passate, concentrandosi invece sulle influenze totali. In altre parole, teniamo traccia di un *campo* che rappresenta l'influenza totale.

La mossa di passare da una descrizione in termini di particelle a una descrizione in termini di campi sarà particolarmente proficua se i campi obbediscono a semplici equazioni, consentendo così di calcolare i valori futuri dei campi a partire dai valori che hanno ora, senza dover tenere conto dei valori passati. La teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell, la relatività generale e la QCD hanno tutte queste proprietà. È evidente che la natura ha colto l'occasione per mantenere le cose relativamente¹¹ semplici usando i campi.

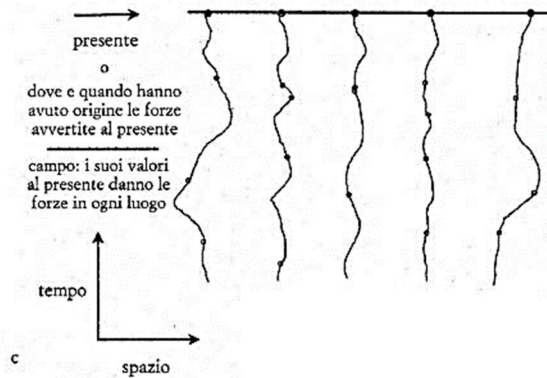
I gluoni e la Griglia.

Einstein e Feynman non erano ignari della logica che suggerisce l'inevitabilità di una descrizione in termini di campi per

¹¹ Non è un gioco di parole voluto. Davvero.

Figura 11c.

c) Per determinare la forza totale, si può tenere traccia delle posizioni di tutte le particelle in passato, oppure ci si può semplicemente concentrare sulla somma delle influenze. La prima procedura corrisponde a una teoria delle particelle, la seconda – potenzialmente molto più semplice – a una teoria dei campi.



la fisica fondamentale. Tuttavia, come si è visto, l'uno e l'altro erano inclini a ritornare a una descrizione in termini di particelle e sembravano addirittura impazienti di farlo.

Il fatto che questi due grandi fisici, in momenti diversi e per ragioni diverse, potessero mettere in dubbio l'esistenza di campi che riempiono tutto lo spazio (un aspetto cruciale della Griglia) mostra che le argomentazioni a favore della loro esistenza nel xx secolo inoltrato ancora non sembravano irresistibili. Vi era spazio per il dubbio, poiché le prove concrete del fatto che i campi hanno una vita tutta loro erano assai scarse. Nella discussione che precede la Figura 11, ho sostenuto che i campi sono *comodi*. È molto diverso dall'affermare che sono *ingredienti necessari della realtà ultima*.

Non sono sicuro che Einstein sia mai stato convinto dell'etere elettromagnetico. Uno dei suoi punti di forza come fisico teorico, la caparbia, poteva anche rappresentare una debolezza. La sua caparbia gli fu molto utile quando insistette a cercare di risolvere le contraddizioni tra le due relatività, quella meccanica e quella elettromagnetica, a favore della seconda, poi anche quando perseverò a prendere sul serio le idee di Planck e a svilupparle, malgrado fossero in conflitto con la teoria esistente, e ancora, infine, quando lottò con le equazioni complicate e poco conosciute necessarie per la relatività generale. D'altro canto, la caparbia gli impedì di partecipare all'enorme successo della moderna teoria quantistica dopo il 1924, quando attecchirono l'incertezza e l'indeterminismo, così come gli impedì di accettare una delle conseguenze più sensazionali della sua teoria della relatività generale: l'esistenza dei buchi neri.

Le difficoltà incontrate da Einstein nel conciliare la discrezza quantistica dei fotoni con la continuità dei campi che riempiono lo spazio (i quali da Maxwell in poi erano stati usati con ottimi risultati per descrivere la luce) vengono superate dal concetto moderno di campi quantistici. I campi quantistici riempiono tutto lo spazio e i campi quantistici elettrici e magnetici obbediscono alle equazioni di Maxwell¹². Ciò nondimeno, quando si osservano i campi quantistici, si vede che la lo-

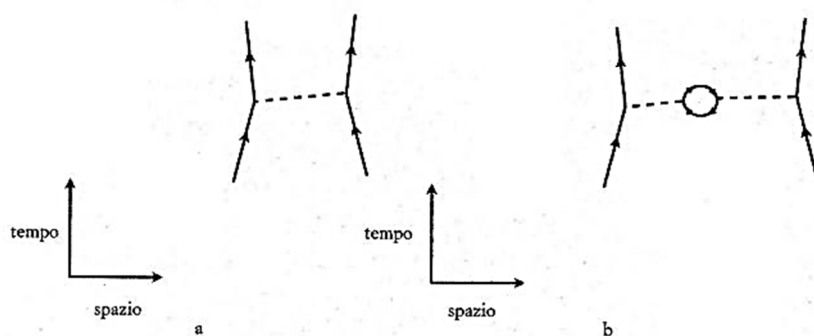
¹² In prima approssimazione.

ro energia è impacchettata in unità discrete: i fotoni. Nel prossimo capitolo, esamineremo piú a fondo le idee bizzarre, ma molto potenti, che stanno alla base della teoria quantistica dei campi.

Quanto a Feynman, si arrese quando, lavorando alle equazioni della sua versione dell'elettrodinamica quantistica, scoprí che i campi, introdotti per comodità, avevano una vita tutta loro. Perse fiducia nel suo programma di vuotare lo spazio, mi raccontò, quando scoprí – usando i grafi di Feynman – che tanto le sue equazioni quanto i fatti sperimentali richiedevano il tipo di modifica della *polarizzazione del vuoto* dei processi elettromagnetici descritto nella Figura 12. La Figura 12a corrisponde a un modo complicato di riassumere le stesse relazioni fisiche considerate nella Figura 11; qui l'influenza di una certa particella sull'altra è trasmessa dal fotone. La Figura 12b aggiunge qualcosa di nuovo: qui il campo elettromagnetico viene modificato dalla sua interazione con una fluttuazione spontanea del campo dell'elettrone – o, in altre parole, dalla sua interazione con una coppia virtuale elettrone-positrone. Descrivendo que-

Figura 12.

La forza tra particelle dotate di carica elettrica. La parte a riassume, nel linguaggio dei grafi di Feynman, la fisica della Figura 11. A questo livello, i campi elettrici e magnetici sono dati dalle equazioni di Maxwell, ma lì si potrebbe anche far risalire all'influenza di particelle cariche. I campi sono comodi, ma forse potremmo farne a meno. La parte b offre qualcosa di nuovo. In questo contributo alla forza, i campi elettromagnetici sono influenzati dall'attività spontanea (coppie virtuali particella-antiparticella) nel campo dell'elettrone.



sto processo, diventa molto difficile evitare il riferimento a campi che riempiono lo spazio.

La coppia virtuale è una conseguenza dell'attività spontanea nel campo dell'elettromagnetismo. Si può avere attività spontanea ovunque. E ovunque vi sia attività spontanea, il campo elettromagnetico può avvertirla. Queste due attività – fluttuazioni che avvengono ovunque e che ovunque vengono avvertite – compaiono in maniera diretta nelle espressioni matematiche associate alla Figura 12b. Ne derivano modifiche complicate, piccole ma molto specifiche, della forza che si calcolerebbe dalle equazioni di Maxwell. Queste modifiche sono state osservate, in maniera precisa, in esperimenti accurati.

Nella QED la polarizzazione del vuoto è un piccolo effetto, qualitativamente e quantitativamente. Nella QCD, di contro, è cruciale. Nel capitolo VI, abbiamo visto che porta alla libertà asintotica, consentendo così di descrivere il fenomeno dei getti. Nel prossimo capitolo, vedremo che la QCD viene usata per calcolare la massa dei protoni e di altri adroni. I nostri occhi non si sono evoluti per avere una risoluzione tale da poter distinguere i minuscoli intervalli (10^{-24} secondi) e le minuscole distanze (10^{-14} centimetri) in cui avviene l'azione. Però possiamo «guardare» dentro ai calcoli dei computer, per vedere che cosa combinano i campi di quark e i campi di gluoni. A occhi più acuti dei nostri, lo spazio apparirebbe come l'ultrastroboscopica lampada lavica della Tavola 4. Creature dotate di occhi simili non condividerebbero con noi l'illusione che lo spazio è vuoto.

La Griglia materiale.

Oltre l'attività spontanea dei campi quantistici, lo spazio è riempito da diversi strati di qualcosa di più permanente e sostanziale. Sono eteri in un senso che si avvicina di più a quello originario di Aristotele e Descartes – sono materiali che riempiono lo spazio. In alcuni casi, possiamo persino capire di che cosa sono fatti e produrne piccoli campioni. I fisici di solito chiamano questi eteri materiali *condensati*. Si può dire che essi (gli

eteri, non i fisici) si condensano spontaneamente dallo spazio vuoto come la rugiada del mattino o una nebbia che avvolge ogni cosa possono condensarsi dall'aria invisibile e umida.

Tra tutti i condensati, quello che comprendiamo meglio consiste di coppie quark-antiquark. Stiamo parlando di particelle reali, oltre le effimere particelle virtuali che vanno e vengono spontaneamente. Il nome consueto per questa nebbia di quark e antiquark che riempie lo spazio è *condensato chirale di rottura della simmetria*, ma chiamiamolo semplicemente con un nome che indichi ciò che è: $Q\bar{Q}$ (si legge «Q-Q barra»), che sta per quark-antiquark.

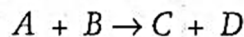
Per $Q\bar{Q}$, come per gli altri condensati, le due domande principali sono:

- Perché pensiamo che esista?
- Come possiamo verificarne la presenza?

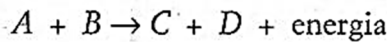
È solo nel caso di $Q\bar{Q}$ che sappiamo rispondere bene a queste due domande.

$Q\bar{Q}$ si forma perché lo spazio perfettamente vuoto è instabile. Supponiamo di vuotare lo spazio eliminando il condensato di coppie quark-antiquark - qualcosa che è più facile fare mentalmente, con l'aiuto di equazioni e computer, che in esperimenti di laboratorio. A quel punto, secondo i calcoli, l'energia totale delle coppie quark-antiquark è negativa. Il costo dell'energia mc^2 per produrre queste particelle è più che compensato dall'energia che possiamo liberare dando via libera alle forze attrattive tra di esse, mentre si legano formando piccole molecole (per inciso, il nome corretto di queste molecole di quark-antiquark è mesoni σ). Quindi lo spazio perfettamente vuoto è un ambiente esplosivo, pronto a deflagrare con molecole reali di quark-antiquark.

Le reazioni chimiche di solito iniziano con qualche ingrediente A e B e generano qualche prodotto C e D ; scriviamo pertanto



e, se si libera energia,



(Questa è l'equazione di un'esplosione).

In questa notazione, la nostra reazione è

$$[\text{nulla}] \rightarrow \text{quark} + \text{antiquark} + \text{energia}$$

– non ci sono ingredienti di partenza (a parte lo spazio vuoto)! Per fortuna, l'esplosione è autolimitante. Le coppie si respingono l'un l'altra perciò via via che la loro densità aumenta diventa più difficile farne entrare di nuove. Il costo totale per produrre una nuova coppia comprende una spesa extra, per interagire con le coppie già presenti. Quando non vi è più un profitto netto, la produzione si arresta. Si finisce con il condensato che riempie lo spazio, $Q\bar{Q}$, come punto finale stabile.

Una storia interessante, spero che siate d'accordo. Come facciamo a sapere che è corretta?

Una delle risposte è che si tratta di una conseguenza matematica delle equazioni – le equazioni della QCD – che possiamo verificare in molti altri modi. Anche se questa può essere una risposta perfettamente *logica* (le verifiche, come si è detto, sono molto particolareggiate e convincenti), non è esattamente scienza nella sua forma migliore. Vorremmo che le equazioni avessero conseguenze che possiamo vedere riflesse nel mondo fisico.

Una seconda risposta è che possiamo anche calcolare le conseguenze di $Q\bar{Q}$ e controllare se corrispondono a ciò che osserviamo nel mondo fisico. Per essere più specifici, possiamo calcolare se $Q\bar{Q}$, considerato come un materiale, può vibrare e come dovrebbero essere tali vibrazioni. È molto simile a ciò che un tempo i fan dell'«etere luminifero» volevano ottenere per la luce: un buon materiale vecchio stile, più consistente dei campi elettromagnetici. Le vibrazioni di $Q\bar{Q}$ non sono luce visibile, ma descrivono effettivamente qualcosa di definito e osservabile, cioè i mesoni π . Tra gli adroni, i mesoni π hanno proprietà del tutto particolari. Sono di gran lunga i più leggeri, per esempio¹³, e non è mai facile inserirli nel modello a quark. Pertanto è molto soddisfacente – e, se si studiano i dettagli in maniera approfondita, molto convincente – che emergano in un modo del tutto diverso, come vibrazioni di $Q\bar{Q}$.

¹³ Per gli esperti: si disaccoppiano anche a basse energie.

Una terza risposta è la piú diretta e sensazionale, quanto meno in linea di principio. Siamo partiti considerando l'esperimento *mentale* di vuotare lo spazio. E se lo facessimo sul serio? Gli scienziati dell'RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) al Brookhaven National Laboratory, a Long Island, hanno lavorato a questo problema e lo studio verrà ulteriormente sviluppato all'LHC. Gli esperimenti consistono nell'accelerare due grandi insiemi di quark e gluoni che si muovono in direzioni opposte – sotto la forma di nuclei atomici pesanti, come i nuclei di oro e di piombo – fino a energie molto alte e nel farli collidere. Non è un buon sistema per studiare le interazioni di base, elementari, tra quark e gluoni né per andare alla ricerca di tracce sottili di una nuova fisica, perché nello stesso momento avviene un gran numero di tali collisioni. Il risultato che si ottiene, infatti, è una palla di fuoco, piccola ma estremamente calda. Si sono misurate temperature superiori a 10^{12} gradi (Kelvin, Celsius o Fahrenheit – a questo livello, si può scegliere la scala che si vuole). La superficie del Sole è un miliardo di volte meno calda; temperature cosí elevate si sono avute l'ultima volta non piú in là del primo secondo dal Big Bang. A tali temperature, il condensato $Q\bar{Q}$ si dissolve: le molecole di quark-antiquark di cui è composto si spezzano. Perciò un piccolo volume di spazio, per un breve intervallo, viene vuotato. Poi, quando la palla di fuoco si espande e si raffredda, ha inizio la nostra reazione di formazione di coppie e di liberazione di energia e $Q\bar{Q}$ si ricostituisce.

Tutto ciò avviene quasi certamente. «Quasi», però, perché ciò che in realtà riusciamo a osservare sono i resti fluttuanti lanciati quando la palla di fuoco si raffredda. La fotografia riprodotta nella Tavola 5 mostra l'aspetto del risultato finale. Ovviamente, la fotografia non contiene cerchietti e frecce che indicano i responsabili di ciascun aspetto di questo spettacolare guazzabuglio. Va interpretata. In questo caso, ancor piú che nelle immagini dell'interno dei protoni e dei getti discusse nel capitolo VI (in realtà, molto di piú), l'interpretazione è una faccenda complicata. Oggi, le interpretazioni piú accurate e complete incorporano il processo di fusione e riformazione di $Q\bar{Q}$ che abbiamo discusso, ma non sono ancora chiare e con-

vincenti come potremmo sperare. I fisici continuano a studiare il problema, sia dal punto di vista degli esperimenti sia da quello dell'interpretazione.

Per il condensato al secondo posto nella classifica dei piú compresi, abbiamo buone prove indiziarie della sua esistenza, ma soltanto congetture sulla sua composizione. Le prove derivano da una parte della fisica fondamentale che finora non abbiamo citato, la teoria della cosiddetta interazione debole¹⁴. Abbiamo una buona teoria dell'interazione debole, che dai primi anni Settanta in poi è passata da un trionfo all'altro. In particolare, questa teoria è stata usata per prevedere l'esistenza, la massa e le proprietà dettagliate dei bosoni W e Z prima che fossero osservati sperimentalmente. Di solito la teoria è chiamata *Modello Standard*, o modello di Glashow-Weinberg-Salam, dal nome dei tre teorici, Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Abdus Salam, che hanno avuto un ruolo fondamentale nella sua formulazione (per cui hanno vinto il premio Nobel nel 1979).

Nel Modello Standard, i bosoni W e Z hanno un ruolo da protagonisti. Soddisfano equazioni molto simili alle equazioni per i gluoni nella cromodinamica quantistica. Le une e le altre sono espansioni basate sulla simmetria delle equazioni per i fotoni dell'elettrodinamica quantistica (le equazioni di Maxwell). L'attività nei campi dei bosoni W e Z crea le interazioni deboli, nello stesso senso in cui l'attività nei campi di fotoni è responsabile dell'elettromagnetismo e l'attività nei campi di gluoni colorati è responsabile dell'interazione forte.

Le straordinarie somiglianze tra le nostre teorie fondamentali di forze superficialmente molto diverse suggerisce la possibilità di una sintesi, in cui tutte le forze saranno considerate aspetti diversi di una struttura piú ampia. Le loro diverse simmetrie potrebbero essere sottosimmetrie di una simmetria principale piú grande. La simmetria in piú consente anche altre possibilità per ruotare le equazioni su se stesse; in altre parole, vi sono piú modi per realizzare «diversità che non fanno differenza». Si aprono quindi nuove possibilità di creare connessioni tra

¹⁴ Per maggiori dettagli sull'interazione debole, si vedano il Glossario, il capitolo XVII e l'Appendice B.

forme che in precedenza non sembravano collegate. Se le nostre equazioni descrivono forme parziali che possiamo rendere piú simmetriche, per mezzo di qualche aggiunta, siamo tentati di pensare che forse *in realtà sono* proprio aspetti di una struttura unitaria piú grande. Secondo una famosa raccomandazione di Anton Čechov,

Se nel primo atto c'è un fucile appeso sopra il camino, entro il quinto atto qualcuno deve averlo usato.

Ecco, ho appena appeso il fucile dell'unificazione.

Tornando al Modello Standard: i bosoni W e Z sono protagonisti attraenti, ma hanno bisogno di aiuto per essere adatti al ruolo che devono svolgere. Lasciati a se stessi, secondo le equazioni che li definiscono, sarebbero privi di massa, come il fotone e i gluoni colorati. Il copione della realtà, però, richiede che siano pesanti. È come se a Campanellino fosse stata assegnata la parte di Babbo Natale. Per mettere in grado la fatina alata di impersonare un omone panciuto dobbiamo procurarle un costume imbottito di cuscini.

Noi fisici sappiamo come realizzare questo artificio – cioè come far acquisire massa ai bosoni W e Z . Così pensiamo. In effetti è stata la natura a mostrarci come fare, dandocene una dimostrazione. Mia moglie, che è un'abile scrittrice e una miniera di buoni consigli, mi ha dato un elenco di parole troppo usate da evitare, tra cui gli aggettivi *sorprendente*, *sbalorditivo*, *meraviglioso*, *mozzafiato*, *eccezionale* e altri che probabilmente potete indovinare. Benché di solito segua i suoi consigli, devo dire che per me ciò che descriverò è sorprendente, sbalorditivo, meraviglioso, mozzafiato e, sí, anche eccezionale.

Il modello che la natura ci fornisce per rendere pesanti le particelle che trasmettono una forza è la superconduttività. Infatti in un superconduttore i *fotoni* diventano pesanti! Una discussione piú dettagliata di questo argomento si può trovare nell'Appendice B, qui ne descrivo soltanto l'idea essenziale. I fotoni, come si è visto, sono perturbazioni in movimento dei campi elettrici e magnetici. In un superconduttore, gli elettroni reagiscono vigorosamente ai campi elettrici e magnetici. Il tentativo degli elettroni di ristabilire l'equilibrio è così vigoroso che fanno

in un certo modo da freno al movimento dei campi. Invece di viaggiare all'usuale velocità della luce, quindi, all'interno di un superconduttore i fotoni si muovono piú lentamente. È come se avessero acquisito inerzia. Quando si studiano le equazioni, si vede che i fotoni rallentati in un superconduttore obbediscono alle stesse equazioni del moto che sarebbero seguite da particelle con una massa reale.

Se ci fosse capitato di essere una forma di vita il cui habitat naturale è un superconduttore, percepiremmo i fotoni come particelle dotate di massa.

Ora ribaltiamo il ragionamento. Gli esseri umani sono una forma di vita che osserva, nel suo habitat naturale, particelle simili a fotoni e dotate di massa, i bosoni W e Z . Forse, quindi, dovremmo avere il sospetto di vivere in un superconduttore. Non, com'è ovvio, in un superconduttore nel senso usuale, eccellente conduttore della carica (elettrica) a cui reagiscono i fotoni, ma in un superconduttore per le cariche a cui reagiscono i bosoni W e Z . Il Modello Standard si basa su questa idea; come si è detto, il Modello Standard riesce a descrivere molto bene la realtà – la realtà in cui ci troviamo a vivere. Così finiamo per sospettare che l'entità che chiamiamo spazio vuoto sia un tipo strano di superconduttore.

Se c'è superconduttività, deve esserci un materiale che conduce. La nostra strana superconduttività si realizza dappertutto, quindi l'impresa richiede un etere materiale che riempie lo spazio.

Domanda importante: qual è questo materiale, concretamente? Che cos'è che, nel superconduttore cosmico, ha il ruolo che hanno gli elettroni nei superconduttori ordinari?

Purtroppo, non può essere l'etere materiale che comprendiamo bene, $Q\bar{Q}$. In realtà $Q\bar{Q}$ è uno strano superconduttore del genere giusto e *contribuisce* alle masse dei bosoni W e Z . Ma dal punto di vista quantitativo è insufficiente all'incirca di un fattore 1000.

Nessuna forma di materia oggi conosciuta ha le proprietà giuste. Quindi in realtà non sappiamo che cosa sia questo nuovo etere materiale. Sappiamo però come si chiama: condensato di Higgs, dal nome del fisico scozzese, Peter Higgs, che è stato il pioniere di alcune di queste idee. La possibilità piú semplice, quanto me-

no se si ritiene che semplice voglia dire che si aggiunge il meno possibile, è che sia composto da una particella nuova, la cosiddetta particella di Higgs. Ma il superconduttore cosmico potrebbe anche essere una mescolanza di molti materiali. In effetti, come si è detto, sappiamo già che $Q\bar{Q}$ contribuisce, anche se in piccola parte. Come vedremo piú avanti, vi sono buone ragioni per sospettare che sia imminente la scoperta di tutto un mondo nuovo di particelle e che molte di queste contribuiscano al superconduttore cosmico, altrimenti detto condensato di Higgs.

Stando all'apparenza, le teorie unificate piú promettenti¹⁵ sembrano prevedere l'esistenza di svariate particelle che non abbiamo ancora osservato. Altri condensati potrebbero risolvere questo grande problema. Nuovi condensati possono rendere molto pesanti le particelle indesiderate – proprio come fa il condensato di Higgs per i bosoni W e Z , ma di piú. Le particelle con una massa molto grande sono difficili da osservare. Occorre piú energia, e quindi sono necessari acceleratori piú grossi per produrle come particelle reali. Anche la loro influenza indiretta, come particelle virtuali, è ridotta.

Com'è ovvio, sarebbe una mossa di ben poco valore aggiungere un nuovo elemento alle nostre equazioni soltanto perché sappiamo come giustificare l'eventualità che non venga osservato. Ciò che rende interessanti le teorie unificate è la capacità di spiegare caratteristiche del mondo che osserviamo e – meglio ancora – di prevederne di nuove. Ecco, ora vi ho detto che il fucile è carico.

L'entità che percepiamo come spazio vuoto è un superconduttore multicolore multistrato. Che concetto *sorprendente, sbalorditivo, meraviglioso, mozzafiato*. Ed eccezionale.

La madre di tutte le Griglie: il campo metrico.

Ecco ora la citazione di Einstein che avevo messo da parte. Nel 1920, Einstein scrisse:

¹⁵ Ovvero quelle che per me sono le piú promettenti – le teorie che saranno discusse nei capitoli XVII-XXI.

Lo spazio senza l'etere è inconcepibile, dal punto di vista della teoria generale della relatività. Questo perché in un tale spazio non solo non vi sarebbe propagazione della luce, ma nemmeno la possibilità di regoli e orologi e pertanto non vi sarebbero distanze spaziotemporali in senso fisico.

Queste parole sono un'introduzione appropriata alla madre di tutte le Griglie: il campo metrico.

Cominciamo da qualcosa di semplice e ben conosciuto: le mappe del mondo. Poiché le mappe sono piatte, mentre ciò che intendono descrivere – la superficie della Terra – ha una forma (approssimativamente) sferica, le mappe vanno chiaramente interpretate. Esistono molti modi di realizzare una mappa che rappresenta la geometria della superficie descritta e tutti usano la stessa strategia fondamentale. Il punto cruciale è indicare una griglia di istruzioni relative alla geometria locale. In maniera più specifica, in ogni piccola regione della mappa, si stabilisce quale direzione corrisponde al nord e quale all'est (il sud e l'ovest saranno le direzioni opposte, com'è ovvio). Si specifica anche, in ogni direzione, quale intervallo della mappa corrisponde a un miglio – o a un chilometro, o a un millisecondo luce o a qualsiasi altra unità di misura – sulla Terra.

Le mappe basate sulla usuale proiezione di Mercatore, per esempio, mantengono il nord verticale e l'est orizzontale. In questo caso, si può far corrispondere la superficie della Terra a un rettangolo. Viaggiare «intorno al mondo» da ovest a est fa passare orizzontalmente da un lato all'altro della mappa, che si segua l'equatore o il circolo artico. Sulla Terra l'equatore copre una distanza molto più grande del circolo artico, quindi interpretare letteralmente la mappa dà una falsa impressione: le regioni polari sembrano, relativamente, molto più estese di quanto siano sulla Terra. Ma la griglia indica come valutare nel modo corretto le distanze. Nelle regioni polari vanno usati regoli più grossi! (La situazione si fa un po' folle ai poli. L'intero bordo superiore della mappa corrisponde a un unico punto sulla Terra, il Polo Nord, e l'intero bordo inferiore corrisponde al Polo Sud).

Tutte le informazioni necessarie per ricostruire la geometria della superficie della Terra dalla mappa sono contenute nella

griglia di istruzioni¹⁶. Consideriamo, per esempio, come si fa a capire che la mappa descrive una sfera. Innanzitutto, scegliamo un punto sulla mappa. Poi, per ogni direzione, misuriamo una distanza fissa r dal punto di riferimento (seguendo le istruzioni della griglia) e segniamo un pallino. I luoghi contrassegnati da un pallino sulla mappa corrispondono a tutti i luoghi della Terra che si trovano alla distanza r dal punto di riferimento. Colleghiamo i pallini. In generale (per esempio, se la mappa si basa sulla proiezione di Mercatore), la figura che si ottiene sulla mappa non sembrerà un cerchio, anche se sulla Terra rappresenta un cerchio. Ciò malgrado, possiamo usare la mappa per misurare la circonferenza del cerchio sulla Terra che è rappresentato dalla figura. E vedremo che è minore di $2\pi r$. (Per gli esperti: è $R \sin(2\pi r/R)$, dove R è il raggio della Terra). Se la mappa rappresentasse una superficie piana – il che potrebbe non essere ovvio, se si usa una griglia distorta – si otterrebbe esattamente $2\pi r$. Si può anche trovare una circonferenza maggiore di $2\pi r$. In questo caso avremmo scoperto che la mappa descrive una superficie a forma di sella. Le sfere, naturalmente, hanno per definizione una curvatura positiva; le superfici piane hanno curvatura nulla e le selle hanno curvatura *negativa*.

Benché la visualizzazione diventi molto più difficile, le stesse idee si applicano anche allo spazio tridimensionale. Invece di una griglia di istruzioni su un foglio, possiamo considerare una griglia di istruzioni che riempie una regione tridimensionale. Queste «mappe» gonfiate contengono (come fette) lo stesso tipo di mappe bidimensionali che abbiamo appena esaminato, oltre alle istruzioni per mettere insieme le fette. Esse definiscono spazi tridimensionali curvi.

Quindi, invece di lavorare direttamente con forme tridimensionali complicate che sono (nel migliore dei casi) estremamente difficili da visualizzare, possiamo lavorare nello spazio ordinario, usando griglie di istruzioni. Possiamo lavorare con queste mappe senza dover sacrificare nessuna informazione.

¹⁶ Una questione tecnica: per misurare la lunghezza di un percorso che va in una direzione diversa dal nord-sud o dall'est-ovest locali, lo si scompone in piccoli passi, in ognuno si usa il teorema di Pitagora e si sommano le lunghezze. Più piccoli sono i passi più precisa è la misura.

La griglia di istruzioni relative alla geometria locale è chiamata, nella letteratura scientifica, il *campo metrico*. Le mappe insegnano che la geometria delle superfici, o degli spazi curvi di dimensioni superiori, è equivalente a una griglia, o a un campo, di istruzioni su come stabilire le direzioni e come misurare le distanze localmente. Lo «spazio» della mappa può essere una matrice di punti, o anche un array di registri in un computer. Con la giusta griglia di istruzioni, o campo metrico, entrambe queste strutture astratte possono rappresentare fedelmente una geometria complicata. I cartografi e i maghi della grafica computerizzata sanno sfruttare abilmente queste possibilità.

Alla storia possiamo aggiungere anche il tempo. In base alla relatività speciale, il tempo di un osservatore per un altro osservatore è una mescolanza di spazio e tempo, quindi è naturale trattare lo spazio e il tempo come pari. Per farlo, abbiamo bisogno di una matrice a quattro dimensioni. La griglia di istruzioni, o campo metrico, specifica in ciascun punto le tre direzioni che vanno considerate dimensioni spaziali – possiamo chiamarle nord, est e su, anche se quando si disegna la mappa dello spazio profondo sono nomi bizzarri¹⁷ – e le unità di misura della lunghezza in tali direzioni. In più, specifica anche che la quarta direzione è il tempo e fornisce una regola per trasformare le lunghezze della mappa lungo tale direzione in intervalli di tempo.

Nella teoria della relatività generale, Einstein utilizzò il concetto di spaziotempo curvo per costruire una teoria della gravità. In base alla seconda legge del moto di Newton, i corpi si muovono a velocità costante in linea retta se non sono sottoposti all'azione di una forza. La teoria della relatività generale modifica questa legge ipotizzando che i corpi seguano i percorsi più diritti possibile attraverso lo spaziotempo (le cosiddette geodetiche). Quando lo spaziotempo è curvo, anche i percorsi più diritti possibile formano gobbe e anse, perché devono adattarsi ai cambiamenti della geometria locale. Mettendo insieme queste idee, diciamo che i corpi reagiscono al campo metrico. Queste gobbe e anse della traiettoria di un corpo nello spaziotempo – in un linguaggio più banale, i cambiamenti di direzione e di velo-

¹⁷ I matematici e i fisici di solito le chiamano x^1 , x^2 e x^3 – nomi meno bizzarri, ma più oscuri.

cità – forniscono, secondo la relatività generale, una descrizione alternativa e più precisa degli effetti in precedenza noti con il nome di gravità.

Possiamo descrivere la relatività generale usando l'una o l'altra di due idee matematiche equivalenti: lo spaziotempo curvo o il campo metrico. I matematici, i mistici e gli specialisti di relatività generale tendono a preferire la visione geometrica per via della sua eleganza. I fisici educati nella tradizione più empirica della fisica delle alte energie e della teoria quantistica dei campi tendono a preferire la visione del campo metrico, perché corrisponde meglio al modo in cui vengono effettuati i calcoli (da noi o dai computer). Più importante, come vedremo tra poco, è il fatto che la concezione basata sui campi rende la teoria della gravità di Einstein più simile alle altre teorie consolidate della fisica fondamentale, quindi rende più facile il lavoro necessario per ottenere una descrizione unificata, completamente integrata, di tutte le leggi. Come probabilmente avrete capito, io sto dalla parte dei campi.

Una volta espressa in funzione del campo metrico, la relatività generale somiglia alla teoria dei campi dell'elettromagnetismo. Nell'elettromagnetismo, i campi elettrici e magnetici incurvano le traiettorie dei corpi elettricamente carichi o che contengono correnti elettriche. Nella relatività generale, il campo metrico incurva le traiettorie dei corpi dotati di energia e di quantità di moto. Anche le altre interazioni fondamentali somigliano all'elettromagnetismo. Nella QCD, le traiettorie dei corpi dotati di carica di colore sono incurvate dai campi di gluoni colorati; nell'interazione debole, sono coinvolti altri tipi ancora di carica e di campi; in tutti i casi, comunque, la struttura profonda delle equazioni è molto simile.

Tali similarità si estendono ulteriormente. Le cariche e le correnti elettriche influenzano l'intensità dei campi elettrici e magnetici vicini, cioè la loro intensità media, ignorando le fluttuazioni quantistiche. Questa è la «reazione» dei campi corrispondente alla loro «azione» sui corpi carichi. In maniera analoga, l'intensità del campo metrico è influenzata da tutti i corpi che hanno energia e quantità di moto (come tutte le forme di materia conosciute). Pertanto la presenza di un corpo *A* influenza il

campo metrico, che a sua volta influenza la traiettoria di un altro corpo B. È così che la relatività generale rende conto del fenomeno noto in precedenza come forza gravitazionale che un corpo esercita su un altro. Essa giustifica il rifiuto intuitivo di Newton dell'idea di azione a distanza, anche se spodesta la sua teoria.

La coerenza richiede che il campo metrico sia un campo *quantistico*, come tutti gli altri. In altre parole, il campo metrico fluttua spontaneamente. Non abbiamo una teoria soddisfacente di queste fluttuazioni. Sappiamo che di solito – nella nostra esperienza fino a oggi, sempre – gli effetti delle fluttuazioni quantistiche nel campo metrico in pratica sono piccoli e lo sappiamo semplicemente perché ignorandoli si ottengono ottime teorie! Da delicati processi biochimici a strani eventi negli acceleratori, dall'evoluzione delle stelle ai primi momenti del Big Bang, siamo riusciti a formulare previsioni precise, che in seguito sono state accuratamente verificate, pur ignorando le possibili fluttuazioni quantistiche del campo metrico. Il moderno sistema GPS, per citare un altro esempio, elabora lo spazio e il tempo direttamente; non tiene affatto conto della gravità quantistica, tuttavia funziona molto bene. Gli sperimentatori hanno lavorato duramente per scoprire un *qualsiasi* effetto che potesse essere attribuito alle fluttuazioni quantistiche nel campo metrico, ovvero, in altre parole, alla gravità quantistica. Una tale scoperta farebbe guadagnare un premio Nobel e la gloria eterna. Finora, non è stata realizzata¹⁸.

Ciò nondimeno, continua a valere l'obiezione di Chicago: «in pratica funziona, ma in teoria?» Il problema che si presenta è molto simile ai problemi che abbiamo considerato con il modello a quark, specie con il modello a partoni, nel capitolo VI. Le preoccupazioni per questi problemi teorici alla fine hanno portato al concetto di libertà asintotica e a una teoria eccellente dei quark e dei gluoni colorati (appena previsti!) Il problema analogo per la gravità quantistica non è stato risolto. La teoria delle superstringhe è un coraggioso tentativo, ma è più che altro una ricerca in corso. Al momento attuale è più una collezione di indizi su come potrebbe essere una teoria più che un mo-

¹⁸ Però nelle Note finali faccio pubblicità a una possibilità promettente.

dello concreto del mondo con previsioni e algoritmi precisi. E non ha incorporato a fondo le idee fondamentali della Griglia. (Per gli esperti: la teoria di campo delle stringhe è, nella migliore delle ipotesi, mal costruita).

Nella citazione all'inizio di questa sezione, Einstein afferma che lo spaziotempo senza il campo metrico è «inconcepibile». Preso alla lettera, ovviamente è falso: possiamo concepirlo senza la minima difficoltà! Torniamo alla nostra mappa. Se le istruzioni della griglia si cancellano o vanno perse, la mappa continua a dire qualcosa. Ci dice quali sono i paesi vicini a un dato paese, per esempio. Invece non indica, in maniera attendibile, quanto sono grandi, o di che forma sono. Anche senza informazioni sulle dimensioni e sulla forma, continuiamo ad avere quelle che si chiamano informazioni topologiche. Vi è ancora molto su cui riflettere.

Ciò che intendeva Einstein per «inconcepibile» è che è difficile immaginare come funzionerebbe il mondo fisico senza il campo metrico. La luce non saprebbe in quale direzione viaggiare o che velocità avere; i regoli e gli orologi non saprebbero che cosa misurare. Le equazioni che Einstein aveva per la luce, e per i materiali con i quali si potrebbero costruire i regoli e gli orologi, non possono essere formulate senza il campo metrico.

È pur vero, ma nella fisica moderna molte cose sono difficili da immaginare. Dobbiamo lasciare che i nostri concetti e le nostre equazioni ci portino dove vogliono. Ciò che disse Hertz a questo proposito è così importante (e così ben espresso) che è proficuo ripeterlo:

Non ci si può impedire di pensare che tali formule matematiche abbiano un'esistenza indipendente e un'intelligenza propria, che ne sappiano più di noi e persino più di chi le ha scoperte, che siamo in grado di ricavare da esse più di quanto vi sia stato inserito in origine¹⁹.

In altre parole, le nostre equazioni – e, più in generale, i nostri concetti – non sono soltanto i nostri prodotti, ma anche i nostri maestri.

In questo spirito, la scoperta che la Griglia è piena di diver-

¹⁹ Hertz è citato da Eric T. Bell, ne *I grandi matematici*, Sansoni, Firenze 1966.

si materiali, o condensati, stimola una domanda ovvia: il campo metrico è un condensato? Potrebbe essere composto da qualcosa di piú fondamentale? Questa domanda ne stimola un'altra: è possibile che il campo metrico, come $Q\bar{Q}$, si sia dissolto all'origine dell'universo, nei primi momenti del Big Bang?

Una risposta affermativa inaugurerebbe un modo nuovo di affrontare una questione che tormentava Agostino: «Che cosa stava facendo Dio *prima* di creare il mondo?» (Il sottinteso è: che cosa stava aspettando? Non avrebbe fatto meglio a iniziare prima?) Agostino diede due risposte:

Prima che Dio creasse il mondo, stava preparando l'Inferno per le persone che pongono domande sciocche.

Fino a che Dio non creò il mondo, il «passato» non esisteva. Quindi la domanda non ha senso.

La prima risposta è la piú divertente, ma la seconda, spiegata nei dettagli nel capitolo x delle *Confessioni*, è la piú interessante. L'argomento principale di Agostino è che il passato non esiste piú e il futuro non esiste ancora; in senso stretto, esiste solo il presente. Ma il passato ha una specie di esistenza nella mente, in forma di ricordo presente (come ovviamente anche il futuro, in forma di aspettative presenti). Quindi l'esistenza di un passato dipende dall'esistenza della mente e senza la mente non può esservi un «prima». Prima della creazione della mente, non esisteva un «prima»!

Una versione laica moderna della domanda di Agostino è: «Che cosa è successo prima del Big Bang?» Forse potrebbe valere una versione della sua seconda risposta basata sulla fisica. Non che la mente sia necessaria per il tempo – non penso che molti fisici accetterebbero questa tesi (come certamente non l'accettano le equazioni della fisica). Ma se il campo metrico si dissolve, anche la misura del tempo fa altrettanto. Appena non esistono piú *orologi* (e ciò significa la fine non solo della possibilità di sviluppare congegni per tenere traccia del tempo, ma anche di qualsiasi processo fisico che potrebbe servire per segnare il tempo), il tempo stesso, insieme a tutto il concetto di un «prima», perde significato. Il flusso del tempo ha inizio con la condensazione del campo metrico.

Il campo metrico potrebbe cambiare in qualche altro modo (cristallizzandosi?) sotto pressione, per esempio nei pressi del centro dei buchi neri? (Sappiamo che i quark formeranno strani condensati sotto pressione, con nomi buffi come superconduttori locked colore-sapore, che sono diversi da $QQ\bar{Q}$).

È possibile che il materiale piú fondamentale di cui è composto il campo metrico sia lo stesso materiale che ci occorre per unificare le altre forze?

Sono domande importanti, spero che siate d'accordo! Purtroppo, non abbiamo ancora risposte adeguate (ci sto lavorando...) Un segno del nostro progresso, e della crescita delle nostre ambizioni, tuttavia, è che possiamo formulare domande e riflettere seriamente su possibilità che Einstein considerava «inconcepibili». Ora abbiamo equazioni migliori, e concetti piú ricchi, e lasciamo che essi ci guidino.

La Griglia pesa.

Tradizionalmente, la massa è stata considerata come *la* proprietà determinante della materia, l'unica caratteristica che dà sostanza alla sostanza. Perciò la recente scoperta astronomica del fatto che la Griglia pesa – che l'entità che percepiamo come spazio vuoto ha una densità universale, diversa da zero – dà l'ultimo tocco alla tesi della realtà fisica della Griglia. Anche se tale scoperta è un po' secondaria rispetto al tema principale di questo libro, dedicherò alcune pagine a discuterne la natura e le implicazioni cosmologiche, poiché è di fondamentale importanza e pure straordinariamente interessante²⁰.

Il concetto di densità della Griglia è essenzialmente identico al termine cosmologico di Einstein, che equivale essenzialmente all'«energia oscura». Vi sono lievi differenze di interpretazione e di enfasi che spiegherò via via che si presenteranno, ma tutt'e tre le espressioni si riferiscono allo stesso fenomeno fisico.

²⁰ Per evitare di introdurre troppe complicazioni tutte insieme, rimando la discussione di un'altra scoperta astronomica estremamente interessante, la «materia oscura». L'affronteremo piú avanti.

Nel 1917, Einstein introdusse una modifica delle equazioni della relatività generale da lui proposte in origine due anni prima. La motivazione era di carattere cosmologico. Einstein pensava che l'universo avesse una densità costante, tanto nel tempo quanto (in media) nello spazio, perciò voleva trovare una soluzione con queste proprietà. Ma quando applicò le equazioni originarie all'universo nel suo complesso, non riuscì a trovare una soluzione di questo genere. Il problema di base è facile da capire. Lo anticipò Newton nel 1692, in una famosa lettera a Richard Bentley:

[...] [M]i sembra che, se la materia del nostro sole e dei pianeti e tutta la materia dell'universo fosse uniformemente distribuita da un capo all'altro del firmamento, e ogni particella possedesse un'innata gravità verso tutto il resto, e tutto lo spazio attraverso il quale questa sostanza è distribuita fosse limitato, la materia all'esterno di questo spazio tenderebbe, per la sua gravità, verso tutta la materia all'interno e, di conseguenza, cadrebbe giù nel mezzo dell'intero spazio e là comporrrebbe una grande massa sferica. Ma se la materia fosse uniformemente distribuita in uno spazio infinito, non potrebbe mai raccogliersi in un'unica massa; perché una parte di essa si raccoglierebbe in una massa e un'altra parte in un'altra massa...

In parole semplici, la gravità è un'attrazione universale, quindi non è soddisfatta di lasciare le cose separate. Poiché la gravità cerca sempre di unire le cose, non sorprende granché che non si riesca a trovare una soluzione in cui l'universo mantiene una densità costante.

Per ottenere il tipo di soluzione che desiderava, Einstein modificò le equazioni. Ma le modificò in un modo molto particolare, che non rovina la loro caratteristica migliore, ovvero che descrivono la gravità in un modo coerente con la relatività speciale. In sostanza, vi è un solo modo per realizzare tale modifica. Einstein chiamò «termine cosmologico» il nuovo termine che aggiunse alle equazioni per la gravità. In realtà non presentò un'interpretazione fisica del termine, ma la fisica moderna ne offre una convincente, che descriverò tra poco.

La motivazione di Einstein per aggiungere il termine cosmologico, per descrivere un universo statico, divenne ben presto obsoleta, poiché negli anni Venti le prove dell'espansione dell'u-

niverso si consolidarono, soprattutto grazie al lavoro di Edwin Hubble. Einstein definì le idee che gli avevano impedito di prevedere l'espansione dell'universo come «il più grande errore» della sua vita. (Furono davvero un errore, poiché il modello di universo che producono, anche con queste nuove equazioni, è instabile. La densità rigorosamente uniforme è una soluzione, ma qualsiasi piccola deviazione dall'uniformità aumenta nel corso del tempo). Ciò nondimeno, la possibilità individuata da Einstein, di aggiungere un nuovo termine alle equazioni della relatività generale senza rovinare la teoria, si dimostrò profetica.

Il termine cosmologico può essere considerato in due modi, così come $E = mc^2$ ed $m = E/c^2$ sono matematicamente equivalenti ma suggeriscono interpretazioni diverse. Lo si può considerare (come fece Einstein) come una modifica della legge di gravità, oppure come il risultato di una densità di massa costante e anche di una pressione costante in ogni luogo dello spazio e in ogni momento. Poiché tanto la densità di massa quanto la pressione hanno lo stesso valore ovunque, possono essere considerate come proprietà intrinseche dello spazio stesso. È la prospettiva della Griglia. Se consideriamo come certo il fatto che lo spazio abbia queste proprietà, e ci concentriamo esclusivamente sulle conseguenze gravitazionali, torniamo al punto di vista di Einstein.

Una relazione fondamentale che governa la fisica del termine cosmologico collega la sua densità ρ alla pressione p che esso esercita, usando la velocità della luce, c . Questa equazione non ha un nome ben preciso, ma sarà utile dargliene uno: la chiamerò equazione ben temperata, poiché indica il modo giusto di accordare, di mettere a punto, la Griglia. L'equazione ben temperata è:

$$\rho = -p/c^2 \quad (1)$$

Da dove arriva? Che cosa significa?

L'equazione ben temperata sembra un clone mutato della seconda legge di Einstein, $m = E/c^2$. La m si è trasformata in una ρ e la E in una p , e poi c'è quel segno meno, ma non si può fare a meno di notare una somiglianza. E infatti sono profondamente legate.

La seconda legge di Einstein mette in relazione l'energia di un corpo isolato in quiete con la sua massa (si vedano il capitolo III e l'Appendice A). È una conseguenza della teoria della relatività speciale, anche se non immediatamente ovvia. Di fatto nel primo articolo sulla relatività non compariva; Einstein ne parlò in seguito, in una nota a parte.

L'equazione ben temperata è inoltre una conseguenza della relatività speciale, però applicata a un'entità omogenea che riempie lo spazio più che a un corpo isolato. Non è immediatamente ovvio come una densità non nulla della Griglia possa essere in accordo con la relatività speciale. Per rendersi conto del problema, si pensi alla famosa contrazione di Fitzgerald-Lorentz, che abbiamo incontrato nel capitolo VI. A un osservatore che si muove a velocità costante, gli oggetti appaiono accorciati nella direzione del moto. In apparenza, quindi, all'osservatore in movimento la densità della Griglia dovrebbe apparire maggiore. Ma questo è contrario alla simmetria di boost della relatività, da cui discende che il secondo osservatore vede le stesse leggi fisiche.

La pressione che si accompagna alla densità, secondo l'equazione ben temperata, offre una scappatoia. La bilancia dell'osservatore in movimento, secondo le equazioni della relatività speciale, indica una nuova densità che è una mescolanza della vecchia densità e della nuova pressione – nello stesso modo in cui, come forse è più noto, i suoi orologi indicano intervalli di tempo che sono mescolanze dei vecchi intervalli temporali e dei vecchi intervalli spaziali. Se – e solo se – la vecchia densità e la vecchia pressione sono collegate proprio come prescrive l'equazione ben temperata, la densità e la pressione nuove saranno identiche alle vecchie.

Vi è una seconda conseguenza dell'equazione ben temperata, strettamente collegata alla prima, che è fondamentale per la cosmologia della densità della Griglia. In un universo in espansione, la densità di ogni genere normale di materia diminuirà. Ma la densità della Griglia ben temperata rimane costante! Se siete in grado di fare un piccolo esercizio di fisica e algebra del primo anno di università, vorrei mostrarvi una bella connessione che lega direttamente la costanza della densità alla seconda

legge di Einstein (nel caso contrario, saltate pure il capoverso seguente).

Consideriamo un volume V di spazio, con densità della Griglia ρ . Il volume si espande di δV . Di norma, quando un corpo si espande sotto pressione produce lavoro, quindi perde energia. Ma il segno meno nell'equazione di una Griglia ben temperata dà una pressione *negativa* $p = -p/c^2$. Perciò la nostra Griglia ben temperata espandendosi *guadagna* energia $\delta V \times pc^2$. In base alla seconda legge di Einstein, quindi, la sua massa aumenta di $\delta V \times \rho$. E questo basta esattamente per riempire il volume aggiunto δV con densità ρ , consentendo alla densità della Griglia di restare costante.

Ognuno dei componenti della Griglia che abbiamo discusso – campi quantistici fluttuanti di molti generi, QQ , il condensato di Higgs, il condensato che salva l'unificazione, il campo metrico (o condensato) spaziotempo – è ben temperato. Ognuna di queste entità che riempiono lo spazio obbedisce all'equazione ben temperata, poiché ognuna è coerente con la simmetria di boost della relatività speciale.

È possibile misurare la densità cosmica e la pressione separatamente, usando tecniche completamente diverse. La densità influenza la curvatura dello spazio, che gli astronomi possono misurare studiando la deformazione provocata da tale curvatura nelle immagini di galassie lontane, oppure nella radiazione cosmica di fondo (una nuova tecnica potente). Usando la tecnica nuova, nel 2001 diversi gruppi di ricerca erano ormai riusciti a dimostrare che nell'universo vi è molta più massa di quella che corrisponde alla sola materia normale. A quanto pare, circa il 70 per cento della massa totale è distribuito in maniera molto uniforme, nello spazio e nel tempo.

La pressione influenza la velocità a cui l'universo si sta espandendo. Questa velocità si può misurare studiando supernovae lontane. La loro luminosità rivela a quale distanza da noi si trovano, mentre lo spostamento verso il rosso delle loro linee spettrali rivela a quale velocità si stanno allontanando. Poiché la velocità della luce è finita, quando osserviamo quelle più lontane stiamo guardando il loro passato. Quindi possiamo usare le supernovae per ricostruire la storia dell'espansione. Nel 1998 due

squadre superefficienti di osservatori hanno segnalato che la velocità di espansione dell'universo sta aumentando. È stata una grossa sorpresa, perché l'attrazione gravitazionale ordinaria tende a frenare l'espansione. È la rivelazione di qualche effetto nuovo. La possibilità più semplice è una pressione universale negativa, che incoraggia l'espansione.

L'espressione *energia oscura* è un'abbreviazione che indica entrambe queste scoperte: la massa in più e l'espansione che accelera. L'intento era non prendere posizione nei confronti dei valori relativi della densità e della pressione. Se le avessimo semplicemente chiamate entrambe termine cosmologico, avremmo espresso un giudizio avventato sulla loro grandezza relativa. A quanto pare, però, avremmo avuto ragione. Le due quantità differenti, la densità della massa cosmica e la pressione cosmica, osservate in modi molto diversi, sembrano proprio essere collegate dalla relazione $\rho = -p/c^2$.

La scoperta astronomica che lo spazio pesa, e che sembra obbedire all'equazione ben temperata, è forse una brillante conferma delle strutture profonde su cui costruiamo i nostri migliori modelli del mondo? Sí e no. Per onestà, probabilmente dovrei scrivere sí e NO.

Il problema è che la densità totale che gli astronomi pesano è molto, molto più piccola delle semplici stime di ciò che fornisce uno qualsiasi dei nostri condensati. Ecco le semplici stime delle densità, come multipli di ciò che gli astronomi trovano in realtà:

- Condensato di quark-antiquark: 10^{44}
- Condensato superconduttore debole: 10^{56}
- Condensato superconduttore unificato: 10^{112}
- Fluttuazioni quantistiche, senza supersimmetria: ∞
- Fluttuazioni quantistiche, con supersimmetria²¹: 10^{60}
- Metrica spaziotemporale: ? (La fisica qui non è abbastanza chiara da consentire una semplice stima).

²¹ Discuteremo più a fondo la supersimmetria più avanti, in rapporto all'unificazione. Il punto principale da notare qui è che suggerisce un contributo ridicolmente grande alla densità, come ogni altra cosa.

Se una qualsiasi di queste semplici stime fosse corretta, l'evoluzione dell'universo sarebbe *molto* piú rapida dell'evoluzione che si osserva.

Perché la densità reale dello spazio è molto piú piccola? Forse c'è una grande congiura tra questi contributi, e forse altri ancora, alcuni dei quali necessariamente negativi, per dare un totale che è molto piú piccolo di ogni singolo contributo. Forse c'è una lacuna importante nella nostra comprensione di come reagisce la gravità alla densità della Griglia. Può darsi che siano vere l'una e l'altra cosa. Non lo sappiamo.

Prima della scoperta dell'energia oscura, la maggior parte dei fisici teorici, considerando l'enorme disaccordo tra le semplici stime della densità dello spazio e la realtà, sperava che qualche brillante intuizione avrebbe consentito di spiegare il motivo per cui la risposta giusta è zero. «Perché è vuoto» di Feynman è stata l'idea migliore che abbia sentito a questo proposito, o quanto meno la piú divertente. Se la risposta in realtà non è zero, abbiamo bisogno di altre idee (è comunque logicamente possibile che la densità fondamentale sia zero, e che l'universo si stia assestando molto lentamente su quel valore).

Una congettura diffusa oggi è che alla densità contribuiscano molti possibili condensati diversi, alcuni positivi, alcuni negativi. È solo quando i contributi si compensano quasi del tutto che si ottiene un bell'universo in lenta evoluzione, che si presta facilmente a essere osservato. Un universo osservabile deve concedere ai potenziali osservatori un tempo sufficiente per evolversi. Pertanto (in base a questa congettura) noi osserviamo una densità totale della Griglia improbabilmente piccola perché, se il totale fosse molto piú grande, non ci sarebbe nessuno a osservarla. Forse è giusto, ma è un'idea difficile da rendere precisa o da verificare. A volte possiamo passare dall'incertezza alla precisione raccogliendo molti campioni. Lo facciamo quando compiliamo tavole attuariali o applichiamo la meccanica quantistica. Ma per l'universo, abbiamo un solo campione.

In ogni caso, nell'unico universo che abbiamo esaminato, la Griglia pesa. Per fortuna, per confermare *questa* conclusione, un universo è sufficiente.

Riepilogo.

All'inizio di questo capitolo, ho fatto pubblicità alle proprietà fondamentali della Griglia, la sostanza primaria alla base della realtà fisica:

- La Griglia riempie lo spazio e il tempo.
- Ogni frammento della Griglia – ogni elemento dello spaziotempo – ha le stesse proprietà fondamentali di ogni altro frammento.
- La Griglia brulica di attività quantistica. L'attività *quantistica* ha caratteristiche speciali. È spontanea e imprevedibile. E per osservare l'attività quantistica, è necessario perturbarla.
- La Griglia contiene anche componenti materiali duraturi. Il cosmo è un superconduttore multicolore multistrato.
- La Griglia contiene un campo metrico che conferisce rigidità allo spaziotempo e provoca la gravità.
- La Griglia pesa, con una densità universale.

Ora, dopo il discorso promozionale, spero di avervi convinti!