

Einstein, la scoperta più bella

La relatività generale è un capolavoro di eleganza e semplicità. Prevede fatti incredibili eppure veri: curvatura dello spazio-tempo, buchi neri, Big Bang, espansione dell'universo

di Carlo Rovelli

Da ragazzo, Albert Einstein ha trascorso quasi un anno a bighellonare oziosamente. Era a Pavia, dove aveva raggiunto la famiglia, dopo avere abbandonato gli studi in Germania. Se non si perde tempo non si arriva da nessuna parte, fatto che spesso dimenticano i genitori degli adolescenti. Era l'inizio della rivoluzione industriale, e il padre, ingegnere, installava le prime centrali elettriche in Italia. Poi Albert si era iscritto all'Università di Zurigo e si era immerso nella fisica. Pochi anni dopo, nel 1905, aveva spedito tre articoli in un'unica busta alla principale rivista scientifica del tempo, gli «Annalen der Physik». Ciascuno dei tre valeva un Nobel. Il primo mostrava che gli atomi esistono davvero. Il secondo apriva la porta alla Meccanica dei Quanti, di cui spero di dire qualcosa in futuro su questa pagina. Il terzo presentava la Teoria della Relatività (oggi chiamata «relatività ristretta»), che chiarisce che il tempo non passa eguale per tutti: due gemelli

Per capire tanta geniale, elementare semplicità ci vuole impegno. Ma meno di quanto ne serva per apprezzare gli ultimi quartetti di Beethoven

si ritrovano di età diversa, se uno dei due ha viaggiato velocemente. Einstein diventa un fisico rinomato e riceve offerte di lavoro da diverse università. Ma qualcosa lo turba: la sua Teoria della Relatività non quadra con quanto sappiamo sulla gravità. Se ne accorge scrivendo un articolo di rassegna sulla nuova teoria, e si chiede se la vetusta e paludata «gravitazione universale» del grande padre Newton non debba essere riveduta anch'essa, per renderla compatibile con la nuova relatività. S'immerge nel problema. Ci vorranno dieci anni per risolverlo. Dieci anni di studi pazzi, tentativi, errori, confusione, idee folgoranti, idee sbagliate. Finalmente, nel novembre del 1915, manda alle stampe un articolo con la soluzione completa: una nuova teoria della gravità, cui dà nome «Teoria della Relatività Generale», il suo capolavoro. La «più bella delle teorie» l'ha chiamata il grande fisico russo Lev Landau.

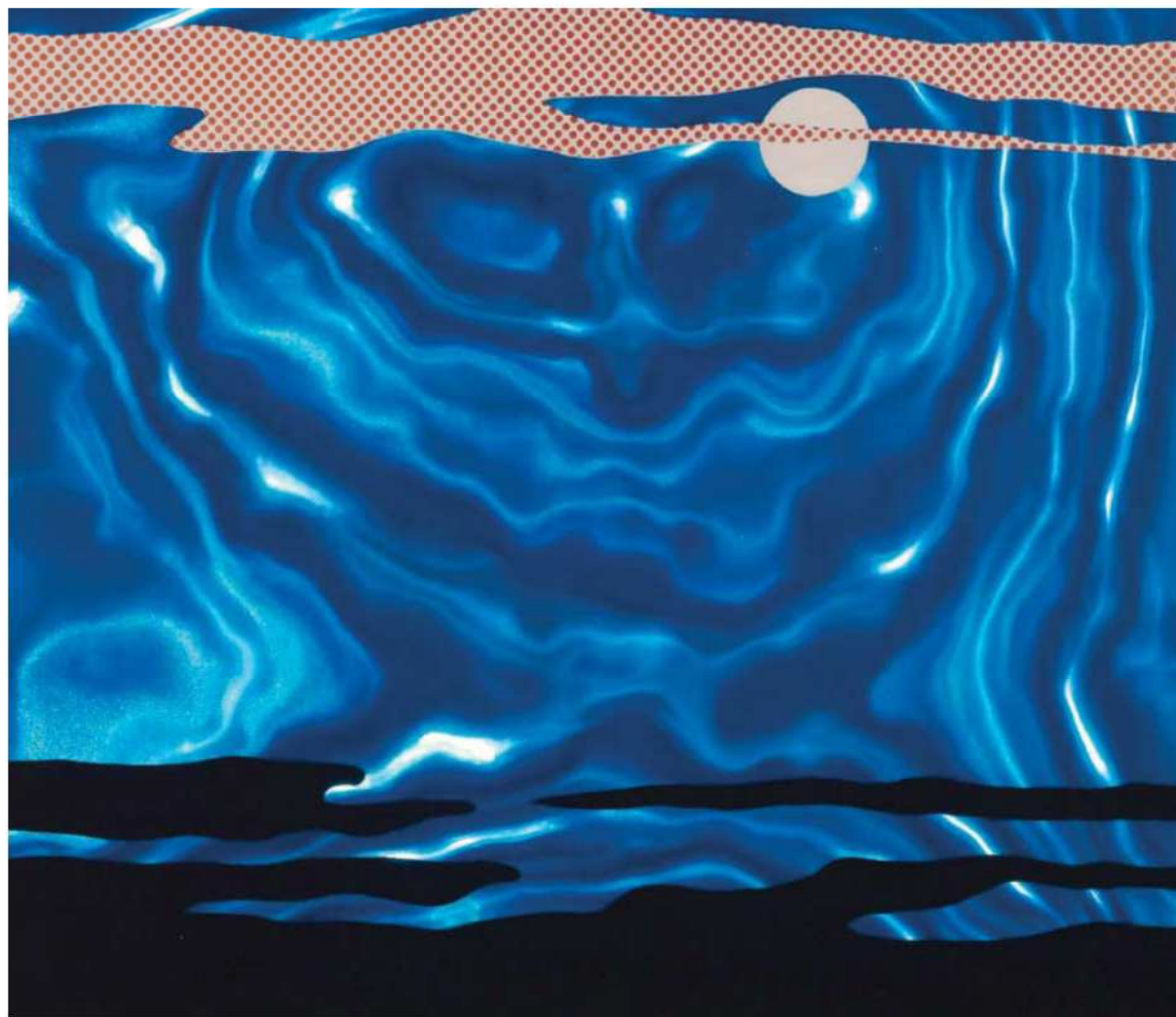
Ci sono capolavori assoluti che ci emozionano intensamente, il *Requiem* di Mozart, l'*Odissea*, la Cappella Sistina, *Re Lear*... Cogliarne lo splendore può richiedere un percorso di apprendistato. Ma il premio è la pura bellezza. E non solo: anche l'aprirsi ai nostri occhi di uno sguardo nuovo sul mondo. La Relatività Generale, il gioiello di Albert Einstein, è uno di questi.

Ricordo l'emozione quando cominciai a capire qualcosa. Era estate. Ero su una spiaggia della Calabria, a Condofuri, immerso nel sole della grecità mediterranea, al tempo dell'ultimo anno di università. Studiavo su un libro un po' roscigliato dai topi, perché l'avevo usato per chiudere le

tane di queste bestiole, di notte, nella casa un po' malandata sulla collina umbra, dove andavo a rifugiarmi dalla noia delle lezioni universitarie di Bologna. Ogni tanto alzavo gli occhi dal libro per guardare lo scintillio del mare: mi sembrava di vedere l'incurvarsi dello spazio e del tempo immaginati da Einstein. Era come una magia: come se un amico mi sussurrasse all'orecchio una straordinaria verità nascosta, e d'un tratto scostasse un velo dalla realtà, per svelarne un ordine più semplice e profondo. Da quando abbiamo imparato che la Terra è rotonda e gira come una trottola pazzo, abbiamo capito che la realtà non è come ci appare: ogni volta che ne intravediamo un pezzo nuovo è un'emozione. Un altro velo che cade. Ma il salto compiuto da Einstein è un salto forse senza eguale.

Perché? Per prima cosa, perché una volta capito come funziona, la teoria è di una semplicità mozzafiato. Provo a riassumerne l'idea. Newton aveva cercato di spiegare perché le cose cadono e i pianeti girano. Aveva immaginato una «forza» che tira tutti i corpi l'uno verso l'altro: l'aveva chiamata «forza di gravità». Come facesse questa forza a tirare le cose da lontano, senza che ci fosse niente in mezzo, non era dato sapere. Newton aveva anche immaginato che i corpi si muovessero nello spazio, e lo spazio fosse un grande contenitore vuoto, uno scatolone rigido per l'Universo. Un'immensa scaffalatura nella quale corrono dritti gli oggetti, fino a che una forza non li faccia curvare. Di cosa fosse fatto questo «spazio» contenitore del mondo, neppure era dato sapere. Ma pochi anni prima della nascita di Albert, due grandi fisici britannici, Faraday e Maxwell, avevano aggiunto un ingrediente nuovo al freddo mondo di Newton: il campo elettromagnetico. Il campo è un'entità reale diffusa, che porta le onde radio, riempie lo spazio, può vibrare e ondulare come la superficie di un lago, e «porta in giro» la forza elettrica. Einstein, affascinato fin da ragazzo dal campo elettromagnetico, che faceva girare i rotori delle centrali elettriche che costruiva papà, capisce che anche la gravità, come l'elettricità, deve essere portata da un campo: ci deve essere un «campo gravitazionale»; e cerca di capire come possa essere fatto e quali equazioni lo possano descrivere.

E qui arriva l'idea straordinaria, il puro genio: il campo gravitazionale non è diffuso nello spazio, il campo gravitazionale è lo spazio. Lo «spazio» di Newton, nel quale si muovono le cose, e il «campo gravitazionale», che porta la forza di gravità, sono la stessa cosa. È una folgorazione. Una semplificazione impressionante del mondo: lo spazio non è più qualcosa di diverso dalla materia: è una delle componenti «materiali» del mondo. Un'entità che ondula, si flette, si incurva, si storce. Non siamo contenuti in una invisibile scaffalatura rigida: siamo immersi in un gigantesco mollusco flessibile. Il Sole piega lo spazio intorno a sé e la Terra non gli gira intorno perché è tirata da una misteriosa forza, ma perché sta correndo dritta in uno spazio che si inclina. Come una pallina che rotoli in un im-



CURVATURA DELLO SPAZIO
Roy Lichtenstein, «Moonscape», 1965

buto: non ci sono forze misteriose generate dal centro dell'imbuto, è la natura curva delle pareti a fare ruotare la pallina. I pianeti girano intorno al Sole e le cose cadono perché lo spazio si incurva.

Come descrivere questo incurvarsi dello spazio? Il più grande matematico dell'Ottocento, Carl Friedrich Gauss, «principe dei matematici», aveva scritto la matematica per descrivere le superfici curve bidimensionali, come la superficie delle colline. Poi aveva chiesto a un suo bravo studente di generalizzare il tutto a spazi curvi di dimensione tre o più. Lo studente, Bernhard Riemann, aveva prodotto una ponderosa tesi di dottorato, di quelle che sembrano completamente inutili. Il risultato era che le proprietà di uno spazio curvo sono catturate da un certo oggetto matematico, che oggi chiamiamo la curvatura di Riemann e indichiamo con R . Einstein scrive un'equazione che dice che R è proporzionale all'energia della materia. Cioè: lo spazio si incurva là dove ci sia materia. È tutto. L'equazione sta in una mezza riga, non c'è altro. Una visione e un'equazione.

Ma dentro quest'equazione, c'è un universo rutilante. E qui si apre la ricchezza magica di questa teoria. Una successione fantasmagorica di predizioni che sembrano i deliri di un pazzo, e invece sono state tutte verificate dall'esperienza. L'equazione descrive come si curva lo spazio intorno a una stella. A causa di questa curvatura, la luce devia. Einstein predice che il Sole devia la luce. Nel 1919 viene compiuta la misura, e risulta essere vero. Non è solo lo spazio a incurvarsi, ma anche il tempo; e Einstein predice che il tempo passi più veloce in alto e più lento in basso, vicino alla Terra. Si misura, e risulta essere vero. Di poco, ma il gemello che ha vissuto al mare ritrova il gemello che ha vissuto in montagna un poco più vecchio di lui. È solo l'inizio. Quando una grande stella ha bruciato tutto l'idrogeno, si spegne e quanto resta viene schiaccia-

to sotto il proprio stesso peso, fino a curvare lo spazio così fortemente da sprofondare dentro un vero e proprio buco. Sono i famosi buchi neri. Quando studiavo all'università, erano poco credibili predizioni di una teoria esoterica. Oggi sono osservati nel cielo a centinaia. Ma non basta. Lo spazio intero può distendersi e dilatarsi; anzi, l'equazione indica che non può stare fermo, deve essere in espansione. Nel 1930, l'espansione dell'Universo viene effettivamente osservata. E la stessa equazione predice che l'espansione debba essere nata dall'esplosione di

un giovane universo piccolissimo e caldissimo: è il Big Bang. Ancora una volta, nessuno ci crede, ma le prove si accumulano, fino a che nel cielo viene osservata la radiazione cosmica di fondo: il bagliore diffuso che rimane dal calore dell'esplosione iniziale. E ancora, la teoria predice che lo spazio si increspi come la superficie del mare, e gli effetti di queste «onde gravitazionali» sono osservati nel cielo sulle stelle binarie, e combaciano con le previsioni della teoria con la sbalorditiva precisione di una parte su cento miliardi. E così via.

Insomma, la teoria descrive un mondo colorato e stupefacente, dove esplodono universi, lo spazio sprofonda in buchi senza uscita, il tempo rallenta abbassandosi su un pianeta, e le sconfinaste distese di spazio interstellare si increspano come la superficie del mare... e tutto questo, che emergeva pian piano dal mio libro roscigliato dai topi, non era una favola raccontata da un idiota in un accesso di furore, o l'effetto del sole della Calabria, un'allucinazione sul baluginare del mare. Era realtà. O meglio, un sguardo verso la realtà, un po' meno velato di quello della nostra offuscata banalità quotidiana. Una realtà che sembra anch'essa fatta della materia di cui son fatti i sogni, ma pur tuttavia più reale del nostro annebbiato sogno quotidiano. E tutto questo, il risultato di un'intuizione elementare: lo spazio e il campo sono la stessa cosa. E di un'equazione semplice, che non resisto a ricopiare qui, anche se il lettore non potrà certo decifrarla, ma vorrei che almeno ne vedesse la semplicità: $R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$. Tutto qui.

Certo, ci vuole un percorso di apprendistato per digerire la matematica di Riemann e impadronirsi della tecnica per leggere quest'equazione. Ci vuole un po' d'impegno e fatica. Ma meno di quelli necessari per arrivare a sentire la rarefatta bellezza di uno degli ultimi quartetti di Beethoven.

LA FISICA IN TRE LEZIONI

La grande fisica del Novecento ha cambiato in profondità quello che sappiamo sulla natura: spazio e tempo, materia ed energia; e il processo di revisione concettuale è tuttora in corso. Sono passi avanti del nostro sapere che per portata culturale e significato vanno molto al di là delle discipline specialistiche che li hanno generati: riguardano la nostra immagine del mondo, e di noi stessi in esso. La loro complessità concettuale e matematica, tuttavia, li tiene ancora lontani dal pubblico, anche il più colto. Per tre domeniche, a partire da questa settimana, il Domenicale pubblica tre lezioni di Carlo Rovelli, che toccano alcuni dei temi sollevati dalla grande fisica del Novecento, e alcuni aspetti della ricerca attuale. L'articolo di oggi sulla teoria della relatività generale di Einstein apre la serie. La seconda puntata, domenica prossima, sarà dedicata alla meccanica quantistica. Nell'ultimo articolo, Rovelli parlerà delle ricerche in gravità quantistica su cui è impegnato.

La realtà in quanti

La notevole efficacia pratica della meccanica quantistica resta tuttora quasi inspiegabile. Come quando ne discutevano Bohr e Einstein

di Carlo Rovelli

Un secolo dopo la sua nascita, la meccanica dei quanti continua a inquietare e interrogarci.

I due pilastri della fisica del Novecento, la relatività generale e la meccanica quantistica, non potrebbero essere più diversi. Entrambe le teorie ci insegnano che la struttura fine della natura è molto più sottile di quanto ci appaia. Ma la relatività generale è una gemma compatta: concepita da una sola mente, quella di Albert Einstein, è una visione semplice e coerente di gravità, spazio e tempo. La meccanica quantistica, o "Teoria dei Quanti", al contrario, a un secolo dalla sua nascita ha ottenuto un successo sperimentale che non ha eguali e ha portato applicazioni che hanno cambiato la nostra vita quotidiana (il computer su cui sto scrivendo, per esempio), ma resta avvolta nel mistero. Due libri recenti ne ripercorrono la complessa nascita e la crescita. *The Quantum Story: A history in 40 moments* di Jim Baggott (Oxford University Press), non ancora tradotto in italiano, ripercorre i momenti cruciali di questa teoria straordinaria, in 40 quadri brevi e vivaci. *Quantum. Da Einstein a Bohr, la teoria dei quanti, una nuova idea della realtà*, di Manjit Kumar (Oscar Saggi, Mondadori), ne restituisce il mistero attraverso la lente privilegiata del lungo e splendido dialogo sul significato della teoria svoltosi attraverso gli anni fra due giganti del pensiero: Albert Einstein e Niels Bohr.

Si usa dire che la meccanica quantistica nasca esattamente nell'anno 1900, quasi ad aprire un secolo di intenso pensiero. Il fisico tedesco Max Planck calcola il campo elettrico in equilibrio all'interno di una scatola calda, usando un trucco: immagina che l'energia del campo sia distribuita in "quanti", cioè in pacchetti. La procedura porta a un risultato che torna con quanto si misura, ma stride con tutto ciò si sapeva al tempo, perché l'energia era considerata qualcosa che varia in maniera continua, e non c'era ragione per trattarla come fosse fatta di mattoncini. Ma per Max Planck



AMICI RIVALI | Niels Bohr e Albert Einstein nel 1925 fotografati da Paul Ehrenfest

questo era solo uno strano trucco di calcolo. È Albert Einstein, cinque anni dopo, che comprende che i "pacchetti di energia" sono reali. Einstein mostra che la luce è fatta di pacchetti, particelle di luce. Oggi li chiamiamo "fotoni". Nell'introduzione del lavoro scrive: «Mi sembra che le osservazioni associate alla fluorescenza, alla produzione di raggi catodici, alla radiazione elettromagnetica che emerge da una scatola, e altri simili fenomeni connessi con l'emissione e la trasformazione della luce, siano meglio comprensibili se si assume che l'energia della luce sia distribuita nello spazio in maniera discontinua. Qui considero l'ipotesi che l'energia di un raggio di luce non sia distribuita in maniera continua nello spazio, ma consista invece in un numero finito di "quanti di energia" che sono localizzati in punti dello spazio, si muovono senza dividersi, e sono prodotti e assorbiti come unità singole». Queste righe, semplici e chiare, sono il vero atto di nascita della teoria dei quanti. Si noti il meraviglioso «Mi sembra...» iniziale. Il lavoro viene inizialmente trattato dai colleghi come una sciocchezza giovanile di un giovane brillante. Poi sarà per questo lavoro che Einstein otterrà il Nobel. Se Planck è padre naturale della teoria, è Einstein il padre che l'ha fatta crescere.

Ma come tutti i figli, la teoria è poi andata per conto suo e Einstein non l'ha più riconosciuta. Durante gli anni Dieci e Venti del Novecento, è Niels Bohr che ne guida

lo sviluppo. È lui che capisce che anche l'energia degli elettroni negli atomi può assumere solo certi valori "quantizzati", e soprattutto che gli elettroni possono solo "saltare" fra l'una e l'altra delle orbite atomiche con energie permesse. Sono i famosi "salti quantici". È nel suo istituto, a Copenaghen, che si raccolgono le giovani menti più brillanti del secolo, per cercare di mettere ordine in questi incomprensibili comportamenti del mondo atomico e co-

Alla fine non esistono altro che relazioni. Nessun oggetto ha una posizione definita se non quando incoccia in qualcos'altro

struirne una teoria coerente. Nel 1926 appaiono finalmente le equazioni della teoria, che rimpiazzano l'intera meccanica di Newton. È difficile immaginare un trionfo maggiore. D'un tratto, tutto torna, e si riesce a calcolare tutto. Vi faccio un solo esempio: ricordate la tavola periodica degli elementi, quella di Mendeleev, che elenca tutte le possibili sostanze elementari di cui è fatto l'universo, dall'Idrogeno all'Uranio? Come mai sono proprio questi gli elementi, hanno proprio questa struttura e proprio quelle proprietà? La risposta è che ogni elemento è una soluzione dell'equa-

zione base della meccanica quantistica. L'intera chimica emerge da questa singola equazione.

A scrivere per primo le equazioni della nuova teoria sarà un giovanissimo genio tedesco: Werner Heisenberg, basandosi su idee da capogiro. Heisenberg immagina che gli elettroni non esistano sempre. Esistono solo quando qualcuno li guarda, o meglio, quando interagiscono con qualcosa d'altro. Si materializzano in un luogo, con una probabilità calcolabile, quando sbattono contro qualcosa d'altro. I "salti quantici" da un'orbita all'altra sono il loro solo modo di essere reali: un elettrone è un insieme di salti da un'interazione all'altra. Quando nessuno lo disturba, non è in alcun luogo preciso. Non è in un luogo. Nella meccanica quantistica nessun oggetto ha posizione definita, se non quando incoccia contro qualcos'altro. Per descriverlo a metà volo fra un'interazione e l'altra, si usa un'astratta funzione matematica che in generale non vive neppure nello spazio reale, bensì in astratti spazi matematici.

Vi sembra assurdo? Sembrava assurdo anche ad Einstein. Da un lato, proponeva Werner Heisenberg per il Nobel, riconoscendo che aveva capito qualcosa di fondamentale del mondo, ma dall'altro non perdeva occasione per brontolare che però così non si capiva ancora niente. I giovani leoni della banda di Copenaghen erano costernati: ma come, proprio Einstein? Il loro padre spirituale, l'uomo che aveva avuto il co-

raggio di pensare l'impensabile, ora si tirava indietro e aveva paura di questo nuovo balzo verso l'ignoto, che lui stesso aveva innescato? Proprio Einstein, che ci aveva insegnato che il tempo non è universale e lo spazio si incurva, proprio lui ora diceva che il mondo non può essere così strano?

Niels Bohr, pazientemente, spiegava ad Einstein le nuove idee. Einstein obiettava. Immaginava esperimenti mentali per mostrare che le nuove idee erano contraddittorie: «Immaginiamo una scatola piena di luce, da cui lasciamo uscire per un breve istante un solo fotone...» così iniziava uno dei suoi famosi esempi. Bohr alla fine riusciva sempre a trovare la risposta, a respingere le obiezioni. Il dialogo è continuato per anni, passando per conferenze, lettere, articoli... Nel corso dello scambio, entrambi i giganti hanno dovuto arretrare, cambiare idea. Einstein ha dovuto riconoscere che effettivamente non c'era contraddizione nelle nuove idee. Ma Bohr ha dovuto riconoscere che le cose non erano così semplici e chiare come pensava all'inizio. Einstein non voleva cedere sul punto per lui chiave: che esistesse una realtà oggettiva indipendente da chi interagisce con chi. Bohr non voleva cedere sulla validità del modo profondamente nuovo in cui il reale era concettualizzato dalla nuova teoria. Alla fine, Einstein accetta che la teoria è un gigantesco passo avanti nella comprensione del mondo, ma resta convinto che le cose non possono essere così strane, e che "dietro" ci dev'essere una spiegazione più ragionevole. È passato un secolo, e siamo allo stesso punto. Le equazioni della meccanica quantistica e le loro conseguenze vengono usate di routine da fisici, ingegneri, chimici e biologi, nei campi più svariati. Ma restano misteriose: non descrivono cosa succede a un sistema fisico, ma solo come un sistema fisico viene percepito da un altro sistema fisico. Che significa? Significa che la realtà essenziale di un sistema è indescrivibile? Significa solo che manca un pezzo alla storia? O significa, come a me sembra, che dobbiamo accettare l'idea che la realtà sia solo interazione?

Chi usa le equazioni della teoria in laboratorio spesso non se ne occupa, ma articoli e convegni di fisici e di filosofi continuano a interrogarsi, anzi sono più numerosi negli ultimi anni. Che cos'è la teoria dei quanti a un secolo dalla sua nascita? Uno straordinario tuffo profondo nella natura della realtà? Un abbaglio, che funziona per caso? Un pezzo incompleto di un puzzle? O un indizio di qualcosa di profondo che non abbiamo ancora ben digerito, che riguarda la struttura del mondo?

Quando Einstein muore, Bohr, il suo grandissimo rivale, ha parole di commovente ammirazione. Quando pochi anni dopo muore Bohr, qualcuno prende una fotografia della lavagna nel suo studio: c'è un disegno. Rappresenta la "scatola piena di luce" dell'esperimento mentale Einstein. Fino all'ultimo, la voglia di confrontarsi e capire di più. Fino all'ultimo, il dubbio.

© RIPRODUZIONE RISERVATA

La prima puntata, dedicata alla Teoria generale della relatività di Albert Einstein, è apparsa sulla «Domenica» del 19 agosto

La realtà è tutta interazione



ACTION PAINTING | Jackson Pollock, «Convergence» (1952), Collezione Albright-Knox Art Gallery, Buffalo, N.Y.

I tentativi di conciliare relatività generale e meccanica quantistica suggeriscono un'immagine del mondo radicalmente nuova in cui le idee di spazio e tempo si dissolvono

di Carlo Rovelli

C'è una situazione paradossale al centro della nostra conoscenza del mondo fisico. Il Novecento ci ha lasciato due gemme: la relatività generale, su cui sono cresciute cosmologia, astrofisica, studio delle onde gravitazionali, dei buchi neri... e la meccanica quantistica, base della fisica atomica, nucleare, delle particelle elementari, della materia condensata e molto altro. Due teorie prodighe di doni e fondamentali per la tecnologia odierna. Eppure le due teorie non possono essere entrambe giuste, almeno nella loro forma attuale, perché si contraddicono l'un l'altra. Uno studente universitario che assista alle lezioni di relatività generale il mattino e a quelle di meccanica quantistica il pomeriggio non può che concludere che i professori sono citrulli, o hanno dimenticato di parlarsi da un secolo: gli stanno insegnando due immagini del mondo in completa contraddizione. La mattina il mondo è uno spazio curvo dove tutto è continuo; il pomeriggio, il mondo è uno spazio piatto dove saltano quanti di energia. Il paradosso è che entrambe le teorie funzionano terribilmente bene. La Natura si sta comportando con noi come quell'anziano rabbino da cui era-

no andati due uomini per dirimere una contesa. Ascoltato il primo, il rabbino dice «hai ragione». Il secondo insiste di essere ascoltato, il rabbino lo ascolta, e gli dice «hai ragione anche tu». Allora la moglie del rabbino, che orecchiava dalla cucina, urla: «ma non possono avere ragione entrambi!». Il rabbino ci pensa, annuisce, e conclude «hai ragione anche tu». Un gruppo di fisici teorici sparsi per i cinque continenti sta laboriosamente cercando di dirimere la questione. Il campo di studio si chiama «gravità quantistica»: l'obiettivo è trovare una teoria, cioè un insieme di equazioni, ma soprattutto una coerente visione del mondo, in cui la schizofrenia sia risolta.

Non è la prima volta che la fisica si trova davanti a due teorie di grande successo apparentemente contraddittorie. Lo sforzo di sintesi è stato spesso premiato con grandi passi avanti nella comprensione del mondo. Newton ha trovato la gravitazione universale combinando le parabole di Galileo con le ellissi di Keplero. Maxwell ha trovato le equazioni dell'elettromagnetismo combinando le teorie elettrica e magnetica. Einstein ha trovato la relatività per risolvere un conflitto apparentemente irriducibile fra elettromagnetismo e meccanica. Un fisico quindi è felice quando trova un conflitto di

questo tipo: è una straordinaria opportunità. Possiamo costruire una struttura concettuale per pensare il mondo che sia compatibile con quello che abbiamo scoperto sul mondo con entrambe le teorie? È qui, sul fronte, oltre i bordi del sapere attuale, che la scienza diventa ancora più bella. Nella fucina incandescente delle idee che nascono, delle intuizioni, dei tentativi. Delle strade intraprese e poi abbandonate, degli entusiasmi. Nello sforzo di immaginare quello che ancora non è stato immaginato. Vent'anni fa la nebbia era fitta. Oggi esistono piste che hanno suscitato entusiasmo e ottimismo. Ne esiste più di una, quindi non si può certo dire che il problema sia risolto. La molteplicità genera dissensi, ma la polemica è sana: fino a che la nebbia non sia sparita, è bene che esistano critica e opinioni opposte. Una direzione di ricerca è la gravità quantistica «a loop», sviluppata in quasi tutti i Paesi avanzati del mondo (eccetto l'Italia), da qualche centinaio di ricercatori, fra cui eccellono diversi bravissimi giovani italiani (in università estere). La gravità quantistica a loop è un tentativo di combinare relatività generale e meccanica quantistica, tentativo in un certo senso molto cauto, perché non utilizza alcun'altra ipotesi se non queste due stesse teorie, opportunamente riscritte per renderle compatibili. Ma le sue conseguenze sono radicali: una modifica profonda della struttura della realtà.

L'idea è semplice. La relatività generale ci ha insegnato che lo spazio non è una scatola rigida e inerte, bensì qualcosa di dinamico, come il campo elettromagnetico: una specie d'immenso mollusco mobile in cui siamo immersi, che si può comprimere e storcere. La meccanica quantistica, d'altra parte, c'insegna che ogni campo di tal sorta è «fatto di quanti», cioè ha una struttura fine granulare. Ne segue subito che lo spazio fisico è anch'esso «fatto di quanti». La predi-

zione centrale della teoria dei loop, quindi, è che lo spazio non sia un continuo, non sia divisibile all'infinito, ma sia formato da grani, cioè da «atomi di spazio». Questi sono piccolissimi, un miliardo di miliardi di volte più piccoli del più piccolo dei nuclei atomici. La teoria descrive in forma matematica questi «atomi elementari di spazio» e le equazioni che determinano il loro evolversi. Si chiamano «loop», cioè anelli, perché ciascuno di essi non è isolato, ma è «inanelato» con altri simili, formando una rete di relazioni che tesse la trama dello spazio. Dove sono questi quanti di spazio? Da nessuna parte. Non sono in uno spazio, perché sono essi stessi lo spazio. Lo spazio è creato dall'interagire di quanti individuali di gravità. Il mondo sembra essere relazione, pri-

È la teoria dei loop: una struttura granulare di elementi elementari a forma di anelli intrecciati, che nell'interazione costituiscono il mondo e il tempo

ma che oggetti.

Ma è la seconda conseguenza della teoria che è la più estrema. Come sparisce l'idea dello spazio continuo che contiene le cose, così sparisce anche l'idea di un «tempo» continuo che scorre. Le equazioni che descrivono grani di spazio e materia non contengono più la variabile «tempo». Questo non significa che tutto sia immobile e non esista cambiamento. Al contrario, significa che il cambiamento è ubiquo, ma i processi elementari non possono essere ordinati in una comune successione d'istanti. Alla piccolissima scala dei quanti di spazio, la danza della natura non si svolge al ritmo del batstone di un singolo direttore d'orchestra:

ogni processo danza indipendentemente con i vicini, seguendo un ritmo proprio. Lo scorrere del tempo è interno al mondo, nasce nel mondo stesso, dalle relazioni fra eventi quantitativi che sono il mondo e sono essi stessi il tempo.

Il mondo descritto dalla teoria è quindi lontano da quello che ci è familiare. Non c'è più lo spazio che «contiene» il mondo e non c'è più il tempo «lungo il quale» avvengono gli eventi. Ci sono solo processi elementari dove quanti di spazio e materia interagiscono tra loro in continuazione. L'illusione dello spazio e del tempo continui attorno a noi è la visione sfocata di questo fitto pullulare di processi elementari. Così come un quieto e trasparente lago alpino è formato da una danza veloce di miriadi di minuscole molecole d'acqua.

Una delle conseguenze spettacolari della teoria, ben raccontata nel libro *Prima del Big Bang. Storia completa dell'universo* di Martin Bojowald, da poco tradotto in italiano da Bompiani, riguarda l'inizio dell'universo. Sappiamo ricostruire la storia del nostro mondo fino a un periodo iniziale in cui era piccolissimo. Ma prima? Le equazioni dei loop ci permettono di ricostruire la storia dell'universo ancora più all'indietro. Quello che troviamo è che, quando l'universo è estremamente compresso, la meccanica quantistica genera una spaventosa forza repulsiva, con il risultato che il Big Bang, la «grande esplosione», potrebbe essere stato in realtà un Big Bounce, un «grande rimbalzo»: il nostro mondo potrebbe essere nato da un universo precedente che stava contrendosi sotto il proprio peso, fino a schiacciarsi in uno spazio piccolissimo, per poi «rimbalzare» e ricominciare a espandersi, diventando l'universo in espansione che osserviamo attorno a noi. Il momento del rimbalzo, quando l'universo è compresso in un guscetto di noce, è il vero reame della gravità quantistica: spazio e tempo sono del tutto scomparsi, il mondo è dissolto in una pullulante nuvola di probabilità, che le equazioni riescono tuttavia ancora a descrivere.

Noi esseri umani siamo ossessionati da noi stessi. La maggior parte del nostro sapere non è che un rigirarsi dell'uomo attorno a sé, come fossimo la cosa più importante dell'universo. Credo che a me la fisica piaccia perché apre la finestra. Guarda altrove. Mi dà un senso di aria fresca che entri in una camera. Quello che vediamo al di là della finestra non fa che stupirci. Ci rendiamo conto che siamo pieni di pregiudizi e la nostra immagine intuitiva del mondo è parziale, parrocchiale, inadeguata. La Terra non è piatta, non è ferma. Se proviamo a mettere insieme quanto abbiamo imparato sul mondo fisico nel Novecento, gli indizi puntano a qualcosa di profondamente diverso dalle nostre idee istintive su materia, spazio e tempo. La gravità quantistica a loop è un tentativo di leggere questi indizi e guardare un po' più lontano.

Siamo sicuri di quello che troviamo? No, per ora non lo siamo. Uno dei passi più belli della storia della scienza è la pagina del *Fedone* di Platone dove Socrate spiega la forma della Terra. È il testo più antico che ci sia giunto che parli esplicitamente della Terra rotonda. Socrate sostiene che la Terra è una sfera e che ci sono grandi valli dove vivono gli uomini. Un po' di giusto e un po' di confusione. E aggiunge «non sono sicuro». È il riconoscimento chiaro dei limiti del sapere del suo tempo. È grazie a questo riconoscimento i limiti del proprio sapere che abbiamo imparato così tanto sul mondo. Siamo sicuri di quello che oggi sospettiamo? No. Non lo siamo. Ma se non proviamo a capire, non capiremo mai.