



Questo libro è stato scritto a partire da una serie di video pubblicati dallo stesso autore sul proprio canale YouTube Quantum Gravity: @QuantumGravityChannel.

Il canale è accessibile tramite il link <https://tinyurl.com/QuaGra>

I video su cui si basa il libro sono raccolti nella playlist "I Quanti", accessibile tramite il link <https://tinyurl.com/LibroQuanti>

Lo scopo del libro è dare al lettore che non ha conoscenze di fisica la possibilità di accedere alle informazioni fondamentali sulla teoria dei quanti, senza complicazioni matematiche, in modo da permettergli di poterne ugualmente apprezzare lo straordinario impatto sulla comprensione del mondo.

Si tratta di sedici lezioni alla portata di tutti sulle affascinanti proprietà dei quanti: l'atomo, le particelle elementari, il principio di indeterminazione, la correlazione e l'entanglement, il gatto di Schroedinger, lo spin, i bosoni e i fermioni, la particella puramente virtuale, l'entropia, il tempo e la causalità, l'espansione dell'universo, il caso e il caos, la quasi realtà, il potere del logos nello studio della natura



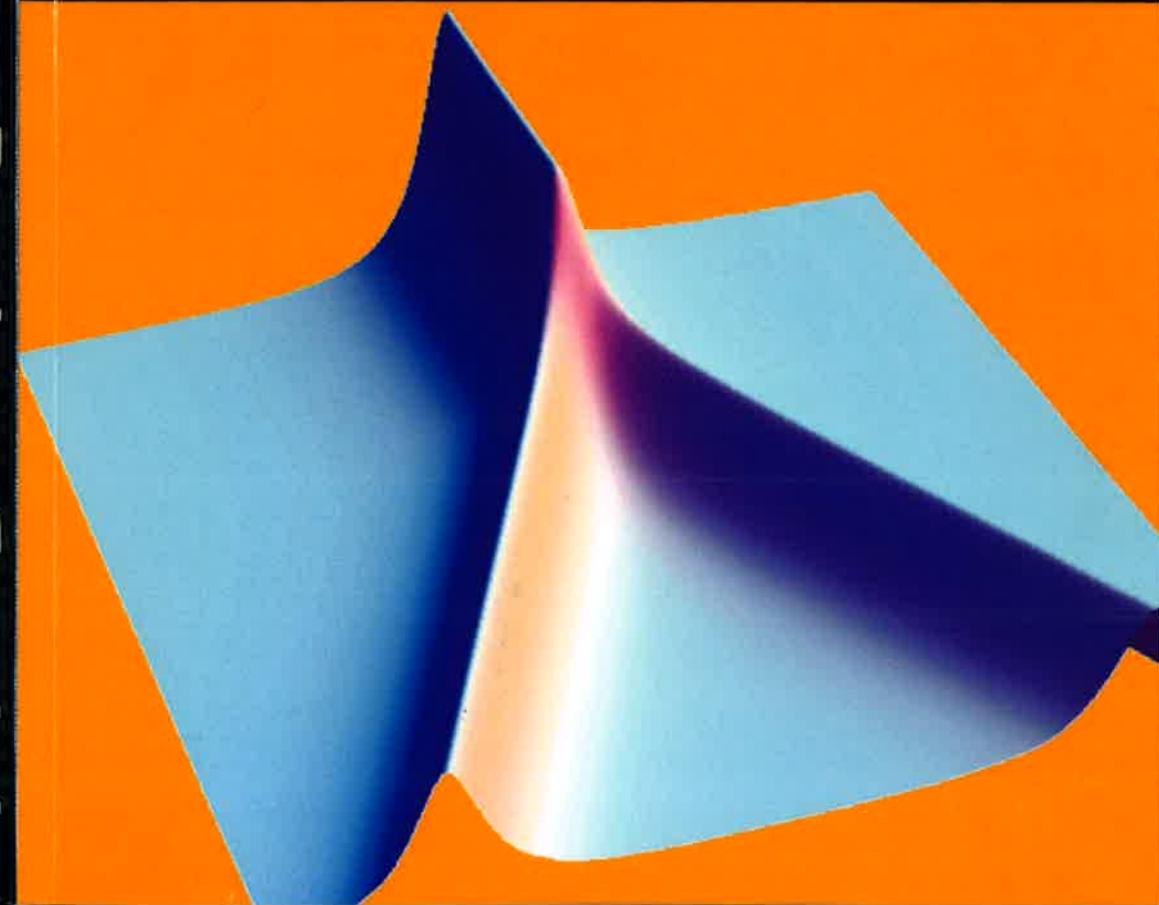
I QUANTI

Damiano Anselmi

Damiano Anselmi

I QUANTI

come non ve li ha mai
spiegati **NESSUNO**



I QUANTI

come non ve li ha mai spiegati

nessuno

Damiano Anselmi

Prima Edizione

Copyright @ 2023 D. Anselmi

Codice ISBN: 9798854740302

Casa editrice: Independently published

Sommario

Introduzione	7
1 L'atomo	11
2 Polvere di particelle	19
3 Il principio di indeterminazione	27
4 Correlazione ed entanglement	43
5 Il gatto di Schrödinger	55
6 La libertà della non realtà	67
7 Lo spin	73
8 Creazione, distruzione, cancellazione, rigenerazione	87
9 Bosoni e fermioni	97
10 Della libertà assoluta: la particella puramente virtuale	105
11 Entropia: irreversibilità o eterno ritorno?	119
12 Che cosa (non) è il tempo	143
13 I quanti e la quasi realtà	159
14 I quanti e la quasi realtà, spiegati col bitcoin	181
15 L'espansione dell'universo: come emergono le leggi fisiche dal caos	203
16 Il crepuscolo del logos	219

Introduzione

Questo libro è stato scritto a partire da una serie di video pubblicati dallo stesso autore sul proprio canale YouTube @QuantumGravityChannel. Il canale è accessibile tramite il primo codice QR disponibile qui sotto, o al link <https://tinyurl.com/QuaGra>



I video su cui si basa il libro sono raccolti nella playlist “I Quanti”, accessibile tramite il secondo codice QR disponibile qui sopra, o al link <https://tinyurl.com/LibroQuanti>

Tra illustrazioni, spiegazioni aggiuntive e dettagli, il libro contiene, orientativamente, un materiale circa doppio rispetto a quello contenuto nei video. Accompagnare la lettura alla visione dei video potrebbe essere utile per chi affronta questi argomenti per la prima volta.

Lo scopo del libro è dare al lettore che non ha conoscenze di fisica la possibilità di accedere alle informazioni fondamentali sulla teoria dei quanti senza complicazioni matematiche, in modo da permettergli di apprezzare lo straordinario impatto della teoria stessa sulla comprensione del mondo.

Non è richiesta alcuna preparazione particolare per capire il contenuto delle lezioni. Tuttavia, gli argomenti trattati saranno accompagnati da una matematica minima, non cruciale per procedere, ma utile per dare concretezza alla trattazione. Come vedremo, i punti chiave della teoria dei quanti non sono esprimibili con sufficiente accuratezza con le

parole di uso comune. La lingua che parliamo comunemente traballa, quando vogliamo descrivere i quanti. Essa è soppiantata dalla lingua matematica.

Può essere utile rileggere le lezioni, o l'intero libro, più volte, per apprezzare i particolari che sfuggono alla prima lettura. A chi avesse letto altri libri divulgativi sulla teoria dei quanti prima di questo, è consigliato fare una specie di "tabula rasa", poiché nella maggior parte dei casi sarà stato portato fuori strada.

Sempre più spesso vengono impiegati, consapevolmente o meno, espedienti e trucchi per rendere un libro vendibile sul mercato, a scapito del suo contenuto. Tra questi annoveriamo: a) l'indugiare su particolari storici in merito alle scoperte e ai loro protagonisti, b) la sollecitazione del coinvolgimento emotivo del lettore mediante l'enfaticizzazione degli aspetti umani e personali, facendo leva sulle peripezie che hanno accompagnato le scoperte stesse, in particolare le inevitabili incomprensioni iniziali tra scienziati, c) il richiamo ad una presunta, quanto inesistente, "bellezza" di certe teorie, verso le quali anche il lettore si dovrebbe sentire obbligato a provare una qualche forma di fascinazione, per adesione sociale, e d) l'insistenza su aspetti che si prestano a suscitare stupore e meraviglia, anch'esse reazioni emotive "obbligatorie" per adesione sociale. Il tempo è relativo, invece che assoluto: quante volte ce l'hanno detto? Bene, segnamocelo, ma quand'è che ci decidiamo ad andare oltre? Per non parlare della materia *oscura*, o dei sempre spendibili buchi *neri*, così emotivamente evocativi. Questi escamotage fanno passare in secondo piano i concetti di cui un libro scientifico dovrebbe trattare, e finiscono per trasformare il suo contenuto in un racconto. Per quanto letterariamente accattivante possa essere il risultato finale per chi legge, o interessante dal punto di vista storico, sociale, o umano, non raggiunge lo scopo dichiarato in partenza. E così capita che i libri divulgativi disponibili in commercio non arrivino mai al punto. A dire il vero, neanche ci provano. Non si addentrano mai nel profondo, anzi si fermano sempre sul più bello. Così, non spiegano veramente cosa siano i quanti a chi non li conosce, e cosa sia la nuova, rivoluzionaria comprensione della realtà a cui portano.

Nessun libro di testo di fisica dei quanti si perde sui dettagli storici, personali o emotivi che riguardano i protagonisti delle scoperte. Non si vede perché dovrebbe farlo la divulgazione della scienza, sempre che sia ciò che dichiara di essere. Sarebbe utile se i libri in commercio fossero distinti in più categorie, in modo da permettere al lettore veramente interessato alla scienza di avvicinarsi a quella, invece che essere dirottato verso forme oblique di letteratura.

Questo libro è da intendersi come la "traduzione" di un libro di testo di teoria dei quanti in un linguaggio il più possibile vicino a quello parlato comunemente. Non sarà difficile rendersi conto delle difficoltà intrinseche che questo comporta, perché saranno gli stessi quanti a farle emergere, e a farci apprezzare che quelle difficoltà hanno una portata ben più ampia di quanto si possa immaginare. Lungi dall'essere confinate al linguaggio parlato vero e proprio, si estendono fino a gravare sulla formulazione stessa delle leggi fisiche.

Il linguaggio usato nel libro è intenzionalmente comprensibile ai più. Questo potrebbe avere l'effetto indesiderato di trarre in inganno, e far credere "di aver capito" al primo colpo. Occorre sapere che una nota tecnica di manipolazione è rendere difficile ciò che è semplice, perché le nostre scorciatoie cerebrali inconsce associano valore al grado di difficoltà. Per contrasto, un testo scritto in modo accessibile sembrerà di scarso valore. Il punto è che, se non è scritto in modo accessibile, per quanto *sembri* aver valore, non ne avrà alcuno, nel senso che non raggiungerà mai il suo scopo. Basti pensare al linguaggio intricato usato da molti celebrati filosofi, che ha il solo scopo di nascondere bene le vistose lacune del loro procedere. Essi ottengono ugualmente il risultato di farsi "ammirare", citare e seguire da molti, cioè tutti quelli che non sanno discernere, in quel che leggono, la qualità vera dall'incartamento elegante di ciò che vale poco.

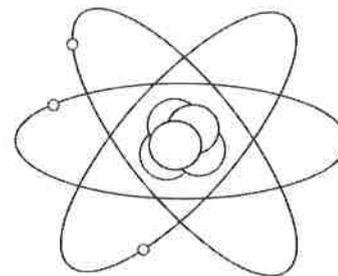
Pertanto, è consigliabile a tutti rileggere vari capitoli parecchie volte, magari in ordine differente, per apprezzare i dettagli che sfuggono la prima volta, perché dietro il linguaggio apparentemente semplice si nasconde una miriade di particolari cruciali. Ed è necessario anche fermarsi, dopo la lettura di un capitolo, e ripensarne il contenuto da sé, riformu-

landolo nella propria mente. Poco importa se la riformulazione personale si rivelerà sbagliata un attimo dopo, alla lettura del capitolo successivo: alla fine di quello si procederà a rielaborare il contenuto di entrambi. E così via. Queste linee guida valgono tanto per chi affronta gli argomenti per la prima volta, quanto per chi, invece, ne ha già sentito parlare, che, come già detto, si trova tutt'altro che avvantaggiato, e deve fare un lavoro supplementare per rimuovere quanto crede di avere appreso.

Apprezzare la portata rivoluzionaria della teoria dei quanti non è né facile, né immediato, ma non è nemmeno fuori portata. La parte più difficile è demolire tutto ciò che crediamo di aver capito, quella zavorra mentale che ci farà saltare le righe, imboccare scorciatoie, perché "ah, sì: questo l'ho già sentito". È meglio leggere e rileggere molte volte un libro che vale molto, piuttosto che leggere tanti libri che valgono poco.

1 L'atomo

In questa prima lezione spieghiamo cos'è l'atomo. Solitamente, l'atomo viene presentato in modo sbrigativo come fatto di un nucleo di protoni e neutroni, con una serie di elettroni che gli orbitano attorno, disegnando

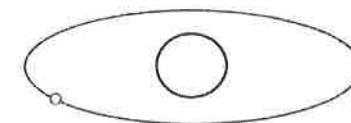


più o meno una figura come quella che vediamo qui. Il modello planetario fu tra i primi ad essere proposti. Dobbiamo sapere che, alla luce della conoscenza disponibile da ormai un secolo e più, è sbagliato e fuorviante. Descrivere cos'è veramente l'atomo ci permette di imparare qualcosa di

molto importante sulla teoria dei quanti.

Consideriamo l'atomo più semplice, che è l'atomo di idrogeno, fatto di un solo protone e un solo elettrone.

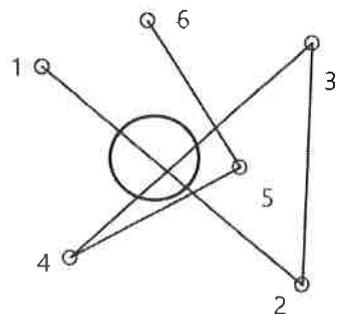
Per comodità, mettiamo il protone al centro, in posizione fissa, senza dare ulteriori spiegazioni al momento, e concentriamoci sull'elettrone. Quello che diremo per l'elettrone varrà poi anche per il protone stesso.



Occorre sapere che nel mondo microscopico non possiamo "accendere la luce", cioè non possiamo guardare una particella continuamente, men che meno riprenderla col telefonino. Quello che possiamo fare è andare a vedere dove la particella sta *adesso*, oppure *un po' più tardi*, dopo qualche tempo. Supponiamo di trovare la particella, cioè l'elettrone del nostro atomo di idrogeno, in una certa posizione, che

chiamiamo 1, in un certo istante. Un po' dopo supponiamo di trovarla in una posizione che chiamiamo 2, e ancora dopo in una posizione che chiamiamo 3. E in un istante successivo nella posizione 4. E così via. Continuiamo finché non raccogliamo un buon numero di osservazioni.

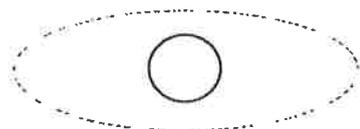
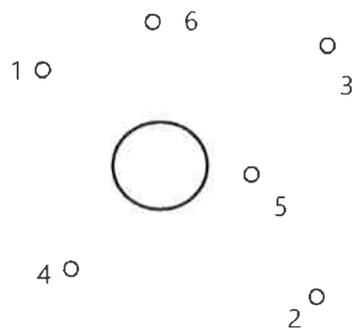
La cosa più immediata che possiamo fare a questo punto è "unire i puntini". Se uniamo i puntini scopriamo che otteniamo una figura che



non ha il minimo senso. Strano, ci diciamo, perché se andasse bene il modello planetario introdotto prima, in cui l'elettrone orbita attorno al nucleo, unendo i puntini dovremmo vedere emergere la traiettoria percorsa dall'elettrone stesso. Cioè, dovremmo ottenere qualcosa di molto simile a

quanto mostrato qui accanto. Tuttavia, non succede niente del genere. Quindi, ci dobbiamo chiedere perché non succeda. Qualcuno potrebbe dire: la ragione per cui non succede è che le nostre osservazioni sono troppo distanziate nel tempo l'una dall'altra. Dobbiamo fare delle osservazioni più frequenti, più dense nel tempo. E allora, facciamolo.

Se facciamo una moltitudine di osservazioni dell'elettrone ravvicinate nel tempo, succede che, a partire dall'istante iniziale in cui l'elettrone sta in un punto che chiamiamo ancora 1, lo troveremo poi magari in un certo punto 2, e nell'istante immediatamente successivo lo troveremo nel punto 3, poi in 4, poi in 5, poi in 6, e avanti di questo passo. Continuiamo pure quanto vogliamo. Una volta soddisfatti della quantità di dati raccolti, uniamo i puntini. Ebbene, non troviamo niente

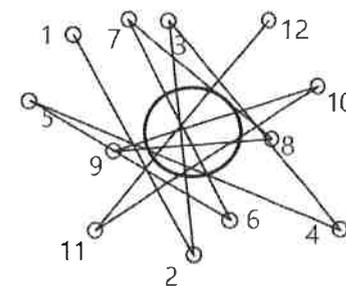


di interessante, esattamente come prima. Possiamo insistere, e infittire le nostre misure ancora di più, quante volte vogliamo. Scopriremo presto di non avere alcuna possibilità di identificare un barlume di traiettoria.

Si tratta di fatti sperimentali, confermati da un numero ormai enorme di dati e osservazioni, raccolti da un secolo a questa parte. Dobbiamo farcene una ragione: la realtà delle cose è diversa da come ce la aspettavamo. E sta cercando di dirci qualcosa. Che cosa?

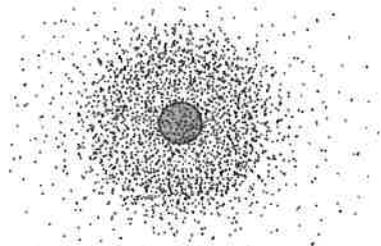
Sembra che ogni volta che facciamo una misura, l'elettrone prenda forma, o, meglio, "prenda posizione", in un certo punto di sua scelta. Letteralmente! Sembra che decida lui dove apparire a noi! È come se, tra una misura e la successiva, per esempio tra 1 e 2, cessi di esistere, diventi virtuale e ubiquo: come se fosse ovunque e da nessuna parte. Quando facciamo la seconda misura, è in grado di prendere forma "ovunque lui voglia", per esempio nel punto 2, un punto qualunque, senza alcuna relazione col punto 1. Sottolineiamo ancora, perché a molti lettori può apparire incredibile, che sembra "decidere lui" dove apparire ai nostri occhi! Qualunque sforzo facciamo, qualunque escamotage ci facciamo venire in mente, non sembra esserci nulla da fare: non riusciamo a prevedere quel punto in anticipo, men che meno a determinarlo. Non ci sogniamo nemmeno di sceglierlo noi, quel punto, per poi comandare all'elettrone di obbedire alla nostra volontà. Dobbiamo arrenderci, e limitarci a fare da spettatori.

Dopo che abbiamo compiuto la seconda misura, cioè tra la seconda e la terza, quando nessuno lo sta guardando, o, meglio, quando l'elettrone non è in interazione con alcun oggetto macroscopico, esso ritorna libero, immateriale e ubiquo. Possiamo dire che vaga per tutto lo spazio, oppure che è spalmato ovunque. Oppure possiamo dire che non è da nessuna parte, che non esiste nemmeno. Successivamente, nel momento in cui facciamo la terza misura, lo troviamo in un altro punto ben definito, il punto che abbiamo chiamato 3. Ma deciderà lui, sempre

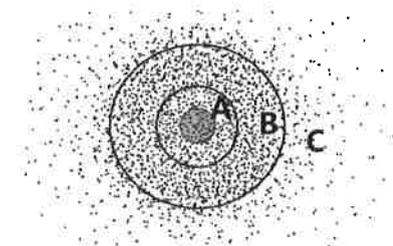


e comunque, dove apparire. Qualcuno potrebbe dire: bene, se le cose stanno così, possiamo chiudere con la fisica. Visto che non possiamo fare nessuna predizione, a che serve studiare la natura? Pensavamo di essere i dominatori del mondo, e scopriamo di punto in bianco di dover fare da spettatori passivi. Che cosa sta succedendo?

In realtà, qualcosa che possiamo dire c'è. Se facciamo tante osservazioni successive, cioè tante misure della posizione dell'elettrone, e rinunciamo all'esercizio di unire i puntini, limitandoci invece a prendere nota di tutte le posizioni che misuriamo, l'immagine che otteniamo è quella mostrata qui, in sezione. Vediamo il protone al centro e poi tanti punti intorno. Cominciamo a identificare una qualche specie di figura.



Dalla densità dei punti capiamo, per esempio, che è molto più probabile trovare l'elettrone in una certa calotta sferica B, e meno probabile trovarlo a distanze maggiori o minori dal centro.



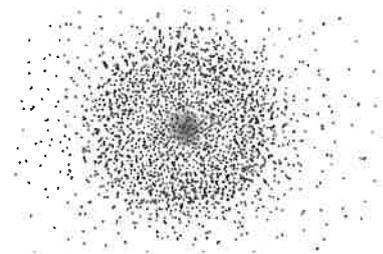
Chiamiamo A la zona più interna, e C la zona più esterna. Supponiamo che la zona B abbia il 40% di probabilità di essere scelta. Ciò vuol dire che se facciamo, per esempio, mille misure della posizione dell'elettrone, lo troveremo in quella zona nel 40% dei casi, cioè 400 volte. Questo è qualcosa che riusciamo a prevedere. Invece, se facciamo una singola misura, non sappiamo prevedere dove andrà l'elettore in quel caso particolare, cioè se apparirà in A, in B o in C.

La situazione più comune che possiamo prendere come esempio per spiegare questo tipo di comportamenti è quella offerta dai sondaggi. Supponete che A, B e C siano tre opinioni differenti, su una data questione, e fate un sondaggio per capire quante persone si riconoscono in ciascuna di esse. Supponete che il risultato del sondaggio dica che l'opinione B è condivisa dal 40% delle persone. A questo punto potete prevedere che, se andate in giro a chiedere l'opinione, sulla stessa que-

stione, di un certo numero di persone, diverse da quelle intervistate per il sondaggio, il 40% vi dirà B. Se le persone a cui vi rivolgete sono mille, saranno circa 400 a rispondere B. Questo è qualcosa che potete effettivamente prevedere, forti del sondaggio che avete fatto preventivamente. Se, però, chiedete a una sola persona, non inclusa tra quelle che avete già intervistato, quale sia la sua personale opinione sulla questione, non sarete in grado di prevedere quale risposta vi darà: il sondaggio non vi è di alcun aiuto. In altre parole, la predizione permessa dal sondaggio è soltanto di tipo collettivo.

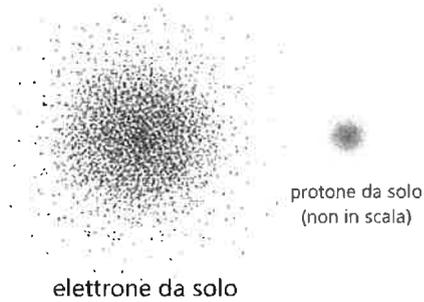
Similmente, nel caso dell'elettrone appartenente all'atomo di idrogeno, e, più in generale, in tutti i fenomeni che coinvolgono i quanti (che non abbiamo ancora definito, perché vogliamo procedere per gradi), voi potete soltanto prevedere che, se fate mille misure, il 40% darà, per esempio, un certo tipo di risultato. Tuttavia, se fate una sola misura non potete prevedere nulla, perché in una sola misura è l'elettrone stesso che "decide" quale posizione prendere, dove "materializzarsi". Voi non potete né ordinarli che cosa fare, né anticipare, o prevedere, che cosa lui farà. In più, se fate misure di posizione ravvicinate nel tempo, non troverete nessuna apparente relazione tra di loro. Così come non c'è nessuna relazione tra la risposta di un intervistato e la risposta dell'intervistato successivo, nel caso del sondaggio.

Finora abbiamo messo il protone al centro e l'abbiamo ignorato, ma possiamo correre subito ai ripari. Per il protone vale qualcosa di simile a ciò che abbiamo detto riguardo all'elettrone. Anche il protone non ha una posizione ben definita. La differenza è che, se andate a misurare tante volte la sua posizione, troverete che il protone "vaga" in una zona molto più circoscritta di quella coperta dall'elettrone. Cioè, se immaginate ciascuna di queste particelle, il protone e l'elettrone, come sparpagliata, smaterializzata, in una propria "nuvola", simile alle nuvole di punti descritte prima, dovete concludere che la nuvola nella quale si concentra il protone è molto, ma molto più piccola di quella in cui si distribuisce



l'elettrone.

Ogni particella, presa singolarmente, è descritta da una propria "nuvola". Si riscontra che la grandezza di quella nuvola, cioè il suo raggio medio, è inversamente proporzionale alla massa della particella. Sic-



come il protone è circa duemila volte più pesante dell'elettrone, la nuvola del protone ha un raggio medio duemila volte più piccolo del raggio medio della nuvola dell'elettrone. Il raggio medio di cui parliamo si chiama "lunghezza d'onda Compton". Il fatto che la lunghezza d'onda Compton sia inversamente proporzionale alla massa spiega perché il protone "vaga" in una zona molto più circoscritta di quella in cui vaga l'elettrone.

È sempre meglio parlare di raggio "medio", perchè la nuvola di una qualunque particella si estende ovunque, strettamente parlando, cioè in tutto l'universo. Il raggio medio che interessa il nostro discorso è quello della zona dove i punti sono più concentrati, che è poi la zona dove è più probabile trovare la particella quando la andiamo a cercare.

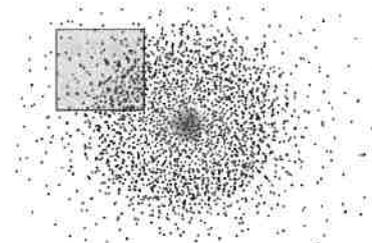
Quanto detto vale nel caso di "particelle libere", cioè particelle prese separatamente. Vedremo poi che, nel momento in cui l'elettrone diventa parte dell'atomo di idrogeno, la nuvola del protone rimane praticamente invariata, mentre la nuvola elettronica "si gonfia" parecchio, per cui la zona in cui "vaga" l'elettrone che fa parte di un atomo di idrogeno è molto più estesa di quella in cui vaga un elettrone da solo.

In questa lezione abbiamo cominciato a farci un'idea, per quanto ancora vaga, di cosa "siano" davvero l'atomo, l'elettrone, il protone. Le nuvole di cui stiamo parlando sono tutto ciò che osserviamo. E non è nemmeno vero che quelle nuvole "esistano", perché sono solo probabilità di trovare qualcosa quando andiamo a cercarla. Così come non possiamo dire che un sondaggio sia qualcosa che "esiste", perché è soltanto un sondaggio, appunto, e, in quanto sondaggio, "sonda" qualcos'altro. Non possiamo dire disinvoltamente che "esiste" un atomo, fatto in un

certo modo, per quanto diverso da come ce lo immaginavamo prima. Sembra che ciò che "è" si disfi e ricrei continuamente, e decida seduta stante come e dove materializzarsi, senza ricevere ordini, senza cause o creatori. Questo ci fa capire che dobbiamo procedere con molta cautela. Cominciamo a intuire quanto sconvolgente sia il mondo dei quanti, che poi è il nostro mondo, perché noi siamo fatti di quelli? Allacciamo le cinture, perché questo è solo un assaggio di ciò che ci aspetta.

2 Polvere di particelle

Nella prima lezione abbiamo parlato dell'atomo. In questa ci concentriamo sulle particelle elementari. Avevamo descritto l'atomo come una nuvola al centro, che rappresenta il protone, e poi una nuvola molto più grande, sparpagliata intorno, che rappresenta l'elettrone. Che cosa sono queste nuvole? Non stanno a dirci che le particelle sono polverizzate, ma danno l'idea che tra due osservazioni successive le particelle non esistono. Esse prendono forma ogni volta che noi le osserviamo. Dove prendono forma, però, lo decidono loro. Noi possiamo soltanto prevedere qual è la probabilità che prendano forma in una certa zona. Questa probabilità è ben raffigurata dalle nuvole che abbiamo introdotto. Per esempio, se ci chiediamo quale sia la probabilità che l'elettrone appaia all'interno del quadrato che appare qui sotto, o un cubo, in tre dimensioni, basta che contiamo il numero di punti della nuvola che stanno all'interno di quel quadrato, o cubo, e lo dividiamo per il numero dei punti totale. Se vogliamo sapere qual è la probabilità che l'elettrone appaia all'interno della corona sferica B di prima, facciamo la stessa cosa, cioè dividiamo il numero di punti che stanno all'interno della corona per il numero di punti di totale. Se ci chiediamo qual è la probabilità di trovare il protone, non l'elettrone, nello stesso quadrato considerato sopra, invece, questa è talmente bassa che possiamo dire che è praticamente zero, perché la nuvola del protone è concentrata al centro. Praticamente, tutti i punti della nuvola del protone stanno fuori dal quadrato in questione.



zioni, basta che contiamo il numero di punti della nuvola che stanno all'interno di quel quadrato, o cubo, e lo dividiamo per il numero dei punti totale. Se vogliamo sapere qual è la probabilità che l'elettrone appaia all'interno

interno della corona sferica B di prima, facciamo la stessa cosa, cioè dividiamo il numero di punti che stanno all'interno della corona per il numero di punti di totale. Se ci chiediamo qual è la probabilità di trovare il protone, non l'elettrone, nello stesso quadrato considerato sopra, invece, questa è talmente bassa che possiamo dire che è praticamente zero, perché la nuvola del protone è concentrata al centro. Praticamente, tutti i punti della nuvola del protone stanno fuori dal quadrato in questione.

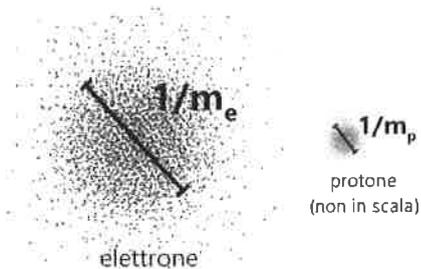
Ciò non vuol dire che la probabilità di trovarlo nelle zone periferiche, come il quadrato indicato, sia assolutamente nulla, perché, strettamente parlando, le nuvole che descrivono le particelle sono sparpagliate ovunque, in tutto l'universo. Tuttavia, esse sono così poco dense nelle zone lontane, da poter considerare nulla, a tutti gli effetti pratici, la probabilità di trovare le particelle in quelle zone.

Quindi, ogni singola particella, presa separatamente, in questo caso un protone, o un elettrone, è descritta da una nuvola. Il protone è descritto da una nuvola piccola e densa, mentre l'elettrone è descritto da una nuvola molto più grande e rada. La grandezza di queste nuvole rappresenta qualcosa che è molto importante nella teoria dei quanti, cioè l'indeterminazione sulla posizione delle particelle stesse. L'indeterminazione si indica con δx , dove δ , o "delta", vuol dire appunto indeterminazione, oppure differenza, mentre x vuol dire posizione. L'impossibilità di misurare con precisione assoluta la posizione di una particella è una conseguenza del principio di indeterminazione che analizzeremo meglio nella prossima lezione. In ogni caso, il risultato è dato da una formula molto semplice. Praticamente, l'indeterminazione di cui stiamo parlando è il reciproco della massa:

$$\delta x \sim \frac{1}{m}$$

Quindi, nel caso del protone l'indeterminazione è $\sim 1/m_p$, dove m_p è la sua massa. Nel caso dell'elettrone è $\sim 1/m_e$, dove m_e è la massa dell'elettrone. Il simbolo \sim , davanti alle formule o al posto dell'uguale, vuol dire "circa", e significa che stiamo facendo una stima. Non ci interessano fattori numerici come 2, 3, pi greco, e altre costanti irrilevanti. Che poi sono le stesse sia per il protone che per l'elettrone, e quindi spariscono completamente nel confronto tra i due.

Pertanto, la formula ci dice che quanto più grande è la massa del protone, rispetto a quella dell'elettrone, tanto più piccola è la nuvola



associata al protone, rispetto a quella associata all'elettrone.

Misurare con precisione assoluta una grandezza, come la posizione x di una particella, o la distanza tra due particelle, o la lunghezza di una barretta, è praticamente impossibile. Associato ad ogni misura è un errore sperimentale, per cui dobbiamo sempre esprimere il risultato mediante un intervallo di valori, invece che un numero semplice, oppure con un certo valore numerico, seguito da *più o meno* il suo errore. Per esempio, nel caso della distanza tra due particelle, o della lunghezza di una barretta, avremo qualcosa come $15,4 \pm 0,2$ centimetri. Possiamo certamente sperare di aumentare la precisione dei nostri strumenti, in futuro, per ridurre la finestra di errore. Ma abbiamo appena imparato che, quando vogliamo determinare la posizione di una particella, esiste un limite minimo sotto il quale non potremo mai scendere, per quanto ci sforziamo di migliorare i nostri strumenti. Si tratta dunque di un limite *intrinseco*. Immaginare una posizione x con una precisione maggiore dell'incertezza δx ricavata finora *non ha nemmeno senso*. E allora, che senso ha la *posizione*?

Il raggio della nuvola del protone, molto piccolo, ha un nome particolare, perché si tratta di una unità di misura molto usata in fisica nucleare. Si chiama "fermi". Lo possiamo prendere anche come unità di riferimento. Rappresenta sostanzialmente "quanto è grande" il protone. Potremmo dire che è "il raggio del protone". Tuttavia, non è corretto, strettamente parlando, dire che la grandezza della nuvola rappresenta la grandezza del protone, visto che il protone non esiste nemmeno, quando noi non lo guardiamo (o "è guardato" per noi da qualche interazione con oggetti macroscopici, come un rivelatore). Essa rappresenta quanto è grande la zona in cui il protone ci può apparire nel momento in cui lo andiamo a cercare.

Quanto è piccolo un fermi? Basta pensare che se li mettiamo in fila, in un centimetro stanno 10000 miliardi di protoni. Si tratta dunque di una quantità molto, ma molto piccola. La nuvola dell'elettrone è duemila volte più grande di quella del protone, pari a circa 2000 fermi. La ragione è che la massa del protone è 2000 volte più grande della massa dell'elettrone.

A questo punto voi sapete che ogni particella si distribuisce nella sua nuvola di probabilità, quando non la osserviamo. Nel buio e silenzio cosmico in cui niente e nessuno la sta osservando, è libera di sparpagliarsi ovunque nell'universo, in un certo senso. Ma sapete anche che la nuvola non ha nessuna consistenza reale, perché è una nostra costruzione matematica, e rappresenta semplicemente la probabilità di trovare la particella in una data zona, qualora la andassimo a cercare. Quindi, potete anche dire che rappresenta l'indeterminazione, o incertezza, sulla posizione della particella stessa. La possiamo chiamare "nuvola di indeterminazione", o "nuvola di incertezza". Cercando sulle tavole la massa della particella che vi interessa, il neutrone, il muone, il tau, i quark, e così via, potete farvi un'idea di quanto sia grande la sua nuvola, facendone il reciproco.

Ci si può anche chiedere quanto sia grande la nuvola che descrive l'elettrone quando non è da solo, ma fa parte di un atomo. Lì le cose cambiano, perché l'elettrone non è preso singolarmente, ma sta interagendo coi protoni che stanno nel nucleo dell'atomo. La sua nuvola viene modificata, anche in maniera importante. Per esempio, si dirada nella zona centrale, la zona A incontrata prima. Strano, qualcuno potrebbe obiettare, perché cariche elettriche opposte, come quelle dell'elettrone e del protone, dovrebbero attrarsi, per cui ci si aspetterebbe il contrario, cioè che la nuvola si infittisca al centro, invece di diradarsi. E invece si dirada. Da una parte abbiamo la repulsione tra cariche elettriche, dall'altra abbiamo i principi della teoria dei quanti. Come vediamo già da questo esempio, prevalgono i secondi, al punto da costringere cariche opposte a "respingersi", in situazioni opportune.

Consideriamo ancora l'atomo di idrogeno. Siccome non abbiamo più due particelle separate, ma due particelle in interazione tra di loro, le formule date prima, che seguono dal principio di indeterminazione, e descrivono la grandezza delle nuvole associate alle singole particelle libere, prese separatamente l'una dall'altra, non valgono più. Però, ne valgono altre, non completamente avulse dalle prime. Per prima cosa, dobbiamo immaginare la nuvola interna, quella del protone, come praticamente indisturbata. Quella nuvola sarà influenzata così poco dalla

presenza del "piccolo" elettrone, da restare ancora quella che era prima, cioè quella del protone come particella libera. Invece, la nuvola dell'elettrone si espande, e di molto. A causa dell'interazione tra il protone e l'elettrone, la nuvola dell'elettore collocato all'interno dell'atomo di idrogeno cambia forma e si sparpaglia più lontano dal centro.

Quanto si ingrandisce? Anche questo è una conseguenza del principio di indeterminazione che vedremo meglio nella prossima lezione, e si può calcolare. Si trova che, quando l'elettrone è in interazione con il protone, l'indeterminazione sulla sua posizione non è più 1 diviso la sua massa, ma la stessa cosa moltiplicata per un fattore ulteriore, che tiene conto dell'interazione stessa. Questo fattore è uguale a 1 diviso α , dove α è la costante fondamentale che descrive non soltanto questa particolare interazione tra il protone e l'elettrone, ma tutte le interazioni tra cariche, magneti, campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici (che sono le oscillazioni dei due, e danno, tra le altre cose, la luce visibile e le onde con cui comunicano i telefonini), cioè: le interazioni elettromagnetiche. La costante α si chiama "costante di struttura fine" e il suo valore è il famoso 1 diviso 137 (circa). Ne ricaviamo dunque che l'incertezza sulla posizione dell'elettrone nell'atomo di idrogeno è data dalla formula

$$\delta x \sim \frac{1}{m \alpha} \sim \frac{137}{m}.$$

Pertanto, la nuvola dell'elettrone in interazione col protone, nell'atomo di idrogeno, è 137 volte più grande della nuvola dell'elettrone libero, che a sua volta è 2000 volte più grande di quella del protone (libero o interazione, perché la sua nuvola, come abbiamo visto, non cambia di tanto). Alla fine, la nuvola dell'atomo di idrogeno (che è, sostanzialmente, quella del suo elettrone) è 137×2000 volte, cioè circa centomila volte più grande di quella del protone. Questa quantità, pari a 100 mila fermi, è la scala di grandezza fondamentale della fisica atomica e molecolare, detta Angstrom. E siccome la nuvola elettronica è ciò che più contribuisce al "volume" dell'atomo, possiamo anche dire che il raggio dell'atomo di idrogeno, che si chiama *raggio di Bohr*, è pari a 1 Angstrom.

I fatti riportati finora ci danno una prima idea di cosa sono, e come

sono da intendere, le particelle elementari: da sole, separatamente una dall'altra, oppure quando sono in interazione tra loro. Gli effetti dell'interazione sono importanti, perché, come abbiamo visto, possono cambiare la situazione completamente. Per esempio, possono costringere le nuvole a sparpagliarsi, magari di parecchio, come nel caso dell'elettrone nell'atomo di idrogeno. L'importante è che questi cambiamenti si possono prevedere e calcolare. Sono quindi quantità che possiamo controllare grazie alle leggi fisiche della teoria dei quanti.

Non si può invece controllare, e su questo dobbiamo insistere molto, perché si tratta di qualcosa di inaspettato e sotto molti aspetti sconvolgente, dove apparirà la singola particella quando la andremo a cercare. Possiamo soltanto prevedere con quale probabilità apparirà in una certa zona, che è poi quello che ci dice la nuvola. Questo è il motivo per cui introduciamo queste famigerate nuvole, anche se non sono "niente di reale". Se facciamo mille osservazioni, o un miliardo di osservazioni, possiamo prevedere statisticamente quante volte la particella apparirà in una certa zona di nostro interesse, e quante volte apparirà in un'altra. Tuttavia, se facciamo una singola osservazione non potremo mai prevedere dove vedremo il segnale della presenza della particella. Non potremo mai ordinare alla particella che cosa fare, perché l'evento quantistico elementare è un evento senza causa. In un certo senso, è l'evento causante e non causato. Questo ci deve far riflettere.

Siamo abituati a parlare di cause, comunemente. Classifichiamo gli eventi come cause di qualcosa, o effetti di qualcos'altro. Questa maniera di procedere non sembra crearci particolari problemi, nella vita quotidiana. Anzi, sembra funzionare molto bene, al punto da farci pensare che tutti gli eventi dell'universo, non soltanto quelli che accadono intorno a noi, abbiano delle "cause". Ma dobbiamo alla fine fare i conti con la teoria dei quanti, che ci dice esattamente il contrario. La catena delle cause, in sostanza, a un certo punto, ogni tanto, o forse più che ogni tanto (per ora lasciamo questo aspetto in sospeso), deve rompersi, per forza.

A livello del mondo macroscopico che ci circonda, possiamo dire che ogni evento è causato da un evento precedente, perché così ci ap-

pare. Ma allora dovremmo anche dire che ogni evento macroscopico, cioè ogni evento che avviene alle nostre scale di grandezza, è originato da una combinazione di eventi "più piccoli", e che gli eventi più piccoli sono a loro volta causati da combinazioni di eventi ancora più piccoli, e che gli eventi ancora più piccoli sono a loro volta causati da eventi ancora più piccoli, finché ad un certo punto arriviamo al livello dell'atomo, dove gli eventi non sono causati per niente. A quel punto ci accorgiamo che la causa prima non esiste, perché finiamo nell'evento quantistico, che è causante e non causato. Siccome anche noi siamo fatti di atomi, e anche le cellule del nostro cervello sono fatte di atomi, le nostre stesse decisioni alla fine non hanno una causa prima, ma sono degli eventi quantistici.

Alla fine, la teoria dei quanti ha, in un certo senso, "la testa tra le nuvole". Parla di nuvole, studia le nuvole, ci spiega come sono fatte, come cambiano interagendo tra loro... E allora, cos'è la nuvola di un tavolo? E la nuvola di noi stessi? Quanto sono grandi? La risposta la sappiamo già, perché ce la fornisce la stessa formula di prima: la grandezza della nuvola è il reciproco della massa. Così, la nuvola di una particella di pulviscolo di massa pari a un grammo è un miliardo di miliardi di miliardi di volte più piccola (non più grande: più piccola!) della nuvola di un elettrone, perché, per fare un grammo ci vogliono, appunto, un miliardo di miliardi di miliardi di elettroni. La nuvola del pulviscolo è molto, ma molto più piccola della più piccola distanza mai misurata da noi umani! Non esistono nemmeno strumenti per misurare distanze così piccole. Non sappiamo nemmeno se abbia senso parlare di distanze, a quelle distanze! Non siamo certi che "esistano" davvero distanze simili.

Ecco perché non ci accorgiamo di nulla intorno a noi: le nuvole di indeterminazione degli oggetti macroscopici sono molto più piccole degli oggetti stessi. Questo ci dà l'impressione della stabilità della realtà che ci circonda. Tanto, appunto, che costruiamo tutto il nostro pensiero su questa presunta stabilità. Con tutte le difficoltà che scorciatoie come queste si portano dietro, come vedremo.

3 Il principio di indeterminazione

Ora parliamo in dettaglio del principio di indeterminazione, formulato per la prima volta da Werner Heisenberg nel 1927. Esso è il cuore di tutta la teoria dei quanti, e quantifica appunto ciò che non possiamo determinare. Anzi, è più corretto dire: quantifica ciò che non è determinato. Infatti, non si tratta di una impossibilità nostra, cioè, di una limitazione delle nostre capacità, ma proprio di una indeterminazione intrinseca della realtà stessa, della natura. Precisamente, non si tratta di qualcosa che esiste, ed è determinato, ma non è determinabile da noi, quindi non è conoscibile da noi. Si tratta, invece, di qualcosa che non è determinato in sé, e quindi "non è". Qualcosa che non si può vedere, o determinare, perché davvero non c'è, non esiste. Se fosse visibile, se fosse possibile vederlo, sarebbe determinato "in sé", e forse un giorno potrebbe diventare determinabile anche da noi. Quello che dice il principio di indeterminazione è che c'è un limite oltre il quale la realtà non è determinata, quindi "non esiste nemmeno", cioè, è indeterminata di per se stessa.

Il principio si esprime nella maniera seguente. Indichiamo con δx l'indeterminazione sulla misura della posizione di un oggetto, dove δ , delta, lo ricordo, vuol dire "differenza". Possiamo immaginare δx come l'errore che facciamo quando cerchiamo di misurare con precisione la posizione di ciò che osserviamo. Tuttavia, dobbiamo tenere presente che, come abbiamo già anticipato, non abbiamo a che fare *soltanto* con un errore sperimentale, dovuto a una limitazione dei nostri strumenti,

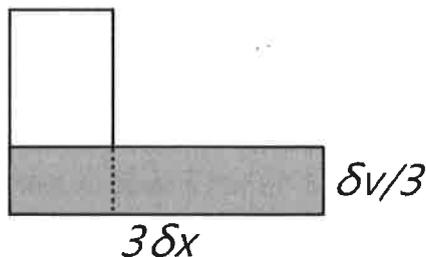
ma anche con un errore *intrinseco* invalicabile. Se vogliamo essere più precisi, possiamo dire che δx è l'errore sperimentale minimo che potremo mai commettere, nella misura della posizione, per quanto insistiamo a migliorare la nostra strumentazione, da qui all'eternità.

Similmente, indichiamo con δv l'indeterminazione sulla velocità di una particella. Il principio di indeterminazione dice che il prodotto delle due è una costante:

$$\delta x \cdot \delta v \sim \text{costante.}$$

Significa che, se volete misurare con precisione la posizione, cioè ridurre δx , pagherete un prezzo molto caro, perché avrete una maggiore incertezza δv sulla misura della velocità, e viceversa.

Disegniamo un rettangolo avente l'indeterminazione sulla posizione come base e l'indeterminazione sulla velocità come altezza. Il principio dice che l'area del rettangolo deve rimanere costante. Per esempio, se aumentiamo la precisione sulla misura della velocità, riduciamo il lato verticale. Questo finisce per aumentare il lato orizzontale,



perché l'area della zona bianca qui sopra deve essere uguale all'area della zona grigia qui di fianco. Così facendo, aumentiamo l'imprecisione sulla posizione. Nel caso della figura, abbiamo aumentato di tre volte la

precisione sulla velocità, cioè ridotto la sua imprecisione di un fattore 3. Questo ha aumentato di un fattore 3 l'imprecisione sulla posizione.

"Quanto" vuol dire "quantità minima indivisibile". Può riferirsi a un'energia, un impulso, un angolo, una lunghezza, un'area, o quello che volete voi. Una grandezza che non può essere divisa all'infinito senza scontrarsi con la sua quantità minima indivisibile si dice "quantizzata". Per esempio, i rettangoli descritti sopra sono quantizzati. Per la precisione, la loro area lo è. Essa non può essere ridotta arbitrariamente. Si tratta della cella fondamentale impenetrabile oltre la quale la realtà non

esiste. Essa ci fornisce un'illustrazione plastica dell'essenza del quanto. Ecco: quella cella fondamentale, quel rettangolo, "è" il quanto, se volete.

Per quanto sia difficile da digerire, dentro la cella la realtà non esiste. Ma allora verrebbe da chiedersi anche: esiste veramente, la realtà, fuori da quella cella fondamentale? E che cosa vuol dire "realtà", a questo punto? E cosa vuol dire "esistere"? E "non esistere"? Non possiamo mettere il carro davanti ai buoi e rispondere subito a queste domande, perché le risposte risulterebbero a questo livello incomprensibili. Vale la pena, però, rassicurare il lettore che se avrà pazienza di seguire il percorso di questo libro conoscerà le risposte a questo, come a moltissimi altri interrogativi.

La costante che sta a destra della formula scritta sopra non è una costante universale, ma la si può rendere subito una costante universale, o legare a una costante universale, moltiplicando entrambi i membri per la massa m della particella. Otteniamo così

$$\delta x \cdot \delta p \sim \text{costante universale} = \frac{\hbar}{2},$$

dove il prodotto $p = m \cdot v$ tra la massa m e la velocità v si chiama "impulso" della particella, mentre \hbar (che si legge "acca tagliato"), è la costante universale a cui volevamo ridurre, detta costante di Planck¹. L'utilità di introdurre grandezze fatte di combinazioni di altre, come l'impulso, sta nella semplificazione che ci permettono di ottenere, e nel fatto che ricorrono spesso nelle formule e nelle leggi fisiche. Per esempio, l'impulso ci permette, come stiamo spiegando, di esprimere il principio di indeterminazione in maniera universale, cosa impossibile con la velocità.

Per la precisione (parola impegnativa, nel mondo dei quanti...), la formula rigorosa del principio di indeterminazione è espressa da una disuguaglianza, cioè

$$\delta x \cdot \delta p \geq \frac{\hbar}{2},$$

¹ Notiamo che, siccome non c'è alcuna incertezza (per quanto ne sappiamo oggi) sulla massa di una particella, da $p = m \cdot v$ segue che l'indeterminazione δp sull'impulso non è altro che l'indeterminazione δv sulla velocità moltiplicata per la massa: $\delta p = m \cdot \delta v$.

il ché vuol dire che possiamo sempre fare peggio di quanto detto finora, ma mai meglio: il prodotto tra l'incertezza sulla posizione e l'incertezza sull'impulso è sempre *almeno uguale* alla costante universale $\hbar/2$, ma può anche essere maggiore.

La disuguaglianza appena scritta è così universale da valere anche per la luce. La luce è fatta di quantità fondamentali indivisibili, chiamate fotoni, o "quanti di luce". I fotoni viaggiano tutti alla stessa velocità, la velocità della luce, appunto, solitamente indicata con c , che vale circa 300 mila chilometri al secondo. I fotoni, inoltre, non hanno massa, cioè la loro massa m è uguale a zero, per cui se il loro impulso fosse il prodotto $p = m \cdot c$ della loro massa per la loro velocità, esso sarebbe uguale a zero, e la relazione di indeterminazione scritta sopra non avrebbe alcun senso. Invece, la disuguaglianza vale anche per la luce, a patto di tenere conto che l'impulso p del fotone è definito in un altro modo.

Occorre ricordare che la luce è anche un'onda e che a un'onda è associata una frequenza f . Se avete un puntatore laser, potete leggere la frequenza f sull'adesivo incollatoci sopra: da essa dipende il colore del raggio emesso, rosso o verde. L'impulso p di un fotone non è altro che la sua frequenza, a parte costanti universali non importanti ai fini del nostro discorso (per la precisione, $p = f \cdot 2\pi\hbar/c$). L'energia del fotone è uguale al prodotto tra il suo impulso e la sua velocità: $E = p \cdot c = f \cdot 2\pi\hbar$.

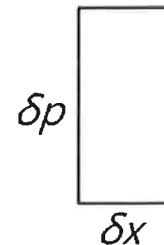
Questi dettagli ci interessano fino a un certo punto. Ricordarli qui, seppur brevemente come abbiamo fatto, ci serve soltanto a fissare nella mente una cosa importante, cioè che nel mondo dei quanti non abbiamo difficoltà a mettere la luce e la materia sullo stesso piano, entro certi limiti. Se vogliamo, possiamo chiamare "quanto fondamentale dell'elettrone" la quantità minima indivisibile "di elettrone", che è l'elettrone stesso. Non ce n'è bisogno, ovviamente, visto che la parola elettrone già rende l'idea. L'elettrone, infatti, è una delle particelle elementari. Pertanto, è per sua natura indivisibile (per quel che ne sappiamo oggi). Invece, nel caso della luce, abbiamo bisogno di una parola nuova, come la parola fotone, perché se diciamo "luce" non intendiamo certo la sua quantità minima indivisibile. Anzi, non è nemmeno ovvio che esista una quantità minima indivisibile di luce. Si tratta di un fatto, sperimenta-

mente vero, come è un fatto che esiste l'elettrone.

Alla fine, il principio di indeterminazione enunciato sopra è universale. Per il resto, possiamo passare sopra un sacco di dettagli. Per esempio, possiamo omettere ovunque i fattori universali incontrati finora (c , \hbar , π ...). Che è poi qualcosa che noi fisici facciamo spesso e volentieri, per semplificarci la vita. Tipicamente, ridefiniamo l'unità di lunghezza (da chilometro ad anno luce) e l'unità di tempo (da secondo ad anno), in modo che la velocità c della luce venga uguale a 1: invece che 300 mila chilometri al secondo, abbiamo un anno luce all'anno, cioè 1, appunto. Si tratta di convenzioni diverse per esprimere la stessa quantità. Similmente, possiamo ridefinire l'unità di energia in modo che la costante di Planck \hbar venga uguale a 1, in modo da liberarcene. E così via. In quanto ai fattori matematici, come π , tendiamo a ridefinire tutte le grandezze, come la costante di struttura fine α già menzionata, e riscrivere tutte le formule, in modo da farli circolare il meno possibile.

Quello che non possiamo *mai* fare con questi giochetti, e qui casca l'asino, è ridefinire le grandezze in modo che \hbar venga uguale a zero, che poi vorrebbe dire spegnere, far sparire completamente, tutti gli effetti quantistici. E non possiamo nemmeno fare in modo che la velocità della luce c venga infinita. Queste sono le cose che non possiamo cambiare. In particolare, l'indeterminazione appena incontrata non è qualcosa di cui ci possiamo liberare, anzi.

Se i fattori appena considerati sono secondari, la massa invece è importante, quando non è nulla, perché cambia da particella a particella, per cui la maniera più generale di esprimere il principio di determinazione non è quella che coinvolge la posizione e la velocità, ma quella che coinvolge la posizione e l'impulso. E allora è meglio riconsiderare il rettangolo di prima, che aveva lati δx e δv , e sostituirlo con un rettangolo di lati δx e δp , in modo da ottenere la vera *cella universale di indeterminazione*. Così facendo, ci caliamo nel cuore della "meccanica quantistica", la teoria dei quanti. Stiamo scendendo a poco a poco nell'abisso, dove potremo capire tutto ciò che ci circonda. E dove, soprattutto, capiremo finalmente



che finora non avevamo capito niente.

Il limite invalicabile rappresentato dall'area della cella universale di indeterminazione, lo ripetiamo ancora una volta, non è l'errore sperimentale, non è una limitazione pratica dei nostri strumenti: se così fosse, non avrebbe nulla di universale. L'indeterminazione quantistica, invece, è un'impossibilità universale ed intrinseca, cioè un'impossibilità *di principio*, codificata nella disuguaglianza studiata in questa lezione. Essa caratterizza tutta la natura, cioè la natura in quanto tale, la "realtà" stessa, qualunque cosa voglia dire questo termine. Ci sta dicendo qualcosa, ci dà un'informazione cruciale sulla natura. All'interno di quella cella, dove appunto la realtà non esiste, la realtà *successiva* può essere, in un certo senso, creata seduta stante, perché il fenomeno quantistico è un fenomeno di creazione. Ed è evidente che la creazione non può essere osservata in divenire, perché nel momento in cui osservate qualcosa, quel qualcosa deve esistere già, deve già essere determinato. Ma se è già determinato, non sta *per essere* creato, perché è *già* stato creato.

Abbiamo visto il principio di indeterminazione all'opera quando abbiamo quantificato la grandezza delle nuvole di probabilità associate alle particelle elementari. Abbiamo spiegato che quando andiamo a rivelare una particella, cioè a cercarla con uno strumento adatto allo scopo, un rivelatore, non possiamo determinare la sua posizione con precisione. Esiste sempre un'indeterminazione minima. La possiamo ricavare dal principio enunciato in questa lezione, cioè dalla formula $\delta x \cdot \delta p \sim \hbar/2$. Supponiamo che la particella abbia una massa m non nulla. Dividendo per la massa, perché stavolta ci è utile tornare a lavorare con la velocità invece che con l'impulso, otteniamo

$$\delta x \cdot \delta v \sim \frac{\hbar}{2m}.$$

Lasciamo il circa, perché quella che facciamo adesso è una stima, basata su un ragionamento euristico.

È abbastanza semplice ricavare la stima cercata, perché se vogliamo l'incertezza minima sulla posizione, basta che inseriamo l'incertezza massima sulla velocità. E qual è l'indeterminazione massima sulla velocità di una particella? È ovviamente la velocità della luce, c , perché se

noi non sappiamo nulla sulla velocità di una particella, quella può avere qualunque valore tra 0 e la velocità della luce, ma non di più, perché nessuna particella può viaggiare più velocemente della luce. Siccome la velocità non può essere aumentata a piacere, l'incertezza sulla posizione non può essere diminuita a piacere, per cui esiste una scala di grandezza minima, una minima distanza, sotto la quale non potete determinare la posizione di una particella. Per calcolarla basta mettere δv uguale alla velocità della luce c nella formula scritta sopra, per cui alla fine avremo

$$\delta x \sim \frac{\hbar}{2mc}.$$

Quindi: la larghezza δx della nuvola associata a una particella elementare, presa da sola, è uguale a una costante universale divisa per la massa, come dicevamo nell'altra lezione. Anche se il ragionamento che abbiamo fatto è euristico, il risultato che abbiamo ottenuto è valido in tutti i casi in cui la particella ha una massa non nulla (escludendo, quindi, il fotone).

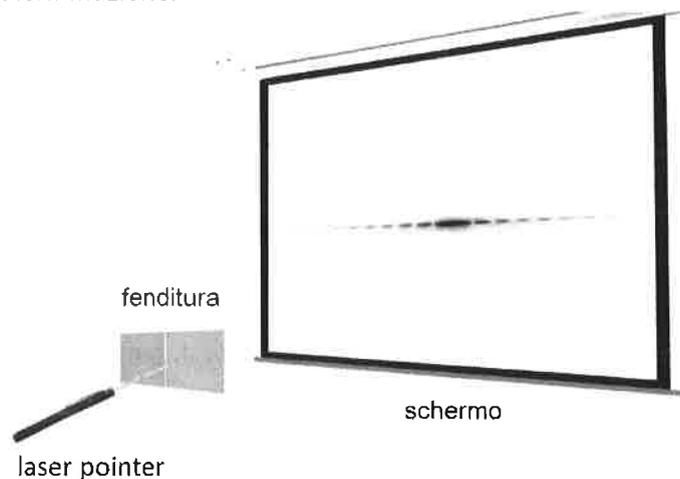
Adesso descriviamo un esperimento che potete fare anche a casa vostra, e che ci aiuta ad apprezzare meglio il principio di indeterminazione dal punto di vista quantitativo. Consideriamo uno di quei puntatori laser che si trovano comunemente in commercio. Essi generano un fascio di luce molto collimato, che persiste come tale anche a grandi distanze. Ciò è possibile, proprio perché la natura intrinseca della luce, alla fine, è quantistica, cioè "corpuscolare". La luce è fatta di quanti fondamentali, i fotoni. Se così non fosse, si manifesterebbe a noi sempre come si manifesta quando accendiamo una lampadina, nel qual caso illuminiamo all'istante tutta la stanza, non un punto particolare. Illuminare invece un punto particolare, anche da molto lontano, è possibile grazie alla natura quantistica della luce.

Quando accendiamo il puntatore, vediamo un punto luminoso su uno schermo, o sul muro. Se facciamo passare quel fascio di luce, durante il tragitto, attraverso una piccola fenditura, la figura che vediamo sullo schermo cambia completamente. Una fenditura adeguata può essere costruita ritagliando, per esempio, due rettangolini di latta da una lattina di bibita, e avvicinandoli l'uno all'altro. L'unico accorgimento è di

tagliarli bene, e avvicinarli in modo tale che la loro distanza di separazione sia una frazione di millimetro, ma chiaramente visibile. In particolare, non devono toccarsi. Li possiamo tenere fermi con dello scotch ai lati, in modo da lasciare spazio nella zona intermedia, dove vogliamo far passare il raggio di luce.



Se l'apertura è sufficientemente stretta, quando il puntatore laser fa passare la luce attraverso la fenditura, sullo schermo si genera la figura che vedete qui sopra, che si chiama *figura di interferenza*². La fotografia è stata realizzata da me col cellulare, quindi anche voi potete ottenerla con poco sforzo. Qual è il significato di questa figura? Quello che vediamo ora sullo schermo è tutto tranne che il punto luminoso che vedevamo prima. A fornirci la spiegazione del fenomeno è ancora il principio di indeterminazione.



² L'interferenza tra due onde è la loro somma, detta anche *sovrapposizione*. Nel caso che stiamo considerando, in cui la fenditura è unica, si dovrebbe parlare, più precisamente, di *diffrazione*. Continueremo a usare la parola interferenza, perché la diffrazione non è altro che l'"autointerferenza" tra le varie porzioni in cui possiamo decomporre idealmente il raggio laser, se immaginiamo la fenditura come fatta di un insieme di fenditure più piccole.

Innanzitutto, diciamo che questo alternarsi di luce e buio è dovuto alla natura ondulatoria della luce, oltre che corpuscolare. Come, come? La luce può avere due o più nature, onda e corpuscolo? Come è possibile? Stiamo dicendo che il mondo quantistico è un mondo "schizofrenico"?

Per la verità, un'entità fisica può avere tutte le nature che vuole, visto che le sue "nature" non sono altro che *nostre* descrizioni verbali. Gli schizofrenici saremmo dunque noi, non la natura. In fondo, quando diciamo che la luce ha una doppia natura, stiamo "sentendo le voci"..., visto che è la nostra mente, e soltanto quella, che ci porta a usare una terminologia ambigua. E chi sente le voci, come si sa, dovrebbe farsi vedere, magari da uno bravo... Se non riusciamo a fare di meglio che usare una terminologia ambigua, non è con la natura che dobbiamo prendercela.

Precisato questo, proviamo ad abbozzare una descrizione per rendere la cosa un po' meno ostica, magari addirittura digeribile. Come può, una singola entità fisica, avere due o più nature? Meglio: perché *noi* siamo costretti ad attribuirgliene più di una? Occorre ricordare che in quelle celle fondamentali invalicabili, che sono protette dal principio di indeterminazione, la natura, la realtà, non è determinata, appunto, non esiste nemmeno, e quindi, se vogliamo insistere a dire che "esiste", ben sapendo che non esiste, è chiaro che dobbiamo accettare che possa essere tutto e il contrario di tutto allo stesso tempo. Una delle prime cose che si imparano, scendendo nel mondo dei quanti, è che alla natura interessa poco di quello che noi faticiamo a concepire, o a spiegarci, o a ricondurre a idee a noi più familiari. È come se la natura ci dicesse: "è un problema vostro, mica sono fatta per farmi capire da voi; e mica mi fermo ad aspettare che voi vi raccontiate la storia in modo da credere di averla capita". Se poi teniamo conto che non c'è nulla di familiare a noi nel mondo dei quanti, una doppia natura come quella onda-corpuscolo è davvero il minimo che possiamo pretendere di incontrare, come ostacolo, verso la comprensione di quel mondo. Ma voglio anche rassicurare il lettore che se crede di non capire quello che sta leggendo, vuol dire che è sulla strada giusta. Se, invece, crede di aver capito quello che sta

leggendo, allora sì che si deve preoccupare...

Mi spiego meglio. Il principio di indeterminazione non può che essere espresso con un linguaggio contraddittorio, perché se dico "non è possibile misurare contemporaneamente la posizione e la velocità di un elettrone con precisione arbitraria", sto facendo credere, ingannando, che quell'elettrone esista, che abbia una posizione e una velocità, e che io non possa determinarle entrambe con la precisione che voglio. In "realtà", non esiste un'entità "elettrone". Quello che noi facciamo è descrivere (a nostro uso e consumo) relazioni tra le nostre percezioni. Osservando una palla da biliardo, le relazioni tra le nostre percezioni ci suggeriscono qualcosa che il nostro cervello traduce con le parole: "esiste una palla da biliardo". Non succede altrettanto con l'elettrone. Le relazioni tra le nostre percezioni ci suggeriscono qualcosa del tipo: "se ci fosse un elettrone, in analogia con la palla da biliardo, non ne potrei misurare contemporaneamente la posizione e la velocità con precisione arbitraria. Ma, stando a quel che vedo, ci sta anche che questo fantomatico elettrone non esista nemmeno, e mi debba accontentare di percezioni dissociate: ora una posizione (posizione di cosa?), poi una velocità (velocità di cosa? non è dato sapere), e, ancora dopo, un mix di posizione e di velocità".

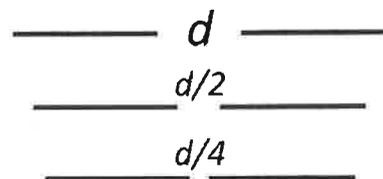
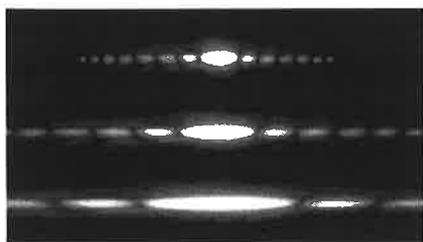
Insomma, non dobbiamo prendere il nostro racconto sul serio fino alla lettera. Occorre ripartire da zero, come quando nasciamo, apriamo gli occhi per la prima volta, e veniamo subissati da uno tsunami di percezioni nuove. Quello che vediamo, da neonati, è *tutto* nuovo. E allora cerchiamo, con fatica, di relazionare le percezioni in qualche modo, a nostro uso e consumo, coll'aiuto di qualche adulto che ci indirizza (o influenza?). Questa attività non equivale affatto a scoprire l'"esistenza" di una qualche sorgente di percezioni. Al massimo, ci può portare a imparare a ripetere il verbo "esistere" ogni qualvolta ci vogliamo far capire dai nostri simili. Il ché non assicura affatto che l'uso di quel verbo si possa disinvoltamente esportare a tutto l'universo. La teoria dei quanti ci rivela che il nostro stesso linguaggio è necessariamente contraddittorio, perché usa termini che non hanno senso fisico, come il verbo "essere".

È come se il principio di indeterminazione fosse esso stesso indeterminato. Come se tutta la teoria dei quanti, e in ultima analisi tutta la realtà, e il linguaggio con cui la descriviamo, fossero indeterminati. Del resto, come si può pretendere di determinare con precisione l'indeterminazione? Ecco perché, se credete di aver capito ciò che è, per definizione, incomprendibile, allora sì che dovete preoccuparvi. Più semplicemente, occorre rinunciare al ricondurre il nuovo a ciò che ci è familiare, e *resettarci* come un bambino che ha appena aperto gli occhi, accettando la novità di buon grado per ciò che è, appunto. Cioè il *nuovo*, il mai visto, non una "variazione sul tema" del vecchio. E poi, magari, ricapire quel che ci è familiare a partire dal nuovo. Insistere a fare il contrario, cioè capire il nuovo a partire da quel che ci è già familiare, è come mettere il carro davanti ai buoi. Se fosse possibile farlo, quel nuovo non sarebbe poi così nuovo. Ecco perché non mi impressiona più di tanto constatare che il tempo è relativo, invece che assoluto, o che lo spazio si incurva, invece che restare sempre piatto. Non abbiamo problema a descrivere le "novità", in quei casi, segno che non sono poi così grandi novità. Ma nel caso dei quanti, non si tratta di "essere così", invece che "essere cosà": si tratta di essere, non essere e non non-essere allo stesso tempo!

Tornando a noi, dobbiamo intendere "onda" e "corpuscolo" come descrizioni di comportamenti limite che possiamo più facilmente ricondurre a qualcosa che ci è familiare. Quando facciamo un esperimento, possiamo rendere manifesta una natura o l'altra della luce, ondulatoria o corpuscolare, e anche passare con una certa disinvoltura dall'una all'altra. Infatti, nell'esperimento che abbiamo descritto facciamo proprio questo: passiamo dalla natura corpuscolare, il punto luminoso che si manifesta senza la fenditura, alla natura ondulatoria, la figura di interferenza che si manifesta con la fenditura.

Ci possiamo chiedere come cambi la figura che vediamo sullo schermo quando facciamo delle varianti. Per esempio, possiamo aumentare o diminuire l'apertura della fenditura. I risultati che otteniamo in questo caso sono molto interessanti, perché ci danno una conferma quantitativa del principio di indeterminazione.

Indichiamo con la lettera d lo spessore iniziale della fenditura, cioè la distanza di partenza tra i rettangoli di latta. Nella parte destra della figura qui sotto, i due rettangoli di latta sono rappresentati, in sezione, da spessi segmenti neri. Nella parte sinistra vediamo le fotografie realizzate col cellulare in tre casi. Prendiamo come riferimento la figura che otteniamo nel primo caso, quando lo spessore è d . Nel secondo caso dimezziamo lo spessore da d a $d/2$, e vediamo che la figura si estende. Osserviamo che l'estensione è all'incirca doppia rispetto a prima. Nel terzo caso riduciamo l'apertura di un altro fattore 2, arrivando a $d/4$: l'estensione della figura di interferenza sullo schermo raddoppia ancora, e arriva a quattro volte l'estensione che avevamo osservato nel primo caso. Ciò suggerisce che il prodotto tra l'apertura della fenditura e l'estensione dell'immagine sullo schermo sia costante, che è proprio ciò che vuole il principio di indeterminazione.



Possiamo spiegare la figura di interferenza in due modi, usando le due nature della luce. Cominciamo dalla natura ondulatoria. Vediamo che l'intensità della luce è maggiore nel disco al centro. Esso è circondato da un'alternanza luce-buio, luce-buio, come richiede la natura ondulatoria della luce. Infatti, onde in opposizione di fase si sottraggono (buio), mentre onde in fase si sommano (luce), come succede per le onde acustiche, le onde sull'acqua, le vibrazioni di una corda. Da dove provengono le onde "diverse" che si sommano o sottraggono? Dai vari punti della fenditura. È vero che la fenditura è stretta, ma la luce che proviene dal centro della fenditura non è esattamente la stessa che proviene dalle zone vicine ai bordi.

D'altra parte, sfruttando la natura corpuscolare della luce, possiamo dire che le zone buie sono quelle verso le quali si dirigono pochi fotoni, mentre le zone illuminate sono quelle verso le quali si dirigono tanti fo-

toni. Quindi l'intensità della luce in una data zona è la *probabilità* che il fotone si diriga verso quella zona.

Come vediamo, non c'è una grande difficoltà a far coesistere due nature così diverse, come quella ondulatoria e quella corpuscolare. Anche perché sono solo *nostre* descrizioni, come abbiamo sottolineato.

Quello che ci interessa adesso è cercare la relazione che esiste tra l'apertura della fenditura ($d, d/2, d/4 \dots$) e l'estensione della figura di interferenza. Come riferimento, possiamo prendere, per esempio, l'estensione della grossa ellisse luminosa centrale, o la distanza del primo buio dal centro, oppure la distanza tra il primo buio e il secondo, la distanza tra il secondo buio e il terzo, ecc. Sono tutte misure adeguate dell'estensione della figura che vediamo sullo schermo. Per rimuovere ogni ambiguità, adotteremo l'estensione della grossa ellisse centrale.

Abbiamo osservato che, se riduciamo la distanza tra i due rettangoli di latta, la figura sullo schermo si allarga, si ingrandisce. Invece, se aumentiamo la distanza tra quei rettangoli di latta, la figura sullo schermo si restringe. Aggiungiamo che, se allarghiamo al massimo l'apertura della fenditura, in modo che tutto il raggio di luce le passi attraverso, alla fine vediamo soltanto un punto sullo schermo, che poi sarebbe il disco centrale. Quel punto non è altro che il punto che il puntatore laser ci mostra comunemente, quando non andiamo a stuzzicarlo con alcuna fenditura. Come si può spiegare quello che succede in presenza della fenditura?

Ebbene, sappiamo che il principio di indeterminazione ci dice che il prodotto tra l'indeterminazione sulla posizione e l'indeterminazione sulla velocità è "uno", cioè una costante, il cui valore non ci interessa nemmeno specificare. Nell'esperimento che abbiamo per le mani, l'indeterminazione sulla posizione è proprio l'apertura della fenditura, cioè la distanza tra i rettangoli di latta. Infatti, siccome stiamo costringendo il fotone a passare attraverso quella apertura, quando la restringiamo lo costringiamo anche a "prendere posizione" con maggiore precisione, cioè gli facciamo acquistare una posizione più definita (in una fase ben precisa del suo tragitto verso lo schermo): restringiamo la sua "libertà di manovra" a quella apertura. Così, diminuiamo l'indeterminazione sulla sua posizione, riferita al momento in cui passa attraverso

quella fenditura. Sappiamo, infatti, che passa di lì. Sembra poco, ma non possiamo dire altro su dove "sia".

Vogliamo "tirare il fotone per la giacchetta" e fargli fare quel che vogliamo noi? Per esempio, costringerlo a passare attraverso una fenditura più stretta? E allora il fotone "si vendica". Come si vendica? Con una maggiore indeterminazione sulla velocità, come previsto dal principio di indeterminazione.

Ora, qualcuno può obiettare: sì, ma il fotone è luce, quindi viaggia alla velocità della luce, e la velocità della luce è una costante universale. Pertanto, non ci può essere alcuna indeterminazione sulla velocità, perché la velocità è data. È la famosa c , che tra l'altro abbiamo messo uguale a 1, con una scelta di convenzioni.

Questo è vero, però quello che è universale è soltanto il *valore* della velocità, non la sua *direzione*. Quando si parla di velocità, bisogna considerare non soltanto il suo valore, ma anche la direzione, perché, se voi state guidando la macchina, non vi interessa soltanto sapere quanto siete veloci, ma anche se state andando nella direzione giusta o in una direzione sbagliata. Pertanto, quello che succede è che se voi stringete, strozzate quell'apertura, il fotone si vendica *deviando*. Cioè: il valore della velocità rimane lo stesso, uguale a c , ma l'indeterminazione consiste proprio nel cambio di direzione della velocità. Quella deviazione fa sì che la figura sullo schermo si allarghi. Pertanto l'estensione della figura di interferenza, misurata per esempio dalla grandezza dell'ellisse luminosa al centro, è proporzionale a quella deviazione, cioè all'indeterminazione sulla velocità.

E allora, bingo! Non ci dice, il principio di indeterminazione, che il prodotto delle due indeterminazioni deve essere costante? Questo vuol dire che, come abbiamo trovato sperimentalmente, il prodotto tra la distanza che separa i due rettangolini di latta e lo spessore della zona luminosa centrale della figura di interferenza deve essere costante: se dimezziamo la prima, raddoppia il secondo; se dividiamo la prima per quattro, il secondo quadruplica, eccetera. Come infatti è chiaramente visibile e verificabile, almeno qualitativamente, con un semplice esperimento come quello che abbiamo descritto, e che chiunque può ripe-

tere a casa propria.

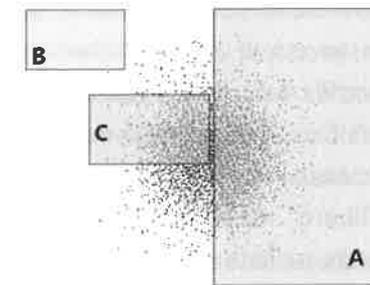
Il principio di indeterminazione fu ricavato poco più di un secolo fa, grazie ad esperimenti come questo. E così si scoprì che non c'era verso di costringere il quanto, in questo caso il fotone (ma potremmo anche prendere un atomo), a "stare in riga", cioè ad avere simultaneamente una posizione definita e una velocità definita. Nel momento in cui si cerca di costringerlo a prendere una posizione, esso "entra in agitazione", in un certo senso. Si agita quel tanto che basta a scrollarsi di dosso la nostra pretesa di dargli ordini. E si vendica scappando via, o deviando, come succede in questo caso. E ciò a dimostrazione del fatto che nella natura esistono celle fondamentali che non sono valicabili. Ci sono coppie di variabili, in questo caso posizione e velocità, o, meglio, posizione e impulso, che non sono determinabili allo stesso tempo con precisione arbitraria.

Ma, lo ripeto ancora, questo non vuol dire che al di sotto di quel limite la realtà esista, e non sia conoscibile da noi: la realtà, al di sotto di quel limite, non esiste proprio, perché non è determinata, ma deve determinare. Lo apprezzeremo meglio in seguito. Per ora ci accontentiamo di aver aggiunto un tassello alla nostra conoscenza sui quanti.

Concludiamo notando che, poiché si trattava di un fotone, avremmo dovuto applicare il principio di indeterminazione usando l'impulso $p = f \cdot 2\pi\hbar/c$, invece della velocità. Ma la conclusione non sarebbe cambiata, perché l'unica indeterminazione sull'impulso è dovuta alla sua deviazione, in quanto π , \hbar e c sono tutte costanti, e si può facilmente notare che non cambia neanche la frequenza f . Infatti, la frequenza determina il *colore* della raggio laser, che non cambia nel passaggio attraverso la fenditura. L'unico modo con cui il fotone può "farcela pagare", per aver cercato di imbrigliarlo in una fenditura, è allora deviando. Il principio di indeterminazione ci assicura che un modo per divincolarsi lo trova sempre....

4 Correlazione ed entanglement

Ora spieghiamo che cos'è la correlazione quantistica istantanea. Abbiamo visto che un atomo (o una particella, o un fotone), quando non è

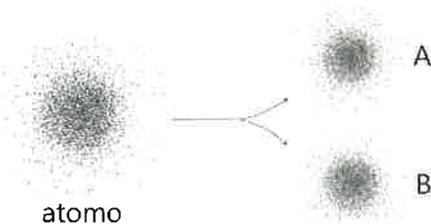


osservato, cioè tra un'osservazione e la successiva, è descritto da una certa nuvola che ha un'estensione corrispondente all'indeterminazione sulla sua posizione. La nuvola dà la probabilità di trovare l'atomo qualora lo andassimo a cercare. Vuol dire, per e-

sempio, che la probabilità di trovarlo nella zona A che vedete qui in figura è circa il 50%, perché la zona copre più o meno metà della nuvola. La probabilità di trovarlo nella zona B, come in qualunque zona lontana dal centro, è praticamente zero, perché la nuvola è talmente rada in quell'area, che finiamo per non disegnare nemmeno un punto al suo interno. In generale, la probabilità di trovare l'atomo in una certa area, come la zona C, è uguale al numero di punti di quella zona diviso per il numero di punti totali.

Riepilogando, l'atomo, tra un'osservazione e l'altra, quando non interagisce con alcun oggetto macroscopico, cioè un oggetto fatto di un gran numero di atomi, non esiste. Al suo posto introduciamo una certa nuvola, che poi è legata a quella che in termine tecnico si chiama "funzione d'onda", che ci permette di calcolare la probabilità di trovarlo in una qualunque zona, qualora lo andassimo a cercare in quella zona.

Ora, se l'atomo è descritto da una nuvola, è chiaro che può anche essere "tagliato", in due o più parti. Per esempio, sfruttando una proprietà dell'atomo di cui parleremo più tardi (lo *spin*), è possibile dividere in due la nuvola facendo passare l'atomo (o, meglio, la sua nuvola) attraverso una zona di campo magnetico: otteniamo così, al posto di una nuvola, due o più nuvole, che poi vuol sempre dire una nuvola unica, ma non più concentrata attorno a un unico centro, bensì attorno a centri diversi (due o più), in diverse zone dello spazio. Le due o più nuvole in cui viene suddiviso l'atomo possono essere distanziate quanto vogliamo.



Otteniamo quindi una configurazione in cui lo stesso atomo è "dislocato", cioè descritto da due o più nuvole, invece di una. Ma l'atomo è sempre unico! Non c'è contraddizione, perché, nella fase di cui stiamo parlando, l'atomo continua a "non esistere". Cioè: non è "sotto osservazione", non è ancora venuto in contatto con alcuno strumento di misura, o alcun oggetto macroscopico. È ancora "libero" nello spazio e nel cosmo. Vista l'importanza che questa fase riveste nella teoria dei quanti, le dobbiamo dare un nome: la chiameremo *virtualità*.

Chiamiamo A e B le due parti in cui abbiamo suddiviso la nuvola dell'atomo virtuale. Immaginatole lontane, anche chilometri, l'una dall'altra. Se sono più o meno uguali, vuol dire che, nel momento in cui andiamo a cercare l'atomo con dei rivelatori, avremo il 50% delle probabilità di trovarlo nella zona A e il 50% della probabilità di trovarlo nella zona B. Dove apparirà? Nella zona A, o nella zona B? Lo "deciderà lui". Non abbiamo tagliato veramente l'atomo, ovviamente. Abbiamo però tagliato la zona in cui sarà possibile rivelarlo.

Abbiamo così realizzato la *biforcazione quantistica*, che è il mattone

fondamentale della teoria dei quanti, a partire dalla quale possiamo comprendere più agevolmente la corrispondenza "uno a molti" tra le condizioni iniziali e il risultato finale di un esperimento. In questo caso, abbiamo una corrispondenza "uno a due", cioè due esiti possibili per la stessa configurazione di partenza. Similmente, l'esempio del puntatore laser e della fenditura, discusso nelle lezioni precedenti, realizzava la *multiforcazione* quantistica. Possiamo ottenere una multiforcazione anche come combinazione di più biforcazioni, ma non possiamo ottenere una biforcazione dall'assenza di biforcazione.

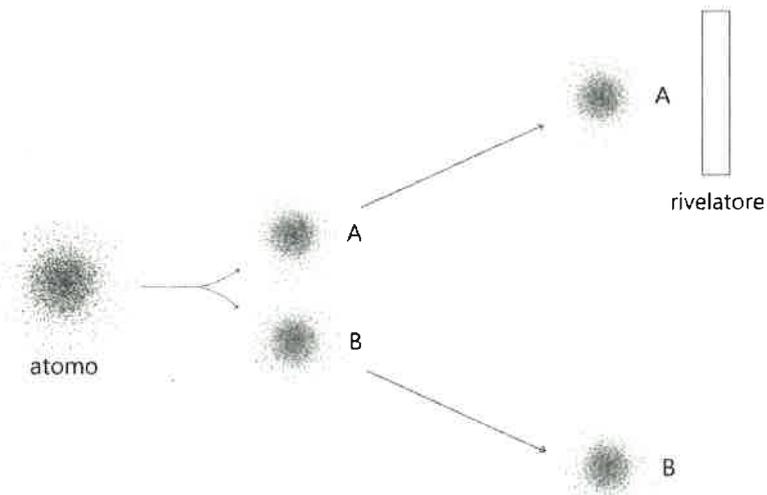
Le due nuvole A e B si dicono quantisticamente correlate, o "entangled". Cosa vuol dire "entanglement"³? Vuol dire che le nuvole sono "intrecciate", "aggrovigliate", cioè legate da una relazione molto particolare. Una relazione del tipo seguente: se succede qualcosa alla nuvola che sta nella zona A, automaticamente succede qualcosa anche alla nuvola che sta nella zona B, per quanto sia lontana. L'"informazione" si propaga dalla zona A alla zona B all'istante, cioè con velocità arbitrariamente alta. Quella velocità non è vincolata ad essere inferiore alla velocità della luce, perché la fase di cui stiamo parlando è ancora la fase virtuale, in cui l'atomo non esiste.

Specifichiamo che questo tipo di informazione, che non a caso abbiamo messo tra virgolette, non è un'informazione reale, ma un'informazione virtuale, e non può essere usata per trasferire informazione vera. Può dunque "viaggiare" a qualsiasi velocità, senza contraddire alcun risultato sperimentale osservato finora.

Facciamo un esempio. Mi trovo nella zona A, lontana ormai chilometri dalla zona B. Dispongo di uno strumento macroscopico che possa rivelare la presenza dell'atomo, cioè un rivelatore. Esso è molto più grande delle nuvole A e B (che sono comunque piccolissime, perché descrivono l'atomo). Quando la nuvola A attraversa lo strumento, essa si viene a trovare, per un certo tempo, all'interno del rivelatore. A quel punto, il rivelatore mi darà un segnale, che può essere di due tipi: 1) esso rivela l'atomo in un qualche punto del suo interno, tramite una scin-

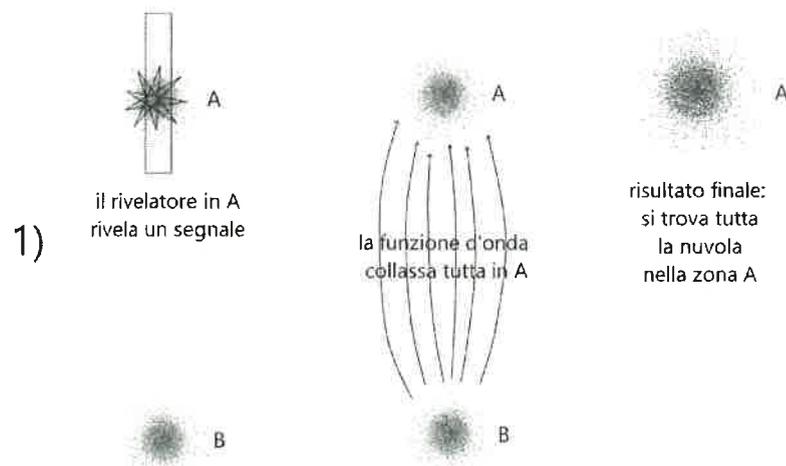
³ Di solito la parola "entanglement" si usa in riferimento a due particelle, una in A e una in B. Alla fine della lezione saremo più precisi su questo.

tilla, un'immagine, una traccia in un'emulsione; in quel caso sapremo che l'atomo è stato là; oppure, 2), non dà nessun segnale della presenza



dell'atomo. Questa è comunque un'informazione utile, perché ci dice che l'atomo non è stato là. Nel caso 1) veniamo a sapere che l'atomo si è "materializzato" nella zona A, mentre nel caso 2) veniamo a sapere che l'atomo non si è materializzato nella zona A. Dov'è finito, nel caso 2)? E che cosa succede alla nuvola, nei due casi?

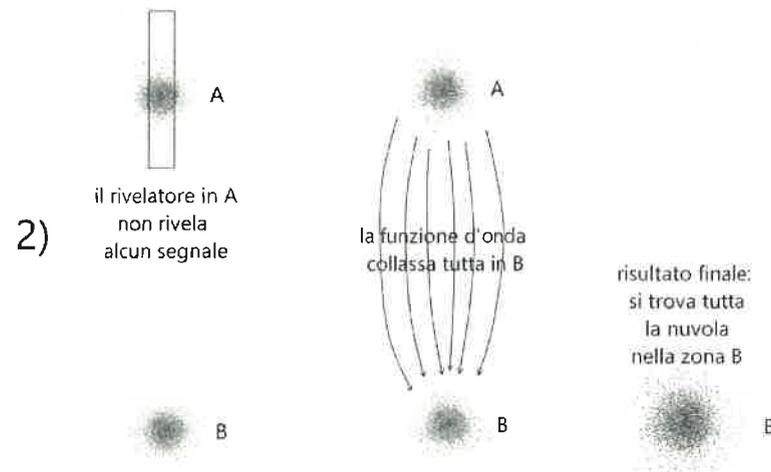
Nel caso 1) il rivelatore "vede" l'atomo. A quel punto, tutta la nuvo-



la che lo descriveva nella fase della virtualità sparisce all'istante. Si dice che essa "collassa nel punto in cui appare l'atomo". Questo vuol dire che

anche la parte di nuvola che sta in B, la zona lontanissima, deve sparire, quando viene a sapere che è successo qualcosa in A. Se non sparisse dalla zona B, l'osservatore in B avrebbe ancora una probabilità di osservare l'atomo in B, nel qual caso l'atomo apparirebbe sia in A che in B, cosa impossibile perché l'atomo è uno solo. Pertanto, anche la parte di nuvola che occupava la zona B collassa nel punto in cui "si crea" l'atomo all'interno del rivelatore in A. In un certo senso, viene "aspirata" in A. Se la immaginassimo come qualcosa di reale, dovremmo dire che la nuvola della zona B si scaraventa istantaneamente nella zona A, a velocità più alta di quella della luce, per concorrere a "materializzare" l'atomo in A.

Supponiamo adesso di trovarci nel caso 2). Cioè: il rivelatore in A non rivela niente, per cui noi, che ci troviamo nella zona A assieme ad



esso, non vediamo nessun segnale. Vuol dire che la nuvola passa attraverso il rivelatore senza lasciare alcuna traccia. Ma ci passa. Anche questo, comunque, è un segnale, è una risposta, perché il rivelatore in A ci dirà che l'atomo non è passato di là. Che cosa succede, in quel caso, alla nuvola? La nuvola A sparisce completamente, all'istante, dalla zona A, per trasferirsi tutta nella zona B, accrescendo la nuvola della zona B.

Veniamo così a sapere, definitivamente, che l'atomo non si trova nella nostra zona, la zona A, perché il rivelatore non ha dato nessun segnale della sua presenza, cioè ha rivelato la sua assenza dalla zona A. Vuol dire che l'atomo si trova, necessariamente, a chilometri e chilome-

tri di distanza, nella zona B, perché adesso tutta la sua nuvola sta là. Se qualcuno laggiù, cioè nella zona B, facesse una misura, con un rivelatore suo, per sondare la presenza dell'atomo, lo troverebbe sicuramente là. Non più con probabilità pari al 50%, ma con probabilità pari al 100%, cioè la *certezza assoluta*.

Si può usare questo meccanismo per trasferire informazione più velocemente della luce, contraddicendo le leggi fisiche della relatività speciale? La risposta è no, perché, anche se è vero che queste nuvole si trasferiscono all'istante da una zona all'altra, solo l'osservatore in A sa che questo è effettivamente avvenuto, e quando è avvenuto. Ma di questa informazione non se ne fa nulla, perché si trova lontanissimo dal luogo (cioè B) dove potrebbe sfruttarla per trarne un qualche vantaggio, per esempio scommettendo a colpo sicuro che l'atomo verrà rivelato là.

Il punto chiave, insomma, è che l'osservatore che sta in B non sa ancora cosa è successo, perché quanto successo dipende da una zona molto lontana da lui, la zona A. Per lui, la probabilità di vedere l'atomo rimane il 50%. Non si può accorgere che è cambiata la probabilità, o la nuvola, perché è, appunto, soltanto una probabilità: la nuvola non è qualcosa di reale. A meno che qualcuno non lo avvisi, chi sta in B non ha alcuna informazione in più di prima.

Quindi, ripeto, se supponiamo che il rivelatore in A non riveli niente, allora la nuvola sparisce da A e si fionda verso B. In B verrà a trovarsi all'istante la nuvola completa dell'atomo, per cui necessariamente l'atomo verrà rivelato nella zona B, quando qualcuno lo andrà a cercare là. Ma l'osservatore in B questo non lo sa, e non si può accorgere dell'avvenuto collasso della nuvola, perché la nuvola, come il suo eventuale collasso, non appartiene al mondo reale: essa è virtuale. Non è altro che una nostra descrizione matematica del sistema, fatta a nostro uso e consumo, per aiutarci a districare la matassa, cioè a collegare un'osservazione sperimentale alla successiva, nei limiti in cui ciò è possibile. E può ben essere necessario usare descrizioni diverse per osservatori diversi, purché non entrino in contraddizione con le osservazioni effettive.

Occorrerebbe far arrivare *per davvero* l'informazione a B, in qual-

che altro modo, per permettergli, magari, di puntare a colpo sicuro sull'osservazione dell'atomo nel suo rivelatore, cosa ormai certa. Potrebbe realizzare così una grossa vincita, ammesso che nessun altro riesca a fare altrettanto prima di lui. Immaginate qualcosa di simile con le puntate al casinò, e vi rendete facilmente conto che, se sapessimo in anticipo quale risultato uscirà, in qualunque reparto del casinò, potremmo realizzare lauti guadagni.

Per mandare un'informazione vera da A a B, dobbiamo però usare qualche mezzo *reale*, come un email, un sms o una telefonata. Non basta un mezzo virtuale, una costruzione matematica. Ma l'email, come l'sms, è vincolato a propagare segnali con velocità inferiore o uguale a quella della luce. Se B è lontano un anno luce da A, l'email impiegherà almeno un anno a raggiungerlo: per un anno intero, B non saprà nulla di quello che è successo in A. Qualunque mezzo reale usiamo per informare B, può essere usato da altri per informare i proprietari del casinò, che avranno tempo e modo per correre ai ripari. Solo la funzione d'onda, che però appartiene al mondo virtuale, non è vincolata a propagare i suoi "segnali" a una velocità particolare, ma quelli sono solo segnali virtuali. Pertanto, non è mai possibile usare l'entanglement per trasferire informazione "vera" a velocità maggiore di quella della luce.

Ci si potrebbe chiedere se l'osservatore in B possa aggirare l'ostacolo mettendosi preventivamente d'accordo con A. Per esempio, A e B potrebbero sincronizzare i loro orologi con dovuto anticipo (prima di allontanarsi di un anno luce) e mettersi anche d'accordo sull'istante futuro preciso, chiamiamolo X, in cui A farà la sua osservazione. Ma non servirà a niente. Ad osservazione avvenuta, B saprà soltanto che, appunto, l'osservazione di A è già avvenuta: non ne conoscerà il risultato. Saprà soltanto che la sua probabilità di trovare l'atomo in B sarà cambiata, da 50% in A e 50% in B, qual era prima dell'istante X, a una delle due opzioni seguenti: 1) 0% in A e 100% in B, oppure 2) 100% in A e 0% in B. Ma non sarà in grado di dire *quale* delle ultime due sarà quella vera, perché non saprà se l'atomo sarà stato visto in A o no. Anche stavolta, per lui non cambierà nulla, perché l'unica cosa che potrà dire è che nel 50% dei casi si è avverata l'opzione 1), e nell'altro 50% dei casi si è avve-

rata l'opzione 2). Non può sapere istantaneamente quale delle due si sia verificata effettivamente.

Abbiamo imparato che nella teoria dei quanti esiste un mondo reale (sarà il nostro? forse sì, forse no, chissà...) e un mondo virtuale. Il secondo riempie la fase del *durante*, che intercorre tra due osservazioni, che sono quella che definisce il *prima*, e quella che definisce il *dopo*. Una nuvola ci dice quale probabilità abbiamo di osservare, per esempio, un atomo in una certa zona, qualora lo andassimo a cercare. Per definizione, non lo possiamo cercare nella fase intermedia tra due osservazioni successive, altrimenti non sarebbe la fase intermedia tra due osservazioni successive: nella fase virtuale regnano il buio e il silenzio assoluti. Solo il prima e il dopo esistono, mentre il durante non esiste. Su questa *dualità* tra reale e virtuale, tra durante e prima/dopo, costruiremo tutta la nostra comprensione della natura. Ed è chiaro, dalle premesse, che spazzerà via ogni presunta comprensione raggiunta prima nella storia.

Rimane "vero" (parola grossa, anche questa, nella teoria dei quanti...) che, nella fase virtuale, l'entanglement ci dice che esiste una correlazione tra le due parti della nuvola, e che questa correlazione viaggia a velocità arbitrariamente alta, per cui quello che succede in una delle due parti influenza istantaneamente l'altra.

Sappiamo che un atomo, o un fotone, in condizioni generiche è descritto da una nuvola di punti concentrati maggiormente in una certa zona, quella in cui l'atomo, o il fotone, "è", cioè dove è più probabile trovarlo quando lo andiamo a cercare. Ma l'atomo è *virtuale*, cioè "non è", finché non lo osserviamo, o finché non interagisce con un oggetto macroscopico, come un rivelatore. E, come abbiamo imparato, possiamo "tagliare l'atomo virtuale", cioè tagliare la sua nuvola, in modo da distribuire i punti attorno a due o più centri, creando delle nuvolette. L'atomo è sempre uno, per cui quando qualcuno vorrà osservarlo, esso si manifesterà in una di quelle, e una soltanto.

Rivediamo ora l'esperimento del puntatore laser descritto nella lezione scorsa, alla luce di quanto appena detto. Immaginiamo un singolo fotone diretto verso lo schermo. Quando il fotone arriva a destinazione, vediamo sullo schermo un segnale soltanto, una scintilla. Vediamo, in

sostanza, un punto della sua nuvola virtuale. Se di atomi, o fotoni, ne facciamo viaggiare tanti allo stesso tempo, come fa un puntatore laser, vediamo tanti segnali, tante scintille, tanti punti sullo schermo, o sul muro. Siccome ogni fotone va dove gli pare, i fotoni, nel complesso, ci permettono di ricostruire l'immagine della loro nuvola. In altre parole: sparando *moltissimi* fotoni assieme, possiamo rivelare la nuvola del *singolo* fotone.

Quando non è presente alcuna fenditura durante il tragitto del raggio laser, il puntatore illumina un punto sullo schermo. Tuttavia, come potete constatare, il punto luminoso che vedete sullo schermo non è veramente un punto, ma un dischetto abbastanza esteso. Quell'immagine estesa è proprio l'immagine della nuvola virtuale di un fotone, in assenza della fenditura. L'estensione del dischetto è l'indeterminazione sulla posizione di un qualunque fotone del raggio di luce. Il puntatore laser spara tantissimi fotoni al secondo, circa un milione di miliardi (potete ricavare quanti sono dal libretto delle istruzioni del puntatore stesso). Siccome un fotone ha associata una nuvola, è chiaro che quando sparate miliardi di fotoni identici, e ognuno deve scegliere dove andare, sullo schermo vedrete riempirsi tutta la nuvola: non un punto ben definito, una scintilla, ma un intero dischetto. E potete anche verificare che l'estensione di quel dischetto è legata alle proprietà del raggio laser come previsto dalle leggi fisiche.

Così come si può dividere la nuvola di un atomo, o di un fotone, in due parti, la si può dividere anche in più parti contemporaneamente. Questo è quello che succede quando facciamo passare il raggio del puntatore laser attraverso la fenditura realizzata con i rettangolini di latta: se costringiamo il fotone a passare attraverso quell'apertura, infatti, la sua nuvola viene divisa, non in due, ma in tante parti, creando una figura come quella che ormai conosciamo bene, e che riportiamo qui ancora



una volta, per comodità. Il punto è che non è possibile visualizzare questa figura sullo schermo usando un solo fotone. Il fotone singolo mi dà una scintilla sola, in un punto qualunque di una qualunque zona lumi-

nosa tra quelle che vediamo nell'immagine. E il suo punto d'arrivo sullo schermo, come ormai sappiamo bene, è scelto liberamente da lui: non è in alcun modo predeterminabile da noi.

Tuttavia, è possibile rivelare la nuvola del *singolo* fotone facendo passare non uno, ma tantissimi fotoni identici attraverso quella stessa fenditura, uno dopo l'altro. Siccome ciascun fotone deciderà casualmente dove apparire sullo schermo, e siccome la probabilità di quella decisione è data proprio dalla nuvola, sparando tantissimi fotoni assieme disegniamo tutta la nuvola, e finiamo quindi per renderla visibile.

Cioè: riusciamo a portare il virtuale di un *singolo* fotone al mondo reale. Per la precisione, riusciamo a farlo per una gran parte del virtuale, ma non tutto. In ogni caso, non possiamo ottenere un risultato del genere con un fotone singolo, in un singolo esperimento. Un milione di miliardi di fotoni al secondo, però, bastano e avanzano allo scopo, per cui sullo schermo vedremo proprio l'immagine della nuvola, e la potremo comodamente fotografare col cellulare, come ho fatto io.

Immaginiamo di nuovo di lanciare un fotone *singolo* verso lo schermo, facendolo passare attraverso la fenditura. Come detto, l'effetto della fenditura è quello di dividere la nuvola virtuale del fotone in tante parti, simili a quelle viste in figura. La figura di interferenza mostra un grosso disco al centro e tanti dischi minori allineati ai lati, che rappresentano le zone nelle quali viene suddivisa la nuvola. Ebbene, tutte quelle zone sono quantisticamente correlate tra loro, cioè sono "entangled". Ciò vuol dire che, se agisco in qualche modo su una, contemporaneamente agisco su tutte. Posso immaginare semplici accorgimenti per allontanare tra loro quelle zone di chilometri e chilometri, nella fase del virtuale, cioè prima dell'osservazione successiva, ma rimarranno sempre correlate, e la correlazione è sempre istantanea.

Per esempio, l'impatto della nuvola con un oggetto macroscopico come lo schermo è devastante per la nuvola stessa, perché costringe tutte le zone in cui è divisa, per quanto siano lontane l'una dall'altra, a collassare istantaneamente in un punto preciso, quello in cui vedrò la scintilla.

La luminosità di una zona mi dice con quale probabilità il fotone

singolo si "materializza" in quella zona quando raggiunge lo schermo. Una volta che il fotone "ha scelto" in quale punto materializzarsi, tutta la sua nuvola, che era sparpagliata e divisa in tante parti, si riunisce, cioè collassa, istantaneamente in quel punto. Non importa che questo richieda alle varie zone collassanti di viaggiare a velocità infinita, perché nel mondo virtuale non ci sono velocità massime insuperabili.

In un certo senso, succede che tutte le zone ricevono istantaneamente l'ordine di sparire di colpo, per fiondarsi frettolosamente in un unico punto. Il fatto è che quel punto è deciso proprio da questo fenomeno, perché non è in nessuna maniera determinato *prima* che succeda quanto appena detto. Cioè, non è proprio corretto dire che le zone ricevono un *ordine* da qualcosa o qualcuno. Esse non ricevono ordini da niente e da nessuno. Forse è più corretto dire che scelgono cosa fare "democraticamente": consultandosi a velocità infinita, decidono dove creare la scintilla che poi noi vedremo. In conseguenza di questo, il risultato finale è creato seduta stante.

Ma queste sono soltanto nostre narrative. Quello che "fanno" le varie parti della nuvola non ha senso, visto che la nuvola stessa nemmeno esiste. Decidono? Si consultano? Votano? Viaggiano più veloci della luce? Possiamo raccontarci le storie che preferiamo, perché tanto il racconto appartiene al virtuale, cioè appunto a ciò che non è. Il nocciolo della questione non dipende dalla nostra narrazione in merito al virtuale. Il principio di indeterminazione ci chiarisce che il virtuale non è accessibile, ma, in un certo senso, "non è nemmeno inaccessibile". Esso è "più che inaccessibile", perché, infatti, "non è". Cominciamo a capire che la nostra lingua fatica a descrivere tutto questo, perché non è pensata per il mondo dei quanti, ma per il nostro. Alla fine, non ha senso fisico cercare di immaginarci "quel che fanno le zone della nuvola" (anche se ci può essere di aiuto per avanzare di un po' nella nostra comprensione, ammesso che invece non ci tragga in inganno), perché non esistono nemmeno quelle zone, non esiste nemmeno la nuvola introdotta nella prima lezione, non esistono i punti di cui è fatta. "Esiste" (forse) solo il risultato finale, la scintilla. E ci metto il forse, per ora, tra parentesi, perché mi sembra chiaro che, arrivati a questo punto, non possiamo più contare su

alcuna "certezza", per quanto scontata possa apparire.

Abbiamo descritto il fenomeno chiave di tutta la teoria dei quanti, la biforcazione, la creazione di qualcosa che prima non c'era, la creazione di quella che chiamiamo "realtà", che adesso comincia a sembrarci sempre meno reale, perché ormai non siamo più sicuri di cosa voglia dire "essere" e di cosa "sia" veramente ciò che noi "vediamo", cioè cosa sia la nostra "percezione". Con pazienza, risponderemo. E capiremo.

Terminiamo questa lezione facendo una precisazione sul significato e uso della parola entanglement (che possiamo tradurre con intreccio, o groviglio) in quanto correlazione quantistica istantanea tra zone separate. È più frequente sentirne parlare in casi come quello di una particella iniziale I che decade in due particelle A e B che si allontanano indefinitamente. Se la particella I ha spin 0 (vedi lezione relativa) e le particelle A e B hanno spin non nullo, allora le particelle A e B devono avere spin opposti, per dare totale zero. Prima di fare la misura, non si sa quale delle due l'abbia positivo e quale negativo, ma si sa che se A l'ha positivo, allora B l'ha negativo, e se A l'ha negativo, allora B l'ha positivo. In breve, $A+$ implica $B-$, e $A-$ implica $B+$. Non appena si fa una misura su A e si scopre, per esempio, che A ha spin positivo, si ricava che B ha necessariamente spin negativo; a qualunque distanza si trovi. L'intreccio è tra il luogo (A o B) e lo spin ($+$ o $-$). Nell'esempio dell'atomo deviato dal campo magnetico, l'intreccio è del tutto simile, tra il luogo (A o B) e la presenza o meno dell'atomo (potremmo dire: atomo sì, atomo no). Detto questo, l'aspetto cruciale della correlazione quantistica di cui stiamo parlando è il suo carattere istantaneo, a qualunque distanza si trovino le zone A e B .

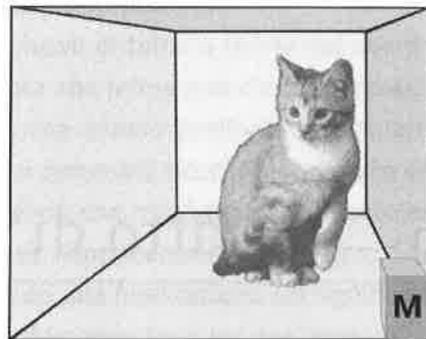
5 Il gatto di Schrödinger

In questa lezione parliamo del famoso esperimento ideale che va sotto il nome di "paradosso del gatto di Schrödinger", con cui Erwin Schrödinger, uno dei padri della teoria dei quanti, si proponeva di spiegare l'indeterminazione e l'entanglement al grande pubblico. Tuttavia, l'esempio a cui pensò non è propriamente calzante. Forse, è anche fuorviante, perché non è possibile ottenere ciò che voleva Schrödinger con un gatto, o, più in generale, un oggetto macroscopico. Infatti, come abbiamo già visto, la nuvola associata a un oggetto macroscopico è piccolissima, a tutti gli effetti pratici trascurabile. Ricordiamo che la sua estensione è inversamente proporzionale alla massa. Basta molto meno di un grammo per rendere l'indeterminazione e l'entanglement troppo piccoli per essere apprezzati nelle situazioni ordinarie.

Sostanzialmente, si tratta di un esperimento immaginario, pensato per illustrare proprietà che a questo punto della lettura il lettore conosce già, grazie agli esperimenti (veri) di cui abbiamo parlato nelle lezioni passate: l'atomo che attraversa una zona di campo magnetico (biforcazione quantistica), o il raggio di un puntatore laser che attraversa una fenditura (multiforcazione). Descriviamo comunque l'esperimento del gatto di Schrödinger, mettendo in guardia il lettore su quello che non va, per poi riagganciarci a uno degli esempi più precisi ricordati poc'anzi, quello dell'atomo. Di cui abbiamo comunque bisogno per spiegare il funzionamento di un certo marchingegno coinvolto nello stesso esempio del gatto di Schrödinger.

Immaginate di avere una scatola opaca. Mettete il vostro gatto al suo interno e chiudetela. Il gatto, all'inizio è vivo e vegeto. Supponete

che in un angolo della scatola sia collocato un certo marchingegno M che funziona quantisticamente, come in uno degli esempi già incontrati, cioè, aziona una biforcazione quantistica. Ciò vuol dire che, per esempio, quando premo il pulsante di accensione del marchingegno, invio un certo atomo in una certa zona di campo magnetico, dentro M. Come sappiamo, il campo magnetico divide la nuvola dell'atomo in due parti, dopodiché una parte della nuvola va a sinistra, zona A, mentre l'altra parte va a destra, zona B. Supponiamo che, sempre all'interno di M, due rivelatori siano collocati alla fine dei tragitti delle nuvole in modo da osservare l'atomo, che poi vuol dire costringerlo a materializzarsi in una delle due zone, A o B. Come sappiamo, nel 50% dei casi l'atomo si materializza a sinistra, e nel rimanente 50% dei casi si materializza a destra. Lui, e solo lui, cioè l'atomo, "decide" tra le due opzioni. Nessuno può sapere in anticipo cosa farà, e nessuno gli può comandare cosa fare.



Supponete anche che, nel caso in cui l'atomo si manifesti a destra, venga azionato un secondo marchingegno, che rilascia del gas letale nella scatola, in modo da uccidere il gatto. E che, se l'atomo si manifesta a sinistra, non succeda niente di tutto questo, cioè la scatola non venga riempita di nessun gas letale, e quindi il gatto rimanga vivo.

Specifichiamo che la scatola deve restare chiusa fino alla fine, per cui, il gatto, o quello che ne resta, rimane sempre al suo interno. Sottolineiamo anche che la scatola deve essere "assolutamente opaca", nel senso che noi non possiamo vedere cosa succeda, o conoscere cosa sia successo al suo interno senza aprirla. Dobbiamo anche supporre che sia garantita la presenza di ossigeno a sufficienza, per non uccidere il gatto per altra via.

Partiamo dunque col nostro esperimento. Premiamo il pulsante del marchingegno M. Un atomo "decide", dopo aver attraversato una zona

di campo magnetico, se andare a destra o a sinistra. Passano pochi istanti è la scelta è compiuta (lo è davvero? A scatola chiusa non lo possiamo veramente dire). Se l'atomo è andato a destra, un gas ha ucciso il gatto nella scatola. Almeno, così ci aspettiamo. Se l'atomo è andato a sinistra, non è stato rilasciato nessun gas, e quindi il gatto è (presumibilmente) ancora vivo.

Le domande che Schrödinger si fa sono tre, due a risposta ovvia e una a risposta meno ovvia. Prima domanda: posso dire che il gatto dentro la scatola sia vivo? Ovviamente no, perché non ho ancora guardato l'interno. La scatola è ancora chiusa e non posso sapere cosa sia successo. Seconda domanda: posso dire che il gatto all'interno sia morto? Sicuramente no, per lo stesso motivo. Terza domanda, quella cruciale: posso almeno dire che il gatto dentro la scatola è *o vivo o morto*?

Potrò dire almeno questo, no? O il gatto è vivo, o il gatto è morto, *tertium non datur...* La "logica" ci dice che il gatto non può essere "mezzo vivo e mezzo morto", oppure "sia vivo che morto". Quindi, sempre la cosiddetta logica, ci dice che il gatto deve essere una delle due cose, cioè "o vivo o morto".

Già, la logica... Occorre tenere conto che i quanti non fanno farsene della nostra logica. Appunto perché la logica è nostra, è la nostra descrizione della natura, e non vincola la natura. Infatti, la risposta corretta alla terza domanda, e Schrödinger voleva arrivare proprio a questo con il suo esempio, è che il gatto non è né vivo né morto, oppure è sia vivo che morto. Per la precisione, si può dire (ma non è l'unica cosa che *si può dire...*) che il gatto si viene a trovare in una sovrapposizione di due stati: lo stato di "gatto vivo" e lo stato di "gatto morto". Per cui, *tertium datur...*

In pratica, se il gatto non fosse un gatto, ma un atomo, o comunque un qualcosa di microscopico, dopo aver azionato il marchingegno sarebbe descritto da una nuvola composta di due parti distinte, ma correlate. Prima dell'osservazione successiva (che si compie all'apertura della scatola), quella nuvola, fatta di una sovrapposizione di due nuvole più piccole, appartiene ancora al mondo del virtuale, al durante. Essa rimane libera, ubiqua, e inosservata... Finché qualcuno non decide di aprire

la scatola e andare a guardare cosa c'è dentro, facendo così collassare la nuvola, a quel punto irreversibilmente, su una delle due opzioni a disposizione. Se potessimo estendere le nostre conclusioni dagli oggetti microscopici al gatto, quelle opzioni sarebbero l'opzione "gatto vivo" e l'opzione "gatto morto". All'apertura della scatola, e solo allora, *tertium non datur*. Ma non prima.

Soltanto quando apriamo la scatola, cioè quando l'osservatore fa la misura, per andare a vedere "cosa è successo", la nuvola collassa. Soltanto allora si compie il destino del gatto. Solo allora "succede quello che deve succedere" e si ha l'evento, che quindi non è affatto "già successo". A quel punto, quando noi apriamo, vediamo realizzata soltanto una delle due possibilità concesse, solo una delle due opzioni in ballo: il gatto sarà morto, oppure il gatto sarà ancora vivo.

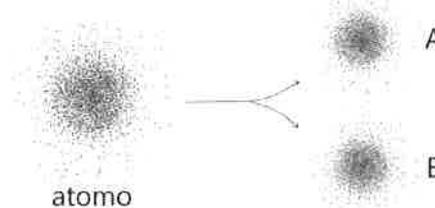
Dobbiamo ora scomodare Sherlock Holmes. Chi è il colpevole? Chi è stato a uccidere il gatto, nel caso sia stato ucciso? È stato l'atomo, oppure siamo stati noi che abbiamo aperto la scatola? E quando è morto, per la precisione? Quando l'atomo ha deviato dalla parte sbagliata, o quando noi abbiamo aperto la scatola? Insomma, chi dobbiamo condannare? Sono tutte domande che non hanno il minimo senso e, quindi, non hanno risposta. Possiamo riaccomodare Holmes.

La ragione per cui non mi piace questo paradosso di Schrödinger è che è impreciso. Solleva più problemi di quanti ne chiarisca. Si propone di illustrare una proprietà importante, ma lo fa rendendo impossibile apprezzarla veramente. Il gatto è macroscopico. Non c'è mai un durante, per lui. Non viene mai interrotta la sua esistenza. La sua nuvola è trascurabile. Anche quando noi non lo stiamo osservando, il gatto non si trova mai nello stato di libertà assoluta che è il buio e il silenzio del durante, descritto nei capitoli precedenti, perché è comunque in interazione con una miriade di atomi. Per esempio, quelli dell'aria che gli sta intorno, e quelli di cui lui stesso è fatto, essendo macroscopico. In sostanza, il gatto è davvero "o vivo, o morto", una volta che il marchinge-gno M ed, eventualmente, il gas tossico, hanno fatto il loro lavoro, prima che io apra la scatola.

Non è possibile immaginare che un oggetto macroscopico si venga

davvero a trovare in una sovrapposizione di due stati, che sia un tavolo, un gatto, o un essere vivente qualunque. Certo, se vogliamo essere davvero pignoli dobbiamo dire tutti noi siamo, e siamo sempre stati, in una sovrapposizione di tantissimi stati, da quando siamo nati (lo capiremo meglio in seguito), ma: a) quegli stati sono così poco diversi tra loro che la loro sovrapposizione non è apprezzabile in quanto tale, né ora, né se ci sottoponiamo ad esperimenti che durino tanto quanto è durato l'universo; e b) non è sicuramente questo tipo di sovrapposizione ciò a cui voleva riferirsi Schrödinger col suo esempio.

Possiamo correggere l'esempio del gatto di Schrödinger immaginando di sostituire il gatto con lo stesso atomo del marchinge-gno M, e fermarci alla sua deviazione dopo il passaggio attraverso il campo magnetico. Torniamo così a uno dei casi considerati nei capitoli precedenti. Nel durante, cioè dopo che



la nuvola dell'atomo è stata divisa nelle due zone A e B, e prima che avvenga lo scontro con uno dei rivelatori, che fa collassare tutta la nuvola in una delle due zone, possiamo farci le tre domande di Schrödinger: possiamo dire che l'atomo è nella zona A? possiamo dire che è nella zona B? possiamo almeno dire che "o è nella zona A, o è nella zona B", cioè che se non è in A, è in B e se non è in B, è in A? Le risposte sono: no, no e no, rispettivamente.

Però, possiamo dire (o forse dobbiamo dire?) che l'atomo, nel momento in cui la sua nuvola viene divisa in due, entra in una sovrapposizione di due stati quantisticamente correlati, che sono lo stato "atomo nella zona A" e lo stato "atomo nella zona B", in relazione alle zone in cui possiamo trovare l'atomo una volta che andiamo a cercarlo. Nella fase intermedia l'atomo è virtuale, ubiquo, quindi non esiste. Può ben "constare matematicamente" di una sovrapposizione di stati, che siano due o più, cioè la sovrapposizione di tutti gli stati finali permessi.

Ridotto l'esempio dal gatto all'atomo, abbiamo così potuto formulare le domande di Schrödinger correttamente. Alla fine, come abbiamo

visto, sono identiche a quelle che ci chiedevamo prima, ma ora si riferiscono a un sistema fisico per cui ha veramente senso farle.

Esperimenti come quello dell'atomo in campo magnetico vengono fatti con relativa facilità, oggi, mentre non hanno senso col gatto. La domanda cruciale delle tre è questa: se io non ho ancora "aperto la scatola", cioè, nel caso dell'atomo, non ho ancora messo i rivelatori nelle zone A e B, posso dire, *tertium non datur*, che l'atomo, è "o in A o in B" nella fase del durante? Almeno questo, lo posso dire? La risposta è no, perché l'atomo non esiste in quella fase. Cioè, è virtuale.

Si può dire che l'atomo, nel durante, "è" in una sovrapposizione di stati. Ma non si tratta di "esistenza", bensì di "descrizione matematica", una delle tante. Matematicamente, si può descrivere il durante in tanti modi diversi, ugualmente corretti, perché fisicamente equivalenti. Un'altra descrizione è quella secondo la quale la nuvola dell'atomo è fatta della somma (sovrapposizione, appunto) di nuvole più piccole, relative a zone dislocate. Non esiste un solo modo per descrivere la virtualità, proprio perché essa non è reale.

Abbiamo capito che non è corretto dire che l'atomo, nel durante, si trova "o in A o in B". Tuttavia, non abbiamo ancora spiegato compiutamente perché possiamo fare un'affermazione del genere. Lo faremo procedendo per gradi. Qui ci accontentiamo di fare un ulteriore passo avanti. Quando ci torneremo sarà più facile cogliere la "logica", e la relativa semplicità, dietro il tutto.

Come posso permettermi di affermare con sicurezza che l'atomo, nella fase virtuale del durante, "non esiste"? Qualcuno potrebbe pensare che sia lecito dire tutto e il contrario di tutto, a proposito del virtuale, che non si possa fare alcun esperimento per smentire o confermare ciò che diciamo, riguardo alla realtà interrotta, sospesa, che si trova dentro la cella universale di indeterminazione. Ne segue che io mi potrei permettere di raccontarvi qualunque cosa mi passi per la testa, come quel che ho appena smentito, cioè che l'atomo è "o in A o in B", oppure quel che ho affermato al suo posto, cioè che "la realtà viene sospesa". Tanto, sarei sicuro di non poter essere contraddetto.

Ma non è così. Esistono *esperimenti dirimenti* che possono smentire

o confermare questo tipo di affermazioni. Infatti, il virtuale che abbiamo per le mani non è completamente scorrelato dal reale. Anzi, esso interpola tra due realtà, quella del prima e quella del dopo. Il durante separa un'osservazione da quella successiva. Come sappiamo, nel mondo dei quanti c'è buio e silenzio, a parte qualche flash ogni tanto, che sono le nostre osservazioni, cioè quella che noi chiamiamo realtà, che poi corrispondono alle nostre percezioni. Il buio e il silenzio che separano due osservazioni è la virtualità. Nel virtuale la realtà è sospesa, ma la realtà che si manifesta successivamente è creata proprio dal virtuale, in un certo senso. Pertanto, è legata strettamente a quello. Per questo non possiamo dire tutto e il contrario di tutto, sul virtuale, e sperare di farla franca.

La questione è stata studiata per molto tempo e, alla fine, si è trovata la soluzione seguente. Dobbiamo chiederci a quali conseguenze porti pretendere che l'atomo, mentre non è osservato, continui comunque ad esistere. Per esempio, potete insistere a dire che l'atomo si trova "o in A, o in B". Oppure, per essere più sicuri, dite solamente che "è da qualche parte", anche se non sapete dove, cioè "è in A, in B, o altrove", pensando di non poter essere contraddetti solo perché aggiungete quell'"altrove". Oppure, per delimitare ancora meno il perimetro di applicabilità della vostra affermazione e restare ancora più sul vago, potete aggiungere ancora qualcosa del tipo: "l'atomo è smaterializzato, sparpagliato, delocalizzato, in base ad una legge di distribuzione qualsiasi", pensando alle nuvole di cui abbiamo parlato prima, come se fossero reali. Potete aggiungere qualunque cosa vi venga in mente, purché sia basata sull'idea che l'atomo continui ad esistere nel durante, nella forma o nelle forme multiple che più vi piacciono.

Se pensate che così non sarete smentiti, sappiate che sarete, appunto, smentiti. Perché? Perché la semplice assunzione di partenza (l'atomo esiste nella fase del durante) porta a conseguenze fisiche confutate dagli esperimenti. Possiamo infatti elaborare esperimenti un po' più sofisticati di quelli descritti finora, ma neanche poi tanto, per trovare delle situazioni nelle quali l'ipotesi in questione porta a conseguenze contraddette dall'osservazione. La ragione, invero abbastanza semplice,

per cui possiamo fare un esperimento dirimente è che l'ipotesi che l'atomo continui ad esistere nella fase del *durante* è comunque un'ipotesi in più. Certo, è un'assunzione molto debole, perché molto generica. In fondo, non facciamo alcuna ipotesi su dove l'atomo sia, cosa sia o come appaia, e nemmeno se sia un'entità unica, o diviso in più entità distinte. Immaginiamo soltanto che "sia", che esista. Tuttavia, come detto prima, il *durante* non è completamente scollegato dal *prima* e dal *dopo*. Esso è una specie di *ponte* tra i due. Qualche collegamento tra il *durante* e il *prima/dopo* c'è comunque, per cui fare un'ipotesi in più sul *durante* può ben riverberarsi sul *dopo*, restringendo l'insieme dei risultati permessi.

Ci aspettiamo, e su questo non saremo smentiti, che un'ipotesi così vaga non abbia quasi mai alcuna conseguenza pratica. Non ci accorgiamo quasi mai della differenza tra averla fatta e non averla fatta. Ma la chiave di tutto sta in quel "quasi": "quasi mai". Un'ipotesi in più, per quanto debole, l'abbiamo comunque fatta. Una volta fatta, possiamo solo incrociare le dita. Possiamo *sperare* che sia innocua, cioè che non vincoli *mai* le predizioni fisiche tanto da renderle incompatibili con le osservazioni sperimentali. Ma se fosse davvero innocua, tanto varrebbe non farla. E se invece scopriamo che, in effetti, non è affatto trascurabile averla fatta, non possiamo lamentarcene troppo, perché, in un certo senso, "ce la siamo andata a cercare".

L'esperimento dirimente che taglia la testa al toro ci dice in modo definitivo se *i*) la realtà continua ad esistere anche nel *durante*, oppure *ii*) la realtà non può continuare ad esistere tra due osservazioni successive.

Se insistiamo a pensare che l'atomo non sia libero nemmeno nella sua fase virtuale, ma continui ad esistere anche in quella, ad essere da qualche parte, se lo incateniamo alla realtà anche quando potrebbe essere libero, esso si vendica, e trova la via per "farcela pagare", smascherando il nostro errore. Infatti, proprio perché lo vincoliamo, le predizioni fisiche riguardanti i fenomeni che interessano quell'atomo sono costrette ad obbedire ad altrettanti vincoli, che possiamo calcolare a partire dalla teoria. Essi vanno sotto il nome di "disuguaglianze di Bell". Limitano i valori che possono avere le quantità che misuriamo nel *dopo*. Espri-

mono i limiti invalicabili che seguono dall'ipotesi che l'atomo continui ad esistere nel *durante*.

Ci troviamo dunque in una situazione relativamente fortunata. Visto che le predizioni fisiche che seguono dalla presunzione che l'atomo esista anche quando non è osservato da niente e da nessuno sono sottoposte a dei vincoli matematici ben precisi, come le disuguaglianze di Bell, possiamo dirimere la questione una volta per tutte: basta andare a vedere se la natura obbedisce a quei vincoli oppure no. Perché, se la natura riesce a aggirare quei vincoli, che seguono dalla sola ipotesi che l'atomo esista anche nel *durante*, allora vuol dire che l'ipotesi non è corretta, cioè che l'atomo non esiste affatto tra un'osservazione e la successiva: la sua "consistenza reale" viene dunque sospesa.

Gli esperimenti sono stati fatti poco dopo la derivazione delle disuguaglianze stesse. La risposta inequivocabile è che la natura viola tranquillamente quelle disuguaglianze. Il premio Nobel della fisica 2022 è stato assegnato agli autori dei primi esperimenti di questo tipo.

Ecco perché vi posso dire con certezza che nel virtuale l'atomo non si trova "né in A, né in B, né da nessun'altra parte, né è delocalizzato", eccetera. Anzi, non potete nemmeno dire che l'atomo esista nella fase virtuale, perché effettivamente non esiste⁴.

Alla fine, un atomo è sempre libero (in un certo senso, è "vivo"), tranne quando comincia ad esistere, cioè quando viene portato all'esistenza reale dal collasso della nuvola, o funzione d'onda. Nell'istante in cui è costretto ad esistere, viene privato della sua libertà.

⁴ È utile fare una precisazione. Se l'atomo continuasse ad esistere nel *durante*, esso dovrebbe essere descritto da variabili a noi ignote, almeno per il momento, dette per questo motivo "variabili nascoste". Il risultato di Bell e del relativo esperimento, esclude ogni tipo di variabili nascoste ordinarie (dette "variabili locali"), che permettano, in parole semplici, di controllare un atomo che sta qui da qui. Rimane sempre aperta la possibilità di variabili nascoste "non locali", che dovrebbero permettere di controllare l'atomo qui, a patto di controllare zone dell'universo che possono essere arbitrariamente lontane (per via dell'entanglement), i rivelatori e noi stessi. Un escamotage del genere rimanda, di fatto, la questione oltre la fisica, cioè alla metafisica. Similmente, è sempre possibile dire che "l'atomo è andato a sinistra perché Dio gli ha detto di andare a sinistra." Anche se accettassimo l'idea di variabili nascoste non locali, nessuna delle conclusioni a cui arriveremo cambierebbe, se non per un "reindirizzamento di parole", senza differenze osservabili. Avremo meglio da dire sui limiti del linguaggio in seguito.

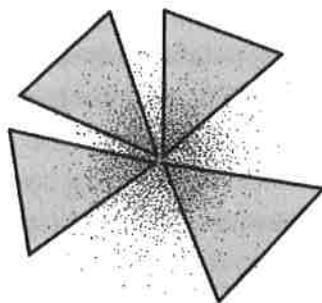
Impariamo che, nel mondo dei quanti, esistenza vuol dire privazione della libertà. Un atomo non conosce la contrapposizione tra la vita e la morte, ma conosce la contrapposizione tra la libertà e l'esistenza. Possiamo dire che un atomo vive quasi sempre nel regno della libertà assoluta, che è la virtualità, interrotta ogni tanto dall'esistenza. Cioè, per un atomo, l'esistenza è una vera scocciatura!

Per ora ci accontentiamo di questo, ma torneremo sulla questione più dettagliatamente in seguito.

Concludiamo questa parte sottolineando che le nostre descrizioni matematiche del durante non implicano nulla sull'"esistenza" del durante stesso. La nuvola e la sovrapposizione di stati, per esempio, sono due maniere matematicamente equivalenti di descrivere un atomo (oppure un fotone, una particella, o un sistema generico) nella fase virtuale. Con operazioni matematiche standard si può passare indifferentemente dall'una all'altra senza cambiare i risultati fisici. Non solo, ma che la nuvola sia una sovrapposizione di stati lo posso, in effetti, dire sempre, anche a proposito di una nuvola "non tagliata", perché posso sempre immaginare di tagliarla matematicamente, come in figura, e de-

scriverla come la somma di tante zone distinte. Cioè, posso sempre descriverla come la sovrapposizione di tanti stati correlati: lo stato "atomo in zona 1", lo stato "atomo in zona 2", eccetera, fino allo stato "atomo in tutto il resto dello spazio". Posso organizzare la ripartizione della nuvola nelle zone che più piacciono a me. Un po' come quando taglio una pizza. Infatti, la ripartizione non è altro che un'operazione matematica completamente arbitraria, come scegliere le coordinate x , y e z per descrivere un sistema fisico (assieme al tempo t), ben sapendo che nessun risultato fisico dipenderà mai dalla nostra, arbitraria, scelta delle coordinate usate per ricavarlo, come non dipende dalla scelta delle unità di misura per le lunghezze, il tempo, eccetera.

Così, quando la nuvola dell'atomo è divisa nelle due zone A e B, la



possiamo descrivere come una sovrapposizione di stati: lo stato "atomo in A" e lo stato "atomo in B". Strettamente parlando, la dovremmo vedere come la sovrapposizione di infiniti stati, perché dovremmo includere anche gli stati "atomo a San Francisco", "atomo a Venezia", "atomo su Marte", ecc. Per quanto sia poco probabile che l'atomo si manifesti così lontano, la nuvola dell'atomo (per la precisione: la sua funzione d'onda matematica) si estende per tutto l'universo. È soltanto per semplicità che ci limitiamo ai due stati dove è più probabile trovarlo: "atomo in A" e "atomo in B". Volendo, potremmo anche scomporre quegli stati in "atomo nella metà superiore della zona A", "atomo nella parte est della zona B", "atomo in un dato spicchio della zona A", e avanti di questo passo. E l'atomo sarebbe allora descrivibile nel durante come una sovrapposizione di tutti quelli.

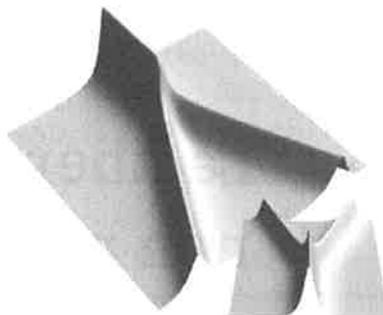
La nostra descrizione matematica della virtualità dell'atomo dipende da noi, è una nostra scelta. Esistono tanti modi diversi, ma fisicamente equivalenti, di raccontare la virtualità: sono tutti quelli che non cambiano il risultato finale di alcun esperimento. Tutte le descrizioni che, invece, cambiano il risultato finale, anche di *un solo* esperimento sono da buttare, perché smentite dai dati. Un esempio è proprio l'ipotesi che l'atomo continui ad esistere nella fase della virtualità, ciò che porta alle disuguaglianze di Bell, smentite dagli esperimenti: tra tutte le descrizioni che possiamo inventarci, a proposito del durante, non c'è quella che nega al durante la sua prerogativa di essere, appunto, il *durante*.

6 La libertà della non realtà

Abbiamo visto che un atomo, o meglio la nuvola associata all'atomo, può essere tagliato come la marmellata, tra un'osservazione e l'altra. Per esempio, sotto certe condizioni, se facciamo passare l'atomo, o "quel che sta al suo posto", attraverso un campo magnetico, la nuvola viene divisa in due. Le due nuvole più piccole in cui viene scissa possono essere allontanate tra loro quanto vogliamo, anche chilometri e chilometri, o fino all'altro capo dell'universo. Tuttavia, esse rimangono sempre correlate, per cui qualunque cosa succeda all'una si riverbera istantaneamente sull'altra. Questo fatto lascia spesso interdetto chi ascolta, perché dice, sostanzialmente, che nel mondo virtuale c'è una libertà tale da frantumare qualsiasi vincolo. Non solo le disuguaglianze di Bell, ma anche la velocità della luce, la velocità massima con la quale possiamo trasmettere i segnali nel mondo reale, oppure la nota legge $E = mc^2$: queste restrizioni sono impotenti sulla virtualità. E quindi succede che, se un rivelatore che interagisce con la nuvola nella zona A rivela l'effettiva presenza della particella in quei paraggi, automaticamente, istantaneamente, la nuvola della zona B lo viene a sapere, ed altrettanto istantaneamente si adegua e sparisce. Pertanto, se un osservatore nella zona B cercherà successivamente la particella in quella zona, non la troverà. Quel che è importante sottolineare è che abbiamo la certezza assoluta che non la troverà. Ma lui non sarà istantaneamente consapevole di avere quella certezza, e quindi non potrà sfruttarla per fare puntate a colpo sicuro. Potrà venire a sapere di avere quella certezza soltanto do-

po un tempo minimo, quello necessario a mandargli un'informazione reale, che viaggia al massimo alla velocità della luce.

La biforcazione quantistica, il fenomeno chiave della fisica dei quanti, è fatta di un input, e due output possibili. Non possiamo prevedere quale sarà l'output effettivo di un singolo esperimento, come non lo possiamo forzare, perché quell'output è creato dall'evento stesso. Più in generale, abbiamo una multiforcazione: tanti output diversi possono avere luogo a partire dallo stesso input.



Queste proprietà possono richiamare alla nostra mente qualcosa come il lancio di una moneta, dove i risultati possibili sono testa e croce. Oppure un getto di dadi al casinò, o la roulette. Tuttavia, il caso dovuto ai quanti è *caso vero*, mentre quello prodotto dal lancio della moneta, o dal getto dei dadi al casinò, è un *caso simulato*. La differenza principale tra i due tipi di caso l'abbiamo in realtà già spiegata. Nel caso vero la realtà viene sospesa nella fase del durante, mentre nel caso simulato non è mai sospesa: la moneta non cessa affatto di esistere quando la lanciamo. Non esiste alcuna cella universale elementare di indeterminazione, nel caso simulato. Di conseguenza, nel caso simulato non esiste alcuna impossibilità di principio a prevedere il risultato finale, mentre nel caso vero, quello che solo i quanti possono dare, quell'impossibilità di principio è il cuore di tutta la questione. Per questo diciamo che il risultato finale di un fenomeno quantistico è *indeterminato*, mentre il risultato finale di un comune getto di dadi è soltanto *molto difficile da prevedere*. Lo potremmo prevedere, in effetti, se riuscissimo a controllare molto bene il modo con cui effettuiamo il getto dei dadi, perché il risultato del lancio non è creato seduta stante, ma già determinato, univocamente, dal lancio stesso. Alcuni ricercatori volenterosi si sono presi la briga di dimostrare la cosa per bene, costruendo un braccio meccanico allo scopo. Facendo lanciare la moneta al braccio meccanico, e controllando il lancio con precisione sufficiente, hanno dimostrato che

è possibile far uscire testa, o croce, quando si voglia.

Come visto nella lezione precedente, dobbiamo dire che l'atomo non esiste, nella fase della virtualità, perché se esistesse ci porterebbe alle disuguaglianze di Bell, confutate dagli esperimenti. Per questo diciamo che nel caso vero, quello quantistico, la realtà viene interrotta tra il prima e il dopo. Ma nel caso simulato, invece, non c'è mai alcuna interruzione della realtà. Possiamo seguire la moneta, o i dadi, per tutta la durata del lancio. Volendo, possiamo riprenderli con un telefonino. Il durante esiste, per cui non è un vero durante. Nel caso vero non abbiamo modo di descrivere ciò che collega il prima al dopo restando nell'ambito delle variabili reali, cioè variabili che corrispondono ad entità reali. Occorre, per esempio, far ricorso a certe nuvole, o stati, che non corrispondono a nulla di reale. Invece, nel caso simulato si può descrivere ogni situazione intermedia come completamente reale.

Il lancio di una moneta simula un evento casuale perché le variabili che determinano il risultato finale a partire dalle condizioni iniziali sono così numerose da non permetterci di tenere traccia di tutte con la precisione necessaria, per cui finiamo col confondere una nostra incapacità pratica con un'impossibilità di principio. Il caso simulato è un fenomeno *statistico*, cioè un effetto dovuto alla presenza di un gran numero di atomi, o al concorso di un gran numero di variabili. Invece, il caso vero è un fenomeno *quantistico*, cioè un fenomeno di tipo completamente nuovo, non riconducibile alle tipologie di fenomeni note in precedenza. In quanto fenomeno quantistico, è un fenomeno *elementare*, per cui ha luogo anche coinvolgendo *un atomo solo*. Per questo, il caso vero non è vincolato ad obbedire alle disuguaglianze di Bell, mentre il caso simulato è vincolato a quelle. Per ora ci accontentiamo di queste puntualizzazioni. Torneremo in seguito su questi argomenti.

Abbiamo appreso che il mondo reale è estremamente vincolato, mentre il mondo virtuale non lo è per nulla. Esso è totalmente libero. In un certo senso, il virtuale è la libertà stessa, la creatività senza limiti. Nel virtuale l'"informazione" viaggia istantaneamente in tutto l'universo: non c'è distanza, vincolo o restrizione che tenga. Nemmeno la famosa equazione $E = mc^2$ vale nella virtualità. Il quanto è libero di andare a de-

stra o a sinistra, oppure “prendere due strade contemporaneamente”, o nessuna. Quando trova un rivelatore sulla sua strada, come per esempio quello che mettiamo nella zona A, l’interazione col rivelatore lo può costringere all’esistenza in A. In quel caso, “finisce per materializzarsi lì”. Oppure, il rivelatore lo costringe a *desistere*, cioè a rinunciare ad esistere in A, negandogli la possibilità di materializzarsi là. Quando, insomma, un rivelatore, un oggetto macroscopico, interagisce con la nuvola, o anche una sola parte di essa, succede qualcosa che si riverbera su tutto il resto della nuvola. Ed è qualcosa di definitivo, qualcosa che “toglie libertà” all’atomo stesso, proprio perché lo costringe a materializzarsi in un luogo ben preciso, come il rivelatore messo in A, oppure lo costringe a sparire dalla zona A per ripiegare tutto nella zona B. Questo lo priva, foss’anche solo per un attimo, della libertà che aveva nel durante.

State afferrando cosa sto dicendo? Sto dicendo che nel mondo dei quanti l’esistenza è la privazione della libertà! Nel momento stesso in cui l’atomo esiste, cessa di essere libero, mentre prima, quando era virtuale, l’atomo era così libero da non essere nemmeno costretto ad esistere. Non era nemmeno obbligato ad “essere”.

Alla luce di tutto ciò, che cos’è quella che noi chiamiamo realtà? Possiamo fare un passo avanti su questa questione se ce la immaginiamo, in un certo qual modo, come il *bordo della virtualità*. Immaginate il mondo come fatto, nella sua quasi totalità, di virtualità. Ebbene, il confine, il limite ultimo della virtualità è quello che noi chiamiamo mondo reale. È la frontiera, quella parte di “mondo” nella quale la libertà del mondo virtuale viene persa. Per cui, se torniamo al caso dell’atomo che viene diviso in due, cioè la cui nuvola viene divisa in due come marmellata, capiamo benissimo che finché restiamo in quella fase, cioè nel virtuale, la libertà di quell’atomo è immensa, perché la nuvola non è soggetta a vincoli di sorta, tra cui l’esistenza, la velocità della luce e la legge $E = mc^2$. L’atomo è ubiquo, la sua nuvola è distribuita in tutto l’universo. Ma nel momento in cui la nuvola interagisce con un oggetto macroscopico, viene privata della sua libertà: le viene impedito di continuare a vagare per il cosmo, per così dire, e viene “costretta ad esistere”, a “stare qui” e “non stare là”, prendendo la forma di “un atomo”. Pertanto, il

dubbio amletico “essere o non essere” è qualcosa che riguarda soltanto la realtà, ma non la virtualità, perché tra essere e non essere c’è una terza via, che è quella della libertà dell’atomo, o di qualunque particella, nella fase virtuale, perché quell’atomo virtuale “è”, “non è” e “non non è” allo stesso tempo.

Vi accorgete, spero, che stiamo usando le parole del vocabolario in una maniera che potrebbe essere percepita come poco rigorosa, o perfino auto contraddittoria. Il motivo è che le nostre parole sono costruite a partire dall’osservazione del mondo reale che ci circonda, e quindi non possono essere adatte a descrivere il virtuale, visto che ciò che è virtuale non è, non “esiste”. Ciò che il mondo dei quanti, la fisica quantistica, arrivano a dirci è che la nostra parola è intrinsecamente difettosa, inadatta, approssimativa, grossolana e rozza. Ma se fa difetto la parola, fanno difetto il pensiero, la ragione, l’intelligenza, l’intenzione, la coscienza, la volontà. Forse che il logos, lungi dall’essere quell’idolo che molti adorano, è intrinsecamente “bacato”? Stiamo anticipando tematiche che dovremo affrontare in seguito, per ricordarci che i quanti ci costringono a rivedere tutta, ma proprio tutta, la nostra presunta comprensione del mondo. Anche perché ogni presunta comprensione del mondo si basa sulla “parola”, e ogni lingua è costruita a partire dal verbo “essere”. Ed è chiaro che, se cade la parola, crolla tutto.

Nessuno sconvolgimento simile può venire dai fenomeni che potremmo chiamare “orizzontali”, cioè quelle “curiosità fisiche” che riguardano ciò che poteva essere così, e invece è colà. Il tempo non è assoluto? Bene, è relativo. Andato. Dovrei farmi sconvolgere da questo? Lo spazio si incurva? D’accordo, me lo segno. Devo provare dei brividi in proposito?

Personalmente, non trovo niente di interessante nell’apprendere qualcosa che avrebbe potuto essere diversamente senza sconvolgermi. La fisica orizzontale è impiegata spesso per intrattenere, corredata magari di “effetti speciali”, usando anche i quanti, ogni tanto, come contorno. E allora la comunicazione della fisica finisce per diventare narrazione, una specie di romanzo. Quante volte ci devono raccontare di questi fantomatici buchi neri, prima che ci vengano a noia? Sarà che

forse ho una "soglia di noia" molto bassa, ma l'impressione è che in giro abbondino il "facile", condito con tutte quelle spezie che devono destare stupore e meraviglia, per incrementare vendite, e ottenere click e like. Lo studio dei quanti è fisica "verticale", perché non soltanto scende nelle viscere dell'universo, ma anche in quelle del logos, cioè della nostra presunta comprensione del mondo. E se i quanti sconvolgono quella comprensione, possono portarci a comportarci in modo diverso, anche nella vita quotidiana, a prendere decisioni diverse. Possono avere una portata addirittura maggiore di quella che hanno le religioni, perché, essendo fisica, hanno dalla loro tutto il potere di convincimento che ha la concretezza della fisica.

Così come una religione, facendo ipotesi gratuite, cioè non verificabili, su ciò che sarebbe il mondo, ha impatto sulle decisioni di molte persone, sui loro comportamenti quotidiani, altrettanto effetto può avere la conoscenza delle leggi fisiche, soprattutto quelle che sconvolgono la logica. Com'è possibile oggi, nel ventunesimo secolo, impostare la propria vita sull'ignoranza di ciò che conosciamo da più di cent'anni riguardo alla natura? Com'è possibile continuare a credere che viviamo in un mondo di cause ed effetti (o magari colpe e peccati, bene e male, responsabilità e punizione, giusto e ingiusto, coscienza, volontà e libero arbitrio)? E adagiarsi su narrazioni facili, che sono state peraltro alla base della maggior parte del pensiero filosofico di tutta la storia dell'umanità? Com'è possibile continuare a buttare tempo e vita nell'inseguimento di illusioni e chimere?

7 Lo spin

Lo spin è una proprietà intrinseca delle particelle elementari. Esso ci permette di descrivere dei sistemi quantistici particolarmente semplici, con i quali possiamo illustrare le proprietà "magiche", per così dire, della fisica dei quanti, in modo diverso e per certi aspetti più chiaro che usando la posizione, l'impulso o la velocità, come abbiamo fatto finora.

Le particelle elementari hanno alcune caratteristiche intrinseche che le identificano, tra cui la massa, la carica elettrica e, appunto, lo spin. La massa è un numero che può avere qualunque valore da zero a infinito. Essa misura, in un certo senso, l'inerzia, o "resistenza al moto". Particelle di massa nulla sono, per esempio, il fotone e il gravitone (l'analogo del fotone per le interazioni gravitazionali). Particelle di massa molto piccola sono i neutrini. Una particella di massa relativamente grande è, per esempio, il quark top. Particelle di massa grandissima sono l'inflatone, necessario per descrivere l'universo primordiale, di cui parleremo in seguito, e la particella fake prevista dalla teoria della gravità quantistica proposta da me nel 2017, di cui pure parleremo in seguito.

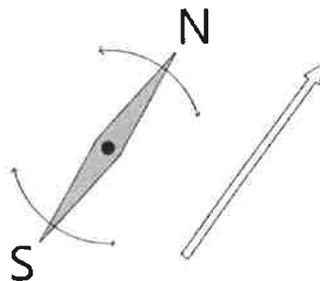
La massa, di solito indicata con m , descrive come la particella reagisce alle interazioni gravitazionali. Essa non è quantizzata, cioè non è multiplo intero di una quantità minima, ma può avere qualunque valore non negativo. La carica elettrica, di solito indicata con q , può essere positiva, negativa o nulla. Essa descrive l'interazione della particella con il campo elettrico, e, più in generale, gli effetti su di essa delle interazioni elettromagnetiche. La carica elettrica è quantizzata, cioè è multipla intera di una carica elettrica elementare, che è quella dell'elettrone, che ha carica $q_e = -1$. La carica del protone è $q_p = +1$. I quark, che sono poi i

costituenti elementari del protone, hanno cariche frazionarie, come $1/3$, $2/3$, $-1/3$, eccetera. Per ora, l'esistenza dei quark è solo un'ipotesi, perché non sono mai stati osservati direttamente. Oltre ai protoni, essi costituiscono i neutroni e tante altre particelle "composte", chiamate adroni. Osservare un quark non è impossibile, in principio. Tuttavia, per una questione legata ad una particolare simmetria che descrive le loro interazioni, non è facile separare i quark dai composti di cui fanno parte. Tutto ciò che sappiamo è che la teoria che descrive gli adroni in termini di queste ipotetiche particelle elementari, i quark, fornisce parecchie predizioni in accordo con i dati, e nessuna contraddizione, almeno per il momento. Per questo motivo pensiamo che questi costituenti "esistano", anche se la stessa teoria prevede che sia molto difficile osservarli direttamente.

Ebbene, se i quark hanno cariche frazionarie e quantizzate, multiple di $1/3$, il protone, che è fatto di tre quark, può avere carica 1, come infatti ha. L'elettrone, invece, è una particella elementare, per quanto ne sappiamo oggi, cioè non è costituita di particelle "più piccole".

Così come la carica descrive l'interazione della particella col campo elettrico, lo spin descrive l'interazione della particella con il campo magnetico. Possiamo descrivere lo spin facendo riferimento all'ago di una bussola. Esso è fatto di due poli, il polo nord e il polo sud. Ruotando attorno al fulcro centrale, l'ago assume una posizione corrispondente a quella del campo magnetico nel quale è immerso. Pertanto, possiamo descrivere l'ago della bussola con una freccia, cioè un segmento orientato dal polo sud al polo nord.

Essendoci due poli, questa freccia si chiama anche "dipolo" o "dipolo magnetico". Lo spin è essenzialmente il dipolo magnetico intrinseco di una particella elementare. È come se una particella elementare, ad esempio l'elettrone, avesse un proprio ago magnetico interno, tipo quello di una bussola. Così diciamo che ha uno spin, cioè un proprio di-



polo magnetico, oltre a una carica elettrica e una massa.

In italiano la parola "spin" si traduce propriamente con "momento di dipolo magnetico intrinseco". La parola "momento" viene dal latino "movimentum", ed è usata in riferimento a quantità o proprietà dinamiche. Un "momento" misura, in un certo senso, la "carica di movimento", o "quantità di dinamica". Ricordiamo l'impulso $p = m \cdot v$, già introdotto, che si chiama anche "momento lineare", o "quantità di moto". Esso è il prodotto della massa (resistenza al moto) e della velocità (il moto vero e proprio).

A livello quantistico, l'osservazione dello spin dà risultati molto diversi da quelli forniti dall'osservazione di un dipolo magnetico ordinario, come l'ago di una bussola. Per esempio, a livello macroscopico è possibile, accendendo la luce, avere una percezione di un ago magnetico nella sua interezza, e vederlo roteare attorno al fulcro della bussola. Dopo un po' lo vediamo assumere una posizione di equilibrio, corrispondente alla direzione del campo magnetico nel quale è immerso. Tutto questo non è possibile a livello microscopico, perché laggiù non è possibile "accendere la luce". Accendere la luce vorrebbe dire investire il dipolo magnetico, cioè la particella elementare, di miliardi di fotoni (i quanti di luce emessi, per esempio, da una lampadina), ciascuno dei quali può essere "più grosso", in un certo qual senso, della particella che vogliamo osservare. E quindi, può disturbare l'esperimento che vorremmo descrivere, fino a impedirci di fidarci del risultato che troviamo. Di fatto, finiamo per fare un esperimento completamente diverso da quello che ci interessava. Vogliamo concentrarci sulle interazioni elementari, ma investire una particella elementare da un flusso fatto di un numero elevatissimo di fotoni non ci darebbe nessuna possibilità di fare osservazioni di quel tipo.

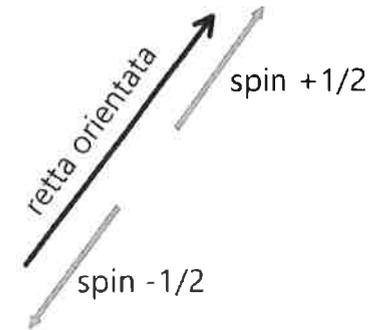
A livello macroscopico possiamo fare osservazioni senza disturbare apprezzabilmente ciò che ci proponiamo di osservare, almeno in linea di principio, immaginando di usare degli strumenti sempre più piccoli e leggeri. Se vogliamo misurare, per esempio, la temperatura dell'acqua contenuta in una vasca da bagno, dobbiamo immergervi un termometro. La colonnina di mercurio del termometro sottrae o cede un po' di calore

all'acqua, per uguagliare la sua temperatura a quella dell'acqua. Questo fa sì che la temperatura che misuriamo grazie alla colonnina di mercurio non sia esattamente la temperatura dell'acqua. Possiamo però ridurre l'errore che facciamo riducendo la quantità di mercurio che impieghiamo. Tuttavia, non possiamo ridurre l'errore arbitrariamente, perché non possiamo scendere sotto un atomo di mercurio. Uno strumento di misura fatto di atomi non può essere più piccolo di un atomo. È chiaro allora che incontriamo delle difficoltà quando vogliamo osservare un atomo, e pretendiamo di non disturbarlo. La buona notizia è che non è necessario incaponirsi su questi problemi, perché la teoria dei quanti li spazza via tutti, ridefinendo ogni aspetto della questione, compreso il significato stesso della *osservazione* della realtà. La brutta notizia, per alcuni, che sarebbero poi gli "aficionados del determinismo", è che non lo ridefinisce come loro vorrebbero.

Descriviamo allora che tipo di osservazioni possiamo effettivamente fare, a proposito dello spin, e che tipo di risultati otteniamo. Essendo lo spin un dipolo magnetico, la maniera più semplice per osservarlo è far interagire la particella con un campo magnetico, e vedere come si comporta. Che cosa possiamo decidere di guardare? Che cosa poi vediamo effettivamente? Se nel mondo che ci circonda abbiamo l'impressione di poter guardare quello che ci pare, a livello microscopico dobbiamo scegliere degli esperimenti particolari. Per esempio, possiamo scegliere di misurare lo spin di una particella lungo l'asse verticale, o l'asse orizzontale, o un altro asse qualunque. Ma non possiamo "vedere lo spin" in quanto tale, cioè misurarlo lungo i tre assi cartesiani contemporaneamente. Non esiste operativamente la possibilità di fare un'osservazione del genere.

L'elettrone è una particella che ha spin $\frac{1}{2}$, riferito a certe unità convenzionali. Ciò vuol dire che se misuriamo il suo spin lungo la verticale, possiamo ottenere due risultati, e due soltanto. Questi sono: spin in su e spin in giù. Se lo spin è in su, si dice che il suo valore è $+\frac{1}{2}$. Se lo spin è in giù, si dice che il suo valore è $-\frac{1}{2}$. Vediamo che anche lo spin è quantizzato, cioè i valori che può assumere sono multipli interi di una quantità fondamentale minima, che qui è normalizzata a $\frac{1}{2}$ invece che a 1.

Quando diciamo che l'elettrone ha spin $\frac{1}{2}$ intendiamo dire che la misura dello spin in una *qualunque* direzione (una retta), per esempio la verticale, può dare due risultati opposti: $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$. Scegliamo un verso convenzionale per orientare la retta, trasformandola così in una freccia. Allora "spin $+\frac{1}{2}$ " vuol dire che lo spin è diretto lungo la retta, e orientato come la freccia, mentre "spin $-\frac{1}{2}$ " vuol dire che lo spin è diretto lungo la retta, ma orientato in maniera opposta alla freccia.



Per esempio, se misuriamo lo spin in direzione orizzontale, possiamo trovare soltanto due valori: $+\frac{1}{2}$, che vuol dire spin $\frac{1}{2}$ in direzione orizzontale, orientato verso destra; oppure $-\frac{1}{2}$, che vuol dire spin $\frac{1}{2}$ in direzione orizzontale, orientato verso sinistra. Sottolineo che questi sono fatti sperimentali: non è possibile ottenere nessun altro tipo di risultati.

Ricapitolando, se misuriamo lo spin in verticale possiamo avere solo i risultati su o giù; se lo misuriamo in orizzontale possiamo avere soltanto i risultati destra o sinistra; se lo misuriamo in profondità possiamo avere solo i risultati avanti o indietro. In tutti i casi il valore è $\frac{1}{2}$, poi distinto in $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$ in base all'orientazione.

Ma *quale* dei due risultati permessi vedremo? Se lo misuriamo in verticale, vedremo su, o vedremo giù? Se lo misuriamo in orizzontale, vedremo destra, o sinistra? Se lo misuriamo in profondità, vedremo avanti, o indietro? Credo che a questo punto il lettore sia in grado di anticipare la risposta da solo. Sappiamo perfettamente ormai che a decidere il risultato della biforcazione quantistica è il fenomeno stesso, la natura, l'elettrone, quello che volete voi, ad ogni modo si tratta di un fenomeno creativo che genera il risultato ex-novo, un risultato che non era contenuto nei dati iniziali.

Veniamo ora allo spin del fotone. Il fotone, come sappiamo, è il quanto della luce e delle interazioni elettromagnetiche, cioè la loro

quantità minima fondamentale. Esso si indica convenzionalmente con la lettera greca gamma (γ), ed ha spin 1. Questo vuol dire che se misuriamo il suo spin possiamo trovare solo i valori $+1$ o -1 , cioè il doppio di quanto troviamo nel caso dell'elettrone. Il gravitone, l'analogo del fotone per le interazioni gravitazionali, ha spin 2. Questo vuol dire che se misuriamo il suo spin possiamo trovare soltanto $+2$ o -2 .

Una piccola differenza, che menzioniamo a latere, ma che non è cruciale per quanto stiamo per dire, è che nei casi del fotone e del gravitone, dove lo spin si chiama *elicità*, non possiamo scegliere arbitrariamente la direzione in cui misurarlo, perché essa coincide necessariamente con la direzione del moto. Questa proprietà è legata al fatto che queste particelle hanno massa nulla, per cui non possono stare ferme, ma sono "costrette a viaggiare" (alla velocità della luce). Per la precisione, sono costrette a farlo solo quando sono reali, perché nella virtualità non sono vincolate a tanto. Nella virtualità "esistono" anche i fotoni fermi, la "luce ferma"! Credo che anche questo, ormai, ci sorprenda poco, perché ci siamo abituati al fatto che la virtualità evade i vincoli della realtà.

Lo spin ci permette di studiare sistemi molto semplici, perché può assumere sempre e solo due valori, almeno nei casi elencati. In altri casi, un po' più articolati, ma neanche tanto, lo spin può assumere soltanto una manciata di valori, tipo tre, o quattro, o cinque. Per quanto ci interessa in questa lezione, queste variazioni sul tema non sono importanti, per cui ci basta analizzare lo spin nel caso più semplice, quello dell'elettrone, o del protone, in cui può valere solo $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

Parlando della posizione, abbiamo dovuto introdurre una certa nuvola per descrivere dove potesse essere l'atomo tra due osservazioni successive. Abbiamo detto che la nuvola è sparpagliata in tutto l'universo, cosa che ci costringeva a suddividerla, in principio, in un numero infinito di zone, che poi chiamavamo anche "stati". Il grosso vantaggio dello spin è che abbiamo solo due "stati", o configurazioni possibili.

Possiamo chiarire meglio cosa voglia dire tutto ciò, spiegando la dinamica degli esperimenti che coinvolgono lo spin, nella sequenza pri-

ma \rightarrow durante \rightarrow dopo. Supponiamo di partire da un elettrone con uno spin diretto in una direzione obliqua generica, che neanche conosciamo. Decidiamo di misurare il suo spin lungo la direzione verticale. Ripetendo l'esperimento tante volte a partire da identiche condizioni iniziali (cioè: identica orientazione dello spin iniziale), vediamo che possiamo trovare solo due risultati finali: spin in su e spin in giù. Alle volte troviamo l'uno, alle volte l'altro. Qual è la probabilità di trovare l'uno o l'altro? In questo caso non è 50% e 50%, ma dipende dall'orientazione dello spin nello stato iniziale (spin in direzione obliqua ignota). Siccome abbiamo detto che non conosciamo nemmeno lo stato iniziale, non ce ne preoccupiamo e andiamo avanti.

Concentriamoci su un esperimento particolare di quelli appena fatti, e supponiamo che il risultato che abbiamo trovato sia stato spin in su. A questo punto ripartiamo. Cioè, partiamo da un elettrone che sappiamo avere spin in su ($+\frac{1}{2}$), e facciamo altri esperimenti.

Cosa vuol dire che *sappiamo* che lo spin dell'elettrone è in su? Vuol dire che, se misuriamo di nuovo lo spin in direzione verticale, ritroviamo il risultato già trovato: spin in su. Questo è l'unico caso in cui sappiamo prevedere il risultato di un fenomeno quantistico in anticipo: quando ripetiamo due o più volte la stessa misura appena fatta. Pertanto, con probabilità uguale al 100% troveremo che lo spin è diretto verso l'alto. Tra parentesi, se non fosse vero nemmeno questo, allora sì che saremmo messi male...

In sostanza, con la prima misura abbiamo determinato il sistema, e gli abbiamo "assegnato" lo spin in su. Anzi, è il sistema che si è determinato da solo, cioè ha "deciso" in che forma apparire. Se è uscito lo spin in su, continuerà ad uscire lo spin in su tutte le volte che ripeteremo la misura dello spin in direzione verticale, a patto che non facciamo *nessun altro tipo di misura* nel frattempo. Se ripetiamo lo stesso esperimento una, due, mille volte di fila, troveremo sempre lo stesso risultato, con probabilità 100%: spin in su.

Supponiamo adesso di interrompere questa catena di ripetizioni dello stesso esperimento, e di fare, a un certo punto, un esperimento diverso. Partiamo sempre dal nostro spin diretto verso l'alto, ma sta-

volta non misuriamo più lo spin lungo la verticale: lo misuriamo in orizzontale.

Se fossero vere le leggi della fisica pre-quantistica, potremmo dire: "Se parto da uno spin diretto verticalmente, e misuro lo spin orizzontalmente, troverò sicuramente zero. Infatti, una freccia (lo spin) diretta in verticale non ha nessuna componente orizzontale. Se avesse una componente verticale e anche una componente orizzontale, sarebbe obliqua, non verticale!"

Il punto è che, quantisticamente, il valore 0 non è permesso! I risultati di una misurazione sono soltanto $+1/2$ e $-1/2$, come già detto. Non esiste nessun'altra possibilità. Pertanto, se noi partiamo da uno spin diretto verso l'alto e misuriamo il suo spin in orizzontale, possiamo trovare soltanto i due risultati $+1/2$ e $-1/2$, che vorrebbero dire destra o sinistra. Questi sono gli unici due risultati che l'esperimento può dare. Dopodiché, se supponiamo che il risultato sia, ad esempio, destra, il nostro elettrone è come se si fosse "girato". Prima aveva lo spin in su e dopo ha lo spin a destra.

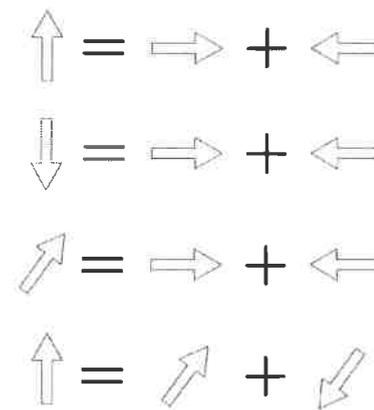
Come vediamo, nel mondo dei quanti non esiste la possibilità di fare una misura nuova senza cambiare lo stato del sistema, senza interferire con quello, tranne in quell'unico caso in cui ripetiamo esattamente l'esperimento fatto un attimo prima. Allora siamo sicuri di trovare lo stesso risultato già trovato.

Alla luce di queste osservazioni, siamo sicuri di osservare una realtà *esterna* a noi? Non stiamo per caso osservando noi stessi? E poi: siamo stati noi a costringere lo spin a girarsi? A fargli fare la scelta di girarsi verso destra o verso sinistra? Per la verità, no. Lo abbiamo già detto: sceglie "da solo". Noi abbiamo solo deciso di farlo entrare in interazione con un sistema macroscopico, fatto di molti atomi, che è il rivelatore con cui abbiamo misurato lo spin. Di fatto, ciò ha proiettato lo spin, che era diretto in verticale, in una direzione orizzontale, costringendolo ad assumere uno degli unici due valori permessi orizzontalmente, che sono destra o sinistra.

Qual è la probabilità dell'uno e dell'altro? Stavolta la conosciamo. Partendo dallo stato che abbiamo considerato, cioè spin in su, la proba-

bilità è proprio 50% a destra e 50% a sinistra. Questo è un esempio molto semplice della biforcazione quantistica che è alla base di tutta la teoria dei quanti, in cui partiamo da uno stato iniziale, in questo caso lo spin in su, e abbiamo due stati finali possibili ed equiprobabili, cioè spin a destra e spin a sinistra. La scelta è in mano all'elettrone stesso, alla natura, al mondo, a quel che volete voi (parole, parole, parole...): creata seduta stante.

Questa proprietà si esprime matematicamente dicendo che lo stato



di spin in su si può scrivere, nel durante, anche come la sovrapposizione degli stati di spin a destra e spin a sinistra. Nella sovrapposizione in questione, quei due stati sono quantisticamente correlati. Proprio come gli stati "atomo in A" e "atomo in B" in cui si viene a trovare un atomo in un campo magnetico, prima che andiamo ad osservarlo.

Ma allora vuol dire che lo stato di spin in su non ha alcuna sua consistenza intrinseca! Immaginate che qualcuno vi venga a dire: "Marco è alto, e, come tutti sanno, 'alto' è una sovrapposizione di 'robusto' e 'slanciato'. Pertanto, quando ci interroghiamo in merito alla corporatura di Marco, potremo trovare tanto che è robusto, quanto che è slanciato, con probabilità 50% e 50%". Lo prendereste per pazzo.

Chi vi dice che le cose stanno effettivamente come abbiamo detto, in merito ai nostri spin? Chi vi assicura che non mi sto inventando tutto? Ve lo assicurano gli esperimenti descritti sopra. A forza di ripetere esperimenti come quelli, e combinarli nelle sequenze più disparate, si arriva a questa conclusione: lo spin in su può essere descritto come la sovrapposizione di spin a destra e spin a sinistra.

Ripetiamo ora esperimenti simili, ma con una variazione. Stavolta, dopo aver ottenuto lo stato di spin in su, decidiamo di fare la misura successiva non in orizzontale, ma in profondità. Seguirà tutto come pri-

ma, ma al posto di “spin a destra” dovremo sostituire “spin in avanti” e al posto di “spin a sinistra” dovremo sostituire “spin indietro”. Scopriamo allora che lo stato “spin in su” è anche esprimibile come la sovrapposizione degli stati “spin in avanti” e “spin indietro”.

E avanti di questo passo. Esperimento dopo esperimento, riusciremo a ricostruire il puzzle. Uno stesso stato, come spin in su, è esprimibile in tantissimi altri modi. Di volta in volta, scelgo quello che più si adatta alla misura *successiva* che voglio fare. Così posso ricavare la probabilità dei risultati permessi in quella misura. Non saprò mai *quale* risultato uscirà in un singolo tentativo, perché sarà creato seduta stante, ma saprò quale probabilità avrà di uscire, e quale probabilità avranno tutti gli altri.

Se avessimo trovato lo stato “spin in giù” al posto dello stato “spin in su” non sarebbe cambiato quasi nulla di quanto abbiamo detto. Anche lo stato “spin in giù” è una sovrapposizione degli stati “spin a destra” e “spin a sinistra”, ma è una sovrapposizione un po’ diversa. Esso è anche una sovrapposizione, un po’ diversa da prima, degli stati “spin in avanti” e “spin indietro”. Analogamente, si troverà che lo stato “spin a destra” è anche una sovrapposizione degli stati “spin in su” e “spin in giù”, che lo stato “spin in avanti” è anche una sovrapposizione degli stati “spin a destra” e “spin a sinistra”, e così via, all’infinito.

Infine, se partiamo da uno spin obliquo e facciamo la misura dello spin in orizzontale, troviamo di nuovo solo due risultati possibili: destra o sinistra, ma stavolta non con probabilità 50% e 50%, ma probabilità diverse, dipendenti dall’inclinazione di quello spin obliquo. Anche un qualunque spin obliquo si può scrivere come una sovrapposizione di “spin a destra” e “spin a sinistra”, o in tantissimi altri modi. E la sovrapposizione è diversa dalle due incontrate sopra, e dipende dall’inclinazione dello spin obliquo.

Ma allora, se è così, cos’è ciò che “è”? Cosa vuol dire “essere”? Come può, “su”, essere una sovrapposizione di “destra” e sinistra”? E come può “destra” essere una sovrapposizione di “su” e “giù”? “Silvia, essendo alta, è una sovrapposizione tra una bionda e una mora. Anche Anna, più bassina, è una sovrapposizione tra una bionda e una mora, ma

una sovrapposizione un po’ diversa. Marco, invece, è biondo, quindi è una sovrapposizione tra un alto e un basso”. Stiamo uscendo tutti di testa? Ma il mondo dei quanti doveva proprio essere così... “allegro”? Beh, dobbiamo farcene una ragione. Non solo è così, ma di fronte a quel mondo tutto quello che credevamo di aver capito in secoli e secoli di storia del pensiero evapora all’istante.

Quanto abbiamo detto ci può apparire meno schizofrenico se ricordiamo che stiamo pur sempre parlando del durante, non della “realtà”, e che al durante non si applicano i vincoli che si applicano alla realtà. Nel durante, uno stato di spin in su è effettivamente una sovrapposizione degli stati di spin a destra e di spin a sinistra, com’è una sovrapposizione di avanti e indietro, eccetera. Così, se ci fosse un durante anche per la nostra Silvia potremmo dire che, in quel durante, “Silvia, che è alta, è la sovrapposizione tra una bionda e una mora”. Tuttavia, come spiegato nel caso del gatto di Schrödinger, non c’è praticamente nessun durante per gli oggetti macroscopici, perché la loro esistenza non viene praticamente mai interrotta. “Va bene”, qualcuno potrebbe obiettare, “lo abbiamo capito. Praticamente è così. Ma è quel *praticamente* che comincia a farci girare la testa”. Non è una gran consolazione sapere che l’unico motivo per cui Silvia non è una sovrapposizione tra una bionda e una mora sta in quel “praticamente”.

Il mondo microscopico ci mostra che uno stato si può scrivere come sovrapposizione di altri stati. Ma è anche vero che il mondo macroscopico è pur sempre fatto di quello microscopico. Pertanto, possiamo estendere quelle proprietà anche agli oggetti macroscopici, strettamente parlando. Il fatto che non ci sia “nulla di cui preoccuparsi, praticamente”, ci lascia comunque interdetti. E infatti ci dovremo tornare, per spiegare meglio cosa sta succedendo.

Matematicamente, si può esprimere uno stato in tantissimi modi diversi. Caso per caso, scegliamo quello che corrisponde alla misura che abbiamo intenzione di fare *dopo*. Abbiamo visto, che, per esempio, sia lo spin in su che lo spin giù sono, tra le tante possibilità, sovrapposizioni di “spin a destra” e “spin a sinistra”. Ma sono sovrapposizioni un po’ diverse. Ciò che lascia perplessi è che i risultati finali, destra e sinistra, ab-

biano ciascuno il 50% delle probabilità di uscire, tanto se partiamo dallo spin in su, quanto se partiamo dallo spin in giù. Quindi destra e sinistra sarebbero sovrapposizioni diverse, fatte però con gli stessi ingredienti (su e giù), ciascuno presente nella stessa quantità. Come è possibile fare sovrapposizioni diverse con gli stessi ingredienti nelle stesse quantità? A ricette uguali, pietanze uguali, diremmo noi.

Le quantità degli ingredienti sembrano le stesse, se ci limitiamo alle misure descritte sopra, ma possiamo farne di più sofisticate per andare a scoprire che le differenze ci sono, in effetti. Finora abbiamo descritto gli esperimenti più elementari, perché ci siamo limitati a guardare cose tipo destra e sinistra, e annotare percentuali, cioè numeri che vanno da 0 a 1. Ma se vogliamo esplorare la virtualità per bene, dobbiamo rimboccarci le maniche. Anche perché, ormai, ci stiamo rendendo conto di esserci messi finalmente sulla strada giusta. Quindi si tratta solo, appunto, di lavorare con pazienza per carpire alla natura i suoi segreti.

Il risultato è che, per descrivere la virtualità non bastano numeri semplici come quelli che descrivono le percentuali (3%, 5%, 21%, ...), che poi sono tutti numeri tra 0 e 1 (40% è 40 diviso 100, cioè 0.4). E non bastano nemmeno i numeri naturali (0, 1, 2, 3, 4, 5, ecc.), o i numeri interi (che sono i naturali più -1, -2, -3, -4, ecc.), o i numeri razionali (che sono gli interi più $1/3$, $2/5$, $7/421$, -0.4, 3.514, ecc.), o i numeri reali (che sono tutti i numeri che hanno uno sviluppo decimale, qualunque esso sia, come 32,192782...).

Ci vogliono i *numeri complessi*, che sono *coppie* di numeri reali, appaiati in un certo modo, molto speciale, di cui parleremo in seguito. Questo per dire che nella virtualità esiste una grande varietà di possibilità, che vengono inevitabilmente perse quando ci avviciniamo al bordo della virtualità stessa, che è poi la realtà. Cioè: nel passaggio dalla virtualità alla realtà si perde irrimediabilmente "qualcosa". Qualcosa di molto importante, anzi cruciale. Molte opzioni non si manifestano più, una volta fatto l'esperimento. La versatilità dei numeri complessi ci permette, con una certa nonchalance, di formulare sovrapposizioni diverse degli stessi ingredienti nelle stesse quantità, di esprimere uno stesso stato in una miriade di modi diversi, a seconda della misura successiva che

vogliamo fare. Insomma, di fare tutto quello che ci serve per studiare la fisica dei quanti. I numeri complessi, infatti, sembrano essere l'alveo naturale della virtualità, della non realtà. Là, nei numeri complessi, "vivono" i quanti. La nuvola di cui abbiamo parlato fin dall'inizio, cioè la funzione d'onda, vive là. Gli stati che abbiamo introdotto stanno là. E, per qualche misterioso motivo, che non abbiamo ancora spiegato, quei numeri "non esistono", esattamente come la virtualità. Per ora ci accontentiamo di questo, ma ci torneremo.

8 Creazione, distruzione, cancellazione, rigenerazione

Veniamo a un altro aspetto dei fenomeni quantistici che colpisce parecchio per il suo significato. Abbiamo detto più volte che il fenomeno quantistico elementare è una biforcazione, o, più in generale, una multiforcazione. Partiamo da uno stato iniziale, ma a quello può seguire una pluralità di stati finali, che chiameremo output 1, output 2, ecc. Possono essere tanti, anche infiniti, ma per descrivere il nocciolo della questione ne bastano due, come nel caso dello spin $\frac{1}{2}$. L'importante, per quel che ci riguarda, è che non è possibile sapere quale sarà il risultato finale a partire dallo stato iniziale: il risultato finale viene creato seduta stante. Quindi il fenomeno quantistico è un fenomeno creativo.

L'altra faccia della medaglia è che il fenomeno quantistico è anche un fenomeno distruttivo, "cancellativo", se volete. Del resto, se ci pensiamo bene, non è possibile creare senza annientare. Se è vero che non possiamo stabilire quale output seguirà l'input, è anche vero che non possiamo risalire all'input dall'output. Cioè, se conosciamo solo il risultato finale, non abbiamo speranze di risalire alla configurazione iniziale che lo ha prodotto, perché lo stesso risultato finale può provenire da tante configurazioni iniziali diverse. O siamo stati presenti al prima, e abbiamo preso nota, oppure non c'è nulla da fare: non possiamo risalire al prima dal dopo. Ciò illustra ancora meglio l'interruzione della realtà rappresentata dal durante, e lo fa, stavolta, guardando agli eventi dal dopo al prima, invece che dal prima al dopo.

Possiamo capire bene la proprietà chiave di cui stiamo parlando se

studiamo a fondo il caso dello spin. Abbiamo visto, nella lezione precedente, che se decidiamo di misurare lo spin in direzione orizzontale possiamo trovare soltanto "spin a destra" o "spin a sinistra". Supponiamo che il risultato finale sia "spin a destra". Allora possiamo soltanto dire che lo stato iniziale da cui proviene non può essere "spin a sinistra", mentre tutte le altre opzioni sono permesse. Infatti, sappiamo che, quando misuriamo lo spin in orizzontale partendo dallo stato iniziale "spin a sinistra", otteniamo con certezza assoluta "spin a sinistra". E se poi continuiamo a ripetere la misura dello spin in orizzontale, *senza mai fare alcun altro tipo di misura nel frattempo*, continuiamo a ritrovare "spin a sinistra". Ripetere una misura appena fatta è l'unico caso in cui possiamo prevedere il risultato finale.

Tornando a noi, da quale stato iniziale può provenire spin a destra? Può provenire da spin in su, spin in giù, spin in avanti, spin indietro, spin obliquo, e così via. Cioè, da qualunque stato iniziale *tranne spin a sinistra*, perché spin a sinistra è l'unico che dà spin a sinistra con certezza assoluta.

Matematicamente, succede che tutti gli stati tranne quello di spin a sinistra sono esprimibili come sovrapposizioni di spin a destra e spin a sinistra che contengono (questo è il punto cruciale) *almeno un po'* di spin a destra. Per questo, se misuriamo lo spin in orizzontale a partire da uno qualunque di loro, possiamo trovare il risultato finale spin a destra. Lo stato di spin a sinistra, per contro, è l'unico stato che *non contiene neanche un po'* di spin a destra, per cui non potrà mai essere seguito da una misura di spin a destra.

Ne concludiamo che il durante rende impossibile risalire al prima dal dopo. Questo vuol dire che ogni fenomeno quantistico resetta tutto: è un nuovo inizio. Crea la realtà, ma proprio perché crea una novità, annienta la realtà precedente, distrugge il passato. Nel fenomeno quantistico non viene tenuta memoria dello stato precedente. Una conseguenza è che nell'universo non c'è nessuna memoria del passato, strettamente parlando. A livello microscopico l'abbiamo appena visto: non c'è nessuna memoria, perché non possiamo risalire al prima dal dopo; anzi, abbiamo la cancellazione completa e totale di ciò che era prima. E

questo succede in ogni singolo evento quantistico, dove avviene la creazione del nuovo e la cancellazione del vecchio. E a livello macroscopico?

Gli eventi che accadono nel mondo che ci circonda sono comunque prodotti dalla combinazione di un numero enorme di eventi elementari come quelli che abbiamo descritto. Pertanto, quanto abbiamo imparato sul mondo microscopico, vale anche alle nostre scale di grandezza, solo che non ce ne possiamo accorgere altrettanto facilmente, visti i tempi in gioco. La memoria del passato suggeritaci dai fenomeni che ci circondano è parziale, illusoria, limitata. E, rispetto ai tempi dell'universo, effimera.

Mi lasciano sempre perplesso i discorsi sul cosiddetto "inizio dell'universo", essendo io ormai abituato ad un "pensare quantistico". Infatti, non ci può essere un "inizio". Oppure, possiamo dire che l'inizio è sempre ed ovunque: ogni evento quantistico è un nuovo inizio, un reset completo della realtà. Nel caso dello spin lo possiamo apprezzare in maniera molto pulita, perché stiamo analizzando un sistema elementare molto semplice. Si tratta di un sistema ideale, sotto molti aspetti. Se analizziamo un sistema complesso, fatto di molti più atomi, la cancellazione completa richiede più tempo, perché bisogna "resettare", per così dire, tutti gli atomi. Questo ci dà l'illusione di poter mantenere una memoria. Il ché è pure vero, ma non in assoluto. Lo possiamo fare soltanto per un tempo limitato. Per poter mantenere una memoria più a lungo dobbiamo usare più atomi.

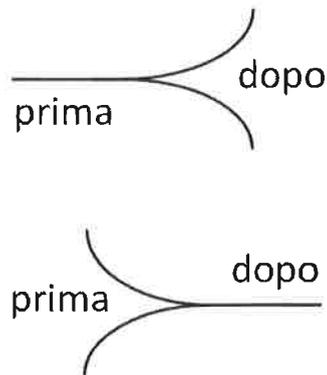
Il mondo che ci circonda, in cui gli oggetti sono fatti di tantissimi atomi, ci dà l'impressione della stabilità, proprio per questo motivo. Ci suggerisce l'idea dell'immutabilità, del determinismo. Ci fa credere che ad ogni input segua uno ed un solo output. Però sappiamo, dalla fisica quantistica, che il determinismo non è la vera "natura della natura", è soltanto l'apparenza di ciò che ci circonda. Se il determinismo fosse la legge della natura, non ci sarebbe mai nessuna creazione, e, simmetricamente, non ci potrebbe mai essere nessuna cancellazione. Determinismo vuol dire corrispondenza uno a uno tra presente, passato e futuro. È la negazione della biforcazione. Descrive il mondo immaginario ed illusorio dell'*ordine*, come l'ordine temporale, il mondo delle cause e de-

gli effetti, cioè il mondo a cui abbiamo sempre creduto. Un mondo che può andar bene a menti semplici, quelle di chi non vuole "noie", di chi fa fatica ad articolare il pensiero oltre una soglia minima, come la maggior parte dei filosofi che si sono succeduti nella storia (e gli stessi fisici, a dire il vero). E quel mondo è resistito a lungo, per secoli. Secoli e secoli di sforzi buttati a cercare "senso", "inizio", "scopo" o "fine". Finché non sono arrivati i quanti, a rovinare tutto. Hanno terremotato il mondo dell'ordine, e ci hanno costretto a rivedere tutto ciò che credevamo fermamente di aver capito.

Ripeto: nel determinismo abbiamo una corrispondenza "uno a uno", non "uno a molti", mentre nel fenomeno quantistico abbiamo proprio una corrispondenza "uno a molti". E non solo una corrispondenza uno a molti tra presente e futuro, ma anche una corrispondenza uno a molti tra presente e passato. Perché il presente può dare molti futuri diversi, ma, allo stesso tempo, può essere conseguenza di molti passati diversi. La biforcazione, in definitiva, può essere letta anche dal dopo al prima. Così la multiforcazione.

Nel determinismo la corrispondenza uno a uno tra presente, passato e futuro implica che il futuro è già scritto, che non c'è nessuna creazione, o creatività. Allo stesso tempo, implica che non c'è alcuna possibilità di cancellare il passato, e che si può tenere una memoria infinita di tutto. Anzi che si *deve* tenere memoria di tutto, perché non è concessa alcuna scelta, non è offerta alcuna alternativa. Per cui, se l'universo fosse governato dal determinismo, e voi conoscesto lo stato presente dell'universo stesso, potreste risalire a tutto il suo passato e predire tutto il suo futuro. Come? Applicando le leggi fisiche, risolvendo le equazioni deterministiche che governano l'evoluzione temporale del cosmo.

In *quel* contesto, cioè nell'ambito deterministico, può avere senso la domanda: "Qual è l'inizio dell'universo?" La risposta consisterebbe



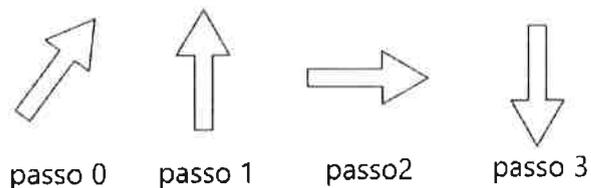
nell'esercizio di applicare le leggi fisiche a ritroso nel tempo per risalire al passato: il passato recente, come il passato remoto, come l'inizio del tutto. Non ci sarebbe nessun segreto, nessun mistero. La risposta sarebbe racchiusa nel nostro stesso presente! Sarebbe davanti e tutt'intorno ai nostri occhi. Forse sarebbe difficile estrarla dal presente, per via della quantità enorme di variabili coinvolte. Sarebbe difficile nel senso di complicato. Ma non si tratterebbe di una difficoltà concettuale, di principio, perché, concettualmente, la risposta sarebbe lì, davanti a noi.

Ma una volta che uno sa che i fenomeni quantistici sono quelli che vi ho descritto fin qui, e gli altri che incontreremo, capisce anche che ogni singolo evento è un reset, una ripartenza, un nuovo inizio, una cancellazione totale di tutto il passato, e una creazione ex novo del futuro. Per cui, non c'è nulla di "già scritto" nell'universo! Tutte le domande che ci facciamo comunemente sull'universo sono plasmate, condizionate, forgiate dal mondo che ci circonda e dalle proprietà apparenti che quello suggerisce, impropriamente estese al tutto. È chiaro, ormai, che quelle domande devono essere riviste e riformulate alla luce della conoscenza dei fenomeni quantistici. E magari abbandonate, a favore di altre domande, più appropriate. O si dovrà concludere che forse... è meglio stare in silenzio?

Un altro aspetto importante dei fenomeni quantistici è la rigenerazione. È vero che si può cancellare il passato, ma non lo si può cancellare per più di poco tempo, perché si può rigenerare successivamente. Non c'è nessuna cancellazione vera, nel senso di "morte". Tutte le sequenze, tutte le combinazioni già uscite, magari cancellate dalle successive, usciranno di nuovo, prima o poi, e lo faranno infinite volte. Pertanto, nel mondo dei quanti si crea, si distrugge, si dimentica, ma non si "perde" mai nulla. Vedete voi se questo voglia dire cambiamento, perché alla fine, in un certo senso, non cambia mai nulla. Ma se da una parte non cambia mai nulla, è anche vero che non rimane nessuna memoria di nulla. Non cambia mai nulla, e non si preserva mai nulla.

Per esempio, vi ho detto che se partite dallo spin obliquo e misurate lo spin in verticale, potete trovare solo spin in su o spin in giù. Supponete di trovare spin in su. Ora, spin in su cancella spin in giù: cioè, se

esce l'uno, vuol dire che non esce l'altro. Se è uscito spin in su, è spin in su, definitivamente. Nel senso che, se ripeto l'esperimento mille e più volte, ottengo sempre spin in su. Non otterrò mai più spin in giù.



Ma se io, invece, interpongo, tra due esperimenti di quel tipo, in cui osservavo lo spin nella direzione verticale, un esperimento diverso, in cui, per esempio, osservo lo spin nella direzione orizzontale, lo stato "spin in giù", che era stato distrutto, si può rigenerare. Poco dopo. Tranquillamente. Vediamo in dettaglio la sequenza di eventi che danno questo risultato. Al passo 0 (stato iniziale) ho lo spin obliquo. Al passo 1 (misurazione in verticale) trovo lo spin in su. Ciò cancella la possibilità di ottenere lo spin in giù. Se ripeto la misura del passo 1 otterrò sempre, infatti, spin in su. Ora cambio tipo di misura: al passo 2 misuro lo spin in orizzontale. Come risultato, avrò necessariamente lo spin a destra o lo spin a sinistra. Supponiamo che esca lo spin a destra. Al passo 3 misuro di nuovo lo spin in direzione verticale. Necessariamente, troverò uno stato di spin in su, oppure uno stato di spin in giù. Ciò vuol dire che al passo 3 può uscire lo spin in giù che pensavo di aver eliminato nel passo 1. Se rifaccio tante sequenze di esperimenti simili a quella descritta, un certo numero di volte uscirà effettivamente lo spin in giù al passo 3.

La cancellazione, quindi, è veramente un reset *totale*, al punto che quello che viene cancellato può anche rigenerarsi un attimo dopo. E questa è l'unica vera cancellazione, perché (pensiamoci un attimo), se non fosse così, cioè se voi riusciste davvero a cancellare qualcosa *per sempre*, allora si terrebbe memoria di qualcosa. Si terrebbe memoria di ciò che non può più ritornare. Ci sarebbe, in definitiva, un movimento irreversibile nell'universo, una direzione di avanzamento. Non sarebbe un reset completo. Ma nei fenomeni quantistici non c'è nulla che sia irreversibile. Non si può impedire il ritorno di alcuna configurazione. Cioè, si torna sempre al punto di partenza, come se nulla fosse accaduto.

E allora la domanda "qual è l'inizio dell'universo, il suo punto di partenza?" crolla rovinosamente. Si riparte ogni volta, si riparte da zero, senza nessuna memoria, pronti a costruire un altro futuro, e a vederlo sparire un attimo dopo.

Qualcuno potrebbe obiettare che ci sono anche cose che si conservano. Per esempio, le leggi della fisica: rimangono sempre le stesse. Non è una specie di memoria, questa? Un esempio è la legge che dice che, se parto dallo spin in su e poi misuro lo spin orizzontalmente, allora il risultato sarà "o spin a destra, o spin a sinistra". Questa legge è un fatto, ed è comunque un'informazione. Non so se lo spin si girerà verso destra o verso sinistra. Cosa farà, lo deciderà "lui". Ma so che si girerà "o a destra, o a sinistra". E questo *non* lo decide lui, questa è una legge fisica.

Ricordiamo che non possiamo dire qualcosa del genere rispetto al durante. Non possiamo dire che, nel durante, lo spin è orientato "o a destra, o a sinistra", perché vincoleremmo il dopo ad obbedire alle disuguaglianze di Bell, come spiegato nelle lezioni precedenti, e così saremmo smentiti dagli esperimenti. Ma possiamo sicuramente dire che le opzioni sono soltanto due riguardo al dopo, perché l'osservazione costringe la virtualità a materializzare la realtà in una delle due alternative permesse. Cioè, sappiamo che, una volta fatta la misura, una volta interrotta la virtualità, troveremo necessariamente lo spin girato "o a destra, o a sinistra". Rispetto al dopo, vale il *tertium non datur*. Non vale certamente per il durante, ma vale per il dopo. Questo, in effetti, lo possiamo dire.

È vero (almeno per il momento, ma ci dovremo tornare...): la legge fisica si conserva. La legge fisica non è mai cambiata. Ma proprio perché la legge fisica non cambia mai, non ci dà alcun appiglio per pensare ad un fantomatico "inizio dell'universo", e chiedere: "qual è l'inizio delle leggi fisiche?" Se le leggi fisiche non sono mai cambiate, non suggeriscono affatto cambiamenti nell'universo. Non parlano né di inizio, né di fine, né di fini.

Se, da una parte, abbiamo i fenomeni quantistici, che suggeriscono un reset in ogni istante, una ripartenza da zero, una creazione di una re-

altà nuova, e una cancellazione di tutta la precedente, con rigenerazione, dall'altra parte sappiamo anche che la legge fisica di fondo che governa quegli stessi reset è sempre la stessa. E allora si può dire che esiste qualcosa di immutabile, di fisso, nel mondo. Non solo, ma anche il cambiamento continuo dovuto alle biforcazioni quantistiche, è, come spiegato sopra, un *cambiamento in cui nulla cambia*, perché se non c'è memoria, non c'è nessun avanzamento, e quindi non c'è alcun traguardo finale da raggiungere. Sembra che anche l'imprevedibilità dei quanti, in fin dei conti, sia "sotto controllo", in qualche senso.

Certo! Possiamo abbandonare le peregrinazioni errabonde intorno al fantomatico "inizio" dell'universo, e così pure la chimera del movimento di avanzamento verso un qualche traguardo finale. Ma almeno abbiamo trovato delle certezze! Le leggi della fisica quantistica, le leggi dell'incertezza sono comunque certezze! Viva le certezze!

Ne siamo proprio sicuri? Dobbiamo tenere presente che la legge fisica non è *nella* natura. La legge fisica è soltanto la *nostra* descrizione *della* natura. Se notiamo che un fenomeno si ripete, diciamo che obbedisce ad una legge fisica, universale. Sempre quella, immutabile. Ma supponiamo che, invece, ad un certo punto qualcosa cambi. Supponiamo, per assurdo (ma neanche tanto), che le leggi fisiche cambino con il tempo. Sapete che cosa faremmo, a quel punto? Introdurremmo un parametro in più in quelle stesse leggi fisiche, per tenere conto del cambiamento. Formuleremmo, molto prosaicamente, delle nuove leggi fisiche, che incorporino quella modifica. E le nuove leggi fisiche, manco a dirlo, diventeranno immutabili. Fino al cambiamento successivo...

In altre parole, ce la cantiamo e ce la suoniamo un po' come vogliamo. Dire che la legge fisica non cambia non ha alcun senso, perché è soltanto la nostra descrizione della natura. Se la legge fisica cambiasse con il tempo noi descriveremmo quel cambiamento con una diversa legge fisica. Poi diremmo che la legge fisica così ottenuta è quella vera, e che *quella* non cambia.

Ci torneremo più avanti, quando ci chiederemo se ci sono veramente delle leggi fisiche *nella natura*. Per ora osserviamo che, per una serie di motivi connessi a come noi "funzioniamo", non possiamo, o non

vogliamo, uscire facilmente dalle nostre narrazioni. Più che spesso ne restiamo prigionieri. Occorre un certo allenamento, e una certa scalrezza, per riconoscere subito, e quindi evitare, quelle domande, molto frequenti, che non sono vere domande sulla natura, ma soltanto domande intorno alla narrazione stessa, cioè "domande interne" al discorso. Per contro, dobbiamo allenarci a farci domande su quello che osserviamo effettivamente, su quello che ci dicono gli esperimenti, non su quello che diciamo noi, o sentiamo dire da altri, perché le domande di questa seconda classe non hanno, e non possono avere, alcuna risposta. Quello che osserviamo è che in natura non c'è nessuna memoria del passato, che ogni evento è un inizio, e che ogni evento è una fine.

Le meraviglie della meccanica quantistica ci costringono a ripensare anche le cose più semplici, quelle che abbiamo dato per scontate per tutta la vita. Le domande più ingenuche che ci facciamo normalmente, per quanto profonde crediamo che siano, non sopravvivono di fronte al nuovo tipo di fenomeni. Non so più come dirlo, ormai, ma a questo punto del libro dovrebbe affiorare nel lettore il sospetto che, forse forse, dobbiamo davvero ripensare tutto, in una maniera completamente nuova. Forse dobbiamo portare il discorso all'estremo, e resettare noi stessi. Se teniamo conto che la nostra immaginazione e il nostro pensiero, financo la nostra logica, sono limitati dal fatto che sono stati plasmati dalla costante osservazione del mondo che ci circonda, che ha proprietà completamente diverse da quelle del mondo dei quanti, non è difficile capire che siamo stati portati fuori strada, e che l'inganno si è protratto per tutta la nostra vita. Per capire il mondo dei quanti sarebbe opportuno "rinascere", fare "tabula rasa", e aprire gli occhi, per la prima volta, sul mondo microscopico, come bambini appena nati. Con la differenza che non siamo in grado di fare veramente tabula rasa su di noi, per cui, per comprendere quello che la natura sta cercando di dirci a proposito dei quanti, dobbiamo fare un lavoro in più, rispetto a quello del bambino appena nato. E quel lavoro in più è allenarci a scansare tutti gli inganni e i pregiudizi di cui il nostro cervello è infarcito, demolire tutto ciò che abbiamo sempre dato per scontato, tutto ciò che sembrava funzionare così bene fino a ieri, e che può al massimo andare bene per

capirsi quando parliamo del mondo attorno a noi, ma che può non valere più quando estendiamo il discorso al di fuori di quello. In poche parole, cade tutto ciò in cui “credevamo”. Rinascere: questa è l'unica possibilità per immaginarsi l'inimmaginabile, e capire i quanti.

9 Bosoni e fermioni

Così come gli individui o le specie viventi possono essere sociali o asociali, anche le particelle elementari hanno comportamenti “sociali” o “asociali”, in un certo qual senso. Le prime si chiamano bosoni, mentre le seconde si chiamano fermioni. Come abbiamo visto, quando elenchiamo le proprietà fondamentali di una particella dobbiamo dire qual è la sua massa, qual è la sua carica elettrica e anche qual è il suo spin. Dal suo spin si può capire se è un bosone o un fermione.

La parola bosone deriva da Satyendra Nath Bose, fisico indiano, mentre la parola fermione deriva da Enrico Fermi. Qualunque particella è un bosone o un fermione. Se è un bosone il suo spin è intero, come 0, 1, 2, 7, ecc. Se è un fermione il suo spin è semintero, come $1/2$, $3/2$, $5/2$, $13/2$, ecc. I due tipi di particelle hanno proprietà completamente diverse, che si manifestano in condizioni particolari. Quando, per la precisione? Quando non consideriamo una particella alla volta, ma tante insieme. Cioè: studiamo il comportamento di un sistema fatto di tante particelle *identiche*, nel senso che vedremo. La natura bosonica o fermionica delle stesse specifica come le particelle si “aggregano”, in un certo senso, quando si trovano, numerose, nelle stesse condizioni. Bosoni e fermioni lo fanno in maniera essenzialmente diversa, cioè obbediscono a comportamenti statistici per certi versi opposti, che sono la statistica di Bose-Einstein per i bosoni e la statistica di Fermi-Dirac per i fermioni.

Facciamo un po' di fisica orizzontale prima di entrare nel merito, cioè degli esempi di bosoni e fermioni. Bosoni sono tutte le particelle che mediano le interazioni. Un esempio è il fotone, che media le interazioni elettromagnetiche e descrive la luce. La differenza tra i fotoni che

mediano le interazioni elettriche e magnetiche e i fotoni di “vera” luce è che i primi sono virtuali e i secondi sono reali. Poi abbiamo il gravitone, che media le interazioni gravitazionali, e propaga le relative onde. Poi ci sono i “bosoni intermedi” W e Z scoperti da Rubbia al Cern all’inizio degli anni 1980, che mediano le interazioni deboli. Poi i gluoni, che sono quei bosoni che mediano le interazioni forti e, per esempio, tengono uniti i quark all’interno dei protoni. Oltre a questi, esiste un bosone molto particolare, il bosone di Higgs, scoperto nel 2012. I fermioni, invece, si dividono in quark e leptoni. Questi ultimi sono l’elettrone, il muone, il tau e i loro neutrini (c’è un neutrino dell’elettrone, un neutrino del muone e un neutrino del tau). I quark sono di sei tipi, denominati up (su), down (giù), charm (fascino), strange (strano), top (cima) e bottom (fondo).

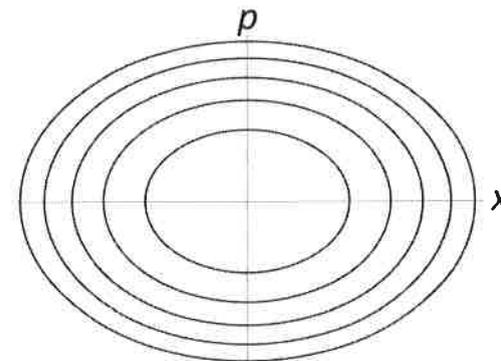
Quelle che abbiamo elencato sono particelle elementari. Possiamo poi avere particelle composte. Componendo un numero pari di fermioni si ottiene un bosone. Componendo un numero dispari di fermioni si ottiene un fermione. Componendo un numero qualsiasi di bosoni si ottiene un bosone. La ragione è questa: siccome il fermione ha uno spin semintero (cioè, un numero dispari diviso per due), due fermioni fanno un composto con spin totale intero (numero pari diviso per due), che quindi è un bosone. Non è possibile ottenere un fermione da soli bosoni, perché mettendo insieme delle particelle che hanno uno spin intero si può ottenere solo uno spin totale intero.

Nel seguito considereremo dei bosoni della stessa specie, per esempio fotoni, oppure bosoni di Higgs. Similmente, quando parliamo di fermioni ci riferiremo a fermioni della stessa specie. Per concretezza, saranno elettroni.

Per procedere, dobbiamo ricordare quel che dice il principio di indeterminazione, cioè che il prodotto dell’indeterminazione δx sulla posizione x per l’indeterminazione δp sull’impulso p non può essere minore di una costante universale \hbar , detta costante di Planck, divisa per due 2. Non esiste nessuna possibilità di determinare la posizione e l’impulso con precisioni maggiori del limite intrinseco previsto dal principio di indeterminazione. Abbiamo anche visto che possiamo raffigurare l’inde-

terminazione universale mediante una celletta rettangolare di area $\hbar/2$, avente lati δx e δp .

Per descrivere la differenza tra bosoni e fermioni, che si riferisce a come stanno o non stanno insieme, occorre chiarire cosa intendiamo per “stato”. La parola “stato” si riferisce ad una configurazione stabile nel tempo (cioè, che “sta”), tale per cui se ripeto la misura già fatta (senza interporre misure di tipo nuovo) trovo “stabilmente” lo stesso risultato già trovato prima. Non è possibile ottenere una tale stabilità misurando le variabili posizione e velocità, per quanto convenienti e intuitive esse siano, oppure x e p , proprio perché le loro misure si disturbano a vicenda. Occorre riferirsi all’energia, che è una funzione di entrambe. Precisato questo, si può mostrare che la cella fondamentale nello “spazio degli stati” ha area $2\pi\hbar$, invece che $\hbar/2$. Ricordiamo infatti che $\hbar/2$ è il limite *minimo* dell’indeterminazione, ma quando consideriamo tante particelle assieme non è possibile soddisfare il minimo per tutte. Inoltre, la cella di energia non è un rettangolo. Possiamo descriverla meglio come una corona ellittica. Ad ogni modo, la conclusione è che una particella può stare in uno stato di energia diverso per ogni cella di area $2\pi\hbar$, nel piano definito dalle coordinate x e p .



Consideriamo dunque un tale piano, e suddividiamolo nelle celle elementari menzionate, aventi area $2\pi\hbar$. Come prima, dobbiamo immaginare che quelle celle siano impenetrabili. All’interno delle celle non è possibile entrare e neppure vedere. Possiamo dire in quale cella sta una particella (cioè: quale energia abbia), ma non in quale punto essa stia all’interno della cella stessa, perché dire una cosa del genere non a-

vrebbe alcun senso fisico. Non possiamo, per esempio, dire che la particella sta in una zona più ristretta, interna alla cella, di area più piccola di $2\pi\hbar$. I punti interni alla cella appartengono soltanto alla nostra immaginazione, ma nella "realtà" esiste solo la cella, "fatta di virtualità". Se vogliamo, al suo interno non esiste nemmeno lo spazio, e neanche il tempo. Sotto questo aspetto, non fa alcuna differenza che la particella sia un bosone o un fermione.

La differenza tra bosoni e fermioni si apprezza quando consideriamo tante particelle della stessa specie. Cominciamo con i fermioni, nella fattispecie elettroni. La statistica di Fermi-Dirac, a cui obbediscono i fermioni, ci dice come "stanno insieme" i fermioni quando sono in tanti. Anzi, ci dice come "non stanno affatto insieme", perché i fermioni sono, in un certo senso, "asociali", cioè non vogliono stare insieme per niente. Si respingono senza alcuna vera forza che li respinga...

Vale infatti il principio di esclusione di Pauli, che è a fondamento della statistica di Fermi-Dirac. Esso dice che ciascuna di quelle celle può essere occupata da un solo fermione della stessa specie, nel nostro caso elettrone, con lo stesso spin. Usando questo principio, vogliamo chiederci in quale stato possa trovarsi un insieme di n elettroni, cioè quali siano i valori permessi dell'energia e dello spin di ciascuno. Ciascun elettrone starà in una cella: ciò definisce la sua energia. In più, dobbiamo tenere conto del suo spin, cosa che facciamo a parte.

Partiamo allora dalla cella fondamentale, che è quella che contiene l'origine degli assi, cioè quella a energia più bassa⁵. Essa si chiama anche *livello energetico fondamentale*. Riferendo la misura dello spin alla direzione verticale, per comodità, in quella cella possono stare, al massimo, un elettrone con lo spin in su, e uno con lo spin in giù. Nella cella limitrofa, che rappresenta il primo livello eccitato, ed ha un'energia un po' più alta, possono stare, al massimo, un elettrone con lo spin in su e uno con lo spin in giù. Nelle celle ancora più lontane, che descrivono il livelli

⁵ L'energia è una funzione di x e p (e lo spin). Il suo minimo, che di solito è zero, si ha, nei sistemi più semplici per $x = p = 0$. Genericamente, valori di x e p corrispondenti a punti più lontani dall'origine hanno energia maggiore. Stiamo assumendo di trovarci in un caso come questo. Tutti gli altri casi funzionano praticamente allo stesso modo.

energetici oltre il primo, ed hanno energie ancora più alte, possono stare al massimo un elettrone con lo spin in su e uno con lo spin in giù in ciascuna. E così via.

È come se il mondo dei quanti fosse un mondo di pixel. I quanti possono decidere se stare in un pixel o in un altro, ma nessuno può accedere all'interno di quel pixel, perché la cosa non avrebbe nemmeno senso. In più, in un singolo pixel possono stare al massimo $2s+1$ fermioni di spin s della stessa specie (cioè, dello stesso tipo di particella, elettrone, protone, ecc.), che vorrebbe dire uno per ogni valore permesso del loro spin⁶. Non possiamo trovare due elettroni identici (cioè, nello stesso stato di spin) nella stessa cella. Qualunque forza esercitiamo, non riusciremmo mai a farceli entrare. Se a "respingerli" fosse una vera forza, sarebbe sempre possibile, almeno in linea di principio, esercitarne una ancora maggiore per compensarla e superarla. Invece, il contenuto del principio di esclusione di Pauli è che far stare due elettroni identici in una stessa cella è impossibile. Non è soltanto *difficile*, ma è *impossibile*, come è impossibile viaggiare a velocità maggiori di quella della luce.

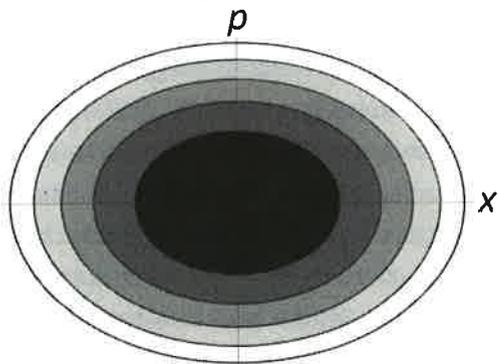
Dobbiamo infatti tenere a mente che, nell'ambito del virtuale, cioè prima di un'osservazione empirica vera e propria, un insieme di più elettroni costituisce un'entità unica, e si comporta secondo le leggi che governano quell'entità unica. Siamo soltanto noi che vogliamo descriverlo come un sistema fatto di un elettrone, più un elettrone, e poi un altro elettrone, e così via. Se abbiamo due elettroni, non abbiamo una vera pluralità, ma una sola entità, l'entità "due elettroni". Possiamo avere un'entità "quattro elettroni", un'entità "cento elettroni", ecc. Anche in questo caso, come nel caso dell'entanglement, l'informazione che i due o più elettroni si scambiano per comunicare tra di loro quali sono le celle già occupate e quali sono le celle libere, necessaria per sapere dove possono e dove non possono andare a mettersi, non è vincolata a propagarsi con velocità inferiore o uguale a quella della luce: è istanta-

⁶ I valori che può dare la misura dello spin di una particella di spin s massiva (cioè: avente massa non nulla) lungo una direzione qualunque sono appunto $2s+1$. Quei valori sono: $s, s-1, s-2, \dots, 1-s, -s$. Elettroni e protoni ($s = 1/2$) hanno, come sappiamo, due stati di spin: $1/2$ e $-1/2$. Tutti i fermioni noti sono massivi.

nea, viaggia a velocità arbitrariamente alta.

Quando osserviamo un insieme di tre elettroni, per esempio, la realtà che vediamo è fatta di tre scintille, o tracce, in uno o più rivelatori. Ma non ha senso associare una traccia particolare al "primo elettrone", una seconda traccia al "secondo elettrone", una terza traccia al "terzo elettrone". Questo è il contenuto del principio di *indistinguibilità* delle particelle. Non è possibile "marcare" le particelle per ricordarci qual è quale. Non ci sono "adesivi" da appiccicarci sopra.

Vediamo ora cosa succede ai nostri n elettroni quando li "raffreddiamo" il più possibile, cioè riduciamo al massimo la loro energia. Per quanto abbiamo detto sopra, non è possibile fare in modo che abbiano tutti l'energia minima, che è l'energia della cella più fredda (il livello energetico fondamentale), perché in quella cella ne possono stare al massimo due, uno per ogni stato di spin permesso. Ciò che succede, invece, è la cosa seguente: di quegli n elettroni, uno si colloca nella cella



con energia minima, con lo spin in su, un altro va nella stessa cella, ma con lo spin in giù, e poi gli altri si distribuiscono nelle celle immediatamente circostanti, a strati, due per ogni cella, con spin opposti. Così facendo, riempiono una figura delimitata da quella che viene detta *superficie di Fermi*. Cioè: mentre in generale possono disporsi *al massimo* in due per cella, con spin opposti, quando li raffreddiamo fino allo zero assoluto si dispongono *esattamente* in due per cella, riempiendo i livelli di energia più bassa in tutti i modi permessi.

La situazione è completamente diversa per i bosoni. Non c'è limite al numero di bosoni che possono stare nella stessa cella. Con i bosoni

possiamo costruire stati fisici impacchettando all'interno della cella fondamentale un numero arbitrario di bosoni della stessa specie, nello stesso stato. Bosoni della stessa specie e nello stesso stato "stanno bene assieme", perché "sono sociali". Pertanto, se raffreddiamo un sistema di bosoni fino a temperature bassissime, vicine allo zero assoluto, vediamo che le celle attorno a quella fondamentale si svuotano tutte progressivamente. Poiché i bosoni non sono costretti a tenere un distanziamento sociale minimo, collassano tutti nella cella centrale, che corrisponde al livello fondamentale. In definitiva, allo zero assoluto li troveremo tutti lì.

Questo processo di riempimento della cella fondamentale si chiama condensazione di Bose-Einstein. Praticamente, il condensato di Bose-Einstein è un "coro", cioè un unisono di tantissimi atomi che si comportano coerentemente. Sono tutti correlati tra loro, e si comportano come un unico atomo gigantesco, o come un'unica particella gigantesca, che quindi è in grado di manifestare proprietà quantistiche anche su scale molto maggiori rispetto a quelle a cui ci abitua la teoria dei quanti in condizioni ordinarie. Si tratta di un tipo di amplificazione degli effetti quantistici molto particolare.

Abbiamo quindi che le particelle elementari mostrano due tipologie fondamentalmente diverse di comportamenti, quando mettiamo insieme particelle della stessa specie e nello stesso stato. A temperature bassissime i bosoni tendono a condensare nello stato con energia minima, a stiparsi tutti nel livello energetico fondamentale. Quando sono lì, si comportano come un unisono, come una particella unica. I fermioni, invece, non possono fare niente del genere, perché sono costretti a distanziarsi. Non possono stare tutti nella stessa cella, perché in quella può stare, al massimo, un solo elettrone per ogni stato di spin permesso. Gli "altri" (diciamo così, perché in realtà non esiste alcun modo di distinguerli) dovranno distribuirsi nelle celle circostanti, a strati, con energie gradualmente più alte, fino a riempire l'interno di una certa superficie, la superficie di Fermi, che separa le celle occupate da quelle libere.

Le proprietà che abbiamo descritto finora sono fatti sperimentali. E in quanto fatti sperimentali, non hanno "spiegazione", men che meno "logica". Succede così, perché osserviamo che succede così. E non sa-

rebbe nemmeno immaginabile dedurre quei comportamenti da principi primi, che poi sarebbero comunque principi "secondi", perché seguirebbero l'osservazione della natura, non potendola precedere, per definizione. Principio di indeterminazione, principio di indistinguibilità delle particelle, principio di esclusione di Pauli, eccetera: noi umani non resistiamo alla tentazione di rovesciare le carte in tavola, chiamando principi delle massime sbrigative con cui codifichiamo in modo succinto un insieme di fatti sperimentali, *dopo* averli constatati e ripetutamente osservati. Per quanta cieca fiducia riponiamo abitualmente nella nostra logica e razionalità, essa non ha il potere di dettare principi alla natura. È la natura che detta a noi le sue volontà.

La fisica quantistica squarcia il velo su un mondo nuovo, e ci riporta alle condizioni del bambino appena nato, che apre gli occhi per la prima volta, e comincia a raccogliere informazioni su quello che lo circonda. Per questo dobbiamo procedere con molta cautela, senza forzature, senza voler vedere per forza quel che non c'è. Stiamo soltanto facendo un elenco di fatti. Non forniamo "ragioni", spiegazioni o "perché", che poi ci porterebbero a commettere l'errore già descritto nella lezione scorsa, quello di inabissarci nei problemi interni fittizi della narrazione stessa, e a perdere di vista i fatti della natura. Nel momento in cui rielaboriamo l'insieme dei fatti raccolti, qualunque presunta "spiegazione" diamo, altro non è che una nostra sintesi di comodo, e ovviamente a posteriori, utile per scopi meramente pratici. Non è certamente una vera "spiegazione", né potrebbe mai esserlo.

Ci potremmo comunque chiedere, in merito alle proprietà descritte fin qui: avrebbe potuto essere diversamente? Potrebbe, in qualche parte dell'universo, succedere qualcosa di diverso da quello che sperimentiamo qui sulla terra? Esistono parti dell'universo governate da leggi fisiche diverse dalle "nostre"? Dalle quali potrebbero seguire anche, magari, "logiche" diverse? Al punto a cui siamo arrivati, non abbiamo abbastanza informazioni per rispondere a queste domande, ma più avanti raccoglieremo indizi utili a farci un'idea delle risposte.

10 Della libertà assoluta: la particella puramente virtuale

Abbiamo visto che un atomo, o un elettrone, o un fotone, non esiste tra due osservazioni successive, dove è praticamente una nuvola delocalizzata, che può essere anche frazionata, divisa in più parti. E quelle parti possono essere allontanate a piacimento l'una dall'altra. Poi, quando una di esse viene in contatto con un rivelatore, uno strumento di misura, oppure il nostro occhio (se si tratta di un fotone), la nuvola collassa. Allora la particella "prende forma" in una delle regioni in cui è stata suddivisa la nuvola, e soltanto in quella. Tutte le altre vengono istantaneamente a saperlo e si adeguano, sparendo.

Quando facciamo un'osservazione l'atomo diventa improvvisamente *reale*, da virtuale, cioè prende forma in un punto ben preciso, dove genera un segnale in un rivelatore. Nel caso di un fotone vediamo una scintilla. In quel momento, avviene in noi quella che chiamiamo percezione. Ma cosa vuol dire esattamente che l'atomo diventa "reale"? Sarà reale davvero? E cos'è una *percezione*?

La realtà, in definitiva, è il bordo della virtualità. Il regno della virtualità è la quasi totalità della natura, e quella che noi chiamiamo realtà ne è soltanto la frontiera ultima,



il contorno, il limite estremo. Per la precisione, occorre dire che la zona reale è un *quasi* bordo, perché al bordo la "natura" non arriva mai compiutamente. Possiamo dire che l'atomo resta sempre "un po' virtuale". Per spiegare il motivo per cui possiamo fare questa affermazione, dobbiamo partire da un teorema matematico che dice che, se la nuvola associata all'atomo si annulla esattamente, in un certo istante, in una zona qualsiasi, per quanto piccola essa sia, allora si deve annullare in quella zona in tutti gli istanti successivi, e si deve pure essere annullata, là dentro, in tutti gli istanti precedenti, tranne sporadiche eccezioni, dette "singolarità".

Applichiamo questo teorema al caso nostro, cioè l'atomo che attraversa una zona di campo magnetico. Supponiamo che la nuvola venga frazionata in due parti, nel durante, che chiamiamo, come prima, zona A e zona B. Sappiamo allora che, in ciascuna di quelle zone, in un certo istante intermedio, la nuvola non è nulla. Veniamo ora al dopo, cioè all'osservazione dell'atomo, che vedremo in A o in B. Supponiamo che il rivelatore faccia collassare la nuvola *esattamente* in una delle due zone, cioè che l'osservazione dell'atomo consista proprio in questo "collasso estremo", il "bordo esatto" della virtualità. Per concretezza, assumiamo di trovare l'atomo nella zona A. Per ottenere un risultato del genere, la nuvola dovrebbe essere "aspirata" completamente dalla zona B, dove finirebbe per valere esattamente zero. Ma allora, per il teorema menzionato, la nuvola è sempre stata zero nella zona B, contrariamente a quello che abbiamo detto, a meno che non sia intervenuta una qualche singolarità nel frattempo.

Il punto è che una tale singolarità dipende dalla nuvola stessa che descrive il sistema che vogliamo osservare. Per generare una singolarità del genere, il rivelatore dovrebbe essere costruito in maniera molto particolare, dipendente dalla stessa nuvola che vuol fare collassare. Se l'osservazione è una tale singolarità, dovrebbe sparire ogni volta che apportiamo un minimo cambiamento al sistema, finché non risincronizziamo il rivelatore al sistema osservato. Ora, le osservazioni che facciamo nel mondo dei quanti sono inusuali, certo, ma non così tanto. Cioè, riusciamo ad osservare gli atomi senza preoccuparci fino a questo punto

di sincronizzare i rivelatori con precisione *assoluta* a ciò che dovrebbero rivelare, cosa peraltro praticamente impossibile.

Vuol dire che ciò che chiamiamo osservazione non è una tale singolarità. Cioè: per rivelare un atomo non c'è bisogno di cancellare la nuvola *completamente* da tutte le zone tranne quella in cui lo vediamo. Ne consegue che, anche dopo che la nuvola è "collassata" nel rivelatore in cui vediamo l'atomo, essa rimane comunque presente, sparpagliata, in tutte le zone in cui si era trovata prima. Cioè, si concentra massimamente dove vediamo l'atomo, ma non sparisce completamente da nessun altro luogo in cui già stava. Non sarà esattamente nulla altrove: delle "code" rimarranno ovunque, e quelle code significano che c'è sempre una probabilità, magari piccolissima, che l'atomo sparisca dal luogo in cui lo stiamo guardando, per riapparire all'improvviso in un altro punto dell'universo.

Ricapitolando, la nuvola si "quasi materializza" dove percepisco l'atomo, nel senso che si concentra quasi tutta in una zona relativamente ristretta attorno al punto in cui vedo il segnale dell'atomo, e sparisce quasi completamente da tutto il resto dell'universo, ma non sparisce del tutto da nessuna zona in cui era già presente. Le altre zone nelle quali era stata, eventualmente, frazionata, vengono a sapere istantaneamente della quasi materializzazione dell'atomo in una di esse, e istantaneamente si "adeguano", nel senso che riducono la concentrazione della nuvola nella regione di competenza fino a quasi annullarla. Ma non arrivano mai ad annullarla completamente.

La nostra percezione si genera quando la concentrazione della nuvola nella zona in cui vediamo apparire l'atomo supera una certa soglia, quella che l'evoluzione ci ha programmato a considerare minima per far scattare dentro di noi ciò che chiamiamo, appunto, percezione. La soglia potrebbe essere diversa da essere vivente a essere vivente. Così, ci sembra che l'oggetto sia creato, o si materializzi, nel punto in cui lo percepiamo.

In sostanza, per spiegare cosa percepiamo, come "funzioniamo", non c'è bisogno di raggiungere il bordo della virtualità in senso stretto. Basta avvicinarsi abbastanza ad esso. E specie diverse dalla nostra po-

trebbero funzionare diversamente. Ad alcune potrebbe bastare un avvicinamento minore, per far scattare la percezione. Altre potrebbero richiedere un avvicinamento maggiore. Specie diverse vedrebbero allora "realtà" leggermente diverse. Comunque sia, ciò che chiamiamo realtà non è mai una realtà compiuta, né lo potrebbe essere, per il teorema menzionato sopra.

Lo studio dei quanti presenta una complicazione intrinseca, perché procede di solito dal quasi bordo reale, che è ciò che conosciamo meglio, in quanto descrive il mondo macroscopico che ci circonda, per risalire fino a raggiungere l'"interno profondo", cioè il reame della virtualità. Il processo di ricostruzione del virtuale dal quasi reale si chiama "quantizzazione". Si cerca, procedendo per tentativi, prove e (tanti) errori, di indovinare come possa essere fatta la virtualità che sottostà alla (quasi) realtà, a partire dalla realtà stessa. Esperimento dopo esperimento, fallimento dopo fallimento, riusciamo a capire qualcosa su "come è fatto" il mondo virtuale, attraverso le sue ricadute sul mondo reale.

Per esempio, possiamo cercare di "quantizzare" una particella, cioè descrivere la sua virtualità, usando le nuvole di cui abbiamo parlato diffusamente nei capitoli precedenti. Poi andiamo a verificare se le conseguenze sul bordo, cioè le ricadute di quella descrizione sulla realtà che ci circonda, sono confermate dai dati o meno (i risultati degli esperimenti nei nostri rivelatori macroscopici). Così, per esempio, abbiamo capito che la descrizione del virtuale in termini delle nuvole che abbiamo formulato nei primi capitoli funziona, mentre tante altre descrizioni (per esempio, quella in termini di variabili nascoste) non funziona, perché vincola i risultati a soddisfare le disuguaglianze di Bell, che in natura sono violate. Il lavoro è molto faticoso, come si può immaginare, perché richiede di procedere alla cieca, in quanto, rispetto al virtuale, siamo, per definizione, ciechi. Ma siccome stiamo parlando di qualcosa di scientificamente testabile e non di fantasie, perché il virtuale ha ricadute, seppur indirette, sul reale (tanto che è il virtuale stesso che "crea" il reale), possiamo stare certi che non è possibile dire tutto e il contrario di tutto, e rischiare di finire col girare a vuoto. Anzi, la confutazione di un'ipotesi sbagliata è sempre dietro l'angolo, come è successo appunto

per le variabili nascoste.

Può essere ben possibile, invece, che il virtuale sia descrivibile in una pluralità di modi diversissimi, tutti equivalenti e quindi accettabili, perché prevedono le stesse identiche ricadute sul mondo reale. Per esempio, le nuvole introdotte nei primi capitoli sono una descrizione valida, ma una descrizione altrettanto valida è quella in termini di stati. Più descrizioni equivalenti sono perfettamente accettabili, anche perché, vale la pena ricordarlo ancora, si tratta sempre della nostra narrazione della natura, non della natura. Alle volte sarà più conveniente usare una certa descrizione, per esempio quella in termini di nuvole, alle volte sarà più conveniente usare l'altra, quella in termini di stati. Ma i risultati fisici relativi al mondo reale saranno sempre in accordo. Ciò che potrà cambiare sarà la fatica richiesta a ricavarli.

Descrizioni equivalenti sono legate da precise relazioni matematiche, che permettono, qualora sia necessario, di passare più o meno agevolmente dall'una all'altra. D'altra parte, descrizioni arbitrarie, soggettive, fantasiose, inconfutabili, beh, quelle non hanno spazio, neanche a proposito del virtuale, perché il virtuale è intimamente legato al reale al punto da crearlo.

Eppure, potrebbe sorgere un dubbio, al proposito. Ci si potrebbe infatti chiedere: se cerco di indovinare il virtuale a partire dal suo bordo, o quasi bordo, cioè il reale, risalendo in sostanza la corrente, non è che mi posso perdere qualcosa? Non potrebbe esistere qualcosa che al bordo non arriva mai? La risposta è: certamente. Non è detto che al bordo arrivi proprio tutto ciò che sta nell'*interno profondo* del virtuale. Potrebbe "esistere" qualcosa che si limita a "vivere" in quell'interno profondo, e che al bordo non arriva mai, magari perché quella cosa "aborre l'esistenza", "evita la realtà come la peste". Non avevamo detto, infatti, che l'esistenza è una "scocciatura", per i quanti, perché li priva della libertà assoluta di cui possono godere soltanto nella virtualità?

Questa è la considerazione chiave che mi ha portato ad introdurre, qualche anno fa, precisamente nel 2017, la particella *puramente virtuale*. Che cos'è questa particella puramente virtuale? È quell'entità puramente quantistica che vive soltanto nell'interno profondo del mondo

virtuale. Essa sta ben alla larga dal bordo della virtualità (cioè i nostri sensi, i nostri rivelatori, o qualunque oggetto macroscopico): non ci si avvicina nemmeno.

Abbiamo spiegato che nemmeno le particelle fisiche raggiungono quel bordo, strettamente parlando, che infatti è un quasi bordo. Ma le particelle fisiche vi si possono avvicinare quanto vogliono, ed è per questo che le possiamo vedere e che le chiamiamo, appunto, particelle fisiche. Quando si avvicinano abbastanza al bordo, possono superare quella famigerata soglia che ci permette di percepirle. Per la particella puramente virtuale, invece, quel bordo è un qualcosa di repellente. La nuvola di una tale particella si dirada fino ad essere praticamente nulla in qualunque zona in cui sia presente un gran numero di atomi, perché un'alta concentrazione di atomi potrebbe nascondere un rivelatore, cioè qualcosa che "potrebbe costringerla ad esistere". Così, la sua intrinseca natura di entità puramente virtuale le permette di evitare qualunque oggetto macroscopico, che, per l'appunto è fatto di un numero elevatissimo di atomi. È come se sapesse in anticipo dove stanno tutti gli oggetti macroscopici dell'universo, e, forte di questa sua conoscenza, non si fa mai trovare nei loro paraggi. Li evita, ci gira attorno, fa qualunque cosa pur di non farsi scoprire, perché, per sua natura, non vuole farsi vedere. In definitiva, non è una particella "vera", perché scansa la realtà. La possiamo chiamare particella "fake", cioè particella finta, o "fakeon".

Per facilitare la comprensione di alcuni aspetti chiave, è utile ricordare il principio di esclusione di Pauli, a cui obbediscono i fermioni: è come se i fermioni sapessero in anticipo dove si trovano tutti gli altri fermioni dell'universo che si trovano nel loro stesso stato, e li evitano come la peste. Dove sta uno di loro non stanno gli altri. E questo succede "all'istante" e senza invocare una "quinta forza" che li respinga. Perché se a respingerli fosse una forza, come abbiamo detto, sarebbe possibile vincerla esercitando una forza ancora maggiore. Ma il principio di esclusione di Pauli è invincibile, perché è una proprietà fondamentale della natura. Similmente, la particella puramente virtuale soddisfa quello che potremmo chiamare il *principio di esclusione classico/quantistico*:

tistico: si tratta, cioè, di quella entità puramente quantistica, che evita per sua stessa natura ogni entità "classica", che vorrebbe dire ogni oggetto simile agli oggetti macroscopici inanimati che ci circondano, cioè composto di un grandissimo numero di atomi organizzati in modo da sopprimere gli effetti quantistici⁷. Anche nel caso della particella puramente virtuale, come nel caso dei fermioni, non c'è bisogno di nessuna "sesta forza" che la respinga dagli oggetti macroscopici. Al suo posto c'è una nuova proprietà fondamentale della natura, che dunque è più forte di qualunque forza. Essa protegge la particella fake e le impedisce di essere privata della sua libertà assoluta "costringendola ad esistere", a prendere forma qui o là, in questo o quel modo, ora o in un altro momento. L'unica cosa che la particella puramente virtuale non è libera di fare è perdere la sua libertà.

Abbiamo imparato che il mondo quantistico è fatto di un regno della virtualità, che è quasi tutta la natura, e poi un bordo, che è ciò che noi chiamiamo realtà. Potremmo anche chiamare il bordo reale mondo "classico", fatto di oggetti macroscopici inanimati. Abbiamo anche imparato che il quanto puramente virtuale, la particella fake, appartiene solo al primo regno. Invece, le particelle fisiche appartengono a tutti e due, cioè sono prevalentemente virtuali, ma possono anche avvicinarsi al bordo reale arbitrariamente, pur senza mai raggiungerlo.

Simmetricamente alla particella fake, che appartiene solo all'interno profondo del virtuale, ci si potrebbe chiedere se non possa esistere un'entità che appartiene soltanto al bordo, cioè un'entità che sia sempre e soltanto reale. Ma questo è impossibile. Da una parte, non esiste nessuna evidenza in natura di qualcosa del genere. Dall'altra parte, è anche impossibile in linea di principio, perché abbiamo detto che il bordo non è mai raggiunto veramente, in quanto la realtà non è mai veramente "reale", ma sempre un po' virtuale. Quindi, mentre la virtualità può essere libera e pura, la realtà non può mai essere puramente reale.

Un'entità che fosse completamente e puramente reale sarebbe

⁷ La parola "classico" si riferisce a tutto ciò che concerne la comprensione del mondo (deterministica) che precede l'avvento della teoria dei quanti.

qualcosa di deterministico, cioè classico: sarebbe quello che gli scienziati credevano fosse tutta la natura fino alla fine del 1800, cioè prima che la teoria dei quanti facesse la sua apparizione sulla scena del mondo. Sarebbe un qualcosa di perennemente certo e completamente fissato. In un certo senso, monotono, determinato univocamente dal suo passato, e che determina univocamente il suo presente e il suo stesso futuro. Questo sarebbe il cosmo se ci fosse soltanto il bordo classico, se tutto fosse collocato esattamente là, come si pensava fino alla fine del diciannovesimo secolo. Ma la fisica quantistica ha aperto lo squarcio sull'interno virtuale, e ci ha mostrato che quel bordo non è mai raggiungibile, perché il "grosso" della natura è il regno della virtualità, dove al posto del determinismo c'è l'indeterminazione.

Pertanto, la particella fake è "la particella più libera che esista". La sua libertà la potremmo chiamare anche "anarchia". Potremmo anche parlare di "anarchia asintotica", perché, per motivi su cui non entriamo, quel tipo di particella deve essere molto pesante, e quindi manifesta la sua "presenza" solo a piccolissime distanze, molto più piccole di quelle che abbiamo sondato finora negli esperimenti. La sua "esistenza", laggiù, è necessaria a risolvere i problemi che altrimenti impediscono di rendere i quanti compatibili con la gravità, e cioè a spiegare quella che si chiama gravità quantistica.

Riepilogando, la particella fake è la particella puramente libera, puramente quantistica, che non diventa mai reale e che quindi non viene mai privata della sua libertà, non viene mai costretta a "prendere posizione", a manifestarsi. A un certo punto, le particelle che noi chiamiamo reali, sono costrette a (quasi) manifestarsi *da qualche parte e in qualche modo*. Succede ogni volta che vengono in contatto con un ammasso di altre particelle, cioè un oggetto macroscopico, come un rivelatore, o i nostri occhi. Sono libere di scegliere *dove e come* apparire (come l'atomo che, dopo aver attraversato una zona di campo magnetico, può decidere se apparire a destra o a sinistra), ma non possono opporsi al passaggio dalla virtualità alla (quasi) esistenza. Il fakeon è la particella così libera che non può mai essere privata della sua libertà, perché non è nemmeno possibile costringerla ad esistere, o a scegliere.

Perché non si era mai pensato prima a qualcosa del genere? La ragione è che si è sempre proceduto "a ritroso", cioè dal bordo verso l'interno, quantizzando qualcosa di classico. Esisteva una regola guida per quella procedura, una ricetta empirica per indovinare la descrizione di un sistema quantistico a partire da un analogo sistema classico. Essa va sotto il nome di "principio di corrispondenza", e affermava che ci fosse, appunto, una qualche corrispondenza tra il classico e il quantistico. In molti casi, quel principio ha fornito un insieme di regolette pratiche molto efficienti per associare ad un problema fisico classico un analogo problema fisico quantistico. Fino a un certo punto, l'associazione ha funzionato abbastanza bene. A dire il vero, aleggiava sempre l'impressione che quel procedere fosse intrinsecamente lacunoso, e che potessimo perderci qualcosa per strada. Infatti, non si può escludere, in linea di principio, che esista anche qualcosa che non ha nessuna corrispondenza, somiglianza o relazione, con alcunché di classico. Tuttavia, la questione è stata trascurata per decenni, lasciata in disparte, per poi essere definitivamente dimenticata.

Occorre rendersi conto che, se il mondo che ci circonda è collocato in quel bordo, e noi ci limitiamo a vivere tutta quanta la nostra vita in quel bordo, indovinare l'interno profondo della virtualità può essere molto difficile. Allo stesso modo, se non conosciamo nulla della fisica quantistica, se nella maggior parte della nostra vita non apprendiamo nulla sui fenomeni che avvengono nel mondo microscopico, il bordo ci fa credere a cose che sono fondamentalmente sbagliate, che poi finiamo col dare per scontate per tutta l'esistenza, senza accorgercene. Anzi, di più: ce le trasciniamo appresso per tutta la storia, attraversando i secoli. Questo limita fortemente le nostre possibilità di pensiero, e quindi anche di azione. Per esempio, il bordo ci fa credere al determinismo, al regno delle cause e degli effetti. Ma il determinismo è il contrario della libertà, perché è la negazione dell'indeterminazione. Dopodiché, ci troviamo inevitabilmente a formulare leggi della natura influenzate dal quel pregiudizio iniziale. Forgiamo sbrigativamente principi generali sulla base di quella che crediamo sia la realtà del mondo nel quale siamo collocati, il mondo macroscopico, che è soltanto il bordo del "tutto".

Non sorprende se, alla prova dei fatti, quei principi si dimostrino fuorvianti e sbagliati. Ma se scansiamo la "prova dei fatti" per tutta la vita, finiamo col credere fermamente a principi posticci, come se fossero assoluti, arrivando persino a chiamarli *verità*. Essi si rivelano assolutamente incapaci di descrivere quell'altro mondo, il mondo microscopico, nella fattispecie il mondo virtuale, quello "vero", quello di cui il mondo reale è il bordo. Ma se quei principi non si estendono a quello, non sono universali come credevamo. E allora possiamo smascherarli per quello che sono: leggi e principi grossolani e approssimativi.

Nel corso dei secoli molti pensatori hanno dedicato la vita ad interrogarsi sull'esistenza di un ipotetico "altro mondo". Ma l'hanno fatto procedendo a tentoni, senza mai immaginare veramente qualcosa di "altro", ma indugiando piuttosto in caricature di "questo" mondo. Molti lo chiamavano "al di là", ma era soltanto una scimmiettatura dell'"al di qua", ottenuta spesso estremizzandone alcuni aspetti, graditi o sgraditi. Bene, ora sappiamo che cos'è l'al di là della realtà. Ed è veramente "altro".

Nel caso delle particelle fisiche procediamo dal bordo all'interno profondo, perché esiste ancora qualche barlume di corrispondenza tra i due. Nel caso delle particelle fake dobbiamo cercare di indovinare quell'interno direttamente. Come? Anche se le particelle fake non arrivano mai al bordo, interagiscono con le particelle fisiche nel virtuale, e cambiano le interazioni tra quelle. Le particelle fisiche ci arrivano, al bordo, portando con loro anche il messaggio consegnato loro dalle particelle puramente virtuali. Pertanto, le particelle puramente virtuali possono raggiungere il bordo indirettamente, servendosi di quelle fisiche. Cambiando le predizioni relative alle particelle fisiche, la presenza di particelle fake può essere indirettamente "rivelata".

Forse di più non potremo mai fare, ma per il momento possiamo accontentarci. Ciò che riusciamo fare è agganciarci, direttamente, come nel caso delle particelle fisiche, o indirettamente, come nel caso delle particelle puramente virtuali, al mondo in cui viviamo, che è il quasi bordo, per cercare di carpire i segreti del regno del virtuale. Proponiamo delle idee in merito, poi sottoponiamo le nostre teorie al più alto nu-

mero di esperimenti possibile, per riuscire, o sperare di riuscire, a confermarle o smentirle. Così facendo, cerchiamo di "abituarci" alla natura microscopica, a pensare come penseremmo se "rinascessimo" collocati in quella, invece che nel mondo nostro, fino a superare qualunque ostacolo, pensare l'impensabile, rompere qualunque schema che davamo per scontato o assoluto, come la logica stessa. Grazie a questo procedere per prove ed errori, cominciamo ad acquistare dimestichezza con l'altro mondo, con l'al di là, a pensare come penseremmo se ci vivessimo dentro, come se anche noi fossimo degli esseri microscopici, dei fotoni o degli atomi.

Prima della particella fake, la teoria dei quanti era sempre stata vista come un processo di avvicinamento al mondo microscopico, e al virtuale, a partire dal mondo macroscopico, cioè il bordo, quello che chiamiamo reale. Tant'è vero che la parola chiave usata per descrivere quel procedere, la parola *quantizzazione*, significa "tentativo di rendere quantistico qualcosa che in partenza non lo è", e riassume lo spirito del principio di corrispondenza richiamato sopra. Vuol dire, in un certo senso, partire dall'errore, dal bordo, dall'approssimazione grossolana e rozza, per arrivare alla "verità". Non essendo possibile accedere direttamente alla seconda, partiamo da un suo caso limite, il bordo, per arrivare al nocciolo, alla sostanza. È chiaro che questa operazione può nascondere un sacco di trabocchetti, perché ci possono essere tanti interni che hanno lo stesso bordo. Può essere un'operazione ambigua, o addirittura mal definita, senza senso. Però è il massimo che riusciamo a fare, nella maggior parte dei casi. E funziona quando funziona, con uno spirito del tipo: "proviamo; se funziona bene, sennò proviamo qualcos'altro".

Quantizzare vuol dire rendere quantistico, in qualche modo (da trovare, sempre che ci riusciamo), qualcosa che non lo è per nulla: fare un "esercizio di logos" per descrivere il virtuale usando termini consoni al reale. Capite che è un po' come mettere il carro davanti ai buoi, perché la natura procede esattamente al contrario di come procediamo noi. Se il mondo microscopico è quantistico, mentre quello che ci circonda è il bordo del primo, cioè un suo limite, una sua approssimazione, do-

vremmo partire dal mondo quantistico, per poi spiegare quello che ci circonda come un suo limite. Non fare il contrario, come invece siamo costretti a fare.

Il punto è che quello che dovremmo fare per non mettere il carro davanti ai buoi ci è impossibile. Noi viviamo nel mondo macroscopico, quello che ci circonda. E i nostri pensieri sono plasmati da quello. C'è bisogno di agglomerati di moltissimi atomi (quali siamo noi esseri viventi) per elaborare quello che noi chiamiamo "pensiero", un pensiero che possa "capire" il mondo. Ma quando si tratta di capire il mondo microscopico, ci troviamo di fronte ad una specie di cortocircuito. E quindi siamo costretti a partire dal mondo macroscopico, cioè da quello che ci circonda, quello che forgia il nostro pensiero, e procedere a forza di prove ed errori per cercare di "quantizzarlo", cioè renderlo qualcosa di completamente e fundamentalmente diverso, per avere un indizio su cosa possa "esserci" laggiù, dove noi non abbiamo facile accesso. Per poi scoprire, senza sorprenderci troppo, che, rispetto al mondo microscopico che vorremmo conoscere, siamo come dei giganti in una cristalleria...

Ecco, la particella fake è proprio quella particella che sfugge a questo processo, perché nel bordo non ci sta, e neanche vi si avvicina. Non si manifesta mai nel reame delle nostre percezioni, cioè in quella che noi chiamiamo realtà. E quindi non è possibile ottenerla tramite la quantizzazione di alcunché. Essa deve essere ottenuta necessariamente con il processo corretto, quello della natura, cioè come un'entità puramente ed essenzialmente quantistica, di cui poi, eventualmente, potremo studiare il "limite classico", per trovare quali sono i suoi effetti indiretti anche sulla realtà che ci circonda. Perché, anche se la particella fake non si manifesta mai in modo diretto nel mondo reale, effetti suoi, indiretti, sul mondo reale ci sono eccome, perché, lo ricordiamo, il virtuale è così intimamente legato al reale da crearlo. Senza il virtuale, infatti, il reale non esisterebbe.

Pertanto, con la particella fake ci caliamo veramente, per la prima volta, nel regno del virtuale profondo in quanto tale, e non soltanto come dipartita dal bordo, non solo come progressivo e "cauto" allonta-

namento dal regno protettivo del reale che ci circonda. Potremmo dire che il fakeon è un virtuale di tipo "hardcore". Non è dato sapere dove questa avventura, iniziata con questo nuovo viaggio, ci porterà. Tuttavia, è verosimile che ci porterà lontano, perché quello che abbiamo appreso dalla fisica quantistica, confermato e potenziato poi dalla gravità quantistica, è che quella che noi chiamiamo realtà è soltanto una piccola, piccolissima parte di ciò che "esiste", anche se non possiamo più nemmeno usare disinvoltamente il verbo essere, o il verbo esistere, per questo tipo di concetti.

Una volta che abbiamo aperto le porte alle entità puramente virtuali, puramente quantistiche, dobbiamo accettare il messaggio di libertà che viene dal mondo microscopico. Esso è un messaggio di libertà assoluta, quella che possiamo chiamare anarchia asintotica. E il messaggio chiave è che la stessa esistenza è una privazione della libertà. Infatti, la particella fake, che vuole essere completamente libera, rifiuta l'esistenza.

11 Entropia: irreversibilità o eterno ritorno?

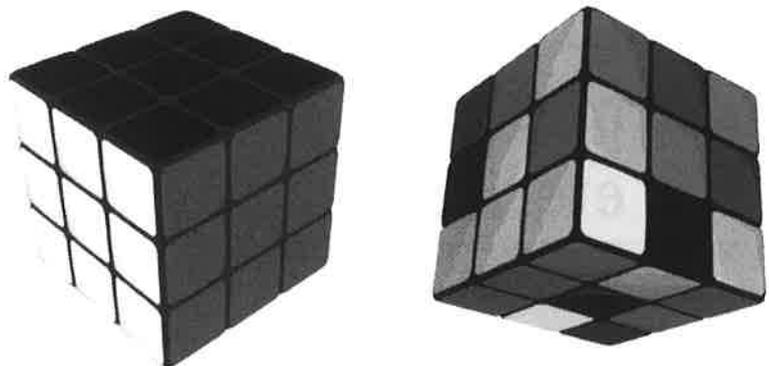
In questa lezione parliamo dell'entropia. Direttamente, l'entropia non ha a che vedere con i quanti. Perché è utile parlarne, allora? Per chiarire ciò che i quanti *non* sono. Per il momento, lasciamo in sospeso questo aspetto, per tornarci verso la fine della lezione. Non solo, ma dimentichiamoci di tutto quello che abbiamo detto finora, e torniamo a ragionare in ambito puramente classico, cioè deterministico: niente biforcazioni, tutto è già scritto, gli oggetti che stanno intorno a noi esistono compiutamente, eccetera. Non è permessa nessuna alternativa a ciò che vediamo.

Ci vogliamo chiedere se l'universo sia governato da leggi di irreversibilità, oppure dall'eterno ritorno. Cioè: se il mondo tenda ad un fine, abbia uno scopo, un punto di arrivo, oppure vaghi senza meta, ritornando infinite volte al punto di "partenza". In ambito quantistico, abbiamo già affrontato questi temi, almeno in parte, nella lezione 8. Ora li rianalizziamo in ambito classico, poi sviluppiamo meglio le risposte forniteci dai quanti in proposito, e infine confrontiamo le varie opzioni sul tavolo.

Nel primo caso, se esiste un fine, vorremmo capire cosa sia quel fine, o quella fine. Nel secondo caso, cioè nel caso dell'eterno ritorno, vorremmo capire bene di che tipo sia il ritorno, quanti tipi di eterno ritorno siano permessi, e quale sia quello che più si adatta a descrivere

l'universo in cui ci troviamo.

Cominciamo dall'entropia. Che cos'è l'entropia? Lo spieghiamo a partire dal cubo di Rubik. Il cubo di Rubik ha una ed una sola configurazione ordinata, quella mostrata nella figura che vediamo a sinistra. Se date un cubo ordinato a un bambino di tre anni, probabilmente comin-



cerà a giocarci e vi restituirà una qualunque configurazione disordinata, come quella mostrata nella figura di destra.

Ebbene, l'entropia è una misura del grado di disordine di un sistema. La maniera più semplice per misurare, nel senso di quantificare, il grado di disordine di un sistema è quella di classificare e contare tutte le configurazioni nelle quali il sistema si può trovare. Per esempio, possiamo contare le configurazioni ordinate del cubo di Rubik e confrontare il risultato con quello che otteniamo se contiamo il numero delle configurazioni disordinate. Notate subito che nel momento stesso in cui impostiamo questo tipo di problematiche, introduciamo nel discorso una certa arbitrarietà, o soggettività, e per certi versi ambiguità, perché ciò che è ordinato per noi può non esserlo affatto per un altro essere vivente, e sicuramente non lo è per la natura che non fa differenze di questo tipo. Ad ogni modo, il conteggio delle configurazioni ordinate del cubo di Rubik è molto facile, perché ne esiste una sola, quella del cubo risolto. Tutte le altre sono da considerare disordinate. Un calcolo un po' meno banale mostra che il numero di configurazioni disordinate del cubo è, approssimativamente, 43 trilioni, cioè 43 miliardi di miliardi, o 43 per 10 alla diciottesima potenza. Potreste dire che l'entropia del cubo ordinato è uno, mentre l'entropia del cubo disordinato è 43 miliardi di

miliardi. Pertanto, se date un cubo ordinato a un bambino di tre anni, in men che non si dica aumenterà l'entropia del vostro cubo da 1 a 43 miliardi di miliardi.

Tuttavia, se definiamo l'entropia così, cioè come il semplice conteggio del numero di configurazioni del tipo che ci interessa, avremo a che fare quasi sempre con dei numeri astronomici, numeri che non si manipolano con grande praticità. Tutte le volte che ricorrono numeri così grandi è preferibile usare, per comodità, la scala logaritmica, perché il logaritmo di un numero grande come 43 miliardi di miliardi è un numero "normale", circa 19,6.

Alla fine, l'entropia non è definita come il numero delle configurazioni N , ma come il suo logaritmo. Di solito la si indica con la lettera S , per cui abbiamo la formula

$$S = \log N,$$

dove "log" vuol dire, appunto, logaritmo. La formula scritta significa che S è quell'"esponente" tale per cui $10^S = N$, dove 10 si chiama "base". Cioè: moltiplicando 10 per se stesso S volte, dobbiamo ottenere N . Per esempio, se $N = 10^{18}$, cioè un miliardo di miliardi, abbiamo $S = 18$ ⁸.

Il logaritmo è una funzione molto conveniente, sotto vari aspetti, per ridurre numeri grandissimi a numeri molto più maneggevoli. Ciò che ci interessa sapere è che usare il logaritmo di N , invece che N , non stravolge alcuna delle proprietà che ci interessano. Possiamo farlo senza perdere nulla, ma guadagnandoci in praticità. In particolare, se N cresce, anche il suo logaritmo cresce, e viceversa: N più grande vuol dire entropia più grande, e N più piccolo vuol dire entropia più piccola.

L'entropia del cubo ordinato è dunque uguale al logaritmo di uno, che fa zero, mentre l'entropia del cubo disordinato è uguale al logaritmo di 43 trilioni, che fa all'incirca 19,6. Riepilogando, se date un cubo di Rubik a un bambino di tre anni, esso aumenterà la sua entropia da 0 a 19 virgola 6.

Storicamente, l'entropia non fu definita per la prima volta come

⁸ Se S è un numero decimale, si moltiplica S per un intero x tale che anche il prodotto $S \cdot x$ sia intero (almeno approssimativamente), e si eleva N a x , per soddisfare $10^{S \cdot x} = N^x$.

appena descritto, ma passando attraverso le proprietà del calore e della trasmissione del calore tra i corpi. Poiché la definizione originale non coinvolgeva numeri astronomici come 43 trilioni, è chiaro che non poteva essere un semplice conteggio di configurazioni. Si riuscì a dimostrare che però era intimamente legata al numero delle configurazioni, e che altro non era che il logaritmo di quel numero, a parte un fattore costante su cui sorvoliamo, perché ininfluente ai fini del nostro discorso. Quel fattore, tra l'altro, come tante altre costanti universali incontrate finora, può essere messo uguale a 1, scegliendo oculatamente le unità di misura. Sempre quel fattore può essere usato per passare dal logaritmo in base 10 al logaritmo in qualunque altra base, per chi sa cosa questo voglia dire.

Siamo pronti a ricavare la legge dell'entropia, cosa che non richiede poi un grande sforzo. Essa dice che un sistema abbandonato a se stesso, per esempio soggetto a fluttuazioni statistiche, o perturbazioni casuali, oppure soggetto ai movimenti di un bambino che non sa che cosa sta facendo, e quindi procede "a caso" (ecco dove appare il caso, in questo contesto; ma sarà lo stesso caso di cui abbiamo parlato nei capitoli precedenti?), evolverà necessariamente verso una configurazione disordinata. E poi evolverà ancora verso configurazioni ancora più disordinate. In sostanza, l'entropia di un sistema lasciato a se stesso non può che aumentare.

Per quale motivo succede questo? Per un motivo assai ovvio, cioè che le configurazioni disordinate sono molto, ma molto più numerose di quelle ordinate. Pertanto, è molto più probabile che un sistema abbandonato a se stesso finisca in una delle tante configurazioni disordinate, piuttosto che rimanga nell'ambito delle rarissime configurazioni ordinate. Quando c'è di mezzo la statistica dei grandi numeri, a poco vale sperare nei miracoli.

Nel caso del cubo di Rubik, potremmo distinguere vari gradi di "disordine". Per esempio, possiamo contare le configurazioni in cui una sola faccia è completa, per distinguerle da quelle in cui non è completa nessuna faccia. O potremmo distinguere le configurazioni in cui sono risolte due, tre, o quattro facce. Troveremmo che il numero di configurazioni

aumenta aumentando il grado di disordine. Ma non è necessario entrare in questi dettagli: per apprezzare il nocciolo della questione bastano i due casi limite che abbiamo considerato finora, cioè il cubo completamente ordinato e il cubo massimamente disordinato.

Notiamo dunque che un qualunque sistema abbandonato a se stesso evolve necessariamente, e "naturalmente", verso una configurazione più disordinata, per il semplice motivo che le configurazioni più disordinate sono più numerose di quelle meno disordinate. Anzi, possono essere molto più numerose delle configurazioni ordinate, tanto da coinvolgere numeri astronomici. Essendo più numerose, sono più probabili, e quindi sono favorite in ogni perturbazione "cieca" del sistema.

La legge dell'entropia è una legge molto importante della statistica e della fisica. E, se vogliamo, della natura. Essa è nota volgarmente come "legge di Murphy". La legge di Murphy dice che "se qualcosa può andare storto, lo farà". Il motivo è sempre lo stesso: se un qualunque sistema, in qualunque situazione, viene lasciato a se stesso, evolverà casualmente verso una delle tantissime configurazioni disordinate (cioè, "qualcosa andrà storto"), piuttosto che verso una delle pochissime configurazioni ordinate (cioè, "niente andrà storto"). Come potrebbe essere diversamente?

Un lungo filo di lana, ripiegato e messo in tasca, si può facilmente ingarbugliare, quando non ci facciamo attenzione. Non perché "lo faccia apposta", "ce l'abbia con noi", ma perché il numero di configurazioni ingarbugliate è molto più alto del numero delle configurazioni ordinate, per cui, sballottato nella tasca o nella borsa, un colpo qui, un colpo là, prima o poi imbroccherà una delle tantissime strade verso il disordine. Allo stesso modo, se cade per terra qualcosa di piccolo in cucina, andrà a rotolare in un punto scomodo da raggiungere, invece che fermarsi dove lo possiamo tranquillamente raccogliere. Basta contare quanti sono i posti scomodi da raggiungere e quanti sono i posti comodi, per capire che la legge dell'entropia è più semplice di quel che la parola criptica "entropia" possa suggerire.

Dobbiamo infatti pensare che, in un sistema abbandonato a se stesso, tutte le configurazioni, sia quelle ordinate che quelle disordinate,

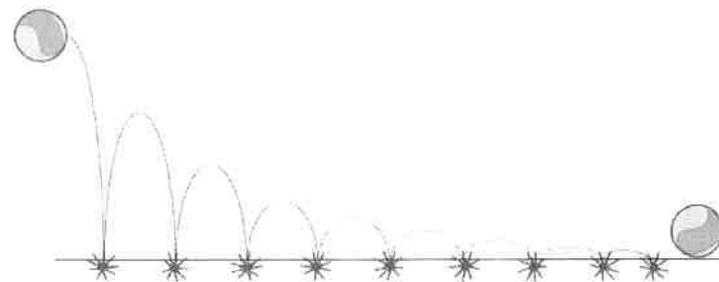
sono a priori equiprobabili, cioè hanno la stessa probabilità di uscire. Come nel caso di una dado non truccato: la probabilità di ottenere 1 è uguale alla probabilità di ottenere 2, che è uguale alla probabilità di ottenere 3, eccetera. E così con due dadi, uno verde e uno rosso: la probabilità che il dado verde dia 4 e quello rosso 3 è uguale alla probabilità che il dado verde dia 6 e quello rosso 6, come è uguale alla probabilità che il dado verde dia un qualunque numero da 1 a 6 e il dado rosso dia un qualunque numero da 1 a 6. Infatti, un dado non può influenzare l'altro.

Se le configurazioni sono equiprobabili, e quelle disordinate sono molto più numerose di quelle ordinate, la direzione verso la quale il sistema evolverà, tutte le volte che viene abbandonato a se stesso, punterà spontaneamente verso il maggior disordine, cioè verso la tipologia di configurazioni che ha più probabilità di uscire.

Come detto, l'entropia è anche legata alle nozioni di calore e temperatura. Su questo non serve insistere, ma qualche dettaglio possiamo darlo, per agganciarci al concetto di irreversibilità. La temperatura descrive il movimento microscopico degli atomi. Per esempio, se prendo a martellate un pezzo di ferro, posso riscaldarlo fino a renderlo incandescente. Ciò succede perché le mie martellate trasferiscono la loro energia di movimento, o energia cinetica, agli atomi del metallo, i quali cominciano a muoversi più velocemente, cioè oscillano con frequenza più alta attorno alle loro posizioni di equilibrio, all'interno del metallo. Ciò si descrive dicendo che aumenta la loro temperatura, perché, come detto, la temperatura misura l'energia cinetica media degli atomi. Se sono così incauto da toccare il pezzo di ferro, me ne accorgo subito, perché mi scotta: gli atomi della mia mano assorbono energia dal metallo, diventando pure loro più energetici; a quel punto, le diramazioni nervose presenti nella mano trasmettono un segnale al mio cervello; infine, il cervello traduce quel segnale in quella sensazione che noi chiamiamo dolore.

Similmente, se prendo una palla da tennis e la lascio cadere a terra, questa rimbalzerà alcune volte, dopodiché si fermerà. A quel punto, mi posso chiedere: dove è andata a finire la sua energia cinetica? La palla

era in moto, mentre alla fine la trovo ferma. Dov'è finito il suo movimento? Sparito nel nulla? Cancellato? No: esso è stato ceduto, rimbalzo



dopo rimbalzo, agli atomi del terreno, o del pavimento. Ad ogni impatto col suolo, la palla perde parte della sua energia cinetica, e la trasferisce agli atomi delle piastrelle, i quali, di conseguenza, si mettono ad oscillare attorno alle loro posizioni di equilibrio con una frequenza maggiore. Cioè: si riscaldano. Magari poco, ma si riscaldano. La maggior frequenza di oscillazione, che vuol dire anche maggior energia, è misurata dalla temperatura.

Ora, il fenomeno della palla che perde energia rimbalzando fino a fermarsi è un chiaro fenomeno irreversibile: non è possibile che accada il contrario. Cioè, non è possibile che una palla, ferma sul pavimento, assorba improvvisamente energia dagli atomi delle piastrelle, raffreddandoli, al punto da mettersi a saltellare dal nulla... Abbiamo mai visto succedere niente del genere? Certamente no. Una palla ferma sul pavimento rimane ferma, se nessuno la tocca. Per l'eternità.

Eppure..., il dubbio rimane. Non potrebbe succedere proprio quello che a prima vista sembrerebbe impossibile? Invece di una palla che rimbalza sul pavimento sempre meno fino a fermarsi, dissipando la sua energia, cedendola al terreno ad ogni rimbalzo, dovremmo immaginare che accada l'esatto contrario. Per farcene un'idea, possiamo riprendere i rimbalzi della palla col telefonino e riguardare il video dalla fine all'inizio. Cosa vediamo? Vediamo una palla inizialmente ferma sul pavimento che, improvvisamente, si mette a saltellare dal nulla, come niente fosse. Tramite un graduale, e ordinato, trasferimento di energia cinetica dagli atomi del terreno alla palla, i primi si raffreddano un po', mentre la se-

conda "assorbe" dal terreno l'energia necessaria a mettersi in moto e saltellare. Cosa c'è, nelle leggi fondamentali della natura, che impedisce questo? Cosa impedisce che un fenomeno della vita quotidiana possa accadere anche al contrario?

Possiamo parlare di irreversibilità anche nel caso del cubo di Rubik. Affidiamolo a un bambino di tre anni. Anche un bambino di tre anni è in grado di disordinare il cubo, perché sa maneggiare gli oggetti. Partendo dal cubo di Rubik ordinato che gli diamo noi, ce lo restituirà disordinato. Disordinare un cubo di Rubik è un'operazione semplicissima, che non richiede alcuno sforzo. Pensate ora all'operazione inversa, cioè restituire un cubo ordinato a partire da uno disordinato. Non è esattamente la stessa cosa. Chiunque si sia messo a risolvere il cubo di Rubik senza guardare le soluzioni che circolano in rete, sa quanto sforzo richieda l'impresa. Ma anche chi si vuole privare del piacere di risolverlo da solo e va a cercarsi le soluzioni su internet, sa che il tutto richiede concentrazione, pratica e un grande sforzo. Vediamo quindi che il passaggio dal cubo ordinato al cubo disordinato non è come il passaggio dal cubo disordinato al cubo ordinato. Se disordinare un cubo richiede solo di prenderlo in mano e manipolarlo a casaccio, cosa che può fare anche un bambino che ha appreso a maneggiare gli oggetti da poco, riordinarlo è qualcosa che può fare soltanto una persona che si sia applicata, abbia imparato una soluzione da qualcuno, o l'abbia trovata da sé, e poi abbia avuto anche la pazienza di fare pratica. E se ha imparato a maneggiare il cubo velocemente, può arrivare a risolverlo in 10 secondi. Tuttavia, la asimmetria tra i due tipi di sforzi è evidente, perché il movimento in una direzione, dall'ordine al disordine, è molto facile e molto probabile, mentre il movimento nell'altra direzione, dal disordine all'ordine, non avviene *da solo*. O, meglio, può avvenire anche da solo, ma con una probabilità bassissima: una su 43 trilioni. Date un cubo disordinato a un bambino di tre anni 43 trilioni di volte e capiterà anche quella volta in cui, muovendolo a caso, ve lo restituirà ordinato. Al ritmo di un tentativo al secondo, impiegherete 100 volte l'età dell'universo! Per far avvenire la cosa in modo più frequente c'è bisogno di uno sforzo non da poco.

Nel caso della palla da tennis, la palla si scontra con gli atomi del

pavimento, a cui cede a poco a poco tutta la sua energia cinetica, fino a fermarsi. Alla fine la troviamo a riposo, da qualche parte sul pavimento. Ci potremmo chiedere se non sia possibile che gli atomi del pavimento a contatto con la palla, che sono in continua vibrazione attorno alle loro posizioni di equilibrio, cioè possiedono energia cinetica propria, si "mettano d'accordo" per cederne un po' alla palla, raffreddandosi, facendola quindi schizzare in alto, e permettendole di percorrere la traiettoria inversa. È possibile che accada spontaneamente una cosa del genere?

Per essere possibile, è effettivamente possibile, così com'è possibile che, se date un cubo disordinato un bambino di tre anni, ve lo restituisca ordinato. Ma è molto poco probabile che accada. Una volta su 43 trilioni nel caso del cubo, un numero incredibilmente più alto nel caso della palla. La legge dei grandi numeri ci dice che la probabilità che accadano eventi come questi è così bassa, ma così bassa che non solo non basterebbe l'età dell'universo per osservarne uno, ma nemmeno molti miliardi di volte l'età dell'universo.

Ricordo che l'età presente dell'universo è 14 miliardi di anni. Si può pensare che sia un'età molto lunga, ma in realtà, rispetto alle questioni statistiche di cui stiamo parlando, è un tempo brevissimo. Tuttavia, il futuro davanti a noi potrebbe prevedere un tempo infinito.

Per il momento trascuriamo l'espansione dell'universo, che può cambiare le conclusioni che stiamo per trarre. La includeremo più avanti. Le domande che ci facciamo sono: esiste l'irreversibilità nell'universo, o l'eterno ritorno? L'universo sta evolvendo verso una situazione di sempre maggior disordine, oppure no? Se sì, il suo stato finale dovrebbe essere lo stato di disordine massimo, noto anche come "morte termica". Una volta raggiunta la morte termica, l'universo non tornerà più indietro, ci dicono. Ma sarà vero? Se davanti a noi c'è un futuro infinito, ci aspettiamo che qualunque evento possibile accadrà, necessariamente, prima o poi, per quanto improbabile possa essere.

La legge di irreversibilità che abbiamo enunciato è, come abbiamo visto, una semplice conseguenza di una proprietà statistica. Si potrebbe riassumere dicendo che "è più probabile che accada ciò che è più pro-

babile che accada". E il disordine è sicuramente più probabile dell'ordine, visto che il secondo è, per definizione, "speciale", quindi ristretto ad un numero di configurazioni molto più basso del primo. Siccome la legge di irreversibilità è soltanto una legge statistica, ne segue anche che è soltanto una legge approssimata dei grandi numeri, non una legge fondamentale della natura. Infatti, le leggi fondamentali della natura, sono tutte simmetriche, si dice *invarianti*, rispetto all'inversione del corso del tempo, cioè rispetto allo scambio tra passato e futuro⁹. Ciò vuol dire che tutti i fenomeni elementari della natura possono avvenire con il tempo che scorre dal passato al presente al futuro, così come possono avvenire con il tempo che scorre dal futuro al presente al passato. Pertanto, qualunque fenomeno vi sembri irreversibile, può succedere anche al contrario. È soltanto una "questione di tempo", potremmo dire. Per la precisione, a fare la differenza è una questione di probabilità, in relazione alle condizioni iniziali del sistema stesso.

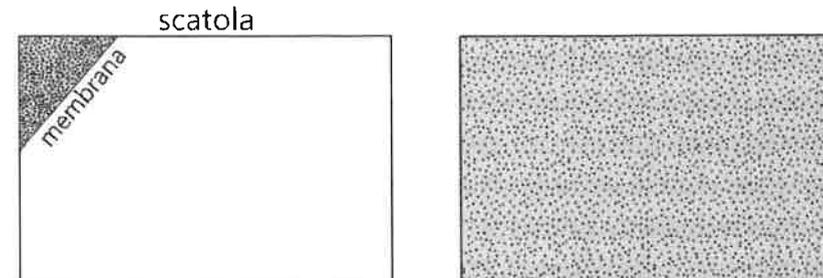
La cosa diventa importante quando non consideriamo sistemi elementari, fatti di pochissimi atomi, ma sistemi complessi fatti di tantissimi atomi. Ciò che rende praticamente impossibile osservare il fenomeno inverso durante il corso della nostra vita, come durante la vita passata dell'universo, come durante la vita combinata di molti universi futuri simili al nostro messi in fila l'uno dietro l'altro, è soltanto un fatto statistico.

Stabilito che i fenomeni inversi sono possibili, ora la domanda è: si verificheranno necessariamente, prima o poi? Per avvicinarci alla risposta vediamo altri esempi di irreversibilità e di eterno ritorno, così da rendere più chiari i termini della questione.

Prendiamo una scatola chiusa e vuota. Con una membrana supponiamo di isolare un quantitativo di gas in un certo angolo, mentre il resto della scatola rimane completamente vuoto, come vediamo nella figura di sinistra della pagina seguente. A un certo punto togliamo la membrana. Che cosa succederà? Inevitabilmente le molecole o gli atomi del gas

⁹ A parte una piccola violazione della simmetria per inversione temporale, prevista dal modello standard delle particelle elementari. Essa non ha molto a che vedere con quello di cui stiamo parlando ora, ma potrebbe comunque avere effetti importanti.

si sparpaglieranno per tutta la scatola, riempiendola, come mostrato nella figura di destra. Abbiamo dunque un grande aumento di entropia, perché la prima situazione, quella con il gas confinato in un angolo, è molto più ordinata della seconda, dove il gas occupa tutta la scatola.



Detto in altre parole, il numero di configurazioni che il gas può assumere nel secondo caso è molto, ma molto superiore al numero di configurazioni che il gas può assumere nel primo. Sicuramente, infatti, tutte le configurazioni del primo tipo sono anche configurazioni del secondo tipo, perché la scatola riempita di gas ammette, tra tutte le configurazioni possibili, anche quelle nelle quali tutte le molecole del gas si accuciano "spontaneamente" vicino a uno degli angoli della scatola. Sono comunque particolari configurazioni permesse, e vanno contate. Ma rispetto al totale delle configurazioni permesse dopo che la membrana è rimossa, quelle sono pochissime, per cui la rimozione della membrana provoca un aumento enorme dell'entropia.

Tuttavia, è ben possibile che, dopo un lasso di tempo sufficientemente lungo, gli atomi della scatola si riaccuccino tutti nell'angolo da cui sono partiti, senza alcuna membrana o altro che li costringa a farlo. Anzi, siccome le configurazioni in cui gli atomi sono situati tutti nell'angolo, per quanto poco numerose, sono particolari configurazioni anche della scatola senza membrana, prima o poi quanto detto succederà davvero. Cioè, prima o poi l'entropia *diminuirà*. Il punto è che, visti i numeri in gioco, se si calcola quanto tempo bisogna aspettare perché accada una cosa del genere, si trova un valore enorme, tipo molti miliardi di volte la vita passata del nostro universo.

Per aiutarci a capire ancora meglio cosa sta succedendo, possiamo pensare al lancio dei dadi al casinò. Ogni dado può dare un numero da 1

a 6. Il risultato del lancio di due di uguali può essere un numero intero qualunque tra 2 e 12. Ma il 2 è poco probabile, perché può uscire soltanto se entrambi i dadi danno 1. Così come è poco probabile il 12, che può uscire soltanto se entrambi i dadi danno 6. Il numero che ha più alte probabilità di uscire è il 7, perché può essere ottenuto in sei modi diversi: 1-6, 2-5, 3-4, 4-3, 5-2, 6-1. Se confrontiamo il numero di combinazioni che danno 7 col numero di combinazioni che danno gli altri risultati, scopriamo appunto che 7 è il più probabile di tutti. Allo stesso tempo, ciò vuol dire che "è meno speciale". Potremmo dire che il 7 è più "normale". In questo caso, l'ordine è la specialità e il disordine è la normalità.



Ora, mettiamo due dadi "ordinati" in un barattolo. Per esempio, sistemiamo i due dadi in modo da avere 12, cioè con le facce dei 6 rivolte verso l'alto. Successivamente, scuotiamo il barattolo e supponiamo che esca un 7. Avremo dunque aumentato l'entropia da 0 (il logaritmo di 1, l'unica combinazione che dà 12) a circa 0,78 (il logaritmo di sei, cioè il logaritmo del numero di modi, elencati sopra, di ottenere il risultato 7). In questo esempio l'entropia non aumenta di molto, perché il sistema fatto di due dadi è un sistema relativamente semplice. Comunque, aumenta. Se partiamo dal 7 e scuotiamo di nuovo il barattolo, potrebbe tornare il 12. In quel caso l'entropia passerebbe da 0,78 a 0. Vuol dire allora che l'entropia diminuisce? In fondo, non è così improbabile ottenere un 12 dopo un 7. Ma allora vuol dire che non c'è affatto irreversibilità, bensì eterno ritorno! Se lanciamo i dadi un numero abbastanza alto di volte, infatti, prima o poi il risultato 12 tornerà. Per forza. E poi ancora. Infinite volte. Ma non avevamo detto che l'entropia deve aumentare *sempre*? Che il grado di disordine tende a crescere? Che un sistema evolve "spontaneamente" verso configurazioni sempre più disordinate?

In realtà, non abbiamo mai detto che il disordine aumenta *sempre*, ma solo che aumenta *statisticamente*, cioè, che è più probabile che aumenti. Il sistema fatto di due dadi è così semplice da non coinvolgere

numeri astronomici, per cui la probabilità degli eventi contrari, cioè gli eventi in cui si passa dal disordine all'ordine spontaneamente, non è così bassa. Tuttavia, ci illustra bene il significato generale della legge dell'entropia in quanto legge approssimata. Infatti, se è molto, ma molto improbabile che la palla da tennis ferma sul pavimento assorba un po' di energia dagli atomi della piastrella su cui giace, per mettersi a saltellare dal nulla, così come è molto, ma molto improbabile che gli atomi del gas, sparpagliato per tutta la scatola, si riaccuccino da soli nell'angolo da cui sono partiti, non è altrettanto improbabile che i nostri due dadi, dopo aver dato, per esempio, 7 partendo da 12, ridiano 12 a partire da 7. Per essere precisi, quella probabilità è 1 su 36, essendo $6 \times 6 = 36$ il numero totale di configurazioni dei due dadi. Pertanto, se ripetiamo l'esperimento qualche decina di volte, torneremo senz'altro alla configurazione di partenza.

La differenza tra i vari casi descritti sta solo nella grandezza dei numeri che essi coinvolgono. Non è una differenza sostanziale, concettuale, fondamentale. Lo possiamo capire ancora meglio se analizziamo cosa succede lanciando quattro dadi alla volta. In questo caso, il numero totale di configurazioni è $6 \times 6 \times 6 \times 6 = 6^4 = 1296$. Tra queste, una sola dà il risultato 4: è quella in cui tutti i dadi si fermano con la faccia 1 rivolta verso l'alto. Una sola è anche la configurazione che dà il risultato 24, cioè quella in cui tutti i dadi danno 6. Invece, ben 73 configurazioni danno 14, che è il risultato più probabile. Pertanto, se mettete nel barattolo quattro dadi con la faccia 6 rivolta verso l'alto, che è una configurazione a entropia zero, perché unica nel suo genere ($\log 1 = 0$), e agitate come si deve, sarà molto probabile che l'entropia aumenti. Per esempio, se ottenete il risultato 14, aumentate l'entropia da zero a 1,86, che è il logaritmo di 73. Se poi agitate il barattolo di nuovo, potrebbe capitare (e capiterà una volta su 1296, all'incirca) che esca di nuovo quel 24 da cui siete partiti, cioè la configurazione in



cui tutti i dadi hanno la faccia 6 rivolta verso l'alto. Avrete quindi fatto scendere l'entropia di nuovo a zero.

Stavolta, ritornare alla configurazione iniziale richiede maggior pazienza e caparbità che nel caso di due dadi soli, ma alla fine, dopo varie centinaia di tentativi, ci riuscirete ancora, necessariamente: ritornerete "spontaneamente" alla vostra configurazione preferita, che in questo caso è quella che dà 24. Pertanto, in un sistema con un numero finito di configurazioni permesse, tra l'irreversibilità e l'eterno ritorno vince l'eterno ritorno.

E a proposito dell'universo, cosa possiamo dire: c'è irreversibilità o eterno ritorno? Un passo avanti verso la risposta ce lo fa fare il teorema della ricorrenza di Poincaré. Esso dice che, genericamente (accenneremo più tardi alle eccezioni), in un sistema deterministico¹⁰ di dimensioni finite si possono verificare le due situazioni che adesso andiamo a descrivere.

Nella prima situazione il sistema ritorna, a un certo punto, esattamente in una delle configurazioni passate. Vuol dire che chiude un ciclo. Allora, quel ciclo si ripeterà all'infinito, portando alla *periodicità*.

Come sappiamo, nel determinismo le condizioni iniziali fissano univocamente tutta l'evoluzione futura. Pertanto, se il sistema passa due volte per una stessa configurazione, possiamo prendere quella come configurazione iniziale, e concludere che dovrà necessariamente ripetere tutto il ciclo a partire da quella. E così all'infinito. Riassumendo, la prima possibilità prevista dal teorema di Poincaré è quella dell'*eterno ritorno dell'identico con ciclicità*.

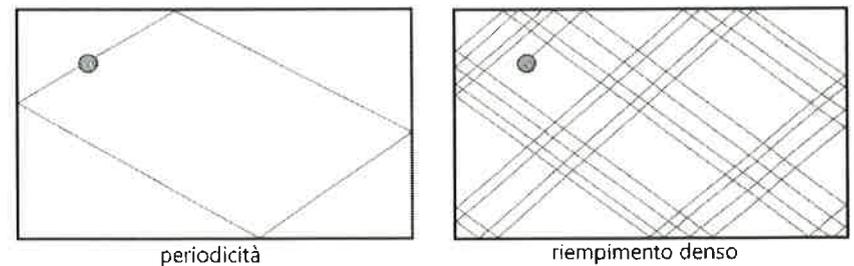
L'alternativa è che il sistema non ritorni mai nella stessa configurazione iniziale. Allora, il teorema dice che il sistema ritornerà infinite volte arbitrariamente vicino alla configurazione di partenza. In altre parole, avremo l'*eterno ritorno del simile*.

Riepilogando, possono succedere due cose: la periodicità, cioè la

¹⁰ Per ora continuiamo a considerare sistemi deterministici, cioè approssimazioni di sistemi reali nei quali tutti gli effetti quantistici sono trascurabili. Oppure, semplicemente, sistemi idealizzati non realistici nei quali facciamo finta che la fisica quantistica non esista. Estenderemo l'analisi ai sistemi quantistici più avanti.

ripetizione monotona ed instancabile della stessa identica sequenza, sempre e comunque, senza soluzione di continuità; oppure, l'eterno ritorno del simile, in cui l'universo non ritorna mai esattamente in uno degli stati già percorsi, o in una delle configurazioni già percorse, ma ci torna arbitrariamente vicino, infinite volte.

L'esempio del biliardo ci fornisce una maniera semplice per descrivere quanto appena imparato. La biglia rappresenta, da sola, il sistema che ci interessa, magari tutto l'universo. Il biliardo rappresenta l'insieme delle configurazioni in cui l'universo si può venire a trovare. Quando colpiamo la biglia, la mettiamo in moto e la facciamo rotolare sul biliardo. Essa rimbalzerà contro le pareti e dopo un po' si fermerà, perché l'attrito le fa perdere gradualmente energia, che sarà assorbita dagli atomi del tappeto verde, i quali si riscalderanno un pochino. Ma se vogliamo descrivere le proprietà dell'universo che ci interessano, dobbiamo supporre di avere, per qualche motivo, un biliardo ideale e una biglia ideale, in cui l'attrito è completamente trascurabile e la biglia è puntiforme. In quel caso, la biglia, una volta messa in moto, continuerà a muoversi all'infinito, e a rimbalzare contro le pareti. Sono due le cose che possono succedere, a quel punto, rappresentate dalle figure qui sotto (dove la biglia va immaginata come un punto).



Nel primo caso, la biglia chiude esattamente una traiettoria ciclica, e ripercorre sempre la stessa traiettoria, all'infinito. Questo è il caso della periodicità. Nel secondo caso, la biglia non chiude alcuna traiettoria. Allora si muove in maniera tale da ritornare infinite volte arbitrariamente vicino alla posizione iniziale. Non solo. Si può dimostrare che la biglia passerà infinite volte arbitrariamente vicino a *qualunque* punto del biliardo, riempiendo il biliardo in modo, si dice, matematicamente *denso*.

Abbiamo enunciato il teorema della ricorrenza di Poincaré in una forma particolare, adatta ai sistemi che ci interessano maggiormente. Nella sua forma generale, il teorema è molto meno potente di quanto abbiamo detto. Se non facciamo alcuna ipotesi in più, oltre a quella di trovarci in un sistema finito, il teorema della ricorrenza dice soltanto che, data una configurazione C , ne esiste una arbitrariamente simile a C che, dopo un tempo finito, tornerà ad essere arbitrariamente simile a C . Ma non assicura che la configurazione particolare C tornerà simile a se stessa. L'eterno ritorno del simile, in sostanza, vale per quasi tutte le configurazioni iniziali, ma non è garantito per tutte. In generale, possono esistere configurazioni eccezionali che non tornano mai, né identiche, né simili, o tornano simili alcune volte e poi mai più.

Inoltre, il ritorno non è garantito se il sistema non è finito. Tutto quello che abbiamo spiegato vale infatti per i sistemi finiti, comunque grandi. Il biliardo ha pareti, quindi è un sistema finito. Il cubo di Rubik ammette un insieme molto grande, ma comunque finito, di configurazioni. E così i dadi. Se l'universo fosse infinito, il ritorno non è mai garantito, men che meno necessario. Per esempio, se rimuoviamo le pareti del biliardo, la biglia senza attrito si muove di moto rettilineo uniforme, senza mai tornare indietro, quindi senza alcun tipo di ripetizione o ritorno.

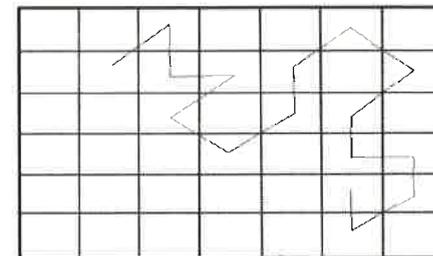
Da ultimo, abbiamo assunto che l'universo abbia un futuro infinito, come forse ha, e abbiamo trascurato la sua espansione. I risultati possono continuare a valere se l'espansione non durerà in eterno, ma sarà seguita da una contrazione, poi da un'altra espansione, e così via all'infinito (universo pulsante).

Se togliamo qualcuna delle ipotesi fatte, possiamo ancora dire che, se si chiude un ciclo, si ripeterà sempre quel ciclo, all'infinito. Se, invece, non si chiude nessun ciclo, non avremo la garanzia dell'eterno ritorno del simile, che resterà comunque una possibilità. Cioè, non potremo dire che le sequenze inverse di eventi avranno luogo, o che si abbia una qualche forma di ritorno, ma non potremo neanche escluderlo. Si potranno avere configurazioni arbitrariamente simili a qualunque configurazione piaccia a noi, e potranno anche ripetersi un numero arbitrario di

volte, ma non lo possiamo dare per certo.

Vediamo ora cosa succede in ambito quantistico, a partire dal caso in cui il numero di stati permessi è finito. Mentre in un sistema classico, sotto ipotesi abbastanza generiche, avevamo la periodicità o l'eterno ritorno del simile, ora non è possibile avere nessuna delle due. Esse sono soppiantate da una terza via.

Sappiamo che esistono celle elementari di indeterminazione, all'interno delle quali non si può entrare e nemmeno vedere. Non è necessario specificare la forma di quelle celle, se sia rettangolare, o a corona ellittica, o chissà cos'altro. L'importante è sapere che al loro interno la realtà non esiste, perché la virtualità prende il suo posto. Per concretezza, possiamo immaginare il nostro sistema quantistico come fatto di una particella qualunque, come un elettrone, e un generico insieme finito di stati in cui possa trovarsi, senza bisogno di essere più precisi. Possiamo raffigurare lo spazio delle configurazioni come un rettangolo suddiviso a sua volta in tante celle elementari rettangolari di area $2\pi\hbar$.



Ha senso soltanto dire se la particella sta in una cella o in un'altra. La particella non è costretta a muoversi di moto rettilineo, o secondo una traiettoria particolare. Può saltare da una cella ad un'altra qualunque. Per semplicità, limitiamo le possibilità dei salti alle celle limitrofe. Il risultato di una multiforcazione quantistica determinerà quale sceglierà di volta in volta. Otteniamo allora una traiettoria spezzata come quella mostrata in figura.

Non si può più dire, per esempio, che, durante il moto, la particella ripassa arbitrariamente vicino ad un punto per cui è già passata prima, perché la nozione di punto non ha più senso, sostituita da quella di cella. Nel caso in cui la particella ripassi per la stessa cella, non è nemmeno possibile dire che la traiettoria chiuderà un ciclo. Infatti, la cella successiva in cui si verrà a trovare non è predeterminata in modo univoco dalla storia precedente. Dopo essere tornata in una cella in cui è già stata,

non sarà obbligata a ripercorrere necessariamente la stessa successione di celle percorse prima, perché nel mondo quantistico non esiste il determinismo. Al suo posto, abbiamo le biforcazioni quantistiche, o le multiforcazioni. E quindi, dopo che la particella è tornata nella stessa cella, cioè nello stesso stato precedente, avrà, come al solito, una pluralità di opzioni per il passo successivo, al posto di una soltanto. E sceglierà una di quelle. Quale, lo “deciderà lei”, sul momento, senza che nessuno glielo possa imporre. E senza che niente o nessuno possa predire quello che farà. E quindi, non sarà costretta a rifare la scelta già fatta eventualmente in precedenza, qualora si fosse già venuta a trovare nella stessa cella.

In un universo finito (cioè, se il numero di celle disponibili è finito) il sistema ritornerà comunque infinite volte nella stessa cella, ma senza ripetere la stessa sequenza di celle percorsa in precedenza. Pertanto, quello che otteniamo in ambito quantistico è *l'eterno ritorno dell'identico senza ciclicità*.

Se qualcuno di voi conosce la filosofia di Nietzsche sa che l'eterno ritorno dell'identico senza ciclicità è proprio quanto intuito da questo grande filosofo verso la fine del 1800, quindi ben prima dell'apparire dei quanti sulla scena del mondo. Occorre sottolineare che non è sufficiente dire “eterno ritorno dell'identico”, come molti spesso fanno, sbrigativamente. Anche la periodicità prevista dal teorema di Poincaré è un esempio di eterno ritorno dell'identico. Tuttavia, quello di Poincaré è l'eterno ritorno dell'identico con ciclicità, mentre la filosofia nietzscheana esclude che l'universo possa percorrere un ciclo. Ove per ciclo si intende ovviamente un ciclo finito. Si potrebbe metaforicamente parlare di “ciclo infinito”, quando si vuole intendere, come a volte fa lo stesso Nietzsche nei suoi aforismi postumi, l'insieme di tutte le possibilità del cosmo, cioè tutte le sequenze possibili di eventi, oppure, appunto, l'assenza di periodicità. Nel caso del sistema quantistico considerato poc'anzi, sarebbe l'insieme di tutte le sequenze finite di celle che la particella può occupare durante il suo moto. Sequenze che, per via delle multiforcazioni quantistiche che “determinano casualmente” le celle successive di volta in volta, essa percorrerà effettivamente, e ripercorrerà infinite volte.

Ma, nell'ambito classico, l'eterno ritorno dell'identico non emerge

come ciclo infinito di tutte le possibilità, ma soltanto come ciclo ben preciso, una traiettoria chiusa, che infatti non riuscirà mai a riempire un biliardo, per cui non può coprire affatto *tutte le possibilità*, ma soltanto una particolare selezione delle stesse. In un mondo deterministico non potete riempire il biliardo con l'eterno ritorno dell'identico, perché in quel caso avrete necessariamente la ciclicità. Nel secondo caso previsto dal teorema di Poincaré, invece, cioè l'eterno ritorno del simile, riempite sì il biliardo, ma soltanto in modo denso, e non ritornerete mai *esattamente* alla situazione iniziale, cioè non avrete l'eterno ritorno dell'identico.

Nel mondo quantistico, dove ci sono soltanto celle elementari, all'interno delle quali non ha senso entrare e non si può nemmeno dire che la realtà esista, anzi si può dire che non esiste affatto, avete la possibilità di percorrere tutti gli stati permessi, e anche di tornare alla situazione iniziale, senza alcuna forma di ciclicità, cioè senza essere mai costretti a fare una scelta futura che non sia libera e indipendente dalla storia precedente. E non solo ritornerete infinite volte nella stessa cella, ma ripercorrerete infinite volte tutte le sequenze finite di celle già percorse. Anzi, percorrerete infinite volte tutte le sequenze finite di celle che vi vengano in mente, per quanto lunghe esse siano. E senza mai essere incatenati a un ciclo.

Una buona illustrazione di quanto appena detto ce la offre proprio il cubo di Rubik che abbiamo dato in mano ad un bambino di tre anni. Sappiamo che se gli diamo il cubo ordinato, che chiamiamo “stato O”, il bambino ce lo restituirà in una certa configurazione disordinata, che chiamiamo D_1 . Se gli ridiamo il cubo disordinato nello stato D_1 , ce lo restituirà disordinato in un'altra maniera, che chiamiamo D_2 . Ma se rifacciamo questa operazione 43 miliardi di miliardi di volte, una di quelle il bambino riuscirà, pur procedendo a caso, come fa sempre, a risolvere il cubo disordinato e a restituircelo ordinato, cioè nello stato O. Ecco che, a quel punto, saremo tornati alla situazione di partenza. Prendiamo nota, e continuiamo. Ridiamo al bambino il cubo ordinato: ce lo restituirà disordinato anche stavolta, ma non nella stessa configurazione D_1 che aveva fatto seguito allo stato ordinato la volta prima. Continuando ancora,

riscontriamo che non si ripeterà la stessa sequenza di configurazioni incontrata prima. Sarà generata, invece, una successione di configurazioni completamente nuova. E così avanti, all'infinito.

Tutte le configurazioni usciranno, prima o poi, e ritorneranno infinite volte. Tutte le sequenze finite di configurazioni usciranno, prima o poi, e ritorneranno infinite volte. Ma non si ripeterà la stessa sequenza di configurazioni all'infinito, cioè non si avrà mai ciclicità. Questo è l'eterno ritorno dell'identico senza ciclicità.

La forza dei grandi numeri può funzionare anche al contrario, perché vi dice che, provando e riprovando, necessariamente si ripeterà qualunque configurazione passata, per cui tornerà anche quella ordinata, *prima o poi*. Il punto è che quel "prima o poi" nasconde tempi lunghissimi. Nel caso del cubo di Rubik, 43 miliardi di miliardi di tentativi. I tempi coinvolti sono molto più brevi nel caso del lancio di due dadi, dove bastano circa 36 tentativi circa per riottenere, ad esempio, la configurazione speciale che dà il totale 2. E pure nel caso del lancio di 4 dadi, dove bastano 1296 tentativi, o giù di lì, per ottenere la configurazione speciale che dà il totale 4.

Infine, se l'universo è infinito, o ammette un numero infinito di configurazioni, il ritorno dell'identico è sempre possibile, ma non è garantito. I quanti ci garantiscono che, anche se una configurazione si ripete, non avremo comunque la ciclicità, cioè non avremo la ripetizione di tutta la sequenza di eventi che si sono succeduti tra le due configurazioni identiche. È importante sottolineare che soltanto la natura quantistica dell'universo garantisce questo, perché il ritorno dell'identico in ambito classico produrrebbe necessariamente la ripetizione di tutto quello che è già occorso tra le due configurazioni identiche. L'universo in cui viviamo non è così, alla fine, perché i quanti garantiscono che una configurazione può essere seguita da futuri diversi.

Qualcuno potrebbe restare perplesso per il fatto che abbiamo illustrando le proprietà di un sistema quantistico con dei sistemi classici, come il cubo di Rubik o i getti di dadi. Non c'è contraddizione? No, perché abbiamo usato quelle metafore per illustrare solo un aspetto particolare del sistema quantistico. Non possiamo spingere le analogie più di

tanto. Quando parliamo di sequenze di getti di dadi siamo *noi* che immaginiamo che ci siano *interruzioni della realtà* tra un lancio e il successivo, oppure tra il momento del lancio e il risultato del lancio, per cui descriviamo il salto dovuto a quell'interruzione mediante le probabilità. In ambito classico, strettamente parlando, non c'è mai interruzione alcuna, per cui i risultati di tutti i lanci sono già predeterminati. Siamo sempre noi che decidiamo di ignorare parte del sistema per i nostri scopi. Fatto questo, possiamo ben cogliere, anche senza volerlo, parte delle proprietà di un sistema quantistico. Ma solo una parte di quelle. Ciò che ha permesso a Nietzsche di intuire quelle proprietà ben prima che i quanti apparissero sulla scena del mondo, a partire dai getti di dadi. Preciso questo, non potremo mai spingere l'analogia fino al punto di cogliere tutte le proprietà di un sistema quantistico con i suoi analoghi classici. Oltre un certo punto, infatti, scopriremo che in ambito classico l'interruzione della realtà che abbiamo inserito noi artificialmente non c'è affatto, mentre nel sistema quantistico c'è davvero.

Perché abbiamo parlato così diffusamente dell'entropia? Che cosa ha a che vedere con i quanti? A prima vista niente. E, invece, in realtà, a ben guardare... No, l'entropia non ha effettivamente niente a che vedere con i quanti. È proprio questo, il punto. E proprio per cogliere differenze come quelle appena messe in evidenza, che ne abbiamo parlato.

Questa è tutt'altro che un'informazione da poco. Anzi, è l'informazione cruciale che ci serve per procedere. Perché? La legge dell'entropia ci parla del caso, di fenomeni casuali, di probabilità e di statistica. Ma anche i fenomeni quantistici ci parlano del caso, come sappiamo bene. La multiforcazione quantistica è il caso. Tuttavia, il caso coinvolto nella legge dell'entropia non ha niente a che vedere con il caso coinvolto nei fenomeni quantistici. Questo è quello che dobbiamo capire bene. Ecco, dunque, perché abbiamo parlato dell'entropia: non perché ci aiuta a capire cosa sono i quanti, ma perché ci aiuta a capire cosa *non* sono.

La differenza tra il caso statistico e il caso quantistico è come la differenza tra il giorno e la notte. Se non capiamo bene l'entropia, non possiamo scansare i più comuni errori che rischiamo di commettere quando ci avventuriamo nello studio dei quanti. E allora possiamo finire subito

fuori strada. I due concetti di caso, quello quantistico e quello statistico, sono diversissimi, antitetici. Tanto che uno solo di loro, quello quantistico, è caso vero, mentre l'altro, quello statistico, è caso finto.

Il caso statistico è frutto della legge dei grandi numeri: non possiamo controllare le numerosissime variabili che identificano lo stato di un sistema fatto di un gran numero di atomi, come il gas in una scatola, e quindi parliamo di comportamenti medi, temperatura, pressione, probabilità, e così via. Ma se potessimo controllare tutte quelle variabili, e in principio potremmo farlo, il caso statistico sparirebbe completamente dai radar. Pertanto, il caso statistico è frutto della nostra narrazione della natura, ma non è una legge di natura. Così come è frutto della nostra narrazione della natura la legge dell'entropia, visto che non esiste una nozione di "ordine" che non sia soggettiva. Perché chiamiamo ordinato il cubo di Rubik avente le facce dello stesso colore? Perché non siamo portati a chiamare "semplice" una configurazione qualsiasi, alternativa a quella?

Il caso quantistico, al contrario, non è di natura statistica, perché interessa il fenomeno elementare, come un atomo che passa attraverso un campo magnetico e può deviare a destra come a sinistra. Non è frutto della legge dei grandi numeri, tanto che si manifesta quando sono coinvolti i piccoli numeri, cioè i sistemi microscopici fatti di pochi atomi. Non riguarda sistemi complessi, fatti di moltissime particelle, ma sistemi semplici. Non esiste caso statistico in sistemi fatti di pochi atomi, perché non si possono applicare le leggi dei grandi numeri ai piccoli numeri.

A voler essere pignoli, anche il fenomeno quantistico coinvolge sistemi di molti atomi, come i rivelatori di cui abbiamo bisogno per far sì che la virtualità del durante crei la (quasi) realtà del dopo. Ma abbiamo comunque bisogno del sistema elementare (il singolo atomo nel campo magnetico), affinché ciò accada. Per essere più precisi, il caso quantistico è frutto dell'interazione cruciale micro-macro, mentre il caso statistico è "solo macro".

Anzi, gli effetti quantistici vengono fortemente soppressi quando prendiamo in considerazione sistemi "solo macro". Esempi sono gli oggetti inanimati intorno a noi, i quali ci danno l'impressione della stabilità,

spesso dell'immutabilità, come nel caso dei sassi e delle rocce. Negli esperimenti descritti nei primi capitoli di questo libro, il singolo atomo è libero nel "durante", quando "nessuno lo sta osservando", cioè non è in interazione con nulla, circondato da buio e silenzio assoluti. Ma non è affatto libero quando è impacchettato in miliardi di altri atomi, come in una sedia, in un tavolo, in una porta. Anche noi, che ci riteniamo liberi, lo siamo molto meno in mezzo al traffico, o in una folla. Quasi sempre, l'indeterminazione tipica dei fenomeni quantistici è fortemente soppressa in oggetti fatti di un gran numero di atomi. Per questo abbiamo la sensazione che la realtà che ci circonda sia così stabile.

Il caso statistico, per definizione, esiste soltanto nei sistemi complessi fatti di molti atomi. Non può esistere in un sistema elementare, appunto perché richiede un campione statistico, non un evento singolo: non ci può essere "indeterminazione statistica" dove non c'è statistica. Ma la differenza più importante tra i due tipi di caso può essere apprezzata solo a livello matematico: il caso quantistico non può essere descritto da variabili nascoste che un giorno magari scopriremo e misureremo, perché nel durante la realtà non esiste, è interrotta per davvero. Nessuna sospensione del genere ha luogo nel caso statistico, che descrive soltanto una nostra ignoranza di ciò che comunque esiste.

La ricerca della variabili nascoste, che ha impegnato molti fisici per decenni, era proprio il tentativo di ricondurre il caso quantistico al caso statistico, immaginando che "dietro" un sistema elementare, come un atomo che, passando attraverso un campo magnetico, devia a destra o a sinistra, ci fossero in realtà variabili a noi nascoste, in numero sufficiente a garantire una statistica, e in grado di spiegare le biforcazioni quantistiche come dovute all'incertezza statistica su quelle variabili, come nei getti di dadi del casinò.

Solo un'impossibilità pratica, dovuta alla nostra imprecisione o approssimazione, ci fa dire che il risultato di un getto di dadi è "determinato dal caso", per cui lo pensiamo come imprevedibile. In verità, il risultato è soltanto difficile da prevedere, perché prevederlo richiederebbe di impostare un sistema di equazioni troppo difficile da risolvere in tempo utile. Tuttavia, è chiaro che non si tratta di un ostacolo intrinseco,

cioè un'impossibilità di principio.

Invece, il caso quantistico è caso vero. E lo possiamo dire perché esistono esperimenti in grado di dirimere la questione se la realtà sia veramente sospesa, nel durante, oppure il durante sia "riempibile" di variabili nascoste, cioè se il caso quantistico sia riconducibile o meno al caso statistico. Esperimenti che hanno permesso di escludere che la natura microscopica sia governata dalla statistica di ipotetiche variabili nascoste. Pertanto, la metafora dei "getti di dadi", che possiamo impiegare sbrigativamente, come intuisce Nietzsche, per dare l'idea di alcune proprietà dei quanti, non può essere intesa come più di una metafora. Se la prendessimo alla lettera, si rivelerebbe fuorviante.

Entrambi i tipi di casualità sono associati a forme di dinamicità ricche e interessanti, pur nelle loro cruciali diversità. Abbiamo visto vari esempi di dinamiche dovute all'indeterminazione quantistica, come le biforcazioni e le multiforcazioni elementari, e poi la creazione, la cancellazione, la rigenerazione. Esempi della dinamicità dovuta all'indeterminazione statistica e alla legge dell'entropia, per contro, sono l'imprevedibilità delle perturbazioni meteorologiche, i terremoti, i movimenti tellurici, l'evaporazione dell'acqua, i fiumi, le cascate, le onde del mare, gli tsunami, il vento, i tifoni, i tornadi, le piogge, eccetera.

12 Che cosa (non) è il tempo

Cos'è il tempo? Questa è una domanda ricorrente, e ovviamente ci si aspetta che la fisica sia in grado di rispondere. In questa lezione cerchiamo di inquadrare il problema, e anche di ragguagliare il lettore su quel che dice la teoria dei campi quantistici in proposito. Prima di tutto, dobbiamo osservare che, anche senza scomodare le conoscenze più recenti della fisica, il tempo sta soltanto nella nostra mente, in particolare nella nostra memoria. Ovviamente, se tutto è percezione, si potrebbe dire che anche lo spazio e qualunque cosa noi vediamo intorno a noi sono soltanto nella nostra mente. Però esiste una differenza importante tra il tempo e lo spazio, da questo punto di vista: non c'è tempo senza memoria. Quando osserviamo ciò che ci circonda, vediamo qualcosa che ci appare collocato in tre dimensioni spaziali. Cioè, possiamo vedere "istantaneamente" lo spazio. Ma non possiamo "vedere il tempo". Possiamo concepire il tempo solo *ricordando*, cioè mettendo insieme, a confronto tra loro, percezioni spaziali diverse memorizzate. Sottolineo che sono sempre percezioni *spaziali*. Mettiamo a confronto una percezione di adesso con le percezioni relative ad istanti precedenti, che stanno soltanto nei nostri ricordi. Se guardiamo l'orologio vediamo una lancetta in una certa posizione dello spazio. Se guardiamo l'orologio di nuovo in un momento successivo, vediamo la lancetta in una posizione spaziale diversa. Quello che vediamo, in entrambi i casi, sono posizioni di un oggetto nello spazio, la lancetta. È il confronto tra le due percezioni spaziali, una attuale e l'altra memorizzata, che ci dà la sensazione di

quello che chiamiamo tempo.

I ricordi coinvolti sono coscienti, per cui il tempo è una percezione più complicata di quella che è associata alle coordinate spaziali, perché richiede un lavoro ulteriore e non banale di manipolazione interiore di percezioni memorizzate. Colleghiamo la percezione di adesso, qualunque cosa voglia dire "adesso", alle percezioni di prima, qualunque cosa voglia dire "prima", che in realtà sono percezioni di un "prima presunto", che sta solo nella nostra memoria. Questo vuol dire che la sensazione del tempo è una "percezione interna", derivata dal confronto tra percezioni di altra natura, più dirette, che, nel momento in cui vengono confrontate, non sono più tanto dirette, in quanto ripescate dalla memoria.

Da questo nasce l'idea di ciò che noi chiamiamo tempo. E da questo possiamo partire per capire che il concetto di tempo è molto più vago di quello di spazio. Possiamo confermare questa sostanziale differenza sperimentalmente. La misura del tempo, infatti, è molto più imprecisa della misura dello spazio, per i motivi appena illustrati. Se consideriamo le misure più precise delle distanze spaziali che siamo mai state fatte, e le confrontiamo con le misure più precise degli intervalli temporali, troviamo che l'imprecisione sulla misura del tempo è dieci ordini di grandezza (cioè un fattore 10^{10} , che vuol dire 10 miliardi di volte) più grande dell'imprecisione sulle misure dello spazio. L'intervallo di tempo più breve mai misurato fino ad oggi, ottenuto tramite gli impulsi laser, è pari a circa 10^{-17} , 10^{-18} secondi, ad essere ottimisti, che vuol dire un miliardesimo di miliardesimo ($1/10^{18}$) di secondo. Prendiamo questo valore come il valore di riferimento, cioè l'intervallo di tempo più breve rispetto al quale possiamo parlare del tempo. Si potrebbe pensare che il miliardesimo di miliardesimo di secondo sia un tempo brevissimo, e che il risultato raggiunto misurandolo sia impressionante. Lo è, ma la storia non si ferma qui. Prima di tutto, questo risultato ci dice che non sappiamo niente riguardo al tempo a intervalli più brevi. Non sappiamo se esiste ancora il tempo sotto la soglia di 10^{-18} secondi. Qualunque affermazione facciamo in proposito è una nostra supposizione, una scommessa. E non è una constatazione accademica. La gravità quantistica, per esempio, richiede di studiare intervalli un miliardo di miliardi di volte più brevi della

soglia raggiunta, almeno. Non 10^{-18} secondi, ma 10^{-36} secondi. Vuol dire scendere sotto il miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo. Potrebbe essere velleitario pretendere che il tempo esista ancora, laggiù.

Come abbiamo detto, il tempo emerge dal confronto tra percezioni memorizzate. Certamente, non siamo in grado di distinguere percezioni distanziate da intervalli brevi come 10^{-18} o 10^{-36} secondi. Pertanto, è richiesto un enorme lavoro di *amplificazione* per separare eventi relativi ad istanti successivi così ravvicinati, al punto da renderli distinguibili da noi. Fino a che punto possiamo spingere quell'amplificazione? Esiste un limite intrinseco, una barriera invalicabile, o possiamo almeno *sperare* di poter migliorare all'infinito, scendendo sotto qualunque soglia?

Comunque sia, dobbiamo venire a patti col fatto che sotto il miliardesimo di miliardesimo di secondo non abbiamo nessuna idea se il tempo continui ad esistere, ed eventualmente che senso abbia. Si potrà ancora parlare di passato, presente e futuro? Avranno ancora senso il prima e il dopo? E le famose cause? E gli effetti? E qualora non avessero senso, come mai riusciamo a farci queste domande? Come mai la nostra mente è in grado di confezionare domande su qualcosa che potrebbe non esistere nemmeno?

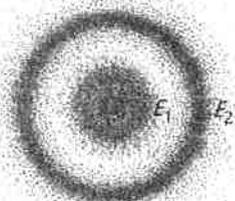
Il punto è che le domande stanno solo nella nostra narrazione della natura, non nella natura. Abbiamo visto tante volte che l'uso delle parole del vocabolario quotidiano per affrontare questi problemi è estremamente rischioso, e può portare fuori strada. La fisica dei quanti ci pone con le spalle al muro, in merito a questo. Il fatto è che la fisica, o meglio, la natura, non parla la nostra lingua. Ne parla un'altra, la sua, che ci piaccia o no. E quindi bisogna riadattare la nostra alla sua, non viceversa. Tra le varie cose, il riadattamento ci richiede anche di ridefinire il tempo, e possibilmente di farlo operativamente, in modo da rimuovere ogni ambiguità.

Einstein, quando formulò la relatività speciale e poi la relatività generale, si dovette chiedere quale fosse la definizione operativa di tempo, che cosa fosse un orologio, come si potesse definire praticamente la misura del tempo in condizioni per allora inusuali, come nel passaggio

tra sistemi di riferimento in moto relativo l'uno rispetto all'altro. Oggi, quelle situazioni non sono più tanto inusuali, ma ne possiamo immaginare molte altre che sono inusuali per i giorni nostri, come cercare di capire cosa succeda a intervalli di tempo brevissimi, come quelli coinvolti nella gravità quantistica. Ovviamente, se un orologio è quello che pensiamo quotidianamente, entriamo in difficoltà quando dobbiamo usarlo per misurare intervalli di tempo infinitesimi, o distanze piccolissime tra lancette, molto più piccole di un atomo, cioè molto più piccole del più piccolo ingrediente di cui l'orologio stesso è fatto.

Fortunatamente, esiste anche l'orologio atomico, che in principio è grande quanto un atomo, appunto. Sfruttando le transizioni tra i livelli energetici degli atomi, predette dalla teoria dei quanti, che avvengono soltanto a frequenze ben definite, possiamo associare un tempo a una di quelle frequenze, la più conveniente per noi, e usare quel valore come unità di misura di riferimento per la misurazione di tutte le altre durate temporali che ci interessano. Vediamo la cosa un po' più in dettaglio.

La transizione dell'atomo da uno stato con energia E_2 (descritto da una nuvola che favorisce gusci più lontani dal centro) a uno stato con energia E_1 (descritto da una nuvola che favorisce gusci più vicini al centro) comporta, per l'atomo, una perdita di energia pari alla differenza $E_2 - E_1$. Quell'energia se ne va sotto forma di radiazione, cioè luce. Essa è associata all'emissione di un fotone di energia uguale a $E_2 - E_1$, per l'appunto. Siccome un fotone, oltre ad "essere" un corpuscolo, "è anche" un'onda, e un'onda è descritta, tra le altre cose, da una frequenza f di oscillazione, possiamo ricavare f dalla relazione, già ricordata, che lega la frequenza all'energia, cioè $E_2 - E_1 = f \cdot 2\pi\hbar$. Infine, il tempo t che ricavo dalla frequenza f è il reciproco di f , cioè $t = 1/f$. Infatti, se la frequenza f di oscillazione di un'onda (che è la quantità che ci dice, appunto, quanto sono frequenti le oscillazioni) è pari, per esempio, a "1000 oscillazioni al secondo" (cioè, si dice, $f = 1000$ Hertz), vuol dire che la durata t di ciascuna oscillazione è precisa-



mente un millesimo di secondo, cioè $1/f$. Nel caso dell'orologio atomico tipico, che funziona con atomi di cesio, la frequenza f è pari a circa 10 miliardi di oscillazioni al secondo, per cui si ottiene, come valore di riferimento per il tempo, un decimiliardesimo di secondo.

Si potrebbe pensare: benissimo, allora con questi fantastici orologi microscopici possiamo misurare il tempo con precisione strabiliante. Questo è vero, ma gli orologi appena descritti sono strabilianti solo se li confrontiamo con gli orologi comuni, che sono molto meno precisi. Rispetto alle questioni di cui ci stiamo occupando adesso, questi orologi microscopici sono a tutti gli effetti giganteschi. Non ci sono molto utili per misurare intervalli brevi come quelli coinvolti, per esempio, nella gravità quantistica. Come detto, oggi siamo arrivati a definire degli orologi ancora più piccoli di quelli atomici, usando impulsi laser, che migliorano le prestazioni di molto, ma non quanto servirebbe. Stiamo tastando il limite delle nostre capacità presenti, ma il massimo a cui siamo arrivati, nella sfida a definire operativamente il tempo, è ancora molto lontano da ciò che vorremmo. Si può sperare che questi limiti siano solo provvisori, nel senso che potremo migliorare in futuro. Ma ha davvero senso sperare che riusciremo a migliorare *sempre*? E che miglioreremo *abbastanza*?

Più in generale: possiamo davvero sperare che il progresso possa raggiungere qualunque traguardo, pur di aspettare abbastanza tempo? Forse una metafora può aiutarci a inquadrare meglio il problema. Il record dei cento metri piani sarà abbassato sempre di più. Su questo non abbiamo dubbi. Ma è difficile credere che un giorno qualcuno (un essere umano, intendo) coprirà i cento metri in tre secondi, per esempio. Migliorare sempre, ma migliorare sempre meno, può voler dire non riuscire mai a migliorare oltre una soglia minima. Che sarebbe una soglia *asintotica* oltre la quale non si arriverà mai, pur migliorando sempre.

Ripetiamo le domande che stanno aspettando ancora risposta: ha senso parlare di tempo per intervalli più brevi di quelli che abbiamo raggiunto con i nostri più potenti strumenti di misura? Possiamo sperare di migliorare la misura del tempo all'infinito, oppure esiste una soglia minima invalicabile oltre la quale non è possibile spingersi, per quanto

sforzo facciamo?

In fin dei conti, il tempo potrebbe essere soltanto uno strumento concettuale utile a collegare le operazioni che facciamo comunemente. Forse si può estenderne il significato solo fino a un certo punto, oltre il quale va abbandonato come concetto, soprattutto quando vogliamo intraprendere l'esplorazione dell'infinitamente piccolo. Arrivati là, magari, scopriamo che è necessario procedere per altra via, sperando che esistano effettivamente delle alternative percorribili.

Così come ci chiediamo se abbia senso parlare di intervalli di tempo arbitrariamente brevi, possiamo chiederci se abbia senso parlare di distanze arbitrariamente corte, cioè di *infinitamente piccolo*. Ebbene, se la misura più precisa del tempo si ferma oggi a 10^{-17} , 10^{-18} secondi, la misura più precisa di distanze spaziali si ferma a 10^{-17} centimetri. Si tratta di una distanza un miliardo di volte più piccola dell'atomo di idrogeno, e diecimila volte più piccola del protone. Le due soglie che abbiamo detto sono numericamente circa uguali, 10^{-17} , solo che nel caso del tempo si tratta di *secondi*, mentre nel caso dello spazio si tratta di *centimetri*. Possiamo paragonare misure spaziali a misure temporali scomodando la velocità della luce, che è *definita* come 29979245800 centimetri al secondo, dove il secondo è *definito* in modo tale che la frequenza f della radiazione emessa da un atomo di cesio 133 a riposo, nella transizione tra due specifici livelli energetici, risulti uguale a 9192631770 Herzt. Cioè, un secondo è il tempo che impiega quella radiazione, in quanto onda, ad oscillare 9192631770 volte¹¹. In sostanza, per come è definita, la velocità della luce ci permette di convertire un intervallo temporale in una durata spaziale senza introdurre alcuna imprecisione ulteriore. Allo scopo, è sufficiente chiedersi quale distanza percorra la luce in quel dato tempo.

Quanto vale $\Delta t = 10^{-17}$ secondi, il tempo più breve mai misurato, rispetto a $d = 10^{-17}$ centimetri, la distanza più breve mai misurata? Per rispondere, confrontiamo d con la distanza $d' = c \Delta t$ che un raggio di luce percorre nel tempo Δt . Essa è meno di un milionesimo di centimetro, ma comunque 10 miliardi di volte più grande di d (perché c è circa 10

¹¹ I due numeri enormi appena dati vanno intesi come numeri esatti, cioè senza alcun errore. Essi sono dovuti a una serie di ragioni storiche su cui non entriamo.

miliardi di centimetri al secondo)¹². Ne concludiamo che il più piccolo intervallo di tempo mai misurato, convertito in una distanza spaziale, è 10 ordini di grandezza più grande della più piccola distanza mai misurata. Il che vuol dire che la misurazione del tempo è dieci miliardi di volte più imprecisa della misurazione dello spazio.

Come vediamo, è molto più difficile misurare il tempo che non lo spazio. Ciò è dovuto al fatto che il tempo è un concetto molto più vago dello spazio, perché l'idea di tempo ci costringe a confrontare percezioni che stanno soltanto nella nostra memoria, fatica non richiesta nel caso dello spazio. Alla fine scopriamo che il prezzo da pagare è enorme: dieci ordini di grandezza.

Ci potremmo chiedere se possiamo migliorare le cose passando a un sistema di riferimento in moto rispetto al nostro laboratorio. Sappiamo, in fondo, che il tempo si comporta in maniera strana, secondo la relatività speciale, quando paragoniamo ciò che vede un osservatore a riposo con quello che vede un osservatore in movimento. Possiamo sfruttare la cosa a nostro vantaggio? Purtroppo no. Quando andiamo a studiare bene la questione, scopriamo che le cose non possono che peggiorare. Non sorprendentemente, la misura del tempo è molto più difficile e imprecisa quando la effettuiamo su oggetti in movimento. Non solo, ma la relatività non ci aiuta, perché prevede che il tempo e lo spazio "si parlino", quando cambiamo sistema di riferimento. Questo vuol dire che la grande imprecisione sulla misura del tempo finisce per scaricarsi anche sulla misura dello spazio. Cioè, la relatività ci dice che non miglioriamo la situazione riguardo alla misura del tempo, ma peggioriamo la situazione riguardo alla misura delle distanze spaziali.

Riepilogando, nelle condizioni ideali, nelle migliori condizioni possibili, la misurazione del tempo è 10 miliardi di volte più imprecisa della misura dello spazio. E questo vi dà l'idea di quanto fuorviante sia insistere a parlare del tempo come qualcosa di fondamentale nella natura. Se spingiamo questo tipo di analisi alle sue estreme conseguenze, ci accorgiamo che usare l'idea di tempo per cercare di capire il mondo è estremamente rischioso. Ripeto ancora che sotto questo limite, dato per

¹² Possiamo ignorare il fattore 3, che non cambia il senso di quanto stiamo dicendo.

ora dagli impulsi laser, cioè 10^{-17} , 10^{-18} secondi, non abbiamo nessun modo di definire operativamente il tempo. Ne possiamo parlare lo stesso, certo, come se nulla fosse, ma dobbiamo tenere presente che, quando lo facciamo, facciamo sostanzialmente una scommessa.

Come possiamo collocare gli eventi nel tempo, quando ci chiediamo che cosa è l'universo stesso, la natura del "tutto"? Se vogliamo veramente comprendere cos'è l'universo, possiamo davvero continuare ad usare questi schemi mentali, questi concetti, queste idee, ora che sappiamo che sono così mal definiti? Ha senso, per esempio, chiedersi cosa sia l'inizio dell'universo? Ovviamente, no. Parlare di inizio richiede, come minimo, che abbia senso parlare del tempo, in riferimento ad intervalli arbitrariamente piccoli. Altrimenti, dovremmo riformulare la domanda dicendo: *cos'è, più o meno, l'inizio dell'universo?* Ed è in quel "più o meno" che frana la nostra pretesa di immaginare che abbia un senso il cosiddetto inizio dell'universo, perché all'interno del più o meno non possiamo distinguere il prima dal dopo, l'inizio dal seguito.

Che cosa ci dice, a tal proposito, la teoria dei campi quantistici? Per conoscere la risposta dobbiamo scomodare la gravità quantistica. La gravità è la teoria che ci permette di capire lo spazio e il tempo. Nella sua versione classica, cioè pre-quantistica, che è la relatività generale, spiega lo spazio e il tempo ovunque, tranne che a distanze microscopiche. Dove con "microscopiche" intendiamo ora molto più piccole di quelle atomiche. Che fine fa il tempo nel mondo microscopico? Possiamo continuare a sperare che i limiti descritti sopra siano soltanto dei limiti temporanei, dovuti alle nostre limitate capacità sperimentali, o dobbiamo capitolare di fronte a dei limiti intrinseci invalicabili, dovuti, per qualche misteriosa ragione, ai quanti? Queste sono domande a cui deve saper rispondere una teoria della gravità quantistica. Essa deve, appunto, riconciliare la gravità classica con i quanti, cioè con l'idea che esistono quantità minime indivisibili di campo gravitazionale, da chiamare *gravitoni*.

Le risposte che dà la teoria della gravità quantistica che ho proposto nel 2017 impiegando le particelle puramente virtuali sono le seguenti. Forse si riuscirà a scendere sotto 10^{-17} , 10^{-18} secondi. Anzi, forse ci riu-

scirà a definire il tempo molto al di sotto di quella soglia. La teoria prevede infatti che quel 10^{-17} , 10^{-18} sia soltanto un limite sperimentale, non un limite intrinseco. Però, e qui casca l'asino, la stessa teoria prevede che non si possa scendere all'infinito. Cioè, prevede che molto più sotto ci si imbatte in un limite che è davvero intrinseco o invalicabile, al di sotto il quale il tempo perde senso. Lo chiameremo "limite Δ ". Esso è dato dal reciproco della massa di una certa particella puramente virtuale. Come già accennato, infatti, c'è bisogno di una particella di quel tipo per risolvere i problemi che altrimenti impedirebbero di riconciliare i quanti alla gravità.

Quindi, da una parte c'è il limite sperimentale, che può essere legato ad una incapacità del momento, cioè di questa epoca, dovuta ai limiti degli strumenti di cui disponiamo, ai limiti della nostra intelligenza e di quello che siamo riusciti a immaginare e costruire finora, per misurare il tempo. Quello è un limite provvisorio. Ma esiste anche un vero limite intrinseco, il limite Δ , sotto il quale è impossibile attribuire un ordinamento temporale agli eventi.

La ragione per cui l'ordine temporale viene perso è dovuta a come sono fatte le equazioni che governano le leggi fisiche in presenza di particelle fake. Esse dicono che per prevedere il futuro tra un secondo, per esempio, ci sia bisogno di conoscere il passato, il presente (come in tutta la fisica classica), ma *anche un po' del futuro stesso*, una piccolissima frazione di secondo, pari al limite Δ . Cosa che, evidentemente, rende impossibile prevedere il futuro in senso stretto, perché richiederebbe di conoscerlo già. Pertanto, su tutte le predizioni che facciamo si riverbera la nostra ignoranza di quanto avverrà in futuro entro il limite Δ . Fortunatamente, l'impatto di questa ignoranza è trascurabile in tutti i casi in cui ci accontentiamo di fare predizioni che riguardano futuri "molto più futuri di Δ " (per esempio, un miliardo di volte Δ), ma ci impedisce completamente di prevedere quello che succede per futuri comparabili a Δ (per esempio, $\Delta/2$, Δ , 2Δ , ecc.).

Alla luce di questo, non possiamo più dire che "il prima causa il dopo". Possiamo certamente ordinare gli eventi usando la coordinata t che appare nella teoria. Tuttavia, non otteniamo più un ordinamento tem-

porale fisico vero e proprio, e non possiamo più veramente parlare di “passato” e “futuro”. Più che un vero “tempo”, t finisce coll’essere un artificio matematico.

La teoria della gravità quantistica che emerge dall’impiego della particella puramente virtuale prevede dunque un limite invalicabile, una scala temporale sotto la quale il tempo non ha più senso, cioè non ha più senso dire cosa avviene prima, durante o dopo. Sotto il limite Δ non esistono passato, presente e futuro. E se non hanno senso passato, presente e futuro, non ha senso parlare di cause e di effetti, perché la cosiddetta causa può tranquillamente scambiarsi di ruolo con l’effetto, in quanto non esiste più la possibilità di ordinare gli eventi secondo la logica del prima e del dopo.

E non ha nemmeno senso fare predizioni fisiche, sotto il limite Δ , perché, per predire l’evoluzione futura di un sistema, bisognerebbe conoscerla già, almeno un po’. Si trova che, laggiù, si possono fare al massimo *post*-dizioni, non *pre*-dizioni, cioè si possono fare solo verifiche a posteriori della correttezza delle equazioni che descrivono l’evoluzione di un sistema fisico. Una volta che il destino di un sistema fisico si è compiuto, si può verificare se l’esito *ha soddisfatto* o meno le equazioni della teoria. Ma non si può prevedere quell’esito, o controllarlo, perché quelle stesse equazioni stabiliscono che le forze che agiscono su un sistema fisico non dipendono più solo dagli stati passati e dallo stato presente di quel sistema, ma anche dai suoi stati futuri ancora ignoti. Le equazioni, insomma, stabiliscono che le condizioni in cui si troverà il sistema “dopo” (definito dalla coordinata t) influenzano il “prima” (definito dalla stessa coordinata t). Inoltre, non c’è modo di definire una coordinata t alternativa che eviti questo tipo di problemi.

Si potrebbe anche dire che al di sotto del limite Δ è possibile fare viaggi in avanti e indietro nel tempo, qualunque senso questo possa avere. Ma lo si può fare solo per durate brevissime, uguali a Δ al massimo. In definitiva, si possono dire molte cose, in merito a quel che succede sotto il limite Δ , senza correre il rischio di essere smentiti, perché tanto sono parole in libertà. Quel che sappiamo di preciso è quello che *non* possiamo dire, cioè ciò che perde senso. Non si può più parlare di pre-

sente, passato e futuro, prima durante e dopo. E quindi non si può nemmeno parlare di “inizio”. Per cui crolla anche l’idea che l’universo abbia avuto un inizio, perché all’interno di un qualunque intervallo pari a Δ non ha senso distinguere ciò che dovremmo chiamare “inizio” da ciò che dovremmo chiamare “seguito”.

Vale la formula

$$\Delta = \frac{\hbar}{Mc^2},$$

dove M è la massa della particella puramente virtuale della gravità quantistica. In pratica: Δ è il reciproco della massa della particella fake, trasformato in un tempo mediante le costanti universali \hbar e c . Quanto vale Δ numericamente? Esso è proprio il numero associato alla gravità quantistica all’inizio di questa lezione: 10^{-36} secondi. Pertanto, il limite Δ è un miliardo di miliardi di volte più piccolo del limite sperimentale attuale sulla misura del tempo, quei 10^{-17} , 10^{-18} secondi raggiunti grazie agli impulsi laser. Possiamo migliorare la precisione dei nostri strumenti di misurazione del tempo ancora un miliardo di miliardi di volte. Possiamo illuderci per molto, molto tempo, che un limite intrinseco non ci sia. Ma per vie indirette sappiamo già, dalla teoria, che quel limite c’è.

Che l’idea di tempo fosse estremamente approssimativa, del resto, lo sapevamo fin dall’inizio. Aggiungiamo che la teoria della gravità quantistica basata sulla particella puramente virtuale dice che, sotto il limite Δ , diventa vaga anche l’idea di spazio.

Questo, qualcuno potrebbe chiedere, vuol forse dire che esiste un limite oltre il quale non possiamo nemmeno esplorare le leggi fisiche? Che al di là di quello non ha nemmeno senso fare fisica? Non necessariamente. Per ora, vuol dire soltanto che non possiamo andare oltre quel limite continuando ad usare le nozioni di tempo e di spazio, perché sono concetti troppo vaghi e mal definiti relativamente alle condizioni e situazioni fisiche che si riscontrano quando ci si vuol spingere oltre. Ma possiamo sperare che altri concetti, magari altre variabili, ci vengano in aiuto. E infatti è così. Le variabili alternative sono le variabili *duali* al tempo e alle coordinate spaziali, che sono l’energia e l’impulso.

Strettamente parlando, è vero che non si può scendere a distanze

arbitrariamente piccole, ordinare gli eventi per intervalli di tempo arbitrariamente brevi, parlare di "infinitamente piccolo", in termini di tempo e spazio. Ma ci possiamo ugualmente spingere "oltre". Per farlo, basta che rinunciamo alla "sacralità" del tempo e dello spazio.

Il principio di indeterminazione ci dice che esistono delle variabili che sono duali l'una all'altra. Si dicono variabili *canonicamente coniugate*. Sono quelle variabili che non possiamo misurare contemporaneamente con precisione arbitraria, cioè i lati della cella universale di indeterminazione. In particolare, le coordinate x (che specificano la posizione) sono duali all'impulso p , perché non possiamo misurare la posizione e l'impulso con precisione arbitraria: il prodotto delle loro indeterminazioni δx e δp non può essere più piccolo di un minimo invalicabile, pari a $\hbar/2$. Similmente, si può far vedere che il tempo t è duale all'energia E : anche il prodotto delle loro indeterminazioni δt e δE deve essere maggiore o uguale a $\hbar/2$.

Se vogliamo descrivere un sistema quantistico, non possiamo usare sia le variabili coordinate/tempo, che le variabili energia/impulso, perché sarebbe come pretendere di determinarle tutte con precisione, cioè entrare nelle rispettive celle fondamentali di indeterminazione, dove la realtà nemmeno esiste, rimpiazzata dalla virtualità. Ad un certo punto, dobbiamo scegliere *da quale parte stare*, cioè con quale set di variabili continuare la nostra esplorazione dell'ignoto: da una parte le coordinate e il tempo, dall'altra l'energia e l'impulso.

Questo ci dice la fisica. Perciò, se vogliamo continuare a scendere nell'infinitamente piccolo, in realtà non scendiamo affatto nell'infinitamente piccolo, visto che non ha più senso dire che cosa è piccolo, in riferimento a distanze spaziali o intervalli temporali. Quello che possiamo fare, invece, è salire ad energie ed impulsi sempre più grandi. In un certo qual senso, che ora spieghiamo, intervalli temporali brevi vuol dire energie alte, e distanze spaziali piccole vuol dire grandi impulsi. Il motivo è legato alla natura duale delle grandezze in questione. Possiamo farcene un'idea parziale, ma abbastanza esauriente, partendo dalla cella fondamentale di indeterminazione, i cui lati sono, per esempio, l'indeterminazione sulla posizione e l'indeterminazione sull'impulso, e la cui area

deve rimanere costante. Se vogliamo spingerci a scale di grandezza sempre più piccole, dobbiamo ridurre l'indeterminazione sulla posizione. Ma questo richiede, affinché l'area rimanga costante, di aumentare l'indeterminazione sull'impulso. Quindi l'impulso può arrivare ad avere valori sempre più grandi.

Un altro argomento, forse più esplicito, è il seguente. Gli urti tra le biglie di un biliardo sono sufficientemente "delicati" da lasciare le biglie intatte. Se acceleriamo le biglie fino a portarle a velocità, quindi energie, molto alte, arriviamo al punto in cui un urto è in grado di romperle. Se le facciamo scontrare ad energie più alte, le rompiamo in frammenti più piccoli. Se le facciamo scontrare ad energie elevatissime, le riduciamo in polvere (per cui fosse curioso, su YouTube si trovano dei video che lo mostrano esplicitamente), ciò che ci permette di ispezionare come sono fatte al loro interno con un elevato grado di precisione. In altre parole, le alte energie ci permettono di studiare le piccole scale di grandezza. Allo stesso modo, in un acceleratore di particelle come il Cern, facciamo scontrare particelle di energie molto alte, perché più elevate sono le energie delle particelle che collidono, più piccole sono le scale di grandezza che riusciamo a sondare tramite quegli urti. Per questo parliamo di "fisica delle alte energie".

A questo punto, abbandoniamo l'uso delle variabili di posizione a favore delle variabili di impulso, e scopriamo che possiamo studiare impulsi arbitrariamente grandi, senza limiti. Impulsi grandi non vuol dire grande indeterminazione sull'impulso, anzi. Una volta che abbiamo rinunciato all'uso delle coordinate, possiamo ridurre l'indeterminazione sull'impulso quanto vogliamo, perché il prezzo da pagare (maggiore indeterminazione sulla misura delle coordinate) lo abbiamo già pagato per scelta nostra, rinunciando alle coordinate una volta per tutte. Possiamo fare un discorso analogo per la coppia di variabili fatta di energia e tempo: abbandoniamo il tempo a favore dell'energia, dopo di che possiamo studiare energie arbitrariamente alte con la precisione che vogliamo.

Ma la novità suggerita dalla gravità quantistica è che il principio di indeterminazione viene corretto da un effetto nuovo, perché scopriamo

che ridurre l'indeterminazione sul tempo oltre un certo limite, il limite Δ , è impossibile. In sostanza, possiamo spingerci a energie e impulsi sempre più grandi, anche se non possiamo spingerci ad intervalli di tempi e scale di grandezza sempre più piccole.

E non è una novità dovuta soltanto alla gravità quantistica. Da decenni ormai, nello studio della teoria dei campi quantistici, come il modello standard delle particelle elementari, abbiamo abbandonato l'uso del tempo e dello spazio, in quanto troppo onerosi, troppo pesanti da trattare a livello di calcolo. Cioè, non li impieghiamo in modo sistematico, ma ci limitiamo ad introdurli quando serve, quando è assolutamente necessario. Tolte queste eccezioni, tutta la teoria dei campi quantistici è formulata nello "spazio" delle energie e degli impulsi (dove la parola "spazio" è ora intesa nel senso di "ambiente"). La gravità quantistica taglia la testa al toro, in un certo senso, perché mostra che quel che facevamo già, abbandonando il tempo e lo spazio a favore dell'energia e l'impulso, è quel che avremmo dovuto fare comunque, a causa dell'ostacolo intrinseco rappresentato dal limite Δ .

L'energia e l'impulso sono le vere variabili "naturali" in cui vive, da decenni ormai, la teoria dei campi quantistici, e nelle quali, giocoforza, vive anche la gravità quantistica. Anche questo ci mostra quanto siano fallaci le idee di tempo e spazio a piccole distanze, o, meglio, grandi energie, perché là veramente perdono di senso fisico.

Possiamo notare nell'universo una curiosa "dualità" tra le grandi distanze, il cosmo, i buchi neri, le galassie, e le piccole distanze, che sono il regno dei quanti. Infatti, se vogliamo studiare la cosmologia, l'astronomia, le grandi distanze insomma, lo facciamo molto comodamente usando come variabili il tempo e le coordinate spaziali. Se volessimo studiare buchi neri, galassie, stelle e pianeti, con le variabili energia e impulso faremmo una fatica enorme. Al contrario, quando andiamo a studiare le piccole distanze, dobbiamo abbandonare le idee di distanza e tempo, e procedere invece con la descrizione in termini di energia e impulso.

È possibile passare da una formulazione in termini delle variabili spazio e tempo alla formulazione duale in termini delle variabili energia

e impulso mediante una certa operazione matematica, peraltro reversibile. Fatto questo, possiamo avventurarci fino ad energie e impulsi arbitrariamente grandi. Pertanto, quando sentiamo parlare di "infinitamente piccolo", non dobbiamo pensare veramente alle piccole distanze, ma alle grandi energie. Quello che intende chi usa un'espressione come quella è proprio il suo significato duale, cioè si propone di "salire ad energie sempre più alte".

Se vogliamo capire il mondo microscopico, da cui deriva anche quello macroscopico, dobbiamo sapere che il tempo e lo spazio sono concetti da abbandonare. Se vogliamo mettere in ordine le idee, dobbiamo fare a meno di ciò che ci porta fuori strada. Ma se non possiamo più parlare di prima e dopo, come facciamo a farci domande sull'inizio del tutto? Ha senso chiedersi quale sarà la fine? O il fine, lo scopo? Qual è la causa? Nessuna di queste domande ha veramente senso.

Non sono solo domande formulate nella lingua sbagliata, ma abbiamo appena visto che fanno uso di concetti dalla portata molto limitata, come l'idea tempo, perché il tempo non è un concetto fondamentale della natura. Pertanto, quelle domande non possono avere nessuna risposta, perché non hanno nessun senso. La questione non è formularle bene o male, nella lingua giusta o nella lingua sbagliata: non esiste una lingua giusta per formulare domande come quelle.

Se non ha senso, a piccolissimi intervalli di tempo, parlare di presente, passato e futuro, è evidente che anche nel mondo che ci circonda parlare di presente, passato e futuro può avere senso solo nel contesto di una serie di approssimazioni. Per tutti gli scopi pratici, e nella vita di tutti i giorni, non ci accorgeremo mai dell'errore che stiamo facendo. Ma quando ci facciamo domande di vasta portata sul mondo, come quando ci interroghiamo sulla sua origine, non possiamo introdurre una fonte di errore mediante le stesse parole con cui formuliamo le domande, e poi sperare di andare lontano quando cerchiamo le risposte. Non possiamo accontentarci di qualcosa che sia buono per capirci, alla bell'è meglio. Cadiamo in errore tutte le volte che facciamo quelle domande, perché le domande stesse sono errori.

Per concludere, abbiamo visto che il tempo non è una nozione fon-

damentale. Le sue difficoltà di misurazione ci mostrano che è una nozione molto più vaga e imprecisa della nozione di distanza spaziale. Inoltre, la gravità quantistica oppone un muro invalicabile, un limite al di sotto del quale non si può comunque estendere l'idea di tempo. Una volta che crolla l'idea di tempo a livello fondamentale, tutte le domande universali fondate sull'idea di tempo, come gli interrogativi sull'origine del mondo, il suo inizio, la sua fine e il suo scopo, crollano assieme ad esso.

Eppure, per quanto sia inutile cercare risposte a ciò che non ha senso, a ciò che sappiamo già non avere senso, continuiamo a farlo, come attratti da qualcosa di irresistibile. Forse vi insistiamo ad oltranza per esorcizzare la consapevolezza della "triste verità": l'irrelevanza dell'essere umano al cospetto della natura. Si tratta di un essere che, avendo sviluppato quella che chiamiamo coscienza, è in grado di porsi delle domande, appunto, raffrontando tra loro delle percezioni memorizzate. O almeno crede di poterlo fare. Domande di cui poi estende il significato presunto ad oltranza, e che finiscono per ingannarlo, circuirlo, sequestrarlo, fino non permettergli più di uscire dalla prigione che lui stesso si è costruita attorno. Ma quelle domande, a ben vedere, non sono domande sulla natura, ma domande interne alla sua stessa narrazione sulle cose.

13 I quanti e la quasi realtà

In questa lezione spieghiamo ancora una volta cosa sono i quanti, ma li presentiamo sotto una luce un po' diversa, facendo anche cenno a qualche aspetto storico, filosofico, o "umano" (sperando di non eccedere nel "troppo umano"), in modo da cogliere altre proprietà importanti. Soprattutto, affrontiamo il problema dell'"esistenza", per esempio l'esistenza della realtà che ci circonda. Anzi, come vedremo meglio nella prossima lezione, la "quasi esistenza" della realtà che ci circonda, perché la realtà che noi pensiamo esista non esiste, e non può esistere, nel senso che noi abitualmente diamo per scontato. Come sappiamo, la rivoluzione rappresentata dalla teoria dei quanti porta a uno sconvolgimento così profondo della nostra comprensione della realtà, da costringerci a rivedere il significato di tutte le parole che usiamo. Ci costringerà a demolire il verbo stesso, la parola, il logos?

Cominceremo con tre richiami storici di matematica e filosofia, in modo da agganciarci a cose che il lettore probabilmente conosce già, e che ci aiuteranno ad avanzare gradualmente verso il punto cruciale. Considereremo poi, o riconsidereremo, gli esperimenti chiave sui quanti, per sviscerarne gli aspetti più reconditi, capire cosa "sono" i quanti, e collegare tra loro le informazioni già raccolte nei capitoli precedenti in una visione organica d'insieme.

Il primo richiamo è quello che ci riporta a San Tommaso d'Aquino. San Tommaso offrì degli argomenti razionali per avvalorare, o potremmo dire "dimostrare", l'esistenza di Dio, cioè la plausibilità dell'esistenza di

una certa entità, definita dagli argomenti stessi, da chiamare Dio. Ne citiamo soltanto due, perché le altre "prove" sono meno attinenti a quello di cui parleremo.

Dice San Tommaso (via ex motu):

è certo, e in accordo con il senso, che qualcosa si muove in questo mondo. Ma tutto ciò che si muove è mosso da altro. Perché muovere è portare in atto qualcosa che è in potenza, ma qualcosa che non è in potenza non può essere portato in atto, se non da qualche essere in atto. Ora, non è possibile che la stessa cosa sia in atto e in potenza. È quindi impossibile che qualcosa si muova da sé. Quindi, tutto ciò che si muove deve essere mosso da altro. E quello da altro ancora. Ma non si può procedere all'infinito, perché così non ci sarebbe il primo motore, e allora nessun altro motore, perché i secondi motori non si muovono se non per esser mossi dal primo, come un bastone non si muove se non per esser mosso dalla mano. Quindi è necessario arrivare a qualche primo motore che non è mosso da nessuno, e tutti riconoscono che quello è Dio.

Un argomento equivalente è la via ex causa, che parte dall'osservazione che qualunque evento che ci circonda sembra trarre origine da un evento precedente, o causa:

Riscontriamo che nel mondo sensibile c'è un ordine tra le cause efficienti, ma non troviamo, né è possibile trovare, che una cosa sia causa efficiente di se stessa; perché sarebbe esistita prima di se stessa, il che è impossibile. Non è possibile che la catena delle cause efficienti proceda all'infinito. Perché in tutte le cause efficienti ordinate, la prima è causa di quella intermedia, e quella intermedia è causa dell'ultima; ma, tolta la causa, si toglie anche l'effetto, sicché se fra le cause efficienti non ci fosse la prima, non ci sarebbe neanche l'ultima, né quella intermedia. Ma se si deve procedere all'infinito, non ci sarà una causa prima efficiente, e quindi non ci sarà né l'effetto finale, né le cause efficienti intermedie, il che è palesemen-

te falso. Perciò è necessario ammettere qualche prima causa efficiente, che tutti chiamano Dio.

È utile affiancare queste citazioni di San Tommaso alle frasi con cui Platone, nel Fedro, definisce l'anima:

una volta stabilito che ciò che si muove da sé è immortale, non si proverà vergogna a dire che proprio questa è l'essenza dell'anima. Infatti, ogni corpo posto in movimento dall'esterno è inanimato, mentre quello mosso dall'interno, cioè da se stesso, è animato, poiché la natura dell'anima è questa; ma se è così, ovvero se ciò che muove se stesso non può essere altro che l'anima, di necessità l'anima sarà ingenerata ed immortale.

Interessante sottolineare che San Tommaso rigetta l'idea che qualcosa possa muoversi da sé ("tutto ciò che si muove deve essere mosso da altro"), mentre Platone ritiene che qualcosa che si muove da sé esista eccome, ed è l'anima ("ciò che muove se stesso non può essere altro che l'anima").

Teniamo nel cassetto questo primo richiamo storico per un attimo. Il secondo richiamo ci porta ad un matematico indiano di nome Brahmagupta, che nell'anno 628 dopo Cristo formula le regole per manipolare algebricamente lo zero e i numeri positivi e negativi. Ci spiega come si sommano e si moltiplicano, cosa fa 0 moltiplicato per qualunque altro numero, enuncia la regola dei segni (secondo cui il prodotto di due numeri positivi è positivo, il prodotto di due numeri negativi è positivo, il prodotto di un numero positivo per un numero negativo è negativo), e spiega anche come si dividono, con un disaccordo sulla divisione per 0 rispetto a quanto facciamo oggi. Questo richiamo ci fa fare un primo passo verso la comprensione che vogliamo sviluppare in questa lezione, perché attraverso lo zero si dà "esistenza" a qualcosa che significa "non esistenza", lo zero, appunto. Cioè, si codifica matematicamente il "nulla".

Il concetto di zero esisteva ben prima di Brahmagupta, però nessuno aveva ancora formulato, come un matematico deve fare, le operazio-

ni per trattarlo come un numero vero e proprio, e soprattutto estendere le operazioni a quelli che chiamiamo numeri negativi. Potreste chiedervi per quale misterioso motivo il prodotto di due numeri negativi debba essere positivo. Non potrebbe essere negativo? La ragione è, semplicemente, che se provate qualunque alternativa alle regole di Brahmagupta (le alternative non sono tante, le potete studiare anche voi come esercizio) entrerete subito in contraddizione colle proprietà che vorreste attribuire alla somma e al prodotto (associativa, commutativa, distributiva). Trovereste delle assurdità come $2 = 0$, o che tantissimi numeri diversi dovrebbero essere uguali tra loro, rendendo il tutto banale. La matematica cerca strutture astratte sulle quali definire delle operazioni non banali, che non entrino in contraddizione tra di loro, e, possibilmente, siano utili per qualche applicazione pratica.

Il terzo richiamo storico ci porta a Bologna, circa un millennio dopo, quando nel 1572 il matematico Rafael Bombelli introduce i numeri complessi. Essi ci permettono di fare un enorme passo avanti. I numeri complessi non sono altro che delle coppie di numeri "usuali", che sono poi quelli che si chiamano "numeri reali". Un numero reale è qualunque numero esprimibile come una sequenza finita di cifre prima della virgola e una sequenza finita o infinita di cifre dopo la virgola, tipo 98,1735924682531...

Dicevamo che un numero complesso, di solito indicato con la lettera z , è una coppia di numeri reali, di solito indicati con x e y . Possiamo scrivere $z = (x,y)$, come facciamo usualmente per le coordinate di un punto su un piano, o di un punto sul globo terrestre (latitudine e longitudine). Il primo numero di quella coppia, cioè x , si chiama "parte reale" di z , mentre il secondo numero della coppia, cioè y , si chiama "parte immaginaria" di z . Si scrive anche $z = x + i \cdot y$, dove il simbolo i è un "numero" introdotto ex novo, che si chiama "unità immaginaria". Introdurre un'entità nuova in matematica, che sia "reale" o simbolica, vuol dire dare delle regole per operare con quella, in combinazione o meno con le altre entità matematiche già note. Ed è sottinteso che le operazioni devono essere nuove, non banali e non entrare in contraddizione tra loro e il resto.

La regola fondamentale è che il quadrato di i , cioè il prodotto i per i , sia uguale a -1 . Questa è la definizione stessa del numero i . Le altre regole ci dicono come sommare, sottrarre, moltiplicare e dividere i numeri complessi, sia che li scriviamo come coppie (x,y) , sia che li scriviamo nella forma $x + i y$. Ricordiamo che il segno \cdot di prodotto si omette quasi sempre, anche perché raramente ciò crea ambiguità.

Per la verità, Bombelli chiamava le varie quantità in modo diverso: parlava di "quantità silvestri", e chiamava il numero i "più di meno" (un'abbreviazione che sta per "radice quadrata positiva di meno uno"). Ormai si chiamano comunemente come abbiamo detto sopra, secondo la terminologia introdotta da Cartesio.

Riepilogando, i numeri di Bombelli sono semplicemente delle coppie di numeri reali. Un esempio è 3 in coppia con 2, che si può scrivere anche $(3,2)$, o $3 + 2 i$. Un altro esempio è 7,5 in coppia con 4, cioè $7,5 + 4 i$, eccetera. Bombelli formula delle operazioni non banali per sommare e moltiplicare queste coppie di numeri. Grazie alla struttura fondata sulle coppie di numeri, invece che sui numeri semplici, riesce a violare le regole di Brahmagupta, senza contraddizioni e senza assurdi. Ricordiamo che Brahmagupta diceva che il prodotto di un numero (reale, diverso da zero) per se stesso è sempre positivo, perché il prodotto di un positivo con un positivo è positivo, e pure il prodotto di un negativo con un negativo è positivo. I numeri di Bombelli possono violare questa regola, per cui potete avere che il prodotto di un numero (complesso) per se stesso è uguale a un numero (reale) negativo. Per esempio, $i \cdot i = -1$. Potremmo immaginare un quadrato di lato uguale ad i : allora la sua area, che è data dal prodotto lato per lato, risulta negativa. Ma possono esistere quadrati con area negativa? Dovremmo fare un grosso sforzo di "immaginazione", per accettare una cosa del genere...

Da allora ad oggi, l'introduzione di questi numeri ha reso possibile un progresso enorme, nella matematica come nella fisica. È stata come una palla di neve, che si è messa a rotolare piano piano, e a poco a poco è diventata una valanga. La facilità con cui si riescono a dimostrare proprietà importanti usando i numeri complessi, e a capire molti aspetti altrimenti arcani della matematica, e poi della fisica, è senza precedenti.

E allora ci si può chiedere che significato abbiano queste proprietà. Ci suggeriscono forse che dobbiamo descrivere la "realtà" con il doppio dei numeri che usiamo normalmente? Che la realtà ammette una seconda versione, una copia nascosta, un "al di là"? C'è forse una realtà "parallela" a quella che osserviamo, che corrisponde al secondo numero della coppia di Bombelli? Se, per descrivere la distanza tra la penna che tengo in mano e il tavolo devo usare un numero di Bombelli, cioè una coppia di numeri reali, solo uno dei due numeri sarà la distanza effettiva, espressa magari in centimetri. Che cosa vorrà dire l'altro numero della coppia? Cosa ci sta a fare? Rappresenta qualcosa di "esistente"? Rivela, magari, un segreto nascosto?

Se la realtà fosse descritta dai numeri di Bombelli, essa sarebbe effettivamente presente in due versioni, e noi ne vedremmo una sola. L'altra possibilità è che i numeri di Bombelli siano soltanto uno strumento matematico, che ci aiuta a dimostrare proprietà in modo molto efficace, ma che non ha alcuna implicazione sulla realtà: per descrivere ciò che mi circonda raddoppio i numeri, li manipolo come ci dice Bombelli, faccio i calcoli, ricavo quello che mi interessa e butto via il di più alla fine.

Fino alla fine del 1800 i numeri complessi sono, appunto, soltanto uno strumento matematico, un trucco per fare calcoli e dimostrare proprietà. E la procedura di raddoppiare tutti i numeri reali per buttare via il di più alla fine si rivela spesso più conveniente della procedura di lavorare con numeri singoli. Cartesio chiamò il secondo numero della coppia "parte immaginaria", per dire che descrive qualcosa che non esiste veramente, ma che ci possiamo comunque immaginare usando l'astrazione matematica. Esso non indica una "realtà parallela", ma semplicemente una quantità non reale, cioè non corrispondente a nulla di reale, come le aree negative.

E così rimasero, i numeri di Bombelli, per secoli: un strumento matematico di grande utilità e con un'ampia gamma di applicazioni, ma nulla più. Finché non arrivarono i quanti, che risvegliarono la parte immaginaria dei numeri di Bombelli dal suo sonno eterno, e la catapultarono nel "regno della realtà".

Sappiamo che non ha senso cercare di capire i quanti a partire dalla realtà che ci circonda. È inutile, per non dire fuorviante, sforzarsi di "immaginare" i quanti, chiedersi che cos'è il fotone, cosa fa, dove sta, quanto è grande, se è liscio, se è ruvido, se è fermo o in moto. Non possiamo attribuirgli le proprietà della realtà macroscopica, perché quelle sono derivate dalle proprietà dei quanti, non viceversa. Se riusciamo a capire che cosa sono in quanti, da lì capiremo che cosa "è" la realtà che ci circonda. Non il contrario! Ma a questo punto, un'idea balena nella mente: certo, partire dal mondo macroscopico può portarci fuori strada, ma, allora, non è che ci potrebbe aiutare, magari, partire dai numeri di Bombelli? Forse quei numeri stavano cercando, da secoli, di dirci qualcosa? Forse quella parte immaginaria ha a che vedere con la virtualità?

Abbiamo detto che "quanto" sta per "quantità minima indivisibile". In origine, la parola "atomo" significa proprio "indivisibile". Infatti, quelli che oggi chiamiamo atomi furono chiamati così perché erano inizialmente creduti indivisibili, anche se oggi sappiamo che non lo sono affatto. Come quantità minima e indivisibile, il concetto di quanto si può riferire a varie cose, come l'energia, o l'area della cella elementare di indeterminazione. Quantità precise di energia identificano, per esempio, i livelli energetici di un atomo. Il che vuol dire che l'energia della radiazione emessa da un atomo non può avere valori qualsiasi, ma le sono concessi soltanto valori sporadici. Si dice: valori *discreti*.

All'inizio del libro abbiamo analizzato l'esperimento del raggio laser che passa attraverso una fenditura. Rianalizziamolo brevemente, per poi passare a un esperimento simile, ma più semplice, con un vetrino invece della fenditura.

Sappiamo che se puntiamo il laser verso lo schermo, vediamo un punto luminoso. Il puntatore laser può essere immaginato come una mitragliatrice di fotoni, che spara un fotone alla volta, ma ne spara così tanti al secondo che noi vediamo un raggio continuo, e un punto luminoso stabile sul muro. Tuttavia, il raggio è pur sempre fatto di quantità minime indivisibili. Se noi riduciamo gradualmente l'intensità del raggio, a un certo punto non vedremo più un raggio, bensì un fotone singolo, seguito, a distanza, da un altro fotone singolo, poi un altro fotone singo-

lo, e così via. Riducendo ulteriormente l'“intensità del raggio”, avremo un fotone al secondo, poi uno al minuto, poi uno all'ora, poi uno al giorno. Ma non potremo mai “diluire” un singolo fotone.

Se facciamo passare il raggio laser attraverso una fenditura, cioè una fessura tra due rettangolini di latta, il raggio si sparpaglia, e invece di



un punto sullo schermo, vedremo ciò che è mostrato in figura. Abbiamo una zona centrale deformata, e poi zone luminose alternate a zone buie intorno a quella. Se la fessura attraverso la quale viene fatto passare il raggio laser è verticale, l'alternanza di zone buie e luminose è orizzontale.

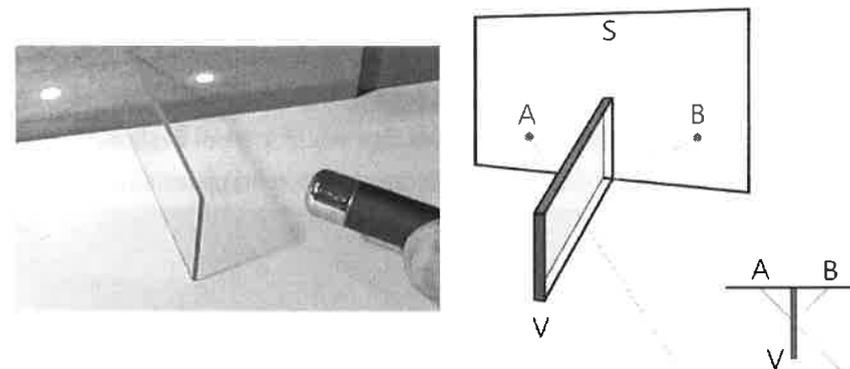
Continuiamo a far passare il raggio attraverso la fenditura, ma riduciamo la sua intensità fino a un fotone al minuto. Il risultato sullo schermo sarà fatto di una sola scintilla al minuto, rilevabile in laboratorio usando degli strumenti appositi. Perché troveremo una sola scintilla? Perché il fotone, essendo un quanto, è indivisibile, per definizione. Non può essere diluito, non si può sparpagliare nelle varie zone luminose della figura completa mostrata sopra. Non può succedere che mezzo fotone vada nella zona centrale, un ottavo di fotone vada nella prima zona luminosa a sinistra, un ottavo nella prima zona a destra, un sedicesimo in quell'altra più lontana, e poi gradualmente a scendere.

Non sappiamo se il fotone sia liscio o ruvido, grande o piccolo, sferico o cubico, ma abbiamo un'informazione molto più importante: non può essere diviso, per cui il risultato dell'esperimento è sempre e solo una scintilla alla volta, che apparirà da qualche parte, in una delle zone luminose viste prima. Una zona che il nostro sistema di rilevazione, se costruito a modo, saprà identificare per noi.

Ricapitolando: se immaginiamo un puntatore laser che spara un solo fotone attraverso la fenditura, quel fotone non è più costretto ad andare dritto, ma ha un ventaglio di possibilità di fronte a sé. Può continuare ad andare dritto, ma può anche andare un po' più a destra o un po' più a sinistra, o molto a destra, o molto a sinistra. La probabilità che prosegua più o meno dritto è proporzionale all'intensità luminosa della

zona centrale della figura vista prima. La probabilità che finisca nella prima zona a sinistra è proporzionale all'intensità luminosa di quella zona, la probabilità che finisca tra due zone, dove vediamo buio, è così bassa da poter escludere a priori un'eventualità del genere. E così via. In sostanza, intensità luminosa vuol dire probabilità, per cui quando sparo i fotoni tutti insieme attraverso la fenditura, essi riempiono tutte le zone. Quando invece sparo un fotone da solo, esso deve fare una scelta ben precisa: deve decidere dove andare.

Possiamo descrivere il punto chiave del discorso con un esperimento ancora più semplice. Prendiamo un vetrino V, come quelli da microscopio, e appoggiamolo in piedi su uno schermo S di cartone, come in figura. Se facciamo passare il raggio laser attraverso il vetrino, sullo schermo S vedremo due punti luminosi invece di uno, A e B. Il punto A è dovuto al raggio rifratto, che attraversa il vetrino e prosegue quasi indi-



sturbato. Il punto B è dovuto al raggio riflesso. Il raggio, insomma, viene diviso in due parti dalla presenza del vetrino lungo il suo cammino. Le due parti non sono necessariamente di uguale intensità.

Cosa succede, ora, se riduciamo l'intensità del raggio laser fino al punto in cui emette un solo fotone alla volta, tipo un fotone al minuto? Il vetrino non può dividere il fotone in due, perché il fotone è indivisibile. E allora il fotone, quando si imbatte col vetrino, “deve fare una scelta”, deve decidere dove andare. Se mettiamo dei rivelatori in A e in B vedremo una scintilla in uno solo di essi. Questo esperimento è molto simile a quello dell'atomo nel campo magnetico, che può deviare a destra o a sinistra. Ma è forse più chiaro, perché tutti sono in grado di immagi-

narsi che cosa sta succedendo.

Chi dice al fotone dove andare quando attraversa una fenditura, o incocchia in un vetrino? Chi gli dice quale scelta fare? Questa domanda cruciale ha mandato in crisi i fisici per generazioni. D'altra parte, potremmo anche chiederci: perché dovrebbe esserci qualcuno o qualcosa che dice al fotone dove andare? Perché ci viene in mente una domanda del genere? Perché, invece, non ci viene in mente che il fotone "decida da solo"? Perché releghiamo questa eventualità all'ultima delle ultime possibilità?

Le prime ipotesi che vengono in mente sono: forse c'è qualcosa di cui non ci siamo mai accorti nella forma della fenditura, o nel vetrino, o nello schermo, o nei rivelatori, o nel modo di lanciare ogni particolare fotone, forse un dettaglio nell'assemblaggio degli esperimenti, insomma qualcosa che determina il risultato finale, cioè dove apparirà il fotone sullo schermo. Se è così, ci aspettiamo che, lanciando un altro fotone, subito dopo, nella stessa identica maniera, vedremo una scintilla nella stessa identica zona dove è apparso il primo. Ma non è così.

Immaginiamo di fare questa prova, cominciando dal caso dell'esperimento della fenditura. Vedremo il secondo fotone apparire in una zona



diversa da quella in cui è apparso il primo. Lanciamone allora un altro, sempre da solo e nelle stesse identiche condizioni degli altri due: lo vedremo apparire in una terza zona. E poi avanti, fotone singolo dopo fotone singolo. Lanciamo un milione di fotoni, uno alla volta, nello stesso identico modo, e segniamo un punto sullo schermo ogni volta che vi appare un fotone. Così facendo vedremo ricostruirsi davanti ai nostri occhi esattamente la figura di prima. Abbiamo lanciato tutti i fotoni esattamente nello stesso identico modo, ma si sono comportati tutti in modo diverso.

Passiamo ora all'esperimento del vetrino. Vedremo il primo fotone deviare a destra, poi il secondo a sinistra, poi il terzo a sinistra, poi il quarto a destra, eccetera, senza regola apparente. Possiamo continuare all'infinito, e non emergerà nessuna regola in grado di dirci cosa aspet-

tarci nel lancio successivo. Eppure, stiamo ripetendo sempre lo stesso identico esperimento, nelle stesse identiche condizioni!

Si può insistere ipotizzando che ci stia comunque sfuggendo qualcosa. Forse tra il lancio di un fotone e quello successivo qualcosa in realtà cambia, e siamo soltanto noi, con i nostri strumenti approssimativi, a non accorgercene, e ad essere dunque indotti a pensare che le condizioni dei lanci siano sempre le stesse, quando in realtà non lo sono. Anni e anni di studi e di ricerca non sono mai riusciti a trovare cosa faccia la differenza, cosa determini il risultato di esperimenti semplici come questi. E oggi conosciamo bene le leggi fisiche alle scale di grandezza atomiche, che sono quelle in gioco negli esperimenti che stiamo descrivendo. Anzi, conosciamo le leggi fisiche fino a scale di grandezza un miliardo di volte più piccole di quelle atomiche. Ma non ci siamo mai accorti di nulla.

Sembra che fotoni diversi in situazioni identiche vadano uno a destra, un altro a sinistra, senza alcuna apparente spiegazione. Ma non demordiamo e insistiamo con la nostra domanda: perché il primo è andato a destra? Perché il secondo è andato sinistra? Che cosa (cioè quale causa) ha fatto sì che il primo andasse a destra e il secondo a sinistra?

Perché mai vorremmo saperlo? Forse perché vorremmo decidere noi per il fotone, o per l'atomo. Vorremmo essere noi a far fare loro quello che piace a noi. Non è così per tutti gli oggetti che ci circondano? Non siamo noi che decidiamo dove andare quando guidiamo l'auto? Di certo non è l'auto che decide dove portarci! L'idea è che l'uomo controlla la natura, e la natura obbedisce a leggi, si dice, deterministiche, per cui è possibile determinare, e quindi decidere, in anticipo cosa far fare agli oggetti che ci circondano. O almeno prevedere quello che faranno. Esattamente come diceva San Tommaso: ogni evento è determinato da un precedente, quello precedente è determinato da un altro precedente ancora, e quello da un altro, in una catena infinita delle cause che può interrompersi soltanto se arriviamo al motore immobile. Lui, il motore immobile, decide per tutti, muove tutto. Ecco allora che, se troviamo un evento che non è determinato da niente di precedente, ci preoccupiamo. E la scelta che fa il fotone di andare a destra, a sinistra, o (nel caso della

fenditura) al centro, o a destra solo un poco, o a sinistra molto di più, non sembra essere determinata da niente. Questo ci fa piombare, per qualche misterioso motivo, in uno stato di smarrimento. A ciò si aggiunga che, in base a quello che dice Platone, se troviamo "qualcosa che muove se stesso", ne dobbiamo concludere di aver trovato l'anima!

Forse la cosa più interessante che ci resta da capire non è tanto quello che fanno i quanti, visto che ormai comincia a chiarirsi di fronte ai nostri occhi, ma perché noi abbiamo questo tipo di reazioni emotive di fronte alla constatazione di quello che fanno. Come mai restiamo perplessi di fronte alla possibilità che la natura decida da sola il suo futuro, che "abbia un'anima"? Forse la cosa dovrebbe preoccupare San Tommaso, che deve venire a patti col fatto di aver preso un granchio. Ma a noi che differenza fa? Eppure, ce ne preoccupiamo...

Il punto è che l'uomo, che crede di controllare la natura, è comunque parte della natura stessa. Non è che ci siamo illusi, fino ad oggi, di controllare la natura, quando, forse forse, è la natura che ha controllato noi? Se ci pensate bene, la seconda ipotesi ha molto più senso della prima. La prima, infatti, è una contraddizione logica. Non è che la natura si sta magari prendendo gioco di noi?

La comunità dei fisici si divise tra coloro che accettavano i fatti per come apparivano, senza necessariamente "capirli", e coloro che non si sono mai arresi di fronte all'evidenza, tra i quali Einstein. E così la teoria dei quanti rimase a lungo corredata di una serie di paradossi, o problemi aperti, che in verità sono soltanto problemi che ci facciamo noi. Per la precisione, sono problemi che si fanno alcuni di noi, cioè coloro che insistono a cercare di ricondurre il comportamento del mondo microscopico ai comportamenti più tipici del mondo macroscopico che ci circonda, ignorando il fatto che, a rigor di logica, dovremmo fare l'esatto contrario, perché il secondo è fatto del primo, e non viceversa. Molti di questi cosiddetti problemi aperti della teoria dei quanti possono essere chiusi anche subito, perché basta accettare quello che gli esperimenti ci dicono per far fare un salto di qualità alla nostra comprensione.

Ma molte persone, in modo più conservativo, hanno sempre pensato che: no, non può essere che il fotone "decida da solo" dove andare.

Ci deve essere qualcosa che ci sfugge. Ci devono essere delle variabili nascoste che controllano la sua scelta e dunque il risultato finale dell'esperimento. Un giorno le scopriremo e le nostre certezze saranno "vendicate". Quando riusciremo a migliorare i nostri strumenti di misura e a fare degli esperimenti sufficientemente precisi, finalmente potremo controllare e prevedere quello che fa il fotone. Così come controlliamo il lancio di un satellite che mandiamo in orbita attorno alla terra, o alla luna. Siamo noi che gli diciamo dove andare, lo guidiamo noi, perché è vincolato ad obbedire a leggi ben precise, le leggi della fisica. E le leggi della fisica non possono essere del tipo "fai quel che ti pare". Sennò, che leggi sarebbero? Dovrà essere possibile, sostenevano, arrivare a controllare la natura anche a livello microscopico. Ma siccome questo non era, o non sembrava essere, possibile, coloro che volevano insistere a credere nella versione appunto delle variabili nascoste, consideravano la teoria dei quanti necessariamente provvisoria e altrettanto necessariamente destinata ad essere superata. Secondo loro, la ragione per cui non sappiamo spiegare la scelta del fotone è che non controlliamo le variabili che la determinano, ma che comunque esistono, per cui ci sembra che il fenomeno quantistico sia casuale, ma in realtà è l'ennesimo esempio di caso statistico, caso finto, come il lancio dei dadi al casinò, o la roulette. Non esisterebbe, per quei fisici, il caso quantistico, ma solo l'illusorio caso statistico, in perfetto accordo con la catena delle cause di San Tommaso. Non può esistere l'anima di Platone.

Einstein non voleva credere al caso quantistico, da cui la sua famosa frase "Dio non gioca ai dadi", dove i "dadi" non sono da intendere come i dadi del casinò, cioè i simulatori del caso, ma come i "dadi veri" che solo i quanti possono realizzare, cioè quei fenomeni che nessuno può prevedere, né controllare. Einstein considerava la teoria dei quanti una teoria provvisoria, ma, curiosamente, pensava che il suo eventuale "superamento" corrispondesse a un tornare indietro, cioè tornare alla visione del mondo pre-quantistica, deterministica.

In definitiva, i fenomeni non controllabili della natura, i fenomeni interamente, assolutamente imprevedibili, non solo in pratica, ma anche in principio, darebbero torto a San Tommaso, secondo cui ogni evento è

causato da un precedente, quello da un altro ancora precedente, e avanti di questo passo, finché non si arriva appunto a Dio, il quale non si sollazza certo giocando ai dadi o alla roulette, ma decide e controlla tutto, e lo fa, per esempio, in base alla sua volontà superiore, benigna e onnipotente. In fondo in fondo, San Tommaso ed Einstein sono in accordo, qualunque significato attribuissero alla parola "Dio". Secondo loro, non ci può essere nulla che muova se stesso, tranne Dio: non ci può essere l'anima di Platone, se non come emanazione di Dio.

Per dirimere la questione, dobbiamo spiegare che cosa fa il fotone durante il viaggio dal puntatore laser allo schermo, attraverso la fenditura, o quando incontra il vetrino. Quando comincia a deviare? Perché lo fa? Cosa lo guida nella deviazione? Segue una traiettoria? Come sceglie la strada da imboccare? Forse si sdoppia e segue più traiettorie allo stesso tempo? Il fotone è uno, nessuno, o centomila? Magari si diluisce? Esistono delle variabili che controllano la sua posizione, o le sue traiettorie multiple, o la sua diluizione? Che ci dicono dove sta in ogni istante, se è lento, veloce, fermo, in moto, di qua, di là, sferico, cubico, liscio, ruvido, consistente, sparpagliato, eccetera?

La verità è che nessuna di queste domande ha senso, e nessuna variabile che descrive le caratteristiche che abbiamo elencato può esistere. In sostanza, esiste un intervallo intermedio nel quale la realtà viene sospesa, cessa di esistere. In quel lasso di tempo il fotone non esiste più. Non possiamo nemmeno *immaginarlo*, qui, là, o altrove, perché non è né qui, né là, né altrove. Non è da nessuna parte. Semplicemente, il fotone non esiste. Se non è così grave rinunciare a dire se il fotone sia liscio o ruvido, è una cosa un po' seria non poter nemmeno dire se sia "qui", "là", "sia qui che là", "un po' qui e un po' là". Perché ciò implica che il fotone "non è".

Ed è proprio perché la realtà cessa di esistere, in quell'intervallo intermedio di tempo, che essa può essere creata. Perché la creazione è in bilico tra l'essere e il non essere. Se la realtà non cessasse mai di esistere, ma fosse possibile, magari un giorno, seguire il fotone, o la sua eventuale diluizione, durante il viaggio dall'inizio alla fine, grazie a certe famigerate variabili nascoste, allora vorrebbe dire che non c'è mai nessuna

creazione. È necessario, per avere creazione, che la realtà venga interrotta, sospesa, che ci sia un intervallo in cui la realtà cessa di essere "reale".

Ma rimane da chiarire bene perché possiamo fare affermazioni come queste. Come facciamo a dire con tanta sicurezza che neanche in futuro riusciremo mai a trovare quelle variabili nascoste? Che non esistono *davvero*? E che quindi il fenomeno è davvero un fenomeno di creazione, non una simulazione di caso, come il caso statistico? Che prove abbiamo che, in un fenomeno quantistico, la realtà cessa davvero di esistere e viene creata di nuovo successivamente? Come possiamo fare un'affermazione così forte e perentoria?

Il problema delle variabili nascoste rimase aperto per decenni. La soluzione fu trovata nel 1964 da John Stuart Bell. Bell aveva inizialmente una posizione vicina a quella di Einstein. Cioè, sperava che i risultati della sua ricerca confermassero che queste variabili nascoste possono esistere. Voleva capire, magari, dove andare a cercarle. Come spesso accade, in fisica, si parte col proposito, che è anche pregiudizio, di dimostrare una cosa, per arrivare a dimostrare l'esatto contrario. E così accadde a Bell. Bell dimostrò che se esistono delle variabili nascoste, che siano una, due o cento milioni, i risultati, cioè le predizioni fisiche, sono vincolati ad obbedire a certe disuguaglianze, che da allora vengono appunto chiamate disuguaglianze di Bell. Esse vincolano tutte le predizioni fisiche di una teoria di "caso simulato".

Non è difficile cogliere il cuore del risultato di Bell senza fare alcun uso di matematica sofisticata. Se esistono delle variabili nascoste, posso parametrizzare la mia ignoranza in merito a quelle con delle probabilità, come nel caso dei getti di dadi al casinò. So che il risultato non è casuale, ma determinato univocamente dal mio lancio (la forza che imprimo ai dadi, la loro rotazione, la posizione e la forma del tavolo su cui li getto, eccetera). Siccome non riesco a controllare tutte le variabili in gioco, me la cavo sbrigativamente usando delle probabilità. Descrivo il getto di dadi come un fenomeno statistico, probabilistico, consapevole che la probabilità che sto usando è un ripiego, dovuto alla mia incapacità pratica di controllare bene la mano quando effettuo il lancio, per far uscire il risul-

tato che voglio.

Una probabilità è un numero che appartiene ad un insieme molto ristretto, compreso necessariamente tra 0% e 100%, ovvero tra 0 e 1. Non può essere un numero qualsiasi. Non esistono "probabilità di Brahmagupta", cioè probabilità negative, perché non ha senso dire "ho il -10% delle probabilità di vincere la scommessa". Allo stesso modo, la probabilità non può essere un numero maggiore di 1, perché non ha senso una probabilità uguale, per esempio, a 5, che poi vorrebbe dire 500/100, cioè il 500%. E sicuramente non esistono "probabilità di Bombelli", cioè probabilità complesse, come una probabilità uguale a i .

Quindi, se esistono queste famigerate variabili nascoste, qualunque cosa siano e in qualunque numero esse siano, posso parametrizzare la mia ignoranza sui valori che hanno con delle probabilità, in un qualsiasi problema. Ma quelle probabilità saranno costrette comunque ad obbedire ai vincoli a cui debbono obbedire tutte le probabilità, dai quali seguono, anche se non immediatamente, le disuguaglianze di Bell, che sono proprio la traduzione di quei vincoli nel problema del caso simulato.

Pertanto, se i fenomeni quantistici fossero davvero descrivibili in termini di variabili nascoste, le predizioni fisiche che ne conseguirebbero sarebbero vincolate a soddisfare le disuguaglianze di Bell. Usando quelle, possiamo delineare esperimenti cruciali, per capire se il caso previsto dalla teoria dei quanti sia caso vero o caso simulato. Se la teoria dei quanti è, appunto, teoria dei quanti e non altro, deve essere in grado di superare la sfida.

L'esperimento chiave è molto simile ad alcuni esperimenti che abbiamo già descritto: quello del fotone e il vetrino, e quello dell'atomo in campo magnetico, per esempio. Si tratta, in sostanza, della biforcazione quantistica elementare, con la differenza che si deve allontanare lo schermo dal vetrino di parecchio. Sfruttiamo il fatto, già ricordato, che prima di far collassare il virtuale al reale possiamo allontanare le zone A e B quanto vogliamo. Separandole abbastanza, è possibile apprezzare la differenza tra le predizioni della teoria dei quanti, nelle quali le disuguaglianze di Bell sono violate, e quelle di una teoria probabilistica, nelle

quali sono sempre rispettate. Effettuando esperimenti come questi fu così possibile tagliare la testa al toro, e dimostrare che i fenomeni quantistici possono violare le disuguaglianze, cioè non sono soggetti ai vincoli delle teorie delle probabilità. Pertanto, la teoria dei quanti non può essere una teoria di probabilità.

Ora possiamo finalmente tornare al nostro Bombelli. Ricordiamo che Bombelli aveva introdotto un doppiante di tutti i numeri, dando vita ai numeri complessi, numeri dei quali si fa uso dalla mattina alla sera nella teoria dei quanti. Per descrivere che cosa? Per esempio, li si usa per descrivere il fotone durante il viaggio dal laser allo schermo, quando passa attraverso la fenditura o incocchia un vetrino, cioè nella fase della virtualità. Li si usa per descrivere quella che abbiamo identificato come la "nuvola" associata a un atomo, o un elettrone, mentre non lo osserviamo, cioè nell'intervallo tra una osservazione e la successiva. Li si usa per descrivere l'operazione di divisione della nuvola stessa in due parti o più, cioè le biforcazioni quantistiche e le multiforcazioni. Li si usa per descrivere il gatto di Schrödinger, che è in una sovrapposizione degli stati "gatto vivo" e "gatto morto". Li si usa per descrivere tutti i tipi di sovrapposizioni di stati. E poi la rigenerazione dello spin, la cancellazione del passato, la creazione del futuro.

Ebbene sì: la virtualità dei quanti è "bombelliana". Non esistono probabilità bombelliane, come sappiamo. Ma proprio perché la meccanica quantistica non è una teoria di probabilità, il suo habitat matematico naturale non può essere quello di una teoria delle probabilità. Può essere, come infatti è, quello dei numeri complessi, che con la meccanica quantistica diventano molto più che un potente strumento matematico. Acquistano "vita", in un certo senso, diventano "reali", come Pinnocchio diventa bambino. Anche se "in realtà", sono soltanto "reali virtuali".

I numeri complessi evadono i vincoli a cui sono soggette le probabilità, e permettono di violare le disuguaglianze di Bell, come gli esperimenti poi confermano. In ogni fenomeno quantistico (che poi vuol dire ogni fenomeno, visto che tutti i fenomeni hanno la stessa origine, che è, appunto, quantistica), a un certo punto la realtà viene interrotta e una

realtà nuova viene creata, seduta stante. In quella interruzione vivono i numeri di Bombelli.

Non si può dire che il fotone, durante il viaggio, sia qui o là, o segua una traiettoria, perché il fotone non esiste nel durante. E allora, come facciamo a descrivere qualcosa che non esiste? Bell ci ha appena mostrato che non ci riusciremo mai, neanche con 100 mila variabili nascoste. Invece, Bombelli ci riesce con una sola, quel secondo numero, introdotto per raddoppiare i numeri di uso comune, cioè la parte immaginaria. Ma bisogna accettare una cosa: che quella non sia una variabile nascosta, cioè una grandezza che un giorno riusciremo magari a rivelare, e a trasformare in una variabile reale. Cioè: dobbiamo accettare che quella variabile non potrà mai corrispondere a nulla di reale. Come le aree negative.

A questo punto, dobbiamo pur chiederci cosa voglia dire "essere". Se ci pensate un attimo è straordinario riuscire a parametrizzare la realtà *prima che venga creata*, prima che prenda forma, cioè nella fase di mezzo tra un'osservazione e la successiva, tra il laser e lo schermo, nella fase in cui la realtà stessa, nella fattispecie il fotone, non esiste. Eppure, ci riusciamo. I numeri di Bombelli ci riescono. Non sono più un trucco matematico di cui potremmo anche fare a meno, ma la maniera di descrivere la fase in cui la realtà non esiste, in cui la realtà è in sospenso, dopo che la realtà precedente è stata cancellata, e prima che la realtà nuova sia stata creata. Anche se il nostro linguaggio parlato si accartocchia e si mostra inadeguato a descrivere le proprietà dei quanti, un altro linguaggio è a nostra disposizione, più potente, fornitoci dalla matematica. Anzi, era pronto da secoli. Stava solo aspettando che ci accorgessimo della sua vera natura, che capissimo in cosa consiste veramente. Ebbene, dobbiamo procedere con quello.

Se facciamo uso dei numeri di Bombelli possiamo spiegare, con relativa facilità, tutte le relazioni sperimentalmente osservate tra il prima e il dopo, tra ciò che esiste prima che la realtà cessi di esistere, e quel che esiste quando la realtà poi ritorna ad esistere. Riusciamo a prevedere la probabilità che il fotone vada da una parte, come la probabilità che vada da un'altra parte. I numeri di Bombelli ci permettono di riempire in mo-

do molto efficiente la lacuna tra il laser e lo schermo. Per contro, non possiamo riempire quella lacuna con delle variabili nascoste che potrebbero un giorno essere rivelate come reali, perché le predizioni che troviamo in quel caso sono già state smentite dagli esperimenti suggeriti da Bell.

Ecco perché non possiamo pretendere che il fotone, o l'atomo, sia descrivibile nei termini che usiamo per la realtà che ci circonda. Però possiamo usare una variabile in più, una soltanto, una variabile "immaginaria", per collegare il prima con le opzioni del dopo, accettando quindi la multiforcazione, che fa sì che la realtà non sia più deterministica. La scelta del dopo che si materializza davanti ai nostri occhi tra le tante opzioni permesse è determinata dal fenomeno in questione, creativamente. Non è sotto il nostro controllo, e non è sotto il controllo di nessuno.

La parola "virtualità", che usiamo a proposito del durante, sta ad indicare che, da una parte, la realtà non esiste in quella fase, ma anche che, in qualche senso, non è "il nulla", perché collega il prima con il dopo, cioè la realtà che sta per essere creata. Non possiamo prevedere tutto del dopo, ma possiamo comunque elencare le opzioni dei risultati finali possibili, e calcolare le probabilità di ciascuna opzione. A ben guardare, la non esistenza del virtuale non è così lontana dall'esistenza del dopo, perché la crea, e perché non la può creare in qualunque maniera essa voglia. Può però scegliere tra un insieme di opzioni, un insieme di strade percorribili. Se la scelta in merito a quale strada prendere è sua, e soltanto sua, essa non può determinare anche l'insieme di strade accessibili, o le probabilità di percorrerle. I numeri di Bombelli sono versatili quanto serve a descrivere tutto questo.

Per ora ci fermiamo qui, perché l'ultimo punto, che affronteremo nella prossima lezione, è proprio cercare di capire come sia possibile che, dopo che la realtà cessa di esistere, nel durante, essa si materializzi in una versione nuova, e diventi quello che noi percepiamo. Il fotone esce dal laser, cessa di esistere, poi si materializza in una scintilla, qui oppure là. Lo abbiamo capito, ormai: il fenomeno quantistico è creativo; non esistono variabili nascoste; non c'è determinismo; i fenomeni dei quanti non sono governati dalle probabilità; i numeri di Bombelli non sono più

soltanto un trucco matematico, e non possiamo reinterpretarli come variabili nascoste; tutto, inclusa la realtà che ci circonda, va capito a partire dai quanti, e non viceversa. Ma manca l'ultimo passaggio: come può ciò che è virtuale trasformarsi in qualcosa di reale? Cosa rende possibile un miracolo del genere?

Ad attivare la creazione non può essere il fotone da solo. Senza lo schermo, o il muro muro, infatti, il fotone continuerebbe a non esistere, per l'eternità. Che incocci un vetrino o no, che passi attraverso la fenditura o meno, non troverebbe nulla che lo costringa a prendere forma, a materializzarsi in una scintilla. E allora resterebbe nella sua condizione di massima, assoluta libertà, quella di cui gode, appunto, quando è virtuale. L'esistenza, quindi, è dovuta ad un concorso di eventi che coinvolgono tanto il fotone, quanto lo schermo.

Nella prossima lezione vedremo come e che cosa vuol dire che la realtà "esiste". Diventerà anche chiaro come mai la realtà è soltanto "quasi reale". E cioè, perché quella scintilla non si materializza mai compiutamente davanti ai nostri occhi, non prende mai veramente forma completa. La realtà non viene mai veramente creata fino all'ultimo, ma rimane sempre un pochino virtuale, per cui ciò che noi chiamiamo reale è, in verità, sempre e solo *quasi* reale, ma mai completamente reale.

Alla fine, ne concludiamo che il fenomeno quantistico è la causa non causata. Esso è proprio un motore immobile, come quello di cui parlava San Tommaso. Ed è anche l'anima di cui parlava Platone: è ciò che muove se stesso. Anche se un singolo fenomeno quantistico non è la causa di *tutto*, è comunque un fenomeno creativo, un fenomeno di "non realtà" che crea la realtà, un fenomeno di "non esistenza", che crea ciò che, successivamente, esiste. La catena delle cause di San Tommaso è quindi un abbaglio. Non è affatto vero che, risalendo all'indietro nella concatenazione causale, dobbiamo continuare all'infinito, o trovare Dio: quella catena si rompe subito, al primo fenomeno quantistico in cui ci imbattiamo.

Nonostante i fenomeni che accadono nell'ambiente che ci circonda sembrino causati da fenomeni precedenti, o fenomeni "più piccoli", quando scendiamo alle scale di grandezza microscopiche vediamo che

tutti i fenomeni microscopici, di cui sono composti anche quelli macroscopici, non sono causati affatto. Lì l'abbaglio diventa apparente, e ingannarsi diventa più difficile. E siccome tutti i fenomeni che ci circondano derivano da fenomeni microscopici quantistici, è evidente che l'idea di causalità che ci trasmette l'ambiente macroscopico in cui viviamo non può che essere un'approssimazione. Magari utile per capirsi, ma non esportabile ad una presunta comprensione del mondo in termini di cause e di effetti, come ha cercato di fare San Tommaso.

14 I quanti e la quasi realtà, spiegati col bitcoin

In questa lezione spieghiamo cosa vuol dire che la realtà che ci circonda è “quasi reale”, e come mai la teoria dei quanti ci porta a trarre questa conclusione.

Da cosa deriva l'esistenza di ciò che ci circonda? In che cosa consiste l'esistenza di un oggetto, come per esempio la penna che sto tenendo in mano? Consiste nel fatto che io ho la percezione della penna, e chiunque altro ha la stessa percezione. Tutto l'universo, in un certo senso, sa e concorda che qui è presente questo oggetto. Nel caso di un osservatore lontano dobbiamo tenere conto del ritardo dovuto al tempo che la luce impiega a connettere lui a noi e la penna. Ma se ci stesse guardando un alieno dallo spazio, in grado magari di vedere attraverso il muro, sarebbe d'accordo anche lui, a tempo debito: qui c'è una penna. Un animale magari non la chiama penna, ma la percepisce. Potremmo dire: è d'accordo anche una mosca che passa di qui, perché vede la penna. E sono d'accordo le molecole dell'aria, che ci rimbalzano addosso: anche l'universo inanimato si accorge che qui c'è una penna. Non ci sono dubbi: qui c'è una penna.

Vedete che l'esistenza di questa penna è una concordanza di percezioni o interazioni di tutto l'universo. E com'è possibile che, “istantaneamente” (a parte il tempo impiegato dalla luce a trasmettere la percezione), tutto l'universo si trovi d'accordo che qui c'è una penna? Che co-

sa fa sì che tutto l'universo, animato quanto inanimato, sia d'accordo che qui esiste una certa cosa, che poi ognuno chiama come vuole?

Per far sì che tutto l'universo sia d'accordo che qui esiste questa penna c'è bisogno di scomodare un'autorità superiore, come Dio, perché solo Dio può coordinare l'universo per dare esistenza alla penna. E può farlo in due modi. Il primo modo è stabilire che questa penna esista veramente, "esternamente" a noi, qualunque cosa voglia dire. Il secondo è mettere d'accordo, sincronizzare, armonizzare, come un direttore d'orchestra, tutte le percezioni e interazioni di tutti gli esseri animati e inanimati dell'universo, "come se" qui ci fosse davvero questa penna. A quel punto, non fa alcuna differenza che la penna esista o non esista "veramente". La seconda via è quella proposta nel diciottesimo secolo dal filosofo, nonché vescovo, George Berkeley.

Per essere precisi, nessuno si può accorgere dell'esistenza di questa penna a una velocità superiore a quella della luce. Quindi, dobbiamo mettere in conto un ritardo, che è il tempo richiesto dalla luce per viaggiare dalla penna ai nostri occhi e mostrarci che qui c'è effettivamente questa penna. Ma questo effetto non gioca alcun ruolo in ciò che vogliamo dire, per cui, con un piccolo abuso di termini, diremo che l'esistenza della penna è comunicata "istantaneamente", col che intenderemo "nel tempo necessario affinché il segnale della presenza dell'oggetto possa raggiungere il destinatario propagandosi alla velocità della luce". Tutto questo però poggia su un'assunzione non da poco, cioè che esista Dio, l'autorità superiore che dà esistenza. Se accettiamo questo, l'esistenza è quello che vi ho appena descritto. In questa visione delle cose, solo Dio può dare esistenza a ciò che esiste.

I quanti, però, ci suggeriscono che non c'è bisogno di un concetto di esistenza così rigido come quello che solo Dio può fornire. Esiste un'altra possibilità, quella in cui la natura "fa da sola", cioè senza Dio.

Dobbiamo tenere sempre presente gli esperimenti chiave del puntatore laser e della fenditura, o del puntatore laser e del vetrino, o dell'atomo nel campo magnetico. Quando accendiamo il puntatore vediamo un punto luminoso molto evidente sullo schermo, dovuto al flusso di numerosissimi fotoni, i quanti di luce, le sue unità indivisibili. Però

abbiamo anche visto che se facciamo passare il raggio attraverso la fenditura generiamo una figura di interferenza. Vuol dire che in presenza di una fenditura ogni singolo fotone che esce dal laser e le passa attraverso ha un ventaglio di possibilità di scelta: può prendere la strada che, creativamente, decide di prendere. Il fenomeno quantistico è la possibilità di creare un output, un risultato finale, che non dipende e non è fissato dall'input, cioè dalle condizioni iniziali.

Avevamo anche detto che il fenomeno quantistico è la causa non causata, un fenomeno creativo. Tra il laser e lo schermo il fotone cessa di esistere. Lo abbiamo stabilito grazie al risultato di Bell e ai numeri di Bombelli: nel tempo intermedio l'esistenza del fotone non è data. Le uniche cose che possiamo dire sono che "esiste" la scintilla che vediamo alla fine, ed "esiste" il fotone che esce dal laser, al momento del lancio. Ma esistono per davvero? Lo stabiliremo proprio in questa lezione. Abbiamo anche accennato al fatto, che ora trattiamo compiutamente, che ciò che fa sì che un fotone prenda forma, solo "alla fine", è l'interazione che avviene tra lui e i numerosissimi atomi dello schermo. È l'interazione tra l'uno e i tanti, tra il micro e il macro.

Capite bene che in questo approccio, l'esistenza non è definita così chiaramente come nell'approccio che parte da Dio. Nell'intervallo in cui un fotone sta "viaggiando", la sua esistenza è in sospenso. Ad un certo punto si materializza una scintilla da qualche parte su uno schermo. Quella è l'unica percezione che avremo, mentre non abbiamo nessuna percezione del durante. Ne concludiamo che non è possibile avere una percezione istantanea della realtà: c'è un ritardo dovuto alla sospensione della realtà stessa, all'intervallo che intercorre tra la cancellazione del prima e la creazione del dopo.

Non è come nel caso della penna, in cui tutto l'universo è d'accordo "istantaneamente" che la penna esiste (a parte il ritardo dovuto alla velocità della luce): nel fenomeno quantistico c'è una fase nella quale l'esistenza della realtà è interrotta. Possiamo aspettare quanto vogliamo, per dare modo alla comunicazione di propagarsi alla velocità della luce, ma non riusciremo mai a riempire il gap che separa il prima dal dopo. Il ritardo dovuto al durante è un ritardo in più. Ed è un ritardo "vero", tan-

to che non dipende dall'osservatore, e può essere allungato arbitrariamente. Cioè: non è un ritardo di comunicazione, ma un ritardo intrinseco, dovuto ad una *sospensione di esistenza*.

Durante il "viaggio" del fotone dal laser allo schermo finale, il fotone non esiste. Si materializza dopo, con una scintilla, in un qualche punto dello schermo, decidendo lui dove. Sulla percezione del risultato finale ci troveremo tutti d'accordo: una scintilla è qualcosa che chiunque di noi può vedere e confermare. Tutto l'universo sarà d'accordo sulla scintilla apparsa in questo o quest'altro punto, *dopo* che sarà apparsa. Ma nessuno può dire nulla su quello che succede durante il viaggio, perché nessuno ne ha alcuna percezione. E nessuno potrebbe averne, visto che non esistono le variabili nascoste.

Anche nel caso della penna siamo tutti d'accordo sulla percezione, ma quella *non* è la percezione finale di un qualche processo durante il quale la realtà della penna era sospesa. La penna è sempre esistita, è sempre stata davanti ai nostri occhi. Nel caso del fotone non si può dire altrettanto. Non si può dire che sia esistito prima di quella scintilla, neanche immaginando o ammettendo che fosse da qualche altra parte, perché non era effettivamente da nessuna parte. Ci si potrebbe inventare che durante il viaggio si "divida" in tantissime entità che viaggiano ciascuna lungo una traiettoria propria, cioè che percorra tutte le traiettorie immaginabili allo stesso tempo. Ma per farlo si dovrebbe ricorrere sempre ai famigerati numeri di Bombelli, a conferma che quella suddivisione in tante entità diverse non può corrispondere ad alcunché di reale. Si possono inventare tante descrizioni diverse per formulare quello che "succede" nella fase del durante, e, se danno i risultati fisici corretti riguardo al dopo, vanno tutte bene. Ma non c'è modo di decidere, e non ha nessun senso dire, che cosa stia veramente succedendo nella fase di mezzo.

La domanda cruciale, a questo punto, è: ma la scintilla finale, quella, almeno, esiste "veramente"? Abbiamo capito che il durante non esiste, ma il dubbio che sorge è: se non esiste il durante, come fa ad esistere il dopo? Quale miracolosa *transizione* fa passare dalla non esistenza all'esistenza? O dobbiamo dire che non esiste nemmeno il dopo?

Per avvicinarci a capire quella che è la "vera esistenza" di questa penna, e di tutta la realtà che ci circonda, ci possiamo aiutare con il bitcoin, perché il bitcoin ci offre un esempio molto concreto di quello che vogliamo spiegare, che potrebbe risultare molto ostico, se spiegato direttamente col linguaggio della teoria dei quanti. Invece di "transizioni", parliamo di "transazioni", le transazioni bancarie.

Il punto chiave è che, usando i bitcoin, è possibile fare transazioni, cioè passaggi di denaro, senza bisogno della banca. Spieghiamo prima bene che cos'è una transazione. Vado in un negozio e chiedo un prodotto. Per pagare quel prodotto consegno, supponiamo, delle banconote al negoziante, degli euro. Un attimo dopo tutti possono dire con certezza che c'è stato un passaggio di denaro da me al negoziante. Tutto l'universo, per così dire, è d'accordo che ho dato del denaro al negoziante, semplicemente per il fatto che, un istante dopo, quel denaro ce l'ha il negoziante, non io, e lo può spendere come gli pare. Chi riceverà le banconote dal negoziante, nella transazione successiva, non avrà nessun dubbio che quelle banconote le l'abbia effettivamente il negoziante, perché il negoziante gliele consegnerà fisicamente, come io le ho consegnate fisicamente al negoziante. In questo caso la transazione è sicura, garantita dal passaggio fisico di qualcosa di materiale, confermata da quello stesso passaggio.

Tuttavia, oggi le transazioni e gli acquisti vengono quasi sempre fatti online, senza passaggio fisico di banconote o altri oggetti concreti. Potete andare in un negozio e pagare col bancomat, o una carta di credito, per esempio. Che cosa succede in quel caso? Succede che quando pago 100 euro per un prodotto con la carta di credito, per qualche misterioso motivo tutto l'universo deve essere d'accordo che il passaggio di denaro sta avvenendo effettivamente. E questo accordo deve sincronizzare tutto il mondo, "istantaneamente" (a parte i ritardi dovuti alla comunicazione, come prima). Perché è necessario questo? Perché questo passaggio di denaro, 100 euro, da me al negoziante deve consentire al negoziante, un istante dopo, se vuole, di spendere quegli stessi 100 euro online, per ordinare, magari, qualcosa dalla Cina. E in Cina devono essere sicuri che quei 100 euro li ha il negoziante e non li ho più io, anche se

fisicamente i 100 euro non esistono nemmeno. Immaginate, per esempio, che il negoziante non abbia neanche un euro prima dei 100 che gli do io, o non ne abbia abbastanza per il suo acquisto. Io compro un prodotto da lui, e gli do 100 euro. Lui un istante dopo deve essere libero di poterli spendere online, magari per fare un acquisto dall'altra parte del mondo, dalla Cina. Come fanno in Cina a sapere che quei 100 euro li ha lui e non più io? La conferma della transazione avvenuta è possibile soltanto perché si ammette l'esistenza di un'autorità superiore, la banca, e i circuiti bancari internazionali. È questa entità superiore che fa da garante alle transazioni. Essa mette tutti d'accordo: la transazione è avvenuta, i soldi sono passati da me al negoziante, tutto il mondo lo sa. Lo sa, non perché il mondo è stato testimone del passaggio fisico di qualcosa, non perché è materialmente transitata una banconota, ma perché in Cina si rifanno all'autorità superiore, la banca, o, meglio, il circuito finanziario internazionale, di cui fanno parte anche le carte di credito. Nell'esempio che stiamo considerando, il circuito finanziario internazionale gioca il ruolo che giocava "Dio" a proposito dell'esistenza della penna.

Il bitcoin è un esempio di moneta in grado di funzionare senza un circuito internazionale che faccia da garante, senza un'autorità superiore, "senza Dio". Eppure funziona lo stesso. Richiamiamo allora qualche dettaglio sul funzionamento del bitcoin, per capire come può funzionare una realtà "senza Dio", e qual è il "prezzo da pagare" per rinunciare a Dio. Ciò ci permetterà di fare luce sul concetto di esistenza che segue dalla teoria dei quanti, e rivelare quando scatta in noi la percezione, e che cosa sia veramente, cioè capire come fa questa penna ad esistere senza un Dio che ci metta tutti d'accordo che questa penna esiste davvero.

Ci sono due prezzi da pagare per rinunciare a Dio. Il primo è che la conferma in merito all'esistenza di una qualunque "realtà" non sarà mai istantanea: la realtà deve essere interrotta, e rimanere in sospeso per un certo tempo. Potremmo dire che la realtà impiega un po' di tempo a ricrearsi, a tornare ad esistere. Il secondo prezzo da pagare è che la realtà che viene ad esistere, di qualunque tipo essa sia, non esisterà mai in modo definitivo. Non è possibile, infatti, che la realtà acquisti "da sola",

cioè senza "Dio", un'esistenza completa, assoluta e definitiva. Cioè, l'esistenza di questa penna rimarrà sempre sub iudice, almeno un po'. La sua esistenza è, ancora adesso che la vedo davanti ai miei occhi, "incompleta". Questo è il motivo per cui dobbiamo parlare di "quasi realtà", e non di "realtà". Alla fine, questa penna esiste... quasi. Mancando Dio, mancando l'autorità superiore che dà esistenza istantaneamente ed assolutamente, che mette d'accordo tutto l'universo, l'unica cosa che possiamo fare è darle un'esistenza *incompleta e ritardata*, che è comunque sufficiente a spiegare tutto ciò che percepiamo e sperimentiamo.

Come e perché possa succedere qualcosa del genere ce lo illustra appunto il bitcoin. Alcuni di voi probabilmente hanno già acquistato dei bitcoin. Se lo hanno fatto in modo diretto fanno due cose. La prima è che l'acquisto non è mai istantaneo. C'è bisogno di aspettare un lasso di tempo pari a circa un'ora, durante il quale deve succedere qualcosa. Non è possibile che la transazione, il passaggio di denaro, avvenga istantaneamente mediante il bitcoin, perché non esiste un'autorità superiore che possa garantire che sta passando del denaro da una persona a un'altra. C'è invece un lavoro di computer sparsi per il mondo che deve fare qualcosa che spiegheremo meglio tra un attimo. Quel lavoro richiede del tempo, per cui soltanto dopo un'ora circa la transazione viene confermata. Prima della conferma la transazione è in sospeso. Come nel caso del fotone emesso dal laser: quando "sta viaggiando" la sua esistenza è sub iudice; poi succede qualcosa che crea una scintilla da qualche parte. Similmente, dopo un'ora, la vostra transazione di bitcoin è confermata.

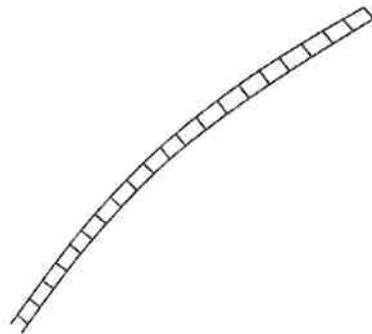
La seconda cosa è che quella transazione di bitcoin non sarà mai confermata al 100%, cioè in modo assoluto. La conferma che ha luogo dopo un'ora è soltanto una convenzione: siamo noi che dichiariamo confermata la transazione dopo un'ora. Per i motivi che ora spieghiamo, lo possiamo fare senza bisogno di "metterci d'accordo" (che ci farebbe tornare al punto di partenza). Così, nel caso del fotone, la scintilla che noi percepiamo non si materializza mai al 100% là dove la vediamo, sullo schermo. Qualunque nostra percezione, di qualunque realtà, non è mai definitiva, non è mai vera, non è mai reale al 100%. E la ragione è che

non è possibile ottenere una conferma al cento per cento senza un'autorità superiore che la garantisca, mentre è possibile ottenere una conferma sufficiente "per tutti gli scopi pratici".

Queste sono le proprietà fondamentali del bitcoin che ci aiutano a capire i quanti, per cui ora ci soffermiamo un po' su di loro, scendendo nei particolari. Disegniamo un "serpente", come quello mostrato in figura, fatto di tanti elementi. Esso rappresenta quella che si chiama *blockchain*, cioè una "catena di blocchi". La blockchain viene scaricata sul computer dal "portafoglio", cioè l'applicazione che usate per fare le transazioni di bitcoin. Che cosa contiene? Contiene tutta la storia passata del bitcoin. Cioè, la storia di tutte le transazioni tra tutte le persone che hanno mai fatto transazioni di bitcoin da quando esiste il bitcoin al momento in cui voi volete fare la vostra operazione. Sostanzialmente, il bitcoin è la storia di tutte le sue stesse transazioni. In un certo senso, la blockchain è la "storia dell'universo" del bitcoin. Nel caso della natura, l'analogo della blockchain sarebbe la storia di tutti gli eventi che si sono succesi nell'universo da sempre, ovunque, in qualunque istante passato, in qualunque parte dell'universo.

Il bitcoin è un serpente che si allunga ogni volta che avvengono transazioni. Ciascuna vostra richiesta di transazione viene inserita in un "blocco", assieme a migliaia di altre richieste di transazioni, circa 5000 a blocco. E poi, per qualche motivo che adesso vediamo, il serpente si allungherà, un blocco alla volta. Oggi la catena è già lunghissima, ma continua ad allungarsi, giorno dopo giorno, ora dopo ora. Come?

Vogliamo acquistare dei bitcoin da qualcun altro, in cambio di euro. Supponiamo, per semplificare un po' che, nell'istante nel quale inoltriamo l'ordine di fare la transazione, la catena sia lunga soltanto 100 blocchi. Il nostro ordine sarà inserito in un blocco assieme a tanti altri (da chi? da cosa? lo vediamo dopo), finché il blocco non arriva a conte-



nerne circa 5000. Non è importante dove venga messo il nostro ordine, se in un blocco o nel successivo, se prima o dopo altre transazioni all'interno di un blocco.

Supponiamo, come detto, che la catena sia arrivata a 100 blocchi. Cento blocchi indica il presente e 99 blocchi, 98 blocchi, 97 blocchi, eccetera, sono i passati, più o meno recenti. Una catena più lunga di 100 blocchi sta ad indicare il futuro. Il punto è: come si fa a stabilire qual è il blocco successivo al centesimo? Come si crea il futuro? E dove va a finire la mia transazione? In quale posizione, di quale blocco?

Se io faccio una richiesta di transazione, e c'è un'autorità superiore, è l'autorità superiore che stabilisce dove metterla, prima o dopo la richiesta di qualcun altro. L'ordine stabilito dall'autorità superiore determina il centunesimo blocco: chiuso il discorso. Ecco come fa ad esistere la realtà, se esiste Dio. In quel caso, non abbiamo niente da discutere, non c'è nulla da spiegare. Rimandiamo tutte le spiegazioni a lui. Ma se invece Dio non esiste, se la realtà deve fare da sola, se si deve creare e ordinare da sola, come fa? Bisogna chiamare a raccolta un lavoro impegnativo e collettivo di numerosissimi computer sparsi in giro per il pianeta, perché non esiste un processo istantaneo che possa ottenere quel risultato.

Dovete sapere che il mondo è coperto di un network, una rete di nodi, che sono postazioni informatiche dove computer molto potenti sono costantemente al lavoro per fare qualcosa con quella blockchain, che servirà a determinare e confermare il blocco centunesimo. Cosa fanno questi computer?

Consideriamo un certo nodo, localizzato, per esempio, a Verona. Ad esso arrivano, via internet, le richieste di un certo numero di nuove transazioni. Il nodo le impacchetta in un blocco, il presunto centunesimo blocco. Ma quello sarà soltanto il centunesimo blocco secondo il nodo di Verona. È quello che a Verona e, per ora, solo a Verona, sosterranno essere il futuro, o il nuovo presente. Il problema è che occorre mettere d'accordo tutto il pianeta che quello è effettivamente il centunesimo blocco, il futuro. In un'altra città, magari a Brescia, o in un altro nodo, possono arrivare, nello stesso arco di tempo, richieste di transazioni di-

verse. Oppure le stesse, ma in ordine diverso. A Brescia le raggrupperanno in un centunesimo blocco diverso. Esso sarà il centunesimo blocco del nodo di Brescia. E ciascuno dei nodi di Milano avrà un centunesimo blocco ancora diverso. E così i nodi di Mosca, Pechino, e tutto il mondo.

Ogni nodo, insomma raccoglie le richieste così come gli arrivano e lavora su un presunto centunesimo blocco diverso da quello su cui lavorano gli altri. Avremo un candidato centunesimo blocco per ogni nodo del pianeta. Un po' come le zone luminose della figura di interferenza, quando il fotone passa attraverso la fenditura. Dove si materializzerà la scintilla sullo schermo? In quale zona? Quale candidato centunesimo blocco, di quale nodo, sarà confermato e diventerà il vero centunesimo blocco della catena?

Ogni nodo lavora con una catena diversa. Verona dirà: io ho questa catena di 101 blocchi. Brescia dirà: io ho quest'altra catena lunga 101 blocchi. Però le due coincidono solo per i primi 100 blocchi, ma differiscono per l'ultimo. Verona e Brescia sono d'accordo solo in merito al passato e al presente, ma differiscono per l'ipotetico futuro, che è ancora sub iudice. E così succederà per il nodo che sta a Mantova, per il nodo che sta Pechino, per il nodo che sta a New York. Ci sono decine di migliaia di nodi, nel mondo. Come si fa a metterli tutti d'accordo, e quindi determinare univocamente il futuro, cioè il centunesimo blocco? A seconda della posizione geografica, la mia richiesta di transazione si troverà all'interno di un diverso ipotetico centunesimo blocco, oppure finirà all'interno del centoduesimo, o del centotreesimo. E se si trova all'interno del centunesimo blocco in più nodi, potrebbe essere all'inizio del blocco di un nodo, al centro del blocco di un altro nodo, verso la fine del blocco di un terzo nodo.

Finché non si stabilisce dove sta la mia transazione, non posso spendere i miei soldi, perché giocando sull'ambiguità (lo ho già spesi per un nodo, non li ho ancora spesi per un altro nodo), potrei spenderli due volte e arricchirmi a danno di altri. O qualcuno potrebbe appropriarsi di ciò che è mio.

Supponete che la transazione con cui un certo cliente vuole acquistare un prodotto P da un certo negoziante stia nella catena del nodo di

Verona, ma non in quella del nodo di Brescia. Se il negoziante si fida della catena di Verona dice: "ah, sì, ho già ricevuto i soldi, sono a posto". Crede di essere stato pagato dal cliente, e gli consegna il prodotto P. Ma se *poi*, cioè dopo un tempo più lungo, la catena di Verona fosse smentita, e la catena confermata definitivamente fosse quella di Brescia (vedremo fra un attimo cosa vuol dire catena confermata "definitivamente"), quando il negoziante andrà a cercare i suoi soldi per spenderli, ci sta che non li trovi più, cioè che non trovi più la transazione che credeva fosse andata a buon fine. Infatti, un cliente scaltro può aver approfittato della situazione per spendere gli *stessi* soldi con un secondo negoziante, e farsi consegnare un'altra copia del prodotto P. Una volta confermata definitivamente la transazione col secondo negoziante, nessuna blockchain potrà includere anche la transazione col primo, perché ciò creerebbe una contraddizione, e le richieste di transazione in contraddizione con la blockchain vengono respinte. Il primo negoziante avrà perso i suoi soldi, e il cliente scaltro avrà speso i suoi soldi due volte! Abbiamo dunque capito che è di fondamentale importanza stabilire qual è la catena giusta, qual è il futuro, qual è l'evento successivo, o il blocco di eventi successivi, altrimenti il bitcoin non regge.

Il processo, come detto, non è istantaneo. Quando un nodo riceve delle richieste di transazione, le organizza in blocchi. Ad ogni blocco è associato algoritmicamente un difficile problema di crittografia, che può essere risolto solo con la forza bruta, cioè provando tutte le combinazioni possibili. Il nodo mette al lavoro i suoi computer per trovare la soluzione. Solo quando riesce a risolvere quel problema può dire: "eureka! Ho veramente una catena lunga 101 blocchi!". A quel punto, la comunica ai nodi limitrofi.

Come vediamo, non è proprio facile aggiungere il centunesimo blocco. Prima di trovare la soluzione al problema di crittografia associato al centunesimo blocco, la catena è fatta di cento blocchi confermati, più un blocco non confermato. I primi cento blocchi sono equipaggiati con le soluzioni ai problemi di crittografia associati a ciascuno di loro (blocco 1 + problema 1 + sua soluzione, blocco 2 + problema 2 + sua soluzione, blocco 3 + problema 3 + sua soluzione, eccetera). Invece, l'ultimo, il

centunesimo blocco, è associato a un problema di crittografia non ancora risolto. Quando viene risolto anche quello, il nodo possiede una catena di 101 blocchi risolti.

Ma non basta. Se il nodo di Verona trova la soluzione al problema associato al suo centunesimo blocco, e qualcun altro, da un'altra parte del mondo, trova, più o meno nello stesso tempo, la soluzione al problema associato al *suo* centunesimo blocco, come si decide con quale blocco si va avanti?

Il problema di crittografia è studiato in modo tale che trovarne la soluzione sia molto difficile, e richiede un gran lavoro di computer. Il motivo è che non esiste alcuna alternativa alla forza bruta, quella che consiste nel provare tutte le possibilità, tentativo dopo tentativo. È come cercare di indovinare la password di un account, per hackerarlo. Non c'è altra via che provare tutte le combinazioni, che sono un numero enorme. Non esiste nessuna formula che permetta di arrivare alla soluzione di questi problemi in modo diretto.

D'altra parte, verificare che la soluzione sia corretta, una volta trovata, è facilissimo, e richiede una frazione di secondo. Anzi, verificare che le soluzioni dei problemi associati a *tutti* i blocchi della catena siano corrette richiede a un computer un tempo irrisorio.

Il grado di difficoltà del problema è studiato in modo che, con la potenza di calcolo che c'è nel pianeta, venga risolto un problema di questo tipo ogni dieci minuti circa, in media, da qualche parte nel mondo. Ovviamente, è possibile che ne vengano risolti due, o anche tre, di quei problemi, negli stessi dieci minuti, in giro per il mondo, o anche di più.

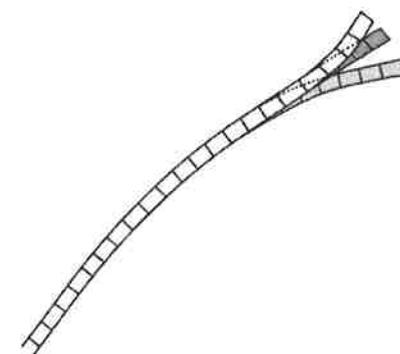
Cosa succede quando Verona riesce a risolvere il problema associato al suo centunesimo blocco? Lo comunica ai nodi limitrofi, i quali verificano subito la soluzione. A quel punto, abbandonano la loro catena (fatta di 100 blocchi risolti, più uno non ancora risolto) e adottano la catena ricevuta da Verona, fatta di 101 blocchi risolti, perché è più lunga, e quindi, come vedremo fra un attimo, ha più possibilità di essere "quella giusta". Fatto questo, ciascun nodo limitrofo aggiunge alla catena di 101 blocchi un certo centoduesimo blocco, fatto di nuove proposte di transazione, nell'ordine in cui le riceve, e inizia a cercare di risolvere il pro-

blema di crittografia associato a quello, per allungare la catena ancora di più.

A livello planetario, succede la cosa seguente. Verona va in giro dicendo di aver risolto il centunesimo blocco. Brescia e i nodi limitrofi lo verificano, adottano la soluzione e allungano la catena. Ma supponete che, nel frattempo, anche a Pechino risolvano il problema associato al loro centunesimo blocco, e lo comunichino ai loro nodi limitrofi. Inoltre supponete che, magari, anche a Mosca risolvano il loro centunesimo blocco, e facciano altrettanto. Avremo così tre catene da 101 blocchi risolti che si propagano per la rete internet del pianeta. Il ché vuol dire che il centunesimo blocco è ancora sub iudice, perché ci sono almeno tre candidati vaganti per la terra. Quale vincerà?

Tra i vari nodi del mondo si diffonderanno tanti serpenti con la stessa coda e lo stesso corpo, fino a cento blocchi, ma teste diverse. E si andrà avanti così, ad oltranza, ciascun nodo lavorando sulla sua catena, cercando di risolvere il problema di crittografia associato al suo centoduesimo blocco. Centoduesimo blocco che, ricordiamo, è diverso da nodo a nodo. Dopo un po', qualcuno risolverà il problema associato al suo centoduesimo blocco, e diffonderà una catena con 102 blocchi risolti ai nodi limitrofi. Così circoleranno per il pianeta serpenti lunghi 102, uguali fino a 100, ma con gli ultimi due blocchi diversi. E ciascuno si metterà a lavorare alla soluzione del problema associato al suo blocco 103, e così via.

Tanti serpenti con teste diverse e lo stesso corpo. Quale prevarrà? Quale stabilirà il futuro? Ciascuno va avanti con la catena più lunga di cui ha notizia, senza curarsi di quello che succede altrove. Se gli arriva comunicazione di due catene diverse della stessa lunghezza, e quella lunghezza è la più grande di cui abbia notizia, ne prende una a caso e lavora con quella. Se gli arriva comunicazione di un serpente più lungo di quello con cui sta lavorando, abbandona il proprio



e passa a quello. Adotta sempre il serpente più lungo che circola nella sua zona, o di cui ha notizia. Solo così può sperare di "vincere". E poi cerca di allungarlo ancora, aggiungendo un altro blocco, e cercando di risolvere il nuovo problema di crittografia associato ad esso. Le informazioni viaggiano per tutto il pianeta, certo, ma ci vuole tempo, come vediamo.

In soldoni, vince chi ce l'ha più lungo... Se ciascun nodo lavora al suo problema senza curarsi degli altri, e tutti adottano il serpente più lungo di cui abbiano notizia, e cercano di allungarlo ulteriormente, finisce che, dopo un po', per esaurimento, in tutto il pianeta ci saranno, sì, tanti serpenti con lo stesso corpo e teste diverse, ma avranno tutti lo stesso corpo fino al centunesimo blocco incluso! Non concorderanno più soltanto fino al centesimo blocco, ma fino al centunesimo blocco! E allora è fatta! Le catene alternative, che avevano diversi centunesimi blocchi, si saranno rinsecchite nel frattempo, saranno sparite per esaurimento, nel senso che non ci sarà più nessun nodo che lavora con quelle in tutto il pianeta. Saranno state abbandonate, perché non sono riuscite ad allungarsi abbastanza.

Alla fine della fiera, quale sarà il centunesimo blocco prescelto? Quello risultante da questo processo. Nessuno è in grado di prevedere in anticipo quale sarà, ma il meccanismo ne restituirà sicuramente uno. E si continuerà alla stessa maniera. Dopo un po', il pianeta sarà popolato da serpenti con teste diverse, ma lo stesso corpo fino al centoduesimo blocco incluso. E poi fino al centotreesimo. E avanti. Grazie a questa dinamica, il serpente si allunga "spontaneamente". La vostra transazione è confermata dopo circa un'ora, cioè dopo il tempo che, in base ad un calcolo matematico, è necessario affinché tutti i serpenti del pianeta differiscano, alla peggio, a partire dal blocco successivo a quello in cui si trova la vostra transazione.

Alla lunga di serpenti ne prevale soltanto uno, il più lungo, appunto. Tutti gli altri sono rami secchi, e vengono scartati. Quello che prevale definisce la realtà, le transazioni confermate. Il tutto, senza autorità superiore, senza Dio.

Riepiloghiamo la situazione. Nel pianeta si diffondono tanti serpenti,

tutti con lo stesso corpo, cento blocchi, ma diversi per la testa, dal centunesimo blocco in su. Ogni nodo ha il suo serpente, con una testa diversa. Se riceve comunicazione da un nodo vicino che esiste in giro un serpente più lungo, abbandona il suo, perché sa che il suo, più corto, ha meno probabilità di vincere, e adotta quello più lungo. E subito impacchetta altre richieste di transazioni in un blocco nuovo, lo aggiunge al serpente lungo e cerca di risolvere il nuovo problema crittografico associato a quel blocco. La difficoltà di questi problemi è praticamente sempre la stessa, per cui è inutile insistere a risolvere i problemi delle catene più corte, perché per allungare quelle e competere con quelle più lunghe bisognerebbe risolvere due o più problemi in un colpo solo, invece di uno. E ciascuno di essi è difficilissimo.

Ebbene, passata un'ora vedrete che i serpenti più brevi, quindi le catene più brevi, saranno sparite da tutto il pianeta, come dei rami secchi, e si continuerà con le catene più lunghe. Dopo circa un'ora tutte le catene rimaste in circolazione avranno ancora teste diverse, e corpi uguali, ma, facendo i calcoli, avranno tutte lo stesso corpo non solo fino al centesimo blocco, ma fino al centunesimo blocco compreso. Differiranno per il centoduesimo, magari, per il centotreesimo, eccetera, ma non più per il centunesimo, che sarà lo stesso per tutte, e dunque sarà "confermato definitivamente". Tutte le opzioni con un diverso centunesimo blocco saranno sparite durante quell'ora di tempo, tra i rami secchi abbandonati. E, dopo questa fatica, se la vostra transazione starà là dentro, cioè nel centunesimo blocco confermato, potrete considerarla conclusa. Altrimenti, dovrete aspettare un po' di più. Dopo altri dieci minuti, le uniche catene che sopravviveranno in tutto il pianeta avranno 102 blocchi tutti uguali. E dopo altri dieci minuti ne avranno 103 tutti uguali, e così via. Le teste delle catene saranno sempre diverse. Circoleranno sempre catene con cinque-sei blocchi potenzialmente diversi in testa, ma il numero di blocchi in comune a tutte crescerà gradualmente.

Il calcolo delle probabilità dice che, dopo circa un'ora, cioè dopo l'aggiunta di sei blocchi, sarete *praticamente* sicuri della conferma della vostra transazione. Cioè, per essere ragionevolmente sicuri che il centunesimo blocco, dove, supponiamo, si trova la vostra transazione, non

cambi più, bisogna aspettare che nel pianeta circoli una catena lunga 106 blocchi. E questo "ragionevolmente" vuol dire che non avrete una conferma assoluta, ma una conferma sufficiente per tutti i vostri scopi. A quel punto, infatti, se volessimo modificare il blocco 101 e sperare di giocarcela con le catene che circolano per il mondo, non ci basterebbe risolvere il problema del centunesimo blocco, ma dovremmo risolvere 6 problemi, quelli di tutti gli ultimi 6 blocchi. Si tratta di qualcosa che non si riuscirebbe ad ottenere, nel tempo richiesto, nemmeno con la potenza di calcolo di tutti i computer del mondo. Per questo motivo potrete essere *praticamente* sicuri che la vostra transazione sia effettivamente "avvenuta".

Vi potete chiedere: ma allora le transazioni non sono mai confermate al 100%? Supponete che nel pianeta stiano viaggiando delle catene lunghe 107 al massimo. Se esistesse un essere così potente da mettere in circolazione una catena lunga 123 blocchi (esageriamo...), ciascuno dei quali equipaggiato con la soluzione del suo problema crittografico, ebbene, quel qualcuno sbaraglierebbe tutte le altre catene in circolazione, in un attimo. Istantaneamente, i nodi che ricevono quella catena verificano che tutte le 123 soluzioni funzionano, abbandonano le catene su cui stavano lavorando fino a quel momento e adottano la nuova.

Impossibile? No, solo improbabile. La catena lunga 123 potrebbe essere diversa da quelle che stavano circolando prima in tutto e per tutto, non solo la testa. E quindi potrebbe riscrivere tutta la storia, la storia di tutte le transazioni, tutto il passato, a partire dal primo blocco. E non lo farebbe tornando indietro nel tempo, ma andando avanti nel tempo. Chi riuscisse a mettere in giro una catena del genere potrebbe appropriarsi di tutti i bitcoin del mondo.

Ecco perché le transazioni con il bitcoin non sono mai confermate al 100%. Però, un calcolo matematico dice che la difficoltà a risolvere questi problemi di crittografia, associati a ciascun blocco, è tale per cui riuscire a diffondere una catena che differisce dalle catene esistenti per più di sei blocchi è praticamente impossibile. Non impossibile in principio, ma impossibile praticamente, nemmeno impiegando tutte le risorse del

pianeta. Questa è l'unica cosa che vi può tranquillizzare quando fate una transazione di bitcoin: dopo un'ora, 10 minuti a blocco, il ché vuol dire sei blocchi, il negoziante che avete pagato con i bitcoin potrà spendere tranquillamente i vostri soldi in qualunque altra parte del mondo, perché in qualunque parte del mondo avranno una catena contenente la vostra transazione, e saranno ragionevolmente sicuri che quella transazione non sarà più smentita, cioè che i soldi ce li ha davvero lui. Però, non saranno mai sicuri al cento per cento.

Non esiste alcun intervallo finito di tempo oltre il quale una transazione passa definitivamente in giudicato, per cui dovete accontentarvi comunque di considerare la vostra transazione *quasi* definitiva, cioè definitiva *a tutti gli effetti pratici*. Per la vita di tutti i giorni, questo può andare più che bene.

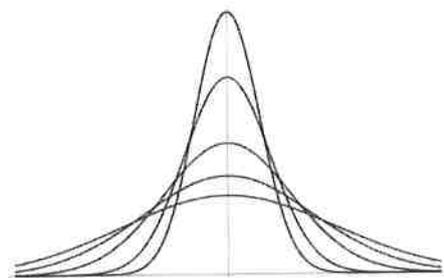
Ma può andare bene a chi vuole capire il mondo, come vorrebbe fare la filosofia? Se eleviamo dei "quasi" a principi universali non prendiamo solo abbagli? Il sospetto è che ciò che è accettabile a tutti gli effetti pratici non sia soddisfacente nel contesto di quella che vorrebbe essere la comprensione del "tutto", in base a fantomatici "principi primi". Non si è mai sentita una filosofia fatta di quasi, una filosofia del mondo poggiante su un logos incerto, indeterminato, sfocato. Non sarebbe una specie di ripiego? D'altra parte, il dubbio comincia a venirci: e se non ci fosse altra scelta? Se puntare troppo in alto, come si è fatto nel corso di tutta la storia, ci avesse restituito soltanto un pugno di mosche, come in effetti è accaduto?

Quanto detto per le transazioni di bitcoin vale anche per l'esistenza di questa penna, come per la realtà che ci circonda: a causa della sua natura intrinsecamente quantistica, la realtà non è mai confermata al 100%. Quella scintilla che voi vedete sullo schermo dopo che il fotone uscito dal laser ha attraversato la fenditura e completato il suo viaggio, non è mai una "scintilla al 100%". Siete voi che stabilite che lo è. È qualcosa che succede nel vostro cervello che stabilisce che è stata superata quella soglia oltre la quale quella cosa, qualunque cosa sia, si trasforma per voi in quella che chiamate percezione di una scintilla. Ma là, sullo schermo, non c'è nessuna scintilla e, soprattutto, non c'è nessuna con-

ferma definitiva di nessuna scintilla, di nessuna realtà, di nessuna percezione. Questa penna che ho davanti a me, quindi, esiste davvero? O non esiste? Essa esiste, ma esiste soltanto... quasi.

Detto in termini matematici, la virtualità del fotone, combinata con le virtualità degli atomi che costituiscono il rivelatore, o lo schermo, e poi con quelle degli atomi che costituiscono voi stessi, e tutta la natura, è pur sempre virtualità. Non esiste la possibilità di cancellare la virtualità completamente, per transire definitivamente alla realtà. Quindi quella che vediamo è solo una quasi realtà.

Torniamo alle nostre nuvole, che descrivono l'atomo nel durante, cioè la probabilità di trovarlo in ciascuna zona, qualora lo andassimo a cercare in quella. Possiamo immaginare la nuvola di un atomo che sta "qui"



come una curva a campana, del tipo mostrato in figura, concentrata "qui". Si tratta di una curva che ha un picco in una data zona, quella in cui troveremo la particella, mentre ha valori trascurabili, ma non nulli, in tutto il resto dell'universo. Più alta e stretta è la curva, più precisa è la misura della posizione. Per completare la transizione e confermare in assoluto che l'atomo è qui dove lo vedo, uno strumento di misura dovrebbe "aspirare completamente" la funzione d'onda, cioè la nuvola, da tutto il resto dell'universo, e concentrarla qui davanti a noi. Le equazioni della meccanica quantistica dicono che una funzione d'onda nulla in una zona, è sempre stata nulla in quella zona, e sempre sarà nulla, tranne sporadiche singolarità temporali. Ma quelle singolarità dovrebbero essere ottenute da un processo ideale di limite, che non si può raggiungere con un rivelatore fatto di un numero finito di atomi. A partire da *qualsunque* stato iniziale, il rivelatore dovrebbe riuscire ad aspirare esattamente la nuvola da tutto il resto dell'universo, tranne la zona in cui vediamo il segnale della presenza della particella. Cioè, il rivelatore dovrebbe adattarsi perfettamente alla nuvola della particella che sta per osservare. Per cui, se spostiamo la particella di un po', dovrebbe non

segnalare niente, o riconfigurarsi interamente per ripetere il miracolo anche in quel caso. Un rivelatore di quelli che usiamo in laboratorio non incontra tutte queste difficoltà a rivelare una particella. Pertanto, quella che noi chiamiamo comunemente *osservazione* non può essere l'idealizzazione in cui la nuvola viene aspirata esattamente da tutto il resto dello spazio. E se la nuvola è una curva a campana, per quanto stretta e alta, allora continua ad avere una coda anche altrove, dove non "vediamo" nessuna particella. Vuol dire che c'è sempre la possibilità di veder sparire la particella da dove la stiamo vedendo per vederla riapparire di là.

Non solo, ma per fare in modo che il dopo raggiunga l'esistenza in modo assoluto, dovremmo essere anche in grado di misurare il tempo con precisione assoluta, perché la singolarità temporale di cui parliamo è anche concentrata in un istante preciso, e solo quello. La gravità quantistica basata sull'idea di particella puramente virtuale esclude questa possibilità, per via del limite Δ di cui abbiamo parlato prima. Insomma, richiedere che la realtà esista in modo assoluto, definitivo, genera una spirale di problemi da cui non si esce. Il tutto per insistere a credere che la transizione dal virtuale al reale avvenga in modo completo, quando non ce n'è alcun bisogno per spiegare le nostre percezioni. Come non c'è bisogno di transazioni definitive per fare acquisti e vendite per mezzo del bitcoin. Una volta che ci siamo convinti, con l'aiuto del bitcoin, che si può tranquillamente convivere con le "quasi transazioni", ci possiamo anche convincere che si può convivere con le "quasi transizioni", cioè che non c'è bisogno dell'"esistenza assoluta" della realtà, ma basta la "quasi realtà". E allora diventa tutto più facile. Meno elegante, forse, per gli adoratori del logos, ma più chiaro e facile per tutti gli altri, quelli che il logos...

Quindi, la realtà è soltanto una "quasi realtà sopra una certa soglia". Non potendo aspirare la funzione d'onda completamente da tutto l'universo, per concentrarla in un punto preciso, risultato che potrebbe essere raggiunto solo come processo di limite e richiederebbe un rivelatore fatto di un numero infinito di atomi, ci accontentiamo di aspirare la nuvola quel tanto che basta per concentrarla oltre una certa soglia at-

torno ad un punto approssimato, la soglia oltre la quale scatta in noi la percezione che chiamiamo "realtà". E questo è un risultato che può ottenere anche un rivelatore fatto di un numero finito di atomi.

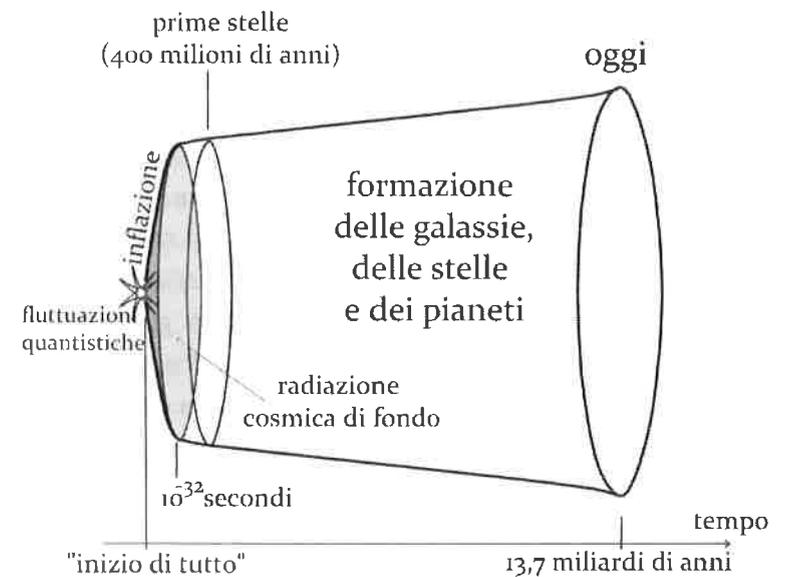
Concludendo, la realtà che ci circonda non esiste perché un Dio le dà esistenza. E siccome non esiste un'entità superiore che dà esistenza alle cose, mettendo istantaneamente d'accordo tutto l'universo, l'esistenza effettiva richiede una sospensione della realtà. Inoltre, la conferma dell'esistenza non è mai definitiva. Anche in questo istante la penna che ho davanti agli occhi è sub iudice, almeno un po'. Anche adesso la sua nuvola ha una coda sparpagliata per il resto dell'universo. Nella fisica quantistica, la realtà che ci circonda non è mai reale al cento per cento, ma è soltanto una quasi realtà.

E se vi piacesse portare il discorso alle estreme conseguenze, dovrete pensare che nell'universo potrebbe esistere un essere così potente, ma non necessariamente onnipotente, da diffondere nel mondo una "blockchain alternativa" della realtà, cioè un'altra storia passata dell'universo stesso, più "lunga" della storia a cui siamo arrivati fino a questo istante e diversa in tutto il passato che noi crediamo di aver già vissuto. Quell'essere potrebbe così "riprogrammarci" tutti all'istante, riscrivendo il nostro passato, comprese le memorie racchiuse nel nostro cervello, quelle che ci fanno credere di avere fissato il passato definitivamente nella nostra memoria. Se esistesse un essere così potente (e, ripeto, non è nemmeno necessario che sia onnipotente; basta solo che sia molto potente), quell'essere potrebbe disfare la catena degli eventi che ci ha portato a credere che esista questa penna, che esista quello che ci circonda, e che abbiamo effettivamente vissuto quello che pensiamo di aver vissuto. Potrebbe "disfare tutto", sciogliere la catena fatta dagli eventi passati per sostituirla con una catena di eventi alternativa, che riparte magari da un certo tempo passato e segue un'altra strada. Non solo tutto questo è possibile, ma non potete nemmeno escludere che succeda, che sia successo, che continui a succedere in tutti gli istanti. Voi non potete escludere che in tutti gli istanti della vostra vita un qualche essere potente, e nemmeno onnipotente, stia riprogrammando e riscrivendo tutti gli eventi che vi riguardano, senza soluzione di conti-

nuità, a suo piacimento, riformattando tutta la catena passata, comprese le memorie dentro il vostro cervello, quelle memorie che vi fanno credere che gli eventi passati della vostra vita siano effettivamente accaduti.

Con queste osservazioni credo e spero di avervi dato un'idea di "che cosa è la realtà", di quanto "fermo" sia ciò che noi consideriamo stabile e certo. Non ci è nemmeno concesso essere sicuri che esista quel che crediamo di vedere e che ci sta davanti agli occhi! Qualsiasi realtà, infatti, potrebbe essere smentita, "disfatta", e sostituita da una realtà alternativa. E non andando indietro nel tempo, cosa impossibile, ma continuando ad andare avanti nel tempo! Facendo e disfacendo la tela, come Penelope.

15 L'espansione dell'universo: come emergono le leggi fisiche dal caos



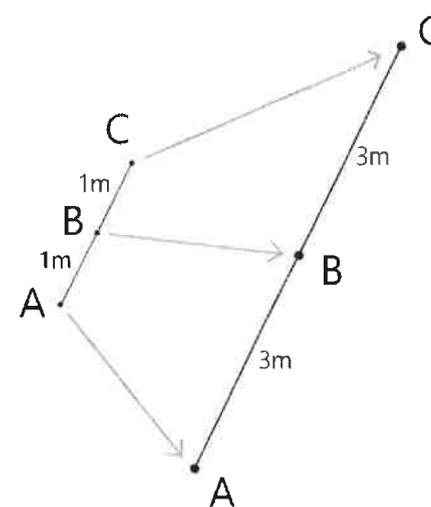
La figura qui sopra sintetizza le fasi principali della vita dell'universo. Vogliamo ripercorrerle per rispondere ad una sfida lanciata da Antonino Zichichi, cioè ricavare le leggi della fisica dal caos. Zichichi dice: "Ci sono persone che è da anni che studiano come derivare le leggi fondamentali dal caos. Non sono riusciti a combinare nulla, e sono sicuro che non

combineranno mai nulla. Nessuno riuscirà mai a dedurre dal caos la logica di colui che ha fatto il mondo, che vuol dire la scienza di oggi. Perché io credo in colui che ha fatto il mondo? Perché esiste una logica. E questa logica deve avere un autore. Se non fosse per questa logica non avrei altro modo per convincere un mio amico, in buona fede ateo, a concludere la sua attività intellettuale riconoscendo che l'esistenza di una logica esige l'esistenza di un autore. E chi è l'autore? Colui che ha fatto il mondo. Ecco perché io credo a colui che ha fatto il mondo".

Per Zichichi le leggi fisiche che abbiamo scoperto nel corso dei secoli, e di cui abbiamo dato vari esempi nei capitoli precedenti, sono il segno che nel mondo "esiste una logica". E se esiste una logica, dice, quella logica deve avere un autore, che possiamo chiamare, a quel punto, "colui che ha fatto il mondo". Non so perché il caos non abbia bisogno di un autore, secondo Zichichi. Bisognerebbe chiederglielo. Forse perché il creatore del caos sarebbe da considerare un grande pasticciatore. Se ne deduce che a Zichichi non piacciono i creatori del mondo pasticciatori. Ma non è questo il punto del nostro discorso. Vogliamo dimostrare che ricavare le leggi della fisica dal caos è la cosa più semplice di questo mondo. Ed è anche il contenuto, per certi versi scontato, di un teorema matematico. Tanto che un espediente del genere, cioè ricavare uniformità, regolarità dal caos, è usato oggi nella cosmologia, per spiegare qualcosa che ha a che vedere con la storia del nostro universo, che altrimenti sarebbe inspiegabile. Cioè, è già impiegato in quella "logica" che Zichichi identifica con la scienza di oggi. Raccogliamo dunque la sfida di Zichichi a ricavare le leggi della fisica dal caos.

Se guardate il cielo, oltre le stelle e le galassie, non trovate il buio completo. Trovate una "radiazione cosmica di fondo", pari a 2,725 gradi Kelvin circa. Si tratta di una temperatura abbastanza vicina allo zero assoluto. Ricordiamo che, poiché la temperatura misura il movimento microscopico, lo zero assoluto (0 gradi Kelvin) è la temperatura dell'immobilità, quella in cui le particelle sono ferme, o, come si dice, a riposo. Per confronto, le temperature di congelamento e di ebollizione dell'acqua, note anche come 0 e 100 gradi Celsius, secondo la scala che usiamo comunemente, corrispondono a 273,15 e 373,15 gradi Kelvin, rispetti-

vamente. La temperatura della radiazione cosmica di fondo, che poi vuol dire la sua densità di energia (a meno di un fattore moltiplicativo che qui non interessa), è data dal numero riportato sopra, 2,725 gradi Kelvin. La cosa sorprendente non è il valore di quel numero in quanto tale. La cosa sorprendente è che quel numero è lo stesso in qualunque direzione voi guardiate. A parte delle piccolissime fluttuazioni, originate da altrettante fluttuazioni quantistiche primordiali, la radiazione cosmica di fondo è sostanzialmente omogenea e isotropa. I punti dell'universo verso cui dirigete la strumentazione che misura questa densità di energia possono essere anche lontanissimi tra loro, ma il risultato che otterrete sarà sempre lo stesso: 2,725 gradi Kelvin. La domanda che qualcuno si potrebbe porre, legittimamente, è: "come fanno, quei punti così lontani tra loro, a sapere ciascuno dell'altro?" È evidente che devono essere stati relazionati in passato in qualche modo. Devono avere comunicato, essere stati in qualche tipo di contatto: qualcosa deve averli "messi d'accordo", omogeneizzandoli. Il fatto che il valore della temperatura della radiazione cosmica di fondo sia comune a tutti i punti si potrebbe spiegare facilmente se fossero emanazione di un'origine comune. Il problema è rendere questa ipotesi compatibile con altri fatti che ora analizziamo, che sembrano dire il contrario.



modo. Notiamo che il segmento AB è un po' spostato rispetto al seg-

Spieghiamo ora brevemente un aspetto geometrico importante dell'espansione dell'universo. Supponiamo di avere tre punti A, B e C lungo una linea retta, e che la distanza tra A e B sia inizialmente uguale a un metro, così come la distanza tra B e C. Facciamo ora passare un secondo, e supponiamo che in quel secondo l'universo si espanda. Allora le distanze tra i punti cambiano in qualche

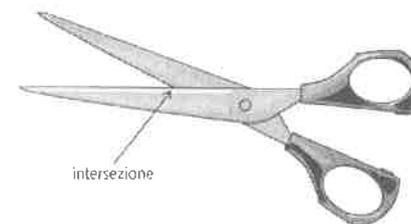
mento BC, ma è lungo quanto BC e diretto come BC. Se l'universo è *omogeneo*, l'espansione non deve dipendere da dove ci troviamo, cioè i suoi effetti sui segmenti AB e BC dovranno essere gli stessi. Pertanto, se supponiamo che dopo un secondo i punti A e B siano separati da tre metri, anche i punti B e C saranno separati da tre metri. Ne concludiamo che la distanza tra A e B aumenta di due metri in un secondo, per cui possiamo dire che la velocità media di *questa* espansione è due metri al secondo. Anche la distanza tra B e C aumenta di due metri, e quindi anche la velocità media dell'espansione con cui si allontanano B e C è pari a due metri al secondo. Notate ora una conseguenza importante di questi fatti: in un secondo la distanza tra A e C passa dagli iniziali due metri a ben sei metri! La differenza fa quattro metri, quindi la velocità media con cui si allontanano i punti A e C è ben quattro metri al secondo, non due metri al secondo: la coppia AC si espande a velocità doppia rispetto alle coppie AB e BC! Questo vuol dire che l'espansione di punti lontani tra loro, come A e C, è più veloce dell'espansione di punti vicini tra loro, come A e B. Più precisamente, la velocità di espansione è proporzionale alla distanza tra i punti.

Questo pone un grosso problema, perché, se la velocità di espansione è proporzionale alla distanza tra i punti, vuol dire che, se due punti distanti un chilometro si espandono a una certa velocità v , allora due punti distanti cento chilometri si espandono alla velocità $100v$, e due punti distanti mille chilometri si espanderanno alla velocità $1000v$, e avanti di questo passo. Ma se continuiamo così otteniamo velocità relative arbitrariamente alte, anche maggiori della velocità della luce. Con questo ragionamento dimostrate subito, in sostanza, che, se l'universo si espande, per quanto lentamente, è sempre possibile trovare punti sufficientemente lontani tra loro che si stanno già allontanando ad una velocità maggiore di quella della luce. Se vogliamo chiederci quali punti dell'universo siano, siano stati, o saranno mai in relazione, per spiegare l'omogeneità della radiazione cosmica di fondo, dobbiamo tenere conto delle difficoltà create da quanto appena detto.

Qualcuno obietterà che non si può superare la velocità della luce (se non nella virtualità, ma non è questo ciò di cui stiamo parlando qui)

e quindi l'espansione dell'universo è impossibile. C'è qualcosa che non quadra. Bisogna stare attenti a come si applica una legge fisica, perché la possibilità di errore è sempre dietro l'angolo. Il punto è che quella di cui stiamo parlando, a proposito dell'espansione dell'universo, è una velocità "geometrica", non una velocità fisica, per cui può tranquillamente essere maggiore di quella della luce. Ed è un tipo di velocità ancora diverso da quella con cui, nei nostri esperimenti con i quanti, si propaga la virtualità. Invece, la velocità di un segnale con cui vorremmo stabilire una qualche comunicazione, è una velocità fisica: *quella* non può superare la velocità della luce.

La velocità geometrica non è la velocità di propagazione di segnali fisici, ma soltanto la velocità astratta di punti geometrici. I segnali fisici (definiti come lo scambio di qualcosa di fisico, reale, che viaggia



da un punto all'altro, come la luce, o la materia) possono propagarsi al massimo alla velocità della luce, mentre i punti geometrici astratti non sono soggetti a questo vincolo. Per capire questo fatto basta pensare alle forbici. Avrete sicuramente notato che il punto geometrico di intersezione tra le due lame, illustrato nella figura, si muove ad una velocità molto alta, ogni volta che tagliate. Ed è più veloce quanto più ci allontaniamo dal fulcro. Pensate ora alle forbici come oggetti geometrici, non come oggetti fisici. Così facendo, potete immaginare di avere delle forbici dotate di lame arbitrariamente lunghe. Quando chiudete queste forbici astratte, il punto di intersezione tra le lame può arrivare a muoversi a velocità arbitrariamente alte, in zone sufficientemente lontane dal fulcro. Tuttavia, non si tratta di un oggetto materiale che si sposta, ma di un semplice punto geometrico, definito come l'intersezione tra due rette. Quindi, il fatto che alcuni punti geometrici si allontanino a velocità geometrica maggiore di quella della luce non è qualcosa di sorprendente, e non rende impossibile l'espansione dell'universo, che è, appunto, un'espansione geometrica, perché non comporta scambi di

materia o luce tra le varie zone.

A causa di proprietà come queste, si può dimostrare, con qualche sforzo in più, per tenere conto della storia passata dell'universo e della probabile evoluzione futura, che ci sono punti nell'universo con cui non potremo mai comunicare, né abbiamo mai potuto comunicare in passato (dall'istante chiamato "inizio di tutto" nella figura¹³). Se l'espansione non si arresta, per qualche motivo, o procede a un ritmo diverso da quello che oggi ci mostrano i dati, quelle zone di universo rimarranno a noi inaccessibili: escluse da sempre, e perse per sempre. Dobbiamo pensare al nostro "universo visibile", cioè la parte di universo con cui potremo, o abbiamo mai potuto, venire in contatto, come un granellino di sabbia nel deserto del Sahara, che è fatto a sua volta di miliardi e miliardi di granellini di sabbia.

Si dice che esistono zone "causalmente disconnesse" nell'universo. I punti di quelle zone non possono essere collegati da relazioni di causa ed effetto, né possono esserlo mai stati. La ragione è l'espansione dell'universo, combinata col fatto che una "causa", di qualunque natura fisica essa sia, non può trasmettere i suoi effetti più velocemente della luce. Siamo collocati in un granellino di sabbia, e possiamo supporre che esistano tantissimi altri granellini di sabbia al di fuori del nostro, cioè oltre a quello che ci è, ci è mai stato, o ci sarà mai, accessibile. Esistono tanti altri universi visibili (ad altri esseri, collocati in quelli), oltre a quello visibile a noi. Dobbiamo dunque distinguere l'universo visibile a noi dall'"universo totale", se così vogliamo chiamarlo, fatto di zone che non sono in comunicazione tra loro, né tramite segnali di luce, né tramite segnali fisici di altro tipo. Mentre l'universo visibile è finito, l'universo totale può essere infinito.

Nell'immagine che vediamo nella pagina seguente il tempo scorre da sinistra a destra. Le sezioni verticali, cioè i cerchi, rappresentano l'universo visibile al variare del tempo. Come vediamo, la sezione si ingrandisce, procedendo dal passato al futuro. Questo ingrandimento de-

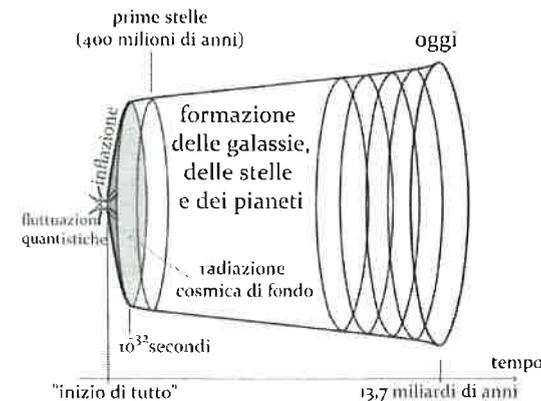
¹³ E esso va inteso come l'inizio della parte di storia dell'universo che vogliamo raccontare. Prima di quell'istante può esserci stato comunque un passato. Si noti anche che non è necessario assumere che ci sia stato un *big bang*.

scrive l'espansione dell'universo.

La sezione si ingrandisce, è vero, ma si ingrandisce molto lentamente, almeno nella zona centrale e in quella a destra. Ora, per spiegare l'omogeneità e l'isotropia della radiazione cosmica di fondo che vediamo oggi, ci si deve chiedere quando i punti che noi osserviamo nel cielo, oltre le stelle, e oltre le galassie, cioè i punti del sottofondo "buio", abbiano mai comunicato tra di loro in passato, ammesso che lo abbiano fatto. Oggi sono talmente lontani tra loro che non è per niente ovvio che siano stati abbastanza vicini in qualche tempo passato da relazionarsi in qualche modo, per "mettersi d'accordo", cioè omogeneizzarsi fino ad avere tutti la stessa densità di energia, quella che misuriamo oggi.

L'universo che vediamo non ha un passato infinito. La sua età è pari a circa 13,7 miliardi di anni. Studiando la sua evoluzione a ritroso nel tempo (risolvendo le relative equazioni mediante programmi numerici al computer), si può fare un calcolo abbastanza preciso per verificare se, durante il passato, i punti del sottofondo buio abbiano potuto effettivamente scambiarsi dei segnali di qualunque tipo, magari segnali luminosi. Cioè, siano mai stati in qualche tipo di relazione fisica, non solo virtuale o geometrica. Questa è la condizione minima, necessaria, ma non sufficiente, affinché si siano potuti omogeneizzare.

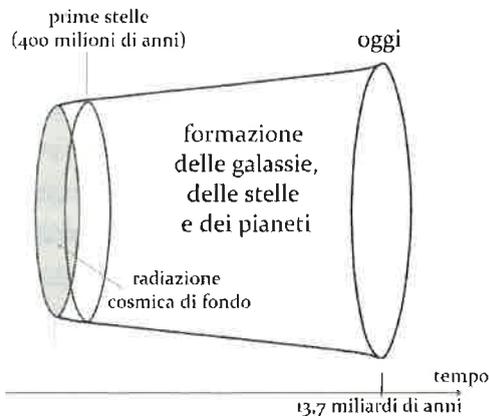
In definitiva, la condizione minima affinché l'omogeneizzazione, che dovrebbe spiegare l'omogeneità della radiazione di fondo che osserviamo oggi, sia effettivamente avvenuta, in qualche momento passato della storia universale, qualunque momento esso sia, è che i punti del sottofondo buio del cielo siano stati collegabili da segnali luminosi. Qualora si dovesse escludere la propagazione di ogni tipo di segnale tra quei punti, e la si potesse escludere anche per tutto il loro passato, la



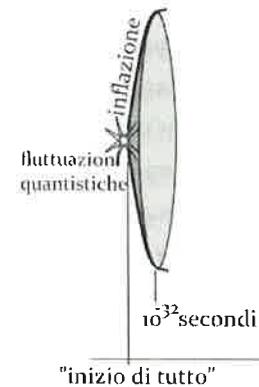
ragione per cui oggi vediamo una radiazione di fondo così omogenea resterebbe un mistero. Dovremmo forse concludere che si tratta di una colossale coincidenza? O di un "complotto" universale ai nostri danni, ordito per prenderci in giro, per farci credere a una cosa così improbabile? Insomma, se quei punti hanno avuto tutti "la stessa origine", si può spiegare perché oggi troviamo la stessa temperatura in qualunque direzione guardiamo. Ma se si scoprisse che non è così, cioè che non sono mai stati in relazione tra loro, dobbiamo inventarci qualcos'altro.

Consideriamo l'espansione recente dell'universo, rappresentata dai cerchi che stanno nella parte destra della figura di prima. Come detto, è un'espansione relativamente lenta. Quei cerchi descrivono il passato prossimo, la fase più vicina al nostro presente, quella in cui si formarono le stelle e le galassie. Se immaginiamo che l'espansione sia stata altrettanto lenta anche nel passato remoto, e così via a ritroso fino a ciò che

ha originato la radiazione cosmica di fondo che vediamo oggi, si arriverebbe a un disco grande come quello grigio. Ma sarebbe ancora troppo grande. Infatti, prolungando l'analisi ancora all'indietro, si trova che non ci sarebbe stato abbastanza tempo, prima di allora, per mettere in comunicazione tutti i punti di quel disco! In definitiva, partendo da un tasso di espansione come quello attuale, e prolungandolo indietro nel tempo, in base alle leggi note, fino a ciò che ha originato la radiazione cosmica di fondo che vediamo oggi, e poi spingendosi a prima di quella, non è possibile spiegare come mai punti così lontani tra loro, che oggi osserviamo al di là delle stelle e delle galassie, abbiano tutti la stessa identica temperatura, in qualunque direzione li guardiamo. L'omogeneità e l'isotropia della radiazione di fondo rimangono apparentemente inspiegabili: tante zone che vediamo non possono aver *mai* comunicato attraverso *alcun* tipo di



segnale, perché sono *sempre state* troppo lontane. Se non possono aver comunicato alla massima velocità possibile, la velocità della luce, non possono aver comunicato per niente.



E allora, che cosa fa o ha fatto in modo che oggi abbiano la stessa temperatura? E qui entra in gioco la spiegazione di cui parlavo prima, e cioè l'idea di dedurre l'ordine dal caos. Si ipotizza che il passato, per la precisione la parte di passato appena successiva all'"inizio", sia consistita di una fase, chiamata inflazione primordiale, di straordinaria espansione accelerata, per cui tutti i punti che noi vediamo oltre le stelle e le galassie siano stati originati non da un disco esteso

come quello grigio visto sopra, ma da un disco molto più piccolo, un dischetto, una zona infinitesima. Se ingigantite il granellino di sabbia che è il nostro universo visibile fino a farlo diventare grande come il deserto del Sahara, allora quella zona infinitesima sarebbe un granellino di sabbia in quel granellino di sabbia ingrandito. Per la precisione, sarebbe grande qualcosa come un miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di centimetro. Tutto ciò che vediamo e mai vedremo è l'ingrandimento di un universo così minuscolo.

Cioè, occorre aggiungere all'espansione lentissima che otteniamo prolungando all'indietro l'espansione che vediamo oggi, una fase antecedente, brevissima, fatta di un'espansione tremendamente veloce, ed accelerata, che ha ingrandito un puntino infinitesimo fino a portarlo al disco grigio di prima,



che poi ha continuato ad espandersi, molto più lentamente, fino a dare quello che oggi è il nostro universo visibile.

Immaginate che l'universo totale sia un piano, e che il nostro universo, cioè l'universo visibile, sia inizialmente un dischetto su quel piano. Immaginate poi che quel dischetto sia sottoposto ad un processo di ingrandimento colossale, suddiviso in due fasi. La prima fase consiste nell'espansione primordiale, rapidissima. La seconda è un'espansione lentissima, che continua ancora oggi. Veniamo così a trovarci, noi e tutto l'universo che vediamo intorno a noi, in uno "spazio" che non è altro che un dischetto ingrandito a dismisura, e pur sempre un granellino di sabbia sul piano dell'universo totale.

A questo punto è molto più facile spiegare la regolarità e l'uniformità della radiazione cosmica di fondo, quand'anche l'universo totale fosse il caos più assoluto. Supponete infatti che nell'universo totale, il piano di cui abbiamo parlato, tutte le zone siano diversissime, senza nessuna regola, relazione o uniformità. Insomma, immaginate la confusione più totale, il caos. È ben possibile che all'interno di quel caos ci siano delle piccole zone, come il dischetto da cui ha tratto origine il nostro universo, nelle quali ha luogo, per puro caso, qualche forma di regolarità, qualche uniformità, qualche isotropia. Perché? Perché stiamo parlando di zone piccolissime. Per quanto caotica sia la totalità, ci saranno pure delle zone infinitesime relativamente omogenee e regolari. Se andiamo a ingrandire un'area infinitesima, insomma, è ben possibile trovarci della regolarità e dell'uniformità, anche senza un particolare motivo. Certo, ci saranno tantissime zone in cui, per quanto scendiamo nel piccolo, troveremo sempre caos, caos e poi ancora caos. Ma proprio perché nel caos non c'è nessuna regola, ci devono essere anche zone di relativa regolarità. Se il nostro universo è l'ingrandimento di una di quelle, ecco spiegata l'uniformità e la regolarità dal caos.

Questo è l'espedito che si usa in cosmologia per spiegare l'isotropia e l'omogeneità della radiazione cosmica di fondo. Sostanzialmente, usiamo l'idea che noi ci troviamo all'interno dell'ingrandimento di un dischetto che una volta era infinitesimo. L'unica ragione per cui vediamo nell'universo una radiazione cosmica di fondo isotropa

e omogenea è questa. Non richiediamo affatto che nel resto del piano, cioè l'universo totale, ci siano o ci siano state uniformità e omogeneità, isotropia e regolarità. Non ce n'è alcun bisogno. E non farebbe alcuna differenza, perché non saremo, né siamo mai stati, in comunicazione con quello. Come vedete, è relativamente facile ricavare la regolarità dal caos. Basta pensare che qualunque situazione caotica iniziale ci sia stata, il presente sia l'ingrandimento colossale di una sua piccolissima parte.

Se volete estendere questo ragionamento a tutte le leggi fisiche, lo potete fare. Chi ci garantisce che in tutti i granellini di sabbia che costituiscono i vari "universi visibili", cioè le zone causalmente connesse al loro interno, ma causalmente disconnesse le une dalle altre, valgano le stesse leggi fisiche? Nessuno. Infatti, se l'universo continua ad espandersi come sembra, non potremo saperlo, perché non potremo mai comunicare con gli altri granellini di sabbia, cioè gli ingrandimenti degli altri dischetti di quel piano, l'universo totale. Sempre che quelli si siano ingranditi effettivamente, perché l'ingrandimento è una legge fisica. Chissà che fine hanno fatto, se negli altri dischetti valgono leggi fisiche diverse.

Ricordate che le nostre leggi fisiche, quelle che noi chiamiamo leggi fisiche, non sono altro che la constatazione di certe regolarità, ripetitività, e la loro traduzione in un linguaggio matematico. Noi osserviamo intorno a noi delle regolarità e le codifichiamo con delle formule che chiamiamo leggi fisiche. Se io lascio cadere una penna e osservo che cade sempre allo stesso modo, noto una regolarità, una ripetitività, e la codifico con una legge fisica. In questa porzione di universo, la nostra, constatiamo regolarità di un certo tipo, come l'uniformità e l'isotropia della radiazione cosmica di fondo, e ne prendiamo nota mediante formule. Sono regolarità che noi osserviamo qui. Ma questo non vuol dire affatto che nell'universo totale ci sia la stessa isotropia e la stessa omogeneità, cioè la stessa regolarità. E non vuol nemmeno dire che ci sia quella stessa ripetitività di fenomeni che nel nostro universo visibile chiamiamo "leggi fisiche". Questo per farvi capire che dedurre dal caos quello che si vuole è più facile di quanto si possa pensare. Ogni regolarità o ripetitività, per quanto prolungata essa sia, può essere sempre vi-

sta come il colossale ingrandimento di una porzione infinitesima dell'irregolarità, cioè del caos.

Pertanto, la sfida di Zichichi cade nel vuoto. Non c'è nessuna prova, insomma, che la ripetitività dei fenomeni che sperimentiamo osservando l'universo nel quale siamo calati dimostri l'esistenza di una "logica" nel mondo. Non sono sufficienti le nostre leggi fisiche per trarre questa conclusione. Anche perché sono soltanto nostre narrazioni della natura. Nessuna legge fisica sarà mai sufficiente a trarre quella conclusione. Pensare che ci sia una logica nella natura è un atto di fede.

Quella che noi chiamiamo logica è semplicemente la traduzione della ripetitività di certi fenomeni, o percezioni, in un linguaggio che ci è familiare. Se fosse stato diversamente, avremmo codificato quella diversa ripetitività con delle leggi fisiche diverse. Probabilmente in molte zone dell'universo a noi inaccessibili hanno luogo ripetitività di tipo diverso, cioè valgono diverse leggi, codificabili con logiche diverse.

La possibilità di ricavare la regolarità dal caos, l'idea che l'ordine non sia altro che un piccolo intervallo di ripetitività nel caos, era stata esposta da Nietzsche nell'aforisma 130 di "Aurora, Pensieri sui pregiudizi morali", che si intitola "Fini? Volontà?". In quello, Nietzsche immagina l'universo come una sequenza infinita di getti di dadi, senza senso e senza scopo, senza "logica". Un po' come il caos, insomma. Si rende subito conto che, anche se partiamo da questo assunto, dovranno capitare, nel gioco infinito dei getti di dadi, sequenze di risultati che assomiglino perfettamente al finalismo e alla razionalità di ogni grado. Cioè, alla regolarità. E non assomiglino a quella di poco, ma quanto si voglia. Questo, infatti, è anche il contenuto di un teorema matematico.

"Le mani di ferro della necessità – dice Nietzsche –, che scuotono il barattolo dei dadi, giocano per un tempo infinito il loro gioco: dovranno allora capitare getti di dadi che assomiglino perfettamente alla finalità e alla razionalità di ogni grado." E continua: "Forse i nostri atti volontari, i nostri fini, non sono altro che tali getti di dadi - e noi siamo soltanto troppo limitati e troppo vanitosi per comprendere la nostra estrema limitatezza: cioè, che siamo noi stessi a

scuotere il barattolo dei dadi, con mani di ferro, e che noi stessi, nelle nostre azioni più deliberate, non facciamo altro che giocare al gioco della necessità."

Vediamo che Nietzsche intuisce che dal caos si può ricavare la regolarità. Non un barlume qualunque di regolarità, ma ogni ordine e grado di regolarità si voglia. Se considerate una sequenza infinita di "getti di dadi", cioè di eventi casuali, senza senso e senza scopo, eventi di vero caso, come quello che solo i quanti possono dare, dovranno, prima o poi, capitare sequenze di getti di dadi arbitrariamente lunghe ed arbitrariamente regolari. Per esempio: sequenze omogenee, isotrope, ripetitive, sequenze regolari nel senso che più piaccia a voi, che obbediscano a tutte le leggi fisiche che volete voi, qualunque cosa voglia dire "regolarità": qualunque cosa.

Di nuovo, ricavare quello che si vuole dal caos è la cosa più facile di questo mondo. Basta soltanto pensare che noi siamo collocati in una piccola isola di regolarità, una piccola sequenza regolare all'interno del caos universale. Basta pensare, come si fa nella cosmologia, che il nostro universo, quello che noi consideriamo così grande, sia in realtà piccolissimo, che sia un colossale ingrandimento di un piccolo punto nella totalità. E allora, quella totalità può tranquillamente essere il caos.

Dicevo all'inizio che non capivo perché il caos non abbia bisogno di un creatore, nell'argomento di Zichichi, e perché soltanto le leggi fisiche, secondo lui, ne abbiano bisogno. La realtà è che nemmeno le leggi fisiche hanno bisogno di un creatore. Esse possono tranquillamente provenire dal caos. E abbiamo visto che l'idea, lungi dall'essere peregrina come si potrebbe pensare superficialmente, è già adottata in fisica, precisamente nella cosmologia primordiale, per spiegare la regolarità e l'isotropia della radiazione cosmica di fondo.

E allora, immaginiamo appunto che l'universo totale sia quest'immenso caos. Se si vuole davvero arrivare all'idea di un creatore, si dovrebbe concludere che il caos ha avuto un creatore un po' confuso. Ci può piacere o meno l'idea di un creatore pasticcione, ma la conclusione che un autore ci debba essere, per quanto pasticcione, è comunque una

conclusione per nulla banale. Possiamo davvero concludere che c'è un creatore, caos o non caos?

Uno potrebbe partire dall'osservazione che, al di là di tutto quello che si possa mai dire, la realtà esterna comunque esiste. Che essa sia logica o illogica, razionale o irrazionale, ordine, caos o caso, che abbia un fine o meno: essa esiste. Qualunque cosa siano queste benedette leggi della natura, qualunque cosa sia quel che esiste, esso esiste! Punto. Pertanto, se esiste, ha bisogno di un creatore, secondo il procedere di Zichichi. O no?

È il momento di ricordare che nella teoria dei quanti la realtà è in sospeso, nel durante. Nella lezione precedente abbiamo spiegato anche che la realtà del prima e del dopo non è veramente reale, ma quasi reale. La transizione dalla virtualità alla realtà non è mai completa, perché è dovuta all'interazione micro macro tra il sistema elementare che vogliamo osservare, per esempio un atomo, e il rivelatore macroscopico, che è fatto di un numero finito di atomi. Senza il rivelatore, l'atomo rimarrebbe virtuale e libero, in eterno. Ma il punto cruciale è che, combinando un numero finito di virtualità, quella dell'atomo che vogliamo osservare e quelle degli atomi del rivelatore, e di noi stessi, non è possibile eliminare la virtualità ovunque tranne che nella zona in cui si manifesta l'atomo quando lo riveliamo. È possibile ridurla, ma non eliminarla completamente.

Per questo motivo, il collasso della virtualità non può essere un collasso assoluto. Può essere al massimo un collasso approssimato, sufficiente però a generare in noi quella che poi chiamiamo percezione. E la nostra percezione non ha bisogno di un collasso assoluto, ma le basta un collasso "oltre soglia". Cioè, basta che il collasso approssimato superi una certa soglia, determinata dal funzionamento di noi come esseri viventi. L'evoluzione ci ha costruiti, plasmati, diciamo così, in modo da farci chiamare "percezione" un collasso che superi una certa soglia. Animali di altre specie potrebbero avere soglie diverse, e quindi percepire diversamente. Non solo, ma l'attivazione delle percezioni potrebbe essere governata da soglie diverse perfino in individui diversi della stessa specie.

Se la realtà che ci circonda non viene mai creata fino in fondo, ma soltanto quasi creata, con il passare di un tempo sufficientemente lungo può anche essere disfatta, cancellata, resettata. L'abbiamo spiegato con la metafora del bitcoin, in cui nessuna delle transazioni del bitcoin è mai definitiva, e la catena può essere disfatta senza nemmeno tornare indietro nel tempo, ma continuando ad andare avanti nel tempo. E così, può essere disfatta o cancellata tutta la storia dell'universo, senza nemmeno andare indietro nel tempo. Questo è "ciò che esiste". Pertanto, nel momento stesso in cui diciamo "qualunque cosa sia quel che esiste, esso esiste", per dedurre magari che ci deve essere un creatore, abbiamo già fatto un atto di fede, perché credere che la realtà esista, in modo assoluto, è equivalente a credere che esista un Dio assoluto che la fa esistere in modo assoluto.

La realtà che ci circonda non è reale, ma quasi reale. Non esiste, ma quasi esiste. Non è mai stata creata definitivamente, ma soltanto quasi creata, e viene quasi creata continuamente. E allora il suo eventuale creatore non è un creatore, ma un quasi creatore. Vuol dire che, se "esiste" un creatore, anche lui deve "quasi esistere". In conclusione, se la realtà non esiste, ma esiste *quasi*, se il suo eventuale creatore può al massimo *quasi esistere* pure lui, allora quel creatore non è assoluto, non è supremo e non è perfetto. Al massimo, è quasi assoluto, quasi supremo e quasi perfetto. Ciò che però lo riduce a qualcosa di "ordinario", o poco più. E se il creatore è qualcosa di ordinario, o poco più, può ben essere un pasticcione.

16 Il crepuscolo del logos

In questa lezione ci interroghiamo sulla "lingua" parlata dai quanti, e la loro "logica". Abbiamo già fatto cenno a qualcosa del genere nei capitoli precedenti, ma dobbiamo tornarci per approfondire il discorso. Il momento è propizio anche per fare il punto della situazione su questo argomento cruciale. Abbiamo visto a più riprese che la lingua con la quale noi comunichiamo risulta alquanto fallace quando vogliamo servircene per esprimere le proprietà del mondo microscopico. All'inizio del nostro viaggio la cosa poteva apparire sorprendente, ma man mano che ci siamo inoltrati nell'analisi dei fenomeni quantistici abbiamo cominciato a farci l'abitudine. Ormai ci appare qualcosa di quasi naturale, forse perfino ovvio, e ciò ci fa capire quanto illusorio, se non ingenuo, fosse pretendere di usare la lingua parlata nel quotidiano per descrivere un mondo così diverso da quello che ci circonda. Invero, tutte le parole della nostra lingua perdono di significato quando vogliamo descrivere il mondo microscopico, tanto che, come abbiamo visto, non sappiamo più dare un significato preciso al verbo essere, il verbo esistere, che è il mattone fondamentale della lingua e della logica. Il logos diventa nebuloso, incerto, sfocato, indeterminato. Del resto, non si può pretendere di determinare l'indeterminazione con precisione. Sarebbe un controsenso logico... Dobbiamo accontentarci di descrivere l'indeterminazione in modo impreciso.

Senza il verbo essere non si può costruire alcuna lingua nota. Questo ci porta a sospettare che la natura non parli affatto la nostra lingua. O, meglio, che noi non parliamo la lingua della natura. Galileo ci ricorda che il libro della natura è scritto in lingua matematica. È forse quella, al-

lora, la lingua parlata dalla natura?

Siamo spesso portati a dare un valore eccessivo alla lingua che abbiamo appreso fin dalla nascita, quella che si applica abbastanza bene a descrivere le esperienze della nostra vita quotidiana, e finiamo col credere di poterla usare disinvoltamente per formulare teorie e filosofie dell'universo. Arrivato a questo punto, il lettore ha accumulato abbastanza conoscenza sul mondo dei quanti da rendersi conto che, quando ci spingiamo fino al punto da pretendere tanto, come molti hanno fatto nel corso della storia, rischiamo di fare la figura degli ingenui, o forse ci rendiamo ridicoli. Questa consapevolezza, conscia o meno, è forse il motivo per cui da decenni la filosofia ha, come dire..., alzato le mani in segno di resa, per cui oggi i cosiddetti filosofi si avventurano molto meno spesso nella ricerca dei "principi primi", per non correre il rischio di essere smentiti un attimo dopo da chi conosce le leggi della fisica.

Non ci sono più i grandi filosofi di una volta, si potrebbe dire. Ammesso che ci siano stati davvero grandi filosofi, una volta. Come mai questo cedimento? I motivi storici sono tanti, ma dobbiamo anche riconoscere che non è più possibile fare filosofia sulla natura del mondo se non si conosce la fisica a fondo, per dirla in rima. E, soprattutto, non è più possibile fare filosofia senza parlare la lingua della natura. E il libro della natura, piaccia o non piaccia, è scritto in lingua matematica. Evidentemente, la matematica è per molti troppo difficile, se non inaccessibile. Tuttavia, questo non è un motivo valido per continuare a costruire teorie a casaccio, formulare domande insensate, creare problemi che non hanno soluzioni, problemi che non esistono in quanto problemi. Se non parliamo la lingua corretta, possiamo brancolare nel buio e continuare a vagare all'infinito, costruire domande finte e darci finte risposte, ingannarci senza sosta, individuare a più non posso problemi fittizi che non hanno nessuna possibilità di soluzione, semplicemente perché non esistono: ce li siamo inventati noi, non hanno il minimo senso, derivano da un uso improprio della parola. Come quando ci chiediamo quale sia l'origine del mondo, o il suo "inizio", dando per scontato che si possa parlare disinvoltamente di "tempo" in ogni situazione immaginabile. O, più in generale, quando mettiamo insieme delle parole facendo un taglia

e incolla. Così costruiamo frasi su frasi, con un punto interrogativo alla fine. E, di fronte ad alcune di quelle parole, o sequenze di parole, rimaniamo a bocca aperta, perché non troviamo "risposta". Un esempio è la parola metafisica, che mette insieme due parole per dire sostanzialmente "oltre" la fisica, oltre la natura, oltre ciò che è. Siamo così sicuri che esista ciò che "è", che ci fiondiamo addirittura a chiederci cosa ci sia *oltre*. Salvo poi scontrarci con i quanti, che ci rimettono in riga, ci fanno abbassare la cresta, dicendoci che quel che "è", non è proprio come pensavamo, ma "quasi è".

"Oltre" è un avverbio che possiamo usare frequentemente nella vita quotidiana, ed è indubbiamente molto utile per farci capire: oltre la strada, oltre la collina, oltre il monte, oltre il fiume, oltre il lago. "Oltre", seguito da un sostantivo di un certo tipo, ha un senso concreto molto chiaro, perché se andiamo a vedere cosa si trova oltre una data cosa troviamo effettivamente quello che ci aspettiamo, salvo clamorosi errori. Ma non accettiamo di fermarci qui, no: mettendo insieme parole su parole, ci giochiamo sopra e ci chiediamo allora se ci sia qualcosa "oltre la morte", "oltre la vita", "oltre la natura", "oltre la fisica". È un bel gioco di parole, un taglia e incolla logico, una manipolazione, e magari un trastullo per la mente. Forse ci tiene compagnia, o ci permette di relazionarci con altre persone che hanno interessi simili. Però non possiamo affermare che una sequenza di parole abbia senso solo perché noi la possiamo costruire. Se così fosse, sarebbe vero che il verbo, la parola, viene prima della natura ("in principio era il verbo"...), quando invece è vero il contrario, perché la parola viene necessariamente dopo la natura, in quanto siamo noi che associamo parole alle cose e agli eventi, e lo facciamo solo *dopo* che abbiamo avuto percezione di quelle e di quelli. Quando prendiamo sul serio questi giochi di parole, finiamo col credere sul serio che ci siano dei problemi senza soluzione. E poi continuiamo, senza freni, sperando di risolvere i giochi di parole con altri giochi di parole. Così, a forza di insistere, possiamo anche convincerci, per un po', di aver risolto i primi, o di avere fatto qualche passo avanti verso la loro presunta soluzione. Tutto ciò, però, riguarda soltanto la nostra narrazione sulla natura, non la natura. E soprattutto, riguarda la nostra sfera

emotiva, la nostra soddisfazione personale, individuale, o di gruppi sociali di individui, che credono a quei problemi e alle loro eventuali soluzioni, e che spesso si identificano, facendo gruppo, come coloro che credono alle tal cose, invece di credere a tali altre.

Di fronte a tutto questo zelo e spreco, la natura non può che rispondere: "e a me che me ne importa?" Perché queste sono "cose nostre" e alla natura non interessano. Potrebbe suonare indelicato quanto stiamo dicendo, perché equivale a dire che dovremmo prendere migliaia di anni di storia del pensiero e buttarli nel cassonetto. Tuttavia, questa è la realtà delle cose. Non possiamo salvare secoli di errori per compassione, pietà, o pena, verso coloro che ci hanno sudato sopra fatiche inutili, avendo percorso strade sbagliate. In fisica non si ricordano mai le tantissime strade sbagliate percorse nei secoli (teorie, modelli, concetti, proposte, idee), se non hanno portato da nessuna parte. E sono molto più numerose delle strade che si sono rivelate corrette, come si può facilmente immaginare. Perché nelle altre discipline non si fa altrettanto? Evidentemente, perché le altre discipline sono "di bocca buona", per cui ci si accontenta di poco. Oppure, perché lo scopo vero della filosofia non è affatto quello di comprendere la natura, ma, più umilmente e concretamente, tenere un po' di compagnia in maniera diversa dal solito.

La prima, ma non unica, ragione del nostro errore è che esprimiamo il pensiero e la filosofia nella lingua sbagliata. Non li esprimiamo nella lingua della natura. Vorremmo leggere il libro della natura senza nemmeno conoscere la lingua nella quale è scritto. Francamente, la vedo dura. Allora, uno può obiettare: "ma se è così come dici, allora cosa mai possiamo dire, noi che non conosciamo la matematica? Niente?" Eh sì: niente. Mi dispiace, ma le cose stanno così. Non possiamo sacrificare la conoscenza, e perpetuare degli errori grossolani, soltanto per non essere scortesii verso chi non parla la lingua matematica della natura, per non urtare la sensibilità di un insieme di persone, per quanto numeroso sia. Non possiamo, per questioni di delicatezza o solidarietà, raccontarci delle storie infondate, quando sappiamo che non hanno alcun senso. E non possiamo continuare a discutere di chi ha creato cosa, se ci sia un'origine del mondo, e scervellarsi su tutte queste domande che non

hanno nessuna base, soltanto perché non vogliamo correre il rischio di rinsecchire le nostre relazioni sociali. O, meglio, possiamo farlo, e lo facciamo sempre, però sarebbe ora che prendessimo atto di quello che facciamo veramente, e del perché lo facciamo, invece di continuare ad ingannarci e ad ingannare gli altri.

Il mondo microscopico ci mostra che la lingua parlata dalla natura è diversa dalla lingua che parliamo noi comunemente. A questo punto, se vogliamo capire il mondo, dobbiamo imparare a parlare la lingua della natura. E la lingua della natura è la lingua matematica. O almeno così ci è stato detto, e così abbiamo creduto. Finora. Ma sarà poi vero?

Lo scopo di questa lezione è fare il punto sullo stato del logos. Scopriremo che nemmeno la lingua matematica è la lingua della natura. La lingua matematica è soltanto una nostra lingua, molto più versatile di quella che parliamo tutti i giorni, meno ambigua, più precisa. Ma non è la lingua della natura. È una lingua molto potente, ma è pur sempre una nostra lingua, una lingua umana. E non potrebbe che essere così, perché non esiste una lingua della natura. Di fronte alle cose umane, alle difficoltà che incontriamo, la natura risponde sempre allo stesso modo: "E a me che me ne importa? Perché continui a pensare, tu, essere umano, di essere speciale per me? Sei alla perenne ricerca di attenzione?"

L'essere umano si ritiene intelligente, quindi speciale. Per esempio, ritiene di essere intelligente per essere riuscito a codificare un certo numero di leggi fisiche. Al proposito, vale la pena ricordare che abbiamo impiegato millenni per capire come moltiplicare i numeri negativi (Brahmagupta, 628 d.c.), e poi un altro millennio, o quasi (Bombelli, 1572), per introdurre i numeri complessi. Siamo davvero così intelligenti come sbandieriamo in giro?

Ma c'è un altro aspetto: la matematica non pre-esiste la natura, e spesso non pre-esiste nemmeno le scoperte che facciamo, ma viene costruita strada facendo. Gli esempi più concreti ce li offrono proprio la meccanica quantistica e la teoria dei campi quantistici. Molto spesso, abbiamo dovuto costruire *ad hoc* la matematica di cui avevamo bisogno. Di fronte alle nuove necessità, abbiamo prodotto una matematica a cui non si era mai pensato prima, per poi spingerci ancora oltre. Abbiamo

creato una lingua nuova. Per riuscirci, abbiamo dovuto terremotare la lingua precedente, scendere a compromessi, adattarci, ridurre le nostre ambizioni. Il tutto per continuare a sperare di poter descrivere efficacemente quello che succede a scale di grandezza sempre più piccole. Fino alla gravità quantistica.

Di fronte agli "spettacolari" successi ottenuti, qualcuno potrebbe dire: "e allora sostituiamo la lingua matematica alla lingua parlata, ed è fatta!" Bene facciamolo. Ma così facendo non è che allontaniamo il problema soltanto di un po', e non lo risolviamo veramente? Possiamo davvero sperare di poter continuare a scendere, per sempre? Cambiando la lingua quando c'è bisogno? Adattando il logos alle nuove necessità, qualunque costo questo comporti? Non è che alla fine questo logos diventa completamente impotente? Come vediamo, la questione non è così semplice.

Per esempio, Zichichi è convinto che "esista una logica" nel mondo. Cioè: è convinto che la logica esista al di fuori di noi. Molti possono provare conforto constatando che siamo gli unici esseri viventi, almeno su questo pianeta, a poterla cogliere. Per vari motivi su cui non entriamo qui, l'evoluzione ha fatto sì che noi abbiamo bisogno di quel tipo di conforto, o di un altro tipo di conforto equivalente. Ciò testimonia del fatto che l'essere umano è tremendamente dipendente dalle sue pulsioni animali. Ma la natura gli ricorda: "hai una facoltà, la parola, come tanti esseri viventi ne hanno altre, la vista potente, l'udito, spesso più sviluppato del nostro, la mano prensile, il pollice opponibile, eccetera. Tu hai la parola: si tratta di uno strumento potente, ma non onnipotente!"

Perché insisto sul fatto, cruciale, che la parola, dalla lingua parlata alla matematica, è sì uno strumento potente, ma pur sempre uno strumento necessariamente limitato ed intrinsecamente difettoso? Che ci piaccia o no, un individuo è un ammasso di atomi, un insieme finito, per quanto grande, di atomi. Quando si tratta di capire cosa succede a scale di grandezza un miliardo di miliardi di volte più piccole del più piccolo ingrediente di cui noi stessi siamo fatti, l'atomo appunto, e di cui è fatto lo strumento nel quale memorizziamo e usiamo le parole, cioè il cervello, non possiamo sorprenderci se scopriamo di trovarci di fronte a un corto

circuito. In un contesto del genere, siamo come degli elefanti in una cristalleria. E la nostra convinzione di essere speciali diventa improvvisamente velleità.

Noi, che siamo fatti di miliardi e miliardi di atomi, vorremmo "capire" che cosa succede a scale di grandezza pari a un miliardesimo di miliardesimo del più piccolo ingrediente di cui siamo fatti. Ambizione comprensibile, ma sviluppare una lingua adatta potrebbe anche essere impossibile in linea di principio. Ci potrebbe essere una specie di "principio di esclusione micro macro" che lo impedisce, per dirla in un modo più fisico. Un principio di esclusione del tipo: più scendi (nel senso delle scale di grandezza) e meno puoi "logicizzare", cioè tradurre la natura in un linguaggio qualunque, parlato o scritto, acustico o visivo, logico o matematico che sia. Il ché vorrebbe dire: la lingua della natura non esiste. E non esiste il libro della natura. La lingua matematica è soltanto la lingua con la quale noi possiamo comporre un libro, a nostro uso e beneficio, per tradurre, approssimativamente, una *parte* della natura in parole, formule, suoni e immagini. Del resto, che bisogno avrebbe mai la natura di essere traducibile in una lingua, di qualunque tipo essa sia, parlata da uno dei tanti esseri viventi che essa stessa genera in giro per l'universo? Può farne tranquillamente a meno. E per quanto riguarda noi, fin dove possiamo spingerci con la nostra logicizzazione? Quanto può essere precisa la traduzione? C'è davvero un principio di esclusione micro macro che rende impossibile logicizzare all'infinito?

Per rispondere, ripercorriamo brevemente la storia di alcuni aspetti salienti del nostro progresso matematico recente, così da inquadrare meglio quali sono i limiti di cui stiamo parlando. Tra la fine del 1800 e la prima metà del 1900 la matematica conobbe grandi progressi, molti dei quali furono sollecitati dalle scoperte della fisica, nella fattispecie la teoria dei quanti. Per affrontare i problemi posti dalla nuova fisica furono creati dal nulla nuovi settori della matematica. Fino al 1800, per esempio, bastava la matematica della continuità e del determinismo, cioè il calcolo infinitesimale, gli integrali, i limiti, le derivate, le equazioni differenziali. Per quanto potente, quella matematica è adatta, al massimo, a descrivere un mondo deterministico, il mondo del "continuo", cioè un

mondo in cui le condizioni iniziali e le equazioni determinano univocamente tutto il futuro, e permettono di ricostruire tutto il passato. Un mondo in cui non esistono quantità minime indivisibili. La matematica del calcolo infinitesimale non è la lingua dei quanti.

La prima cosa con cui si viene a patti quando si affronta la teoria dei quanti è che dobbiamo introdurre entità matematiche che non hanno nessun corrispondente con quella che noi chiamiamo realtà. Esse sono utili a descrivere la virtualità, e non solo. Al contrario, nella fisica pre-quantistica ci si poteva limitare a parlare sempre e soltanto di quantità fisiche, come la posizione, il tempo, la velocità. Quantità misurabili, quantità che corrispondono a "qualcosa che esiste". Non siamo mai stati costretti ad introdurre delle quantità che non possono corrispondere a nulla di reale, neanche per i passaggi intermedi. Ma quando sviluppiamo la matematica necessaria a formulare la meccanica quantistica, siamo costretti a fare proprio questo. E non più soltanto come trucco matematico, come abbiamo visto nel caso dei numeri di Bombelli.

Procediamo oltre, scendendo ancora. Quando vogliamo esplorare scale di grandezza più piccole di quelle atomiche, dobbiamo passare alla teoria dei campi quantistici, come il modello standard delle interazioni fondamentali. In quell'ambito, introdurre entità che non corrispondono a nulla di reale diventa la regola, non più l'eccezione. Ne dobbiamo introdurre un numero così alto che alla fine ci abituiamo, e non ci facciamo più caso. E così via a scendere, fino alla gravità quantistica e alla particella fake, la particella che, appunto, non è mai reale, ma solo e sempre virtuale. Essa rappresenta la quintessenza del non reale.

Questo ci fa capire che la lingua con cui stiamo cercando di far parlare la natura non solo non ha corrispondenza col mondo che ci circonda, il mondo macroscopico, ma spesso non ha nemmeno corrispondenza col "mondo reale" in quanto tale, qualunque cosa voglia dire.

Ma c'è un altro fatto da sottolineare, qualcosa di molto importante che tutti gli addetti ai lavori fanno e nessuno dice mai, e cioè che, pur essendo noi riusciti a sviluppare una matematica molto potente per affrontare i nuovi problemi, siamo pur sempre riusciti, con quella, ad affrontare soltanto i problemi più facili, quelli che abbiamo scelto noi, o-

culatamente. E ci siamo arresi di fronte a tutti gli altri, da decenni a questa parte.

Sono solo alcuni, pochissimi e sporadici, i problemi che riusciamo a trattare. Sono quelli che poi andiamo in giro a sbandierare come grandi successi, tacendo su tutti i fallimenti. Siamo riusciti ad ottenere, anche attraverso esperimenti come quelli che vengono realizzati al Cern di Ginevra, conferme strabilianti alle nostre teorie, ma soltanto perché ci siamo scelti, noi, i problemi facili. Quello che non si dice mai, appunto, è che ci sono migliaia di problemi che abbiamo messo da parte. E che non abbiamo nemmeno idea, dopo decenni che sono in circolazione, di come affrontare. Per quelli non esiste ancora la matematica adatta, e non sappiamo nemmeno se mai ci sarà. A poco vale aspettare i matematici, sperando che un giorno raggiungano noi fisici, e magari ci diano una mano, perché da decenni stanno sbattendo, come noi, la testa contro il muro. Non si è mai riusciti ad elaborare strumenti matematici sufficientemente potenti per affrontare i problemi rimasti aperti, e nemmeno a fare quel progresso minimo che potrebbe permetterci di sperare nel futuro.

Questi semplici fatti, normalmente taciuti, cambiano di colpo la nostra prospettiva sulla logica e la matematica, perché demoliscono una enorme quantità di illusioni che ci facciamo gratuitamente in merito alla presunta potenza del nostro logos. Se continuiamo a credere a quello che ci raccontano gli "esperti in materia", che ci sbandierano i grandi successi, ma nascondono tutti gli imbarazzanti fallimenti (o li presentano in maniera, diciamo così, addomesticata), possiamo continuare a mitizzare il logos e la matematica, e a perseverare nell'errore, per l'eternità.

Facciamo un altro passo avanti (o forse indietro...). Lo scopo di esplorare la natura a scale di grandezza sempre più piccole è quello di coglierne gli "elementi". Quando scendiamo a piccole distanze cerchiamo di capire cosa sono i costituenti elementari della natura, e le loro interazioni, cioè le "interazioni fondamentali", sperando che parole come "elementare" e "fondamentale" significhino anche qualcosa di "semplice", più facile da trattare, dove è coinvolto un numero contenuto di grandezze allo stesso tempo. Trattare problemi elementari è tutto quello che

riusciamo a fare, da decenni a questa parte. Infatti, non appena ci troviamo nella necessità di affrontare problemi che non sono altrettanto semplici, perché non elementari, ma coinvolgono grandi numeri di quanti e particelle "elementari" allo stesso tempo, allora brancoliamo nel buio. Il punto cruciale, per il nostro discorso, è sottolineare che non disponiamo nemmeno della matematica adatta ad affrontarli! La difficoltà va ben oltre la difficoltà che incontriamo normalmente quando vogliamo affrontare i problemi "difficili" del mondo macroscopico, in un senso che ora cerchiamo di spiegare.

Quando vogliamo descrivere un problema complicato della realtà macroscopica, come, ad esempio, il lancio di un satellite attorno alla luna o alla terra, o l'evoluzione di una perturbazione meteorologica, sappiamo che, anche se non riusciamo a risolvere esattamente le equazioni fisiche che lo governano, possiamo procedere per approssimazioni successive, con l'aiuto di un computer. Però sappiamo che quel problema è governato da leggi fisiche ed equazioni ben definite, *esatte e note*. Grazie al computer, possiamo usarle per approssimare la soluzione con un grado di precisione sufficiente. Insomma, conosciamo le leggi della natura, cioè le equazioni che governano il problema, anche se non conosciamo le loro soluzioni esatte. Allora facciamo fare il grosso del lavoro al computer, usando vari sistemi di approssimazioni successive. Sappiamo che, pur di far lavorare il computer abbastanza tempo, possiamo arrivare a risultati soddisfacenti, anche se solo approssimati, cioè precisi quanto vogliamo. Tanto basta per le nostre necessità pratiche. Abbiamo insomma una teoria sottostante che regge il tutto e guida l'intera procedura: abbiamo il "logos" dalla nostra parte! Facciamo approssimazioni successive, sapendo bene che cosa stiamo approssimando.

Entro certi limiti, la stessa cosa vale per la meccanica quantistica. Ma non vale più quando ci addentriamo nella teoria dei campi quantistici. Occorre sapere, infatti, che la teoria dei campi quantistici non è un insieme di leggi fisiche, o equazioni. La teoria dei campi quantistici è soltanto un insieme di regolette per fare delle approssimazioni successive. Approssimazioni successive *di cosa*, ci si potrebbe chiedere, visto che l'unica cosa che abbiamo è quell'insieme di regole per fare le ap-

prossimazioni stesse? Approssimazioni di *nulla*...

Non ci troviamo più nella situazione di approssimare qualcosa di difficile da trattare: al contrario, dobbiamo costruire la teoria stessa a partire dalle sue approssimazioni. Che, a quel punto, sono letteralmente approssimazioni del nulla, visto che la teoria non esiste prima della sua stessa approssimazione.

Nella teoria dei campi quantistici non esiste *niente* prima di usare quei metodi di approssimazioni successive: il "logos" non sta affatto dalla nostra parte! Usiamo metodi approssimati per costruire tutto quello che riusciamo a costruire, mettendo un quanto dopo l'altro, combinando un'interazione dopo l'altra. Usiamo le approssimazioni successive non per approssimare qualcosa che esiste anche *prima* di essere approssimato. Bensì, approssimiamo *prima di avere qualcosa da approssimare*! Cerchiamo di costruire quello che vogliamo approssimare nel momento stesso in cui lo approssimiamo!

In altre parole, brancoliamo nel buio, ci muoviamo a tentoni, sperando di trovare qualcosa, prima o poi, ma non avendo a priori alcuna garanzia che arriveremo da qualche parte, o che esista, o esisterà mai, la matematica adatta a procedere. La legge fisica, nella teoria dei campi quantistici, è proprio questo, cioè ciò che emerge da questa procedura, quando va bene. La legge fisica, al di là dei suoi ingredienti "elementari", che poi sono le regolette per fare le approssimazioni successive a tentoni, non esiste prima della procedura stessa. Non è espressa da alcuna equazione, ma è definita, quando la cosa funziona, come il risultato della stessa procedura a tentoni. Del tipo "se va bene va bene, sennò pazienza". E nella quasi totalità dei problemi vince il "pazienza", cioè raccogliamo fallimenti, quei fallimenti che non andiamo a sbandierare in giro, forse per imbarazzo. Il principio del "se va bene bene, sennò pazienza", illustra accuratamente "la potenza del logos"...

A parte casi eccezionali (i famosi problemi facili che studiamo, per esempio, al CERN), qualsiasi evento è fatto di migliaia, se non miliardi, di interazioni concomitanti. Lì, la matematica manca completamente. Se andiamo a scegliere il problema oculatamente, possiamo fare un figurone al cospetto della collettività, ed ottenere conferme spettacolari alle

nostre predizioni. Ma siamo pur sempre noi stessi a scegliere il problema, e, ovviamente, ce lo scegliamo facile. Se arrivasse qualcuno e ci sfidasse: "Risolvi il problema che ti do io, non solo quelli che scegli tu. Prova un po' a predire questa data cosa! Calcola quest'altra": beh, in quel caso ci arrenderemmo subito.

Praticamente, scendendo a distanze sempre più piccole, a parte questa oculata scelta di problemi semplici, ci dobbiamo arrendere su quasi tutti i fronti. E questo ci fa capire che la lingua matematica non è poi così potente. Possiamo sperare che esistano lingue matematiche più avanzate della nostra. Potremmo riuscire a svilupparle noi stessi, un giorno, magari dopo migliaia di anni di evoluzione. Oppure, possiamo immaginare che esistano lingue più avanzate parlate da esseri non umani, come gli alieni, lingue matematiche che permettano loro di logicizzare e capire quello che noi non riusciamo a capire oggi, e magari non riusciremo a capire mai. Forse: è una possibilità. Ma siccome anche quegli alieni sarebbero ammassi di atomi, è più verosimile che la logicizzazione ad oltranza sia impossibile, per il motivo che dicevamo prima, e cioè che un qualunque ammasso di atomi, in qualunque parte dell'universo stia e per quanto intelligente possa essere (e l'intelligenza, come la volontà e la coscienza, non sono nella natura, perché sono soltanto dovute all'interconnessione di una complessa rete di combinazioni di fenomeni elementari), sia impossibilitato a muoversi con disinvoltura a scale di grandezza miliardi di miliardi di volte più piccole del più piccolo ingrediente di cui lui stesso è fatto. Per cui si deve accontentare dei problemi facili, e ridurre i suoi obiettivi a identificare quelli. Cioè, il principio di esclusione micro macro è la possibilità più naturale e *logica*. Quel principio non afferma che esiste un limite preciso oltre il quale non è possibile logicizzare, e prima del quale è invece possibile farlo. Dice che più si scende nel senso delle scale di grandezza e meno si può logicizzare, a parte una serie di problemi particolari selezionati apposta. E che anche quelli, durante la discesa, sono sempre più rari e sporadici. Ma allora vuol dire che la natura non parla nemmeno la lingua matematica.

Pertanto, se la lingua che noi parliamo tutti i giorni è da buttare nel cassonetto, al cospetto della natura, e con la lingua matematica scen-

diamo molto più in profondità, è anche vero che ci possiamo spingere solo fino ad un certo punto con quella, e solo se scegliamo oculatamente i problemi. Dopodiché, ci scontriamo con la difficoltà intrinseca dovuta al principio di esclusione micro macro, e ci accorgiamo che il verbo, lui, non può essere il principio. Certo, col senno di poi, avremmo dovuto mettere in conto una possibilità del genere tanto tempo fa, ma meglio tardi che mai. Qualunque lingua parliamo, e qualunque forma abbia, la natura va per la sua strada. Essa parla la sua lingua, se vogliamo, nel senso che la lingua della natura è la natura stessa.

Vogliamo tradurre la natura in qualcosa che sia comprensibile a noi. E fino ad un certo punto l'abbiamo fatto con un certo successo. Forse riusciremo a spingere la cosa ancora più avanti. Ma la lingua, per definizione, è qualcosa che riguarda noi, non la natura. Non esiste quindi una lingua parlata dalla natura, se non la natura stessa. E questo vuol dire che, se ci trovassimo nella necessità di risolvere un problema non logicizzabile, come quelli di fronte ai quali abbiamo dovuto capitolare, l'unica strada sarebbe quella di usare la natura stessa.

Del resto, questo è un espediente usato già oggi, in vari contesti, perché spesso è più rapido dell'altro metodo. Esistono problemi così complicati, anche per un computer, che, invece di costruirci sopra teorie matematiche con il metodo galileiano, è molto più facile risolverli realizzando direttamente i sistemi fisici corrispondenti, e tabulare i dati a partire da quelli, con un metodo più "baconiano". Sotto certe scale di grandezza, oltre certi limiti, Bacone può battere Galileo.

In definitiva, la natura non è matematizzabile ad oltranza, cioè non è traducibile ad oltranza mediante una lingua, qualunque essa sia. Primo, non ha nessuna necessità di farsi tradurre, da chicchessia. Secondo, ogni volta che si fa tradurre da noi, ci sta facendo un bel regalo. La natura non ha bisogno di essere magnanima nei nostri confronti, o nei confronti di qualche creatura in particolare. Ma forse lo è stata, in fondo, e dovremmo considerarci fortunati ad essere riusciti a logicizzare così tanto. Guardando il bicchiere mezzo pieno, invece che mezzo vuoto, potremmo concludere che quello che siamo riusciti a formulare finora è sotto certi aspetti sorprendente. Però sarebbe un po' come il gioco dell'illusionista,

che ti fa credere che tu scegli la carta, ma in realtà la sceglie lui.

Elevare la parola a principio è uno degli errori più grossolani e imbarazzanti che abbiamo mai fatto nella storia. È l'errore di Platone, in fondo, cioè l'errore delle idee, l'errore di considerare la logica e la matematica *perfette* e quindi superiori alla natura. Come se una traduzione potesse essere migliore dell'originale.

Il nostro atteggiamento dovrebbe essere meno Cartesiano, e più Galileiano, per così dire. In fondo in fondo, non c'è bisogno di fare il salto più lungo della gamba, e rischiare di impantanarsi in interrogativi malposti, domande ambigue e senza senso, perché questo finisce col portarci fuori strada, e quindi ci rallenta più che aiutarci. Per forza di cose, il metodo galileiano, cioè il metodo che punta sulla matematizzazione della natura, non ha alcuna base logica, ed è potente proprio per questo: *funziona perché funziona finché funziona*. Prevede esso stesso di essere superato dal metodo baconiano, quando non ce la fa più ad andare oltre. Se il metodo di Galileo fosse ingabbiato nella logica, che ormai abbiamo capito essere costruita sulla sabbia, sarebbe anch'esso costruito sulla sabbia. Esso è così potente proprio perché non è in grado di fornirci alcuna garanzia *a priori* di esserlo! Non ci può garantire di funzionare, prima di essere messo all'opera. Se pretendessimo tali garanzie, lo svuoteremmo e lo renderemmo impotente. Come il logos.

Ma la tentazione umana di elevare la "parola", o verbo, o logos, al di sopra delle cose, al di sopra della natura, è sempre forte. Se dobbiamo rinunciare al logos parlato, sostituiamo a quello la *formula*, la matematica, che diventa così il nuovo feticcio. Al ché la natura dice: "ma questo qui, chi si crede di essere? Non sa che qui *comando io*? Tu, essere umano, sei solo uno dei miei tantissimi getti di dadi, fattene una ragione!" La nostra patetica arroganza di crederci speciali, di essere al centro dell'universo, solo perché, a differenza degli altri esseri viventi, abbiamo il dono della parola, viene frustrata quotidianamente dalla natura. Ma noi fingiamo di non vedere, e andiamo avanti, imperterriti. Proprio perché abbiamo il dono della parola, ce la raccontiamo un po' come vogliamo. E ci crediamo superiori. Questo ci dovrebbe procurare qualche sensazione piacevole, qualche forma di conforto. Il ché butta

male, perché dimostra, appunto, che abbiamo bisogno di conforto! Se ci insistiamo tanto sopra, vuoi dire che ne abbiamo bisogno. Abbiamo *bisogno* di *crederci* speciali. Se non ne avessimo bisogno, non ne faremmo un dramma.

Abbiamo ormai rivelato che, anche se miglioriamo la nostra lingua, per esempio abbandonando quella parlata a favore della matematica, non risolviamo il problema. Lo allontaniamo soltanto, nel senso che sbarazzarci delle lingue meno potenti, più ambigue e fallaci, ci permette di percorrere un po' di strada in più lungo il sentiero della logicizzazione, necessariamente limitata e parziale, della natura. Ma non di avanzare a oltranza.

Se da un secolo a questa parte la filosofia è entrata in una specie di catalessi, è perché si è resa conto di parlare una lingua obsoleta, inadatta ad avanzare nella conoscenza. E allora dovremmo fare quello che avremmo dovuto fare tanto tempo fa, cioè buttare nel cassonetto tutta la storia del pensiero umano, o derubricarla a ciò che effettivamente è, un sofisticato intrattenimento per la mente. Leggere un saggio di filosofia greca o di un qualunque filosofo tra quelli che si sono succeduti da allora fino ad oggi, è indubbiamente un piacevole passatempo, come ce ne sono di altro tipo. Ma non si può pensare che quello sia sapere soltanto perché è espresso in modo ricercato, tale da nascondere bene le sue pecche e la sua fallacie. Non possiamo credere che quella sia conoscenza, perché conoscenza non è, e non lo può nemmeno essere, essendo espressa nella lingua sbagliata. Scrivere un trattato sulla natura senza matematica è un po' come parlare italiano a Pechino.

Del resto, la pulce nell'orecchio ce la dovrebbe far venire la parola stessa: "filosofia", cioè "amore per il sapere". Quando si mescola la conoscenza con un'emozione, o pulsione, o sentimento ("amore"), si è già fuori strada. La parola stessa tradisce il fatto che la filosofia non è sapere, non è conoscenza. Essa è "amore" per il sapere. Nella parola stessa, il sapere è subordinato ad un'emozione umana. Se non è "sapere", ma "amore per il sapere", è evidente che la filosofia diventa facilmente "amore per i giochi di parole". E d'un tratto ci rendiamo conto che la storia della filosofia è stata scritta da gente che aveva "bisogno d'amore".

Come abbiamo detto, se si vuole procedere nell'esplorazione della natura, almeno un po', bisogna imparare la lingua matematica. Chiediamoci allora se ne valga la pena. In fondo, si tratta di una lingua molto difficile, per noi umani, per quanto sia un nostro prodotto. E poi, come abbiamo spiegato, non è nemmeno la vera lingua della natura, che non ne ha veramente alcuna, oltre a se stessa. Eppure ne vale la pena, certo. Non soltanto perché ci permette di conoscere meglio la natura, ma soprattutto perché ci permette di conoscere i limiti della logicizzazione stessa della natura. Finché non si impara quella lingua, infatti, si continua a credere, per ignoranza, che il logos abbia virtù magiche che non ha, che possa raggiungere traguardi che gli sono comunque preclusi, che abbia un potere praticamente illimitato. E sarà uno scherzo, allora, elevare il verbo su un piedestallo, vedere in quello un feticcio da adorare, come si è fatto per secoli e secoli, e come si fa ancora, perseverando ad oltranza nell'errore e nell'ignoranza. Conoscere la matematica è la via maestra per conoscerne i limiti, per smascherare i limiti del verbo, cioè l'intrinseca impotenza e fallacia del logos.

Ricapitoliamo. L'unica cosa che si può fare, senza matematica, è elaborare varie forme di trastulli per la mente, cioè fare della "filosofia", che in fondo non è altro che "mitologia", come il mito della biga alata di Platone, un racconto gradevole alla lettura, alternativo a un romanzo. Ma pur sempre un racconto. E si può fare un racconto mitologico di questo tipo anche senza conoscenze di matematica. Per procedere davvero nella conoscenza, però, c'è bisogno della matematica. D'altra parte, la lingua dei quanti richiede una matematica così sofisticata che finisce per farci apprezzare i limiti intrinseci anche di quella, che sono poi i limiti di noi stessi. E che molto probabilmente sono limiti intrinseci di qualunque lingua, sviluppabile da qualunque ammasso di atomi a cui la natura possa dare vita, ovunque nell'universo. Nemmeno chi ha una preparazione scientifica parla la vera lingua della natura, che nemmeno esiste. Il principio di esclusione micro macro ci dice che la logica e la matematica non sono altro, in fondo in fondo, che delle mitologie più sottili, meno facili da smascherare come tali.

"Il logos è morto. Noi spiriti liberi ci sentiamo, nell'apprendere la notizia, come sfiorati da una nuova aurora. Finalmente si libera l'orizzonte, finalmente le nostre navi possono riprendere il largo, per affrontare ogni pericolo. Il nostro mare, il mare aperto, è di nuovo là. E forse non c'è mai stato un mare così aperto."

Così parlò Zarathustra

Printed by Amazon Italia Logistica S.r.l.
Torrazza Piemonte (TO), Italy



62585097R00136