

**ALBERTO GIANNONE  
MATTEO FADEL**



**SE  
FOSSE  
TUTTO  
QUANTO**

**La fisica quantistica  
la capisci solo se la vivi**

**MONDADORI**

**ALBERTO GIANNONE  
MATTEO FADEL**



**SE  
FOSSE  
TUTTO  
QUANTO**

**La fisica quantistica  
la capisci solo se la vivi**

**MONDADORI**

# Il libro

**S**e un gelato alla fragola fosse un gelato quantistico, siamo proprio sicuri che saprebbe ancora di fragola? Si può lanciare una moneta e pensare di fare testa o croce in un mondo quantistico? E cosa ci fa un cubo di Rubik sospeso a mezz'aria dentro un laboratorio quantistico?

La fisica quantistica viene spesso spiegata attraverso paradossi assurdi, fenomeni controintuitivi perché le sue predizioni possono essere verificate e, quindi, comprese solo in un mondo microscopico misterioso fatto di particelle fondamentali. Tuttavia, noi stessi siamo formati proprio da questi atomi e particelle, quindi quello che davvero c'è da esplorare è il confine tra il mondo macroscopico della fisica classica e quello quantistico. È proprio questo confine, questa sottile linea d'ombra che il divulgatore scientifico Alberto Giannone e il fisico Matteo Fadel hanno deciso di esplorare in *Se fosse tutto Quanto*. Attraverso una storia assurda e due personaggi strampalati, tra esperimenti futuristici, paradossi in carne e ossa, spiegazioni intuitive, Giannone e Fadel costruiscono una storia ambientata in un laboratorio quantistico, ipotetico sì, ma scientificamente plausibile. *Se fosse tutto Quanto* riesce, quindi, a raccontare la realtà complessa della meccanica quantistica utilizzando concetti immediati, licenze narrative e iperboli scientifiche, senza appesantirla con tecnicismi o formule inintelligibili. Vi aggirerete in un laboratorio quantistico meraviglioso, districandovi attraverso i tanti aspetti misteriosi e apparentemente incomprensibili della fisica quantistica, che però una volta terminato questo libro non vi sarà mai stata così chiara.

Per capirci, grazie a *Se fosse tutto Quanto* sarà finalmente facile comprendere com'è possibile che il gatto di Schrödinger sia contemporaneamente vivo e (quasi) morto.

# *Gli autori*

Alberto Giannone è da sempre un curioso. Ha conseguito la laurea magistrale in Economia e parallelamente ha coltivato diverse passioni, in particolare quella per il mondo scientifico, tanto da iscriversi alla facoltà di Fisica a 32 anni. Dal 2019 si dedica al progetto social “DivulgaMente”, che ha come obiettivo divulgare argomenti scientifici e stimolare la curiosità in tutte le sue forme. Nel 2022 con Mondadori ha pubblicato *Meglio curiosi che intelligenti*.

Matteo Fadel ha studiato Fisica a Padova, Zurigo e Basilea. Attualmente è ricercatore in meccanica quantistica presso il prestigioso ETH di Zurigo, dove studia il confine tra il mondo classico e quello quantistico. In particolare, nella sua ricerca si è concentrato sullo studio di correlazioni tra atomi e del suono in regime quantistico. Nel 2022 ha pubblicato sulla rivista “Science” un esperimento equivalente a quello del gatto di Schrödinger usando non un animale, ma un cristallo di 16 microgrammi che vibra e non-vibra allo stesso tempo.

Alberto Giannone  
Matteo Fadel

# SE FOSSE TUTTO QUANTO

*La fisica quantistica la capisci solo se la vivi*

**MONDADORI**

Se fosse tutto Quanto

## Introduzione

Siamo amici di lunga data, ci conosciamo da tanto tempo, e per questo a un certo punto ci è venuto naturale mettere per iscritto una serie di pensieri e domande che per anni ci hanno accompagnato, e che continuano a farlo.

Giusto per farvi capire: secondo noi non c'è niente di meglio che discutere di fronte a una buona pizza di come il misterioso e sconfinato universo sia composto da minuscole particelle, il cui comportamento è difficilmente intuibile dalla mente umana!

Abbiamo così unito le conoscenze di Matteo, fisico e ricercatore nel campo della meccanica quantistica, alla curiosità e alla creatività di Alberto, content creator e divulgatore scientifico, per realizzare questo racconto che vuole condurvi in un viaggio alla scoperta di un mondo tanto enigmatico quanto affascinante, quello della meccanica quantistica!

Quando si sente parlare di meccanica quantistica si pensa a qualcosa di complicatissimo e di terribilmente lontano da noi e dalla realtà di tutti i giorni. Ora, è vero che questa teoria è una branca della fisica che indaga atomi e particelle subatomiche e nella quale rientrano fenomeni controintuitivi se non assurdi, ma è altrettanto vero che noi stessi siamo formati da questi atomi e particelle, così come tutto ciò che ci circonda. Il nostro mondo quotidiano è davvero così diverso da quel mondo microscopico che compone il tutto? E perché? Ma soprattutto... dove finisce uno e inizia l'altro? Dove si trova il confine tra meccanica classica e meccanica quantistica?

Queste sono solo alcune delle domande da cui è scaturito il nostro libro e ne troverete altre leggendo le prossime pagine, perché quello che vogliamo trasmettervi, più che i concetti, più che le risposte, è la curiosità e la meraviglia di fronte a un mondo tutto da esplorare.

Non preoccupatevi se la fisica o la matematica non sono il vostro forte: il nostro intento è sì descrivere il fascino di una realtà complessa, ma senza

appesantirla con tecnicismi e formule comprensibili solo dagli addetti ai lavori. Per questo, il nostro racconto cerca di essere il più intuitivo possibile: vi abbiamo proposto concetti anche intricati, ma servendoci di licenze narrative e iperboli scientifiche per semplificare l'esposizione.

Buona lettura!

*Alberto e Matteo*

## Le tre mappe dell'universo

«Alberto, devi venire subito. L'esperimento funziona!»

«Pronto, Matteo? Ma che ore sono? È notte fonda... Quale esperimento?»

La voce dall'altra parte del telefono è troppo emozionata per formulare un discorso comprensibile. «Lascia stare l'ora, funziona! È in sovrapposizione! Più di tre chili e ancora funziona!»

Con le coperte arrotolate intorno al corpo, Alberto non sta capendo una parola. “Sovrapposizione? Tre chili?” si chiede. Ancora mezzo addormentato, non ha idea di cosa stia parlando l'amico. «Cos'è che funziona?»

«Te lo spiego dopo, adesso non c'è tempo. Sbrigati! Devi venire in laboratorio prima che collassi tutto!» La chiamata termina così, bruscamente.

Alberto e Matteo sono amici fin dai tempi delle scuole elementari. Quando si sono conosciuti, hanno capito subito di avere qualcosa in comune, qualcosa di speciale, e sapevano di essere diversi dagli altri bambini, di vedere le cose in un modo tutto loro.

Da piccolo Matteo passava il tempo a immaginare scenari che sfidavano la logica e la realtà, e a porsi domande assurde: “Quanto tempo ci vorrebbe per attraversare la Via Lattea in bicicletta?”, “Che odore ha lo spazio cosmico?”, “Che gusto hanno i protoni?”, “Quanta acqua servirebbe per spegnere il Sole?”. Amava discutere di teorie scientifiche, improvvisare esperimenti, studiare i fenomeni naturali. La sua curiosità lo spingeva a esplorare il mondo, alla ricerca di risposte alle sue innumerevoli domande.

Alberto, invece, raccoglieva tutte le scoperte che Matteo gli raccontava e si divertiva a scriverle in maniera semplice sul giornale della scuola. Provava una grande soddisfazione nel vedere che grazie alla scrittura il suo messaggio poteva meravigliare tantissime persone, o almeno i suoi amici.

Quelli che un tempo sono stati i loro interessi preferiti col passare degli anni non sono svaniti, anzi sono cresciuti sempre di più, fino a diventare, in un modo o nell'altro, le loro professioni.

“Questa telefonata nel cuore della notte si spiega solo con qualcosa di grandioso... Non ho mai sentito Matteo così emozionato per una scoperta, e dire che ne ha fatte tante, eh” pensa Alberto. Per questo deve assolutamente andare a vedere, deve saperne di più sul fantomatico esperimento. E più ci pensa, più la sua curiosità diventa irrefrenabile.

«Cavolo, che sonno però...» commenta accendendo la luce per non riaddormentarsi. Si stropiccia gli occhi e, dopo un silenzioso sbadiglio, trova le forze per alzarsi. Tappa in bagno e poi si cambia al volo, prende la giacca con sé, si mette al polso l'orologio che gli ha regalato suo nonno e apre di fretta la porta. Non sa cosa lo aspetta, ma non vede l'ora di scoprirlo. «Ah, me lo stavo per scordare» dice, facendo dietrofront.

La camera di Alberto è sempre in disordine, piena di fogli, videocamere, libri, microfoni e quant'altro, tutti strumenti che utilizza per raccontare le ultime scoperte tecnologiche e scientifiche sul suo giornale indipendente online. È diventato un giornalista di discreto successo, anche grazie al suo fare un po' sopra le righe e al modo in cui riesce a raccontare nozioni complesse in maniera semplice... Forse perché, sotto sotto, le cose complesse non le capisce nemmeno lui fino in fondo, quindi cerca di semplificarle prima di tutto per sé, e poi per i suoi lettori. Insomma, si definisce un curioso che ama meravigliare le persone raccontando ciò che le menti più geniali del pianeta hanno scoperto.

E comunque, nonostante il suo giornale online vada piuttosto bene, Alberto si sente ancora distante dal raggiungere ciò che più desidera: il premio Pulitzer! Il sogno di ogni giornalista.

Proprio per questo, la sua ossessione è diventata la ricerca di una notizia che riesca a scuotere le masse, un avvenimento rivoluzionario che gli permetta di scrivere un articolo degno di un riconoscimento ambito. Finora, però, non gli è mai capitato tra le mani nulla di così rilevante.

«Eccolo!» esclama Alberto con un'espressione di soddisfazione. Dopo aver rovistato tra i libri, i cavi e le penne che inondano la sua scrivania, estrae qualcosa di nero e se lo infila in tasca. Funziona sempre così: c'è un

gran caos, ma Alberto sa esattamente dove trovare *quell'oggetto* tanto importante.

“Bene, ora ho tutto, posso partire!” pensa, e in pochi minuti raggiunge la sua auto e si mette alla guida.

Matteo lavora nel laboratorio di una delle università più rinomate al mondo. A volte pensa di essere finito lì un po' per caso, senza averlo davvero pianificato. Non è mai stato uno studente modello, uno di quelli bravi in tutto, ma di sicuro è sempre andato forte nelle materie scientifiche, in particolare fisica e matematica. E poi ha sempre amato i rompicapo – lui è uno di quelli che a sei anni risolvono il cubo di Rubik in una manciata di secondi – e ogni tanto si è divertito a realizzare dispositivi stravaganti da portare a scuola per mostrarli ai compagni. Clamorosa è stata quella volta in cui stava per incendiare mezzo edificio dopo aver provato a generare del plasma tramite elettrodi ad altissimo voltaggio. «Volevo solo ricreare un'aurora boreale in miniatura» si era giustificato. Se non fosse stato per la simpatia reciproca che c'era tra lui e il professore di fisica, probabilmente al liceo non sarebbe durato a lungo senza farsi espellere. E forse è stato anche grazie a quella simpatia che Matteo ha deciso di iscriversi all'università per studiare proprio fisica, di ottenere il dottorato e infine di diventare un ricercatore indipendente. Oggi per lui il laboratorio è una specie di parco giochi scientifico, un posto dove provare cose nuove, dove dare libero sfogo alla creatività.

Guidare a notte fonda non è il massimo, e Alberto accende un po' di musica per tenersi sveglio. Sceglie uno dei suoi pezzi preferiti, la *Patetica* di Beethoven. Dopo pochi minuti, però, la sua attenzione è già finita da qualche altra parte: non segue più le note, ma si è perso tra i pensieri, tra le sue idee. La mente salta da un argomento all'altro senza una precisa connessione logica, fino a quando non viene catturata da un ricordo di qualche anno fa: è con Matteo in pizzeria, e l'amico sta cercando di spiegargli il suo ambito di ricerca.

«Allora, Alberto... da dove posso cominciare... Hai presente le mappe geografiche?» gli aveva detto Matteo quella sera dopo aver ordinato la solita Quattro formaggi.

«Sì, be', ma cosa c'entrano con la fisica?» aveva risposto lui.

«C'entrano, c'entrano! Le teorie scientifiche sono un po' come delle mappe geografiche: descrivono il mondo. C'è la mappa dei continenti, quella dei singoli Paesi, fino ad arrivare alle mappe delle città e dei piccoli quartieri. Pezzi di carta che ci mostrano dove si trovano strade, fiumi, montagne... e anche il nostro bar preferito! Ecco, allo stesso modo, una teoria scientifica è un insieme di formule matematiche che cercano di descrivere una porzione di realtà, ci dicono a che temperatura il ghiaccio si fonde, la velocità con cui orbita la Luna, o da dove viene il colore azzurro del cielo.»

Alberto a quel punto non aveva potuto fare a meno di notare lo scintillio negli occhi dell'amico, e con un sorriso aveva aggiunto: «Okay, sì, ti seguo, continua!».

«Per come la vedo io, la fisica attuale si fonda su tre mappe fondamentali. La prima, la più ampia, è quella che si occupa dell'immensità dell'universo, cercando di descrivere il moto di galassie, buchi neri, stelle e pianeti. Insomma, tutte cose enormi, estremamente massicce, o che si muovono velocissime. Questa mappa si basa sulla teoria della relatività di Einstein, una delle più rivoluzionarie di sempre!»

«Rivoluzionaria a dir poco!» aveva esclamato Alberto.

«In effetti solo un genio come Einstein poteva arrivare a capire che il tempo scorre più lentamente o velocemente in base alla velocità a cui si sta andando. La relatività ristretta, infatti, ci dice che più qualcosa va veloce, più il suo tempo rallenta rispetto a chi rimane fermo. E questo è niente in confronto alla dilatazione temporale descritta dalla relatività generale. Einstein aveva anche capito che, oltre alla velocità, il tempo rallenta quando ci si avvicina a oggetti molto, molto massicci. Questo perché l'universo è permeato dallo spaziotempo, che si deforma vicino ai corpi celesti come fosse un telo elastico. Se lo spaziotempo si deforma, vuol dire che il tempo viene modificato. Pensa, se dalla Terra io ti guardassi con un telescopio mentre viaggi verso un buco nero, vedrei il tempo segnato dal tuo orologio rallentare così tanto che, una volta raggiunto l'orizzonte degli eventi, ovvero il "bordo" del buco nero, risulterebbe fermo!»

«Quindi vicino a un buco nero vivrei in eterno?»

«Eh, no, il tempo si ferma dal mio punto di vista, ma dal tuo, invece, il tempo continuerebbe a scorrere normalmente, per questo si chiama "teoria della relatività"! Lo so, è un discorso complesso, magari te lo spiegherò più

nel dettaglio un'altra volta... Comunque, non dimentichiamo che questa è solo una minima parte di tutto ciò che descrive questa teoria. Ovviamente gli effetti illustrati dalla teoria della relatività diventano evidenti in situazioni estreme, come quando si viaggia prossimi alla velocità della luce, o quando ci si avvicina a masse enormi. Nella vita di tutti i giorni non ci accorgiamo degli effetti relativistici, quasi ogni cosa può essere descritta anche solo dalla fisica classica, la seconda mappa che usiamo per descrivere la natura. Forse è anche la più importante per noi esseri umani, perché si occupa dei fenomeni che possiamo vedere e sperimentare direttamente. Questa mappa è composta principalmente dalla meccanica di Newton e dall'elettromagnetismo di Maxwell...»

«Scusa, Matte, non correre troppo, spiegati un attimo.»

«Okay, okay, ti faccio un esempio: grazie alla meccanica newtoniana possiamo descrivere accuratamente il movimento di un'altalena, il modo in cui un aereo riesce a rimanere in volo e... Hai presente quando fai vibrare la corda di una chitarra? Anche in questo caso il suono che senti è descritto dalle leggi della meccanica newtoniana. Grazie alle leggi dell'elettromagnetismo, invece, possiamo fare chiamate, ascoltare la radio, accendere una lampadina e usare il forno a microonde. Per dirla in breve, l'elettromagnetismo ha a che fare con tutto ciò che è legato al magnetismo, alle onde elettromagnetiche e all'elettricità.»

«Ah, quindi è colpa di Maxwell se l'altro giorno ho preso la scossa toccando un filo scoperto!»

«Più che di Maxwell, direi che è colpa della tua solita sbadataggine» lo aveva ripreso Matteo ridendo.

«Comunque, a parte gli scherzi, penso di aver capito cosa intendi, la fisica classica è un po' come il prezzemolo, è ovunque!»

«Be', non proprio ovunque... Se guardiamo le cose ancora più nel dettaglio, infatti, abbiamo bisogno della terza mappa, la meccanica quantistica! Una mappa... ehm... una teoria formulata agli inizi del Novecento da geni come Max Planck, Niels Bohr ed Erwin Schrödinger, nel tentativo di spiegare come si comporta l'infinitamente piccolo. Un mondo di particelle microscopiche, elettroni, atomi e altre cose impossibili da vedere non solo a occhio nudo, ma neppure con il più potente microscopio ottico. La meccanica quantistica spalanca le porte su un mondo misterioso, in cui le leggi che governano la realtà possono sembrare assurde, ma invece

sono sorprendentemente precise. È anche, con ogni probabilità, la teoria scientifica più accurata mai formulata: pensa che l'errore tra la teoria e le verifiche sperimentali di laboratorio è meno dello 0,0000000001 per cento.»

Alberto a quelle parole aveva aperto la calcolatrice dello smartphone e aveva chiesto: «Ti ricordi quanto dista da noi la Luna?».

«Dovrebbe essere a circa 380.000 chilometri dalla Terra, perché?»

Alberto era rimasto in silenzio a digitare e dopo un paio di conti aveva esclamato: «Incredibile, un errore così piccolo sarebbe come avere una teoria capace di predire la distanza tra qui e la Luna, e scoprire che dopo delle misurazioni precisissime l'errore è al massimo di... una frazione di millimetro!».

«Sì, esatto! Vedo che sei bravo con le proporzioni» aveva scherzato Matteo. «La meccanica quantistica è estremamente precisa. Insomma, come avrai capito, con queste tre mappe possiamo descrivere una grandissima parte di quello che ci circonda. Tre mappe che ci permettono di orientarci dalle galassie più lontane alle particelle subatomiche.»

«Bellissimo! Un po' come quell'applicazione in cui parti dall'intero globo e puoi ingrandire fino a vedere le singole case.»

«Sì, più o meno così!»

A quel punto era arrivato il cameriere con le pizze fumanti, loro avevano ringraziato ma, anziché fiondarsi sui piatti, avevano continuato la discussione.

«Anche se c'è un problema...» aveva iniziato Matteo. «Semplificando un po', infatti, possiamo considerare la teoria della relatività come un'estensione della fisica classica, come un suo "miglioramento". Infatti, se applichi la relatività agli oggetti quotidiani, ottieni praticamente gli stessi risultati che ottieni con la meccanica di Newton.»

«Perché gli effetti della relatività si vedono solo quando ci si muove vicino alla velocità della luce, o se si è vicini a masse enormi, giusto?»

«Proprio così. La relatività serve per spiegare effetti che avvengono su scale molto diverse da quelle a cui siamo abituati. Pensa che senza questa teoria, e quindi usando soltanto la formula della gravitazione universale di Newton, non riusciremmo a spiegare correttamente neppure la traiettoria che vediamo compiere nel cielo dal pianeta Mercurio. Einstein aveva capito che la massa del Sole è talmente grande, e Mercurio orbita così vicino a esso, che per studiarne in maniera accurata il moto bisognava usare la teoria

della relatività. In questo senso, possiamo dire che la relatività estende la fisica classica, perché la *comprende*, ma anche la corregge in molti dei casi nei quali darebbe predizioni errate. Oppure, usando parole tue, è come se la fisica classica fosse una “versione zoomata” della relatività...»

«Okay, ma allora dove sta il problema?»

«Eh eh, nella meccanica quantistica! Perché anche se è vero che la meccanica quantistica spiega fenomeni che non sono spiegabili dalla fisica classica, quello che non è per nulla chiaro è come una possa comprendere l'altra. Ed è proprio questo il tema principale della mia ricerca: capire se, e in che modo, la meccanica quantistica può essere vista come una versione zoomata della fisica classica...»

Dopo quelle parole Matteo aveva fatto una pausa, aveva guardato negli occhi l'amico e, incurante delle pizze che ormai si erano raffreddate, aveva proseguito: «Purtroppo, però, ti assicuro che non è per niente facile... Il problema è che la meccanica quantistica è come se fosse *tutta un'altra cosa*. Sebbene ogni cosa sia composta da particelle, il comportamento di una sola di queste è del tutto diverso dal comportamento di un loro insieme. Per descrivere il comportamento di un elettrone o di un atomo, per esempio, servono delle leggi fisiche completamente diverse da quelle di Newton, di Maxwell o di Einstein, anzi completamente diverse da tutto il resto che conosciamo.»

Alberto, che ama fare sempre paragoni, a quel punto aveva commentato: «In pratica è come avere una casa che sta in piedi grazie alla fisica della meccanica classica, ma che è costruita da mattoni che funzionano interamente seguendo un'altra fisica. Ripensandoci bene, la cosa bella è che questo non è neanche un paragone astratto, perché alla fine è proprio così! La casa è sorretta da mattoni, questi sono composti da piccoli cristalli di argilla, che a loro volta sono composti da miliardi di atomi, i quali sono costituiti da particelle ancora più piccole! Ma aspetta: quindi dove smette di funzionare la meccanica quantistica e comincia a funzionare la meccanica classica? Nelle particelle? Negli atomi? Nei cristalli d'argilla o nei mattoni?»

«Vedo che hai colto il punto!» aveva replicato Matteo quella sera, contento di vedere che il suo ascoltatore non aveva perso il filo del discorso. «L'obiettivo della mia ricerca è proprio comprendere se c'è e

soprattutto dove si trova il confine tra la meccanica classica e la meccanica quantistica.»

«E come pensi di riuscir...»

Il suono di un clacson riporta l'attenzione di Alberto sulla strada: qualcuno dietro di lui lo esorta a ripartire. “Cavolo, il semaforo è diventato verde e non me ne sono neanche accorto” pensa. Riprende così a guidare; è in macchina da quasi due ore e ormai manca poco al laboratorio di Matteo.

«Tre chili? Esperimento? Chissà cos'è riuscito a trovare stavolta...» borbotta tra sé e sé.

## Vincere sempre alla roulette

Quando Alberto arriva a destinazione, il sole non è ancora sorto e in giro non c'è anima viva. Parcheggia la macchina e si dirige sicuro al dipartimento di Fisica: è un edificio molto riconoscibile, perché è nuovissimo, fatto di vetro e metallo, e per la sua eleganza architettonica è invidiato dal resto del campus. Tenta di telefonare a Matteo per avvisarlo del suo arrivo, ma l'amico è irraggiungibile. Arrivato all'ingresso decide comunque di entrare per conto suo, ma viene subito fermato dal guardiano notturno.

«Salve, ha bisogno? Il dipartimento è chiuso fino alle otto.»

«Buongiorno, mi chiamo Alberto, mi è stato detto di ven...» ma non fa in tempo a finire la frase che il guardiano lo interrompe: «Ah, è lei! Prego, scenda pure da quelle scale, la stanno aspettando».

“Che strano benvenuto...” pensa Alberto, ma non fa domande e segue le indicazioni. Prosegue quindi fino a trovare un'enorme porta tagliafuoco con su scritto: LABORATORI. La apre senza indugio e si ritrova a vagare in una sorta di labirinto sotterraneo. “Certo che ai fisici piace proprio la simmetria! Questi corridoi sono talmente uguali che non so neppure se ci sono già passato oppure no!” dice tra sé dopo qualche minuto. A ogni porta che trova si ferma per leggere la targhetta affissa, nel tentativo di trovare quella giusta, ma niente. Stanco di vagare a vuoto telefona di nuovo a Matteo, ma prima ancora di sbloccare lo schermo del cellulare si rende conto che lì sotto non c'è segnale.

Sta per girare l'angolo verso il corridoio successivo, quando la sua attenzione viene attirata da un'insegna rossa luminosa sopra una porta. “Fammi un po' vedere...” pensa, avvicinandosi, e finalmente sulla placchetta metallica appesa al muro c'è incisa la scritta: LAB 42 – LABORATORIO DI MECCANICA QUANTISTICA FONDAMENTALE. «È questo!»

esclama. La sua mano è già sulla maniglia, ma lo sguardo gli cade su un foglio di carta appiccicato alla porta con del nastro adesivo, sul quale c'è scritto: IN CASO DI LUCE ROSSA SI PREGA DI NON APRIRE. SUONARE IL CAMPANELLO.

“Il campanello? E dove sarebbe questo camp... Ah, eccolo!” Alberto lo preme senza esitazione. Nessun suono, nulla. Passano una decina di secondi, ancora niente, poi all'improvviso la luce rossa si spegne. È lì, indeciso se entrare oppure no, quando la maniglia ruota automaticamente spalancando la porta.

«Alberto! Sei arrivato!» esordisce Matteo, avvicinandosi per dare un abbraccio all'amico.

«Sì, ho anche provato a chiamarti, ma forse neanche il tuo telefono prende qui sotto...»

«Figurati! Già sottoterra la ricezione è infame, in laboratorio, poi, non c'è speranza. È tutto schermato. Comunque, vedo che hai trovato la strada, bravo! Vuoi un caffè? Ho proprio bisogno di una pausa...» propone Matteo, iniziando a camminare lungo il corridoio.

«Sì, ti prego! Se non prendo un caffè, crollo. Ma non puoi fare esperimenti di giorno come tutte le persone normali?» chiede Alberto seguendo l'amico.

«Certo che no, perché di notte tutto è più stabile e possiamo fare misure notevolmente più precise. Comunque, vedrai, non appena ti mostrerò l'esperimento che sto facendo ti renderai conto che ne è valsa la pena. Nessuno ha mai provato qualcosa di neanche lontanamente simile prima, e voglio che sia tu il primo a vederlo... il primo a raccontarlo al mondo. Avrai un successo incredibile!»

Alberto rimane senza parole, la scoperta di Matteo sembra qualcosa di veramente unico.

Nel frattempo sono arrivati in un salottino dedicato alle pause e alle riunioni informali. Le pareti sono ricoperte di lavagne scarabocchiate e piene di formule, ci sono due divani in tessuto, un tavolino coperto di riviste scientifiche e una sorta di piccola cucina con una macchinetta del caffè.

«Allora, perché mi hai fatto venire fin qui?» chiede Alberto, mentre l'amico comincia ad armeggiare con la macchinetta.

«Per un test di meccanica quantistica! Un esperimento per capire fin dove si spinge la validità di questa teoria, per capire dov'è il suo limite... Insomma, fino a quale punto rimane accurata. Ma lascia che ti mostri dal vivo l'esperimento quando saremo in laboratorio. Intanto, ecco il tuo caffè!» gli dice, porgendogli la tazzina.

La passione per la meccanica quantistica è qualcosa che Matteo porta con sé fin da bambino, praticamente fin da prima di sapere che cosa fosse davvero questo ramo della fisica che entra nel cuore della materia. All'inizio era rimasto sconcertato dal fatto che una teoria così precisa fosse in grado di predire il risultato di una misura solo in modo probabilistico. “Ma cosa vuol dire *probabilistico*?” si domandava Matteo le prime volte. E in seguito aveva capito che per rispondere a questa domanda doveva partire dalla fisica classica, che funziona al contrario, e cioè in modo deterministico.

Nella fisica classica, infatti, conoscendo tutte le variabili che entrano in gioco prima di una determinata azione, si può prevedere come terminerà tale azione con assoluta certezza. Si può prevedere il futuro!

“Grazie alla fisica classica potrei diventare ricco” aveva pensato il giovane Matteo guardando una foto dei casinò di Las Vegas. “Se nel gioco della roulette potessi conoscere con precisione la velocità di rotazione della ruota, la sua inclinazione, il materiale di cui è composta la pallina, la forza con cui viene lanciata, la temperatura della stanza e tutti gli altri fattori che entrano in campo, e facessi elaborare tutte queste informazioni a un computer, potrei predire il risultato finale, senza alcun errore! La probabilità iniziale di indovinare il numero passerebbe da circa un 2 per cento al 100 per cento, dopo aver fatto i calcoli!”

Tutto sommato, l'idea non era poi così assurda. Basti pensare che in certi casi non serve neanche un computer per predire la traiettoria di una palla, possiamo farlo a mente senza un grande sforzo! A un giocatore di calcio, per esempio, è sufficiente vedere il movimento del pallone per qualche frazione di secondo, per sapere già in che direzione correre per riuscire a intercettarlo al volo. Non gli servono strumenti per fare misure precise della forza e della direzione con cui è stato calciato il pallone e neanche una calcolatrice per risolvere le equazioni di Newton che ne governano la traiettoria. Una rapida occhiata, anni di esperienza e un intuito allenato sono

sufficienti per fare predizioni estremamente precise. Lo stesso vale per tanti altri sport e giochi, quindi perché non dovrebbe valere per la roulette?

Dopo giorni di calcoli, simulazioni ed esperimenti vari, il giovane Matteo si era presto reso conto che in sistemi così complessi come una roulette è praticamente impossibile sapere in modo sufficientemente preciso tutti i dati iniziali così da predire il risultato finale con certezza. Ci sono troppi parametri in ballo, troppe variabili da misurare; per non parlare poi della complessità del modello matematico che dovrebbe descrivere tutto il sistema. È lo stesso problema che rende complesso fare previsioni meteorologiche in là nel tempo: sono troppi i fattori che rendono sempre più incerte queste previsioni. Predire se tra un mese ci sarà sole o pioggia è paragonabile a predire se lanciando una moneta uscirà testa o croce: la nostra ignoranza su gran parte delle variabili è tale da far sembrare il processo completamente aleatorio.

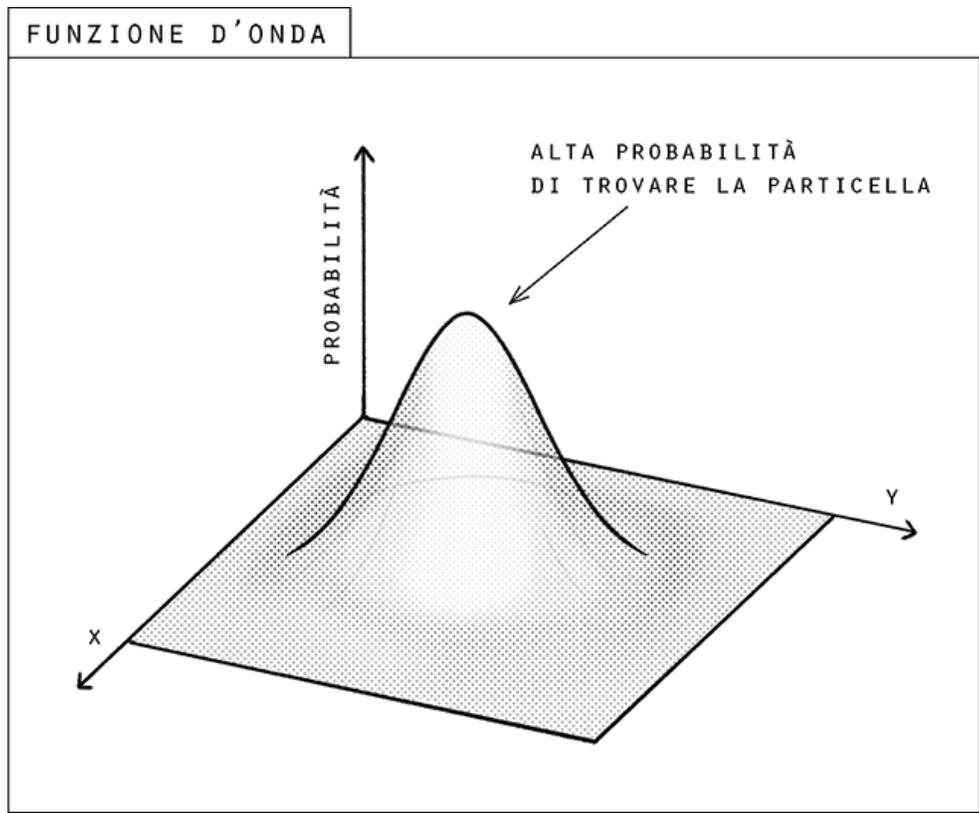
Tuttavia, è importante tenere a mente che l'impossibilità di fare tali predizioni non è dovuta al fatto che la natura non ce lo permette, ma al fatto che le nostre capacità di misurazione sono limitate. Negli esperimenti di laboratorio non è un caso che si cerchi di ridurre al minimo tutte le variabili che non possono essere controllate e che quindi potrebbero influenzare i risultati. Se si giocasse alla roulette in un ambiente sottovuoto, con una rotazione costante della ruota e con la pallina lanciata sempre con la stessa forza e nello stesso punto da un robot, grazie alla meccanica classica potremmo predire molto più facilmente il numero che uscirà.

Nel mondo quantistico, invece, non è affatto così. Se prendessimo una delle roulette di Las Vegas e immaginassimo che funzioni secondo le leggi quantistiche, il numero sul quale si fermerà la pallina sarebbe assolutamente impossibile da predire con certezza. Non importa quanto bene si conoscano tutti i dati iniziali, i parametri e quant'altro, il risultato sarebbe fondamentalmente casuale. In meccanica quantistica, il risultato di un'osservazione è sempre probabilistico e vincolato a un'incertezza imprescindibile. Qualcosa di apparentemente paradossale, incompatibile con l'idea che una teoria scientifica debba essere un modello predittivo ben preciso. Ma la meccanica quantistica è così, incapace di predire con certezza il risultato di una misura, eppure, nonostante questo, rimane la teoria più accurata di sempre.

Dover accettare il fatto che il mondo di particelle, atomi e altre cose piccolissime si comporti in maniera probabilistica non per un limite umano sulla conoscenza di tutte le variabili in gioco, ma per la natura stessa delle particelle, è qualcosa che ha sempre lasciato Matteo sconcertato. Se grazie alla legge di gravitazione universale di Newton possiamo predire con precisione in che punto del cielo si troverà la Luna a una determinata ora di una determinata notte futura, la meccanica quantistica non è minimamente in grado di dirci dove si troverà l'elettrone di un atomo nel momento in cui decideremo di osservarlo.

Questa incertezza è dovuta al fatto che la meccanica quantistica descrive i sistemi fisici non come una collezione delle proprietà che essi possiedono (posizione, velocità, rotazione...), ma con un oggetto matematico chiamato funzione d'onda. Questa funzione racchiude tutta l'informazione che è possibile ottenere dal sistema quando viene misurato, ma solo in termini probabilistici. Per esempio, la meccanica quantistica ci può dire dove si troverà in media l'elettrone che orbita attorno al nucleo di un atomo, o quale sarà la sua energia più probabile, ma nulla di più certo.

Un modo per pensare a una funzione d'onda è considerarla come una campana che fluttua nello spazio, o meglio come la curva a campana. Tuttavia, al contrario di un'onda elettromagnetica o di un'onda del mare, questa è qualcosa di immaginario, di astratto.



Nonostante ciò, la funzione d'onda è estremamente utile. Se vogliamo sapere la posizione di una particella nello spazio, grazie alla funzione d'onda (la nostra campana) possiamo stimare dove avremo una probabilità maggiore di osservarla (la punta della campana) e dove una probabilità minore (le "code" della campana).

Quindi è proprio questa curva a campana a fare tutta la differenza. È nella funzione d'onda stessa che si racchiude sia l'informazione del sistema sia l'incertezza a essa associata, e le due sono inseparabili. Mentre la meccanica classica ci può predire con precisione arbitrariamente alta quale sarà il risultato di una misura, l'unica cosa che la meccanica quantistica ci può fornire con precisione arbitrariamente alta è la probabilità di ottenere un certo risultato.

Facciamo un esempio pratico, che troppa astrazione fa girare la testa! Normalmente, giocando alla roulette abbiamo una possibilità su 37 di indovinare il numero giusto, cioè il 2,7 per cento. Questo perché non teniamo conto di alcun parametro, quindi la pallina può finire in uno dei 37 numeri con la stessa identica probabilità. Se però prima del lancio

facessimo tutte le misurazioni del caso (velocità della pallina, temperatura, rotazione eccetera) magari dopo calcoli complicatissimi potremmo indovinare dove finirà la pallina con una probabilità più alta del 2,7 per cento. In pratica, la meccanica classica ci direbbe che, misurando tutte le variabili in questione con una precisione sufficientemente alta, sarebbe possibile indovinare il numero con una probabilità del 100 per cento, cioè predire il risultato con certezza. Al contrario, se la meccanica quantistica ci dice che abbiamo una probabilità dell'80 per cento di trovare un elettrone in un determinato punto, questa probabilità non potrà mai aumentare. Non c'è altro che possiamo misurare per ottenere una predizione più precisa, non ci sono variabili che racchiudono l'informazione necessaria a migliorare la nostra stima. L'accuratezza della meccanica quantistica sta però nel riuscire a calcolare con estrema precisione proprio la probabilità che un certo evento si verifichi. Se la predizione è dell'80 per cento, allora si è sicuri che l'80 per cento delle volte si troverà l'elettrone esattamente nel punto predetto.

“Che strano, però” pensava all'epoca Matteo, “se una particella subatomica si comporta in modo probabilistico perché segue le leggi della meccanica quantistica, perché allora la traiettoria di un pallone da calcio che è formato da tante particelle subatomiche non è poi così casuale?” D'altra parte tutto ciò che chiamiamo “sistema classico” e che pensiamo debba seguire le leggi deterministiche di Newton non è altro che un insieme di particelle minuscole, quindi imprevedibili perché quantistiche. “Magari il problema sta nel fatto che la meccanica quantistica non tiene conto di tanti altri parametri importanti, e così ci fa sembrare che il risultato di una misura sia casuale quando in realtà non lo è. Così come abbiamo l'impressione che la roulette dia un risultato assolutamente aleatorio, quando invece il problema è che non riusciamo a tener conto di tutte le variabili che sono necessarie a descrivere la traiettoria della pallina. Ciò che noi chiamiamo incertezza nella meccanica classica in realtà non è altro che ignoranza.”

Il giovane Matteo non sapeva che questi dubbi erano esattamente gli stessi che avevano attanagliato i padri fondatori della meccanica quantistica. C'era chi credeva che la meccanica quantistica fosse la teoria più completa per spiegare la natura, accettando quindi la sua qualità probabilistica come inevitabile, mentre altri pensavano fosse solo un'approssimazione di qualcosa di più fondamentale e sicuramente deterministico.

Numerosi fisici illustri, tra cui lo stesso Einstein, erano incapaci di accettare il fatto che un modello matematico della natura potesse contenere degli elementi fondamentalmente aleatori e imprevedibili. Einstein, infatti, nonostante avesse contribuito a gettare le basi per questa teoria, era convinto che non fosse completa e che ci fossero delle variabili nascoste nel mondo microscopico di cui non si tenesse conto. Era dunque l'ignoranza rispetto a queste variabili l'origine dell'aspetto probabilistico della meccanica quantistica. Un po' come se all'interno degli elettroni ci fosse una qualche caratteristica che, se scoperta, avrebbe permesso di predire con certezza la loro posizione nell'atomo. Proprio per questo motivo Einstein scrisse in una lettera la famosa frase "Dio non gioca a dadi" alludendo al fatto che tutto deve essere deterministico: per lui i fondamenti della natura non potevano basarsi su qualcosa di aleatorio.

Tuttavia, esperimenti estremamente sofisticati e precisi, che prendono il nome di test di Bell, hanno dimostrato che non può esserci nessuna variabile nascosta, e che quindi deve essere la natura stessa a contenere una componente di casualità. O meglio, questi test hanno dimostrato che se mai fosse possibile trovare una teoria capace di predire con esattezza il risultato di una misura effettuata su un sistema quantistico, questa teoria dovrebbe essere "non-locale" ossia dipendere da ciò che accade potenzialmente in tutto il resto dell'universo.

Per le nostre menti questo non ha senso, siamo abituati alla "località", cioè al fatto che il comportamento di un sistema dipende solo da ciò che lo circonda nelle sue immediate vicinanze. Per esempio, la teoria capace di predire il risultato della roulette, per quanto complicata sia, ci immaginiamo debba essere locale: dipenderà, cioè, dal lancio del croupier, dalla velocità di rotazione della ruota, dalle molecole d'aria circostanti e da ciò che succede alla pallina. Allo stesso modo, ci aspettiamo che anche il comportamento di una particella microscopica dipenda da ciò che le accade intorno, per esempio dall'interazione elettromagnetica con altre particelle circostanti.

Al contrario, una teoria non-locale non è minimamente intuitiva, anzi sfiora l'assurdo. Se una roulette di Las Vegas si comportasse secondo una tale teoria, il suo risultato potrebbe essere correlato con quello di un'altra roulette, magari a Monte Carlo. Una teoria non-locale sembra permettere l'azione a distanza tra le cose, implicando che sistemi arbitrariamente

lontani possano influenzarsi a vicenda *istantaneamente*, apparentemente violando il principio di Einstein che l'informazione non può viaggiare più veloce della luce. Questo, tuttavia, è impossibile, e infatti la non-località non implica la possibilità di comunicare istantaneamente, ma quella di poter osservare correlazioni inspiegabili localmente. Neanche a dirlo, da un punto di vista concettuale questo potrebbe sembrare ancora peggio che ammettere che il mondo microscopico si comporti in modo casuale. Anche perché, se si dovesse ammettere che tutto in natura si comporti in modo non-locale, allora sarebbe persino impossibile pensare di condurre degli esperimenti in un laboratorio qui sulla Terra, se poi, per interpretare le misure ottenute, fosse necessario aver preso nota di ciò che sta accadendo dall'altra parte del Sistema Solare.

«Ah! Certo che ci stava proprio questo caffè! Peccato solo che non ci siano dei biscotti.»

«Lo so, ogni volta che li porto gli studenti se li finiscono tutti in un battibaleno! Però possiamo andare a mangiare qualcosa assieme più tardi, ora non c'è molto tempo, meglio se torniamo in laboratorio.»

«Sono d'accordo, anche perché mi hai buttato giù dal letto nel bel mezzo della notte, e adesso non vorrai farmi aspettare, eh! Sono proprio curioso!»

«Infatti, lascia pure la tazzina qui sul tavolo e andiamo» dice Matteo, dirigendosi verso l'uscita del salottino.

Dopo aver percorso a ritroso un paio di corridoi, i due si ritrovano di fronte alla misteriosa porta del LAB 42. Matteo fruga nella tasca, estrae il badge che accosta alla maniglia e... *bip!* Al suono segue una lucina verde lampeggiante che indica l'apertura della porta. Alberto si sente un po' intimorito – “Oh mamma, cosa ci sarà lì dentro?” –, ma la curiosità è così forte che entra senza esitare. Quello che vede al di là della porta, però, decisamente non è ciò che si aspettava.

## Sulla cresta dell'onda

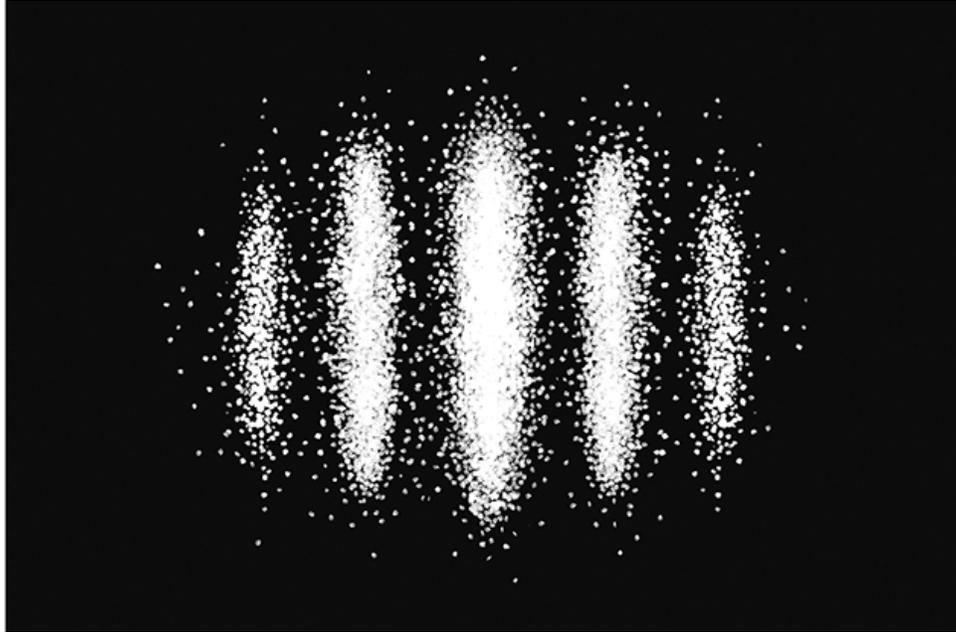
Alberto si ritrova in quello che gli sembra non certo un laboratorio, quanto piuttosto una sorta di angusto ripostiglio. Ci sono ciabatte, camici appesi al muro, un paio di scope, diverse mensole con oggetti e dispositivi vari. «Sarebbe questo il laboratorio?» chiede confuso.

«Ma no! Il laboratorio è qui dietro» risponde Matteo indicando una porta di metallo alle sue spalle. «Questa stanza serve solo per cambiarsi. Mettiti delle ciabatte e un camice: dobbiamo stare attenti a non portare dentro polvere e sporcizia perché ci sono strumenti parecchio delicati... Ah, lascia telefono e orologio su questa mensola, meglio evitare interferenze di alcun tipo.»

«Va bene, però l'orologio è a carica manuale, posso tenerlo? Sai, non me ne separo mai...»

«Mmm... okay, se non è a batteria tienilo pure» conclude Matteo, cominciando a cambiarsi anche lui.

Alberto non può fare a meno di tornare con la memoria ai tempi del liceo, in particolare alle lezioni nel laboratorio di chimica: con il camice bianco addosso, si sentiva ammantato da un senso di autorità scientifica, come se fosse già parte del mondo dei ricercatori. Sotto sotto ha sempre voluto diventare uno scienziato, o almeno capire il funzionamento della natura anche a un livello più profondo, ma una serie di scelte decisive l'hanno portato su un percorso completamente diverso. Essere lì, però, lo elettrizza, non vede l'ora di iniziare. Non fa in tempo a chiudere gli ultimi bottoni del camice che la sua attenzione viene catturata da un poster alla parete intitolato *Dualismo onda-particella: l'esperimento della doppia fenditura con elettroni*, che mostra una specie di fotografia nera con una serie di strisce bianche formate da una miriade di puntini.



Ci riflette un attimo: ha già sentito parlare del dualismo onda-particella...

«Allora, sei pronto?» chiede Matteo, interrompendo i pensieri dell'amico.

«Aspetta un secondo, Matte... Guarda qua» gli dice indicando il poster. «Avevo letto di questo dualismo in riferimento alla luce, che apparentemente può essere spiegata sia come un'onda sia come un flusso di particelle senza massa... i fotoni, giusto?»

«Sì, esatto, è così.»

«Okay, ma cosa c'entra questo con gli elettroni? Anche se sono minuscoli, gli elettroni *hanno* una massa, sono concreti. Quindi un elettrone come fa a essere un'onda? È una particella o è un'onda?»

«È una banana, è un boomerang o un martello?» lo prende in giro Matteo. «Dai, sto scherzando, non fare quella faccia» si affretta ad aggiungere, vedendo l'espressione infastidita dell'amico, e poi prosegue: «Devi sapere che in meccanica quantistica la tua domanda semplicemente non ha senso. I concetti di "particella", nel senso di "corpuscolo", e "onda" sono qualcosa di puramente classico, idee che ci aiutano a descrivere il comportamento di quello che stiamo osservando. Un sasso si comporta come un corpuscolo: ha una posizione ben definita, può rimbalzare contro altri sassi, e così via. Al contrario, le increspature d'acqua sulla superficie di uno stagno si comportano come onde: sono distribuite nello spazio, se

incontrano un ostacolo possono essere deformate e quando si scontrano tra loro possono diventare più alte o più basse. Nel mondo quantistico ogni cosa può comportarsi sia come corpuscolo sia come onda!»

«Ed è proprio questo che mi fa andare fuori di matto!»

«Eh, Albe, non sei mica l'unico! Ma sappi che l'esperimento della doppia fenditura dimostra proprio questo. Te lo spiego brevemente...»

«Vai, ti ascolto» risponde Alberto. Se fino a un secondo prima non vedeva l'ora di entrare nel laboratorio, ora la sua curiosità sembra proprio essere stata catturata da qualcos'altro.

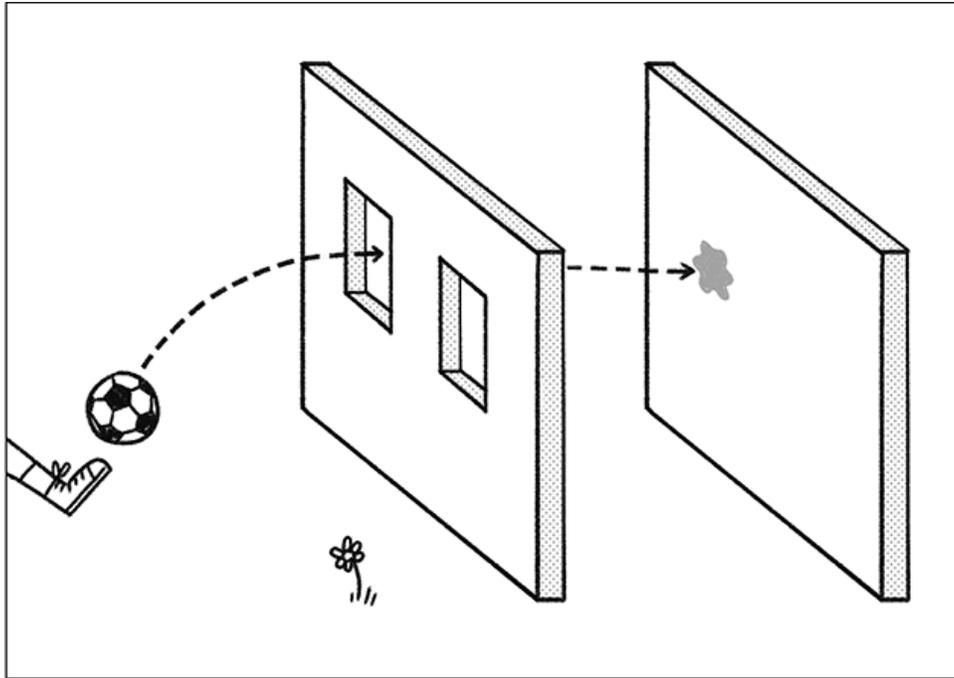
«Allora, in questo esperimento una sorgente emette elettroni verso una barriera con due piccole aperture – ecco perché “doppia” fenditura – e dietro queste aperture c'è un rivelatore che registra dove arrivano gli elettroni...» Matteo si interrompe un attimo vedendo che alla parola “rivelatore” l'amico ha cambiato espressione, poi gli chiede: «Ti ricordi quella volta, da bambini, quando stavamo giocando a pallone sotto la pioggia nel campo dietro la scuola...».

«... e per sbaglio ho distrutto la finestra della vicina calciando la palla, e siamo dovuti scappare via come dei fulmini?»

«Sì, esatto! Anche perché la palla infangata aveva lasciato una chiazza sul muro del soggiorno.»

«Okay, ma non capisco cosa c'entra...» ribatte perplesso Alberto.

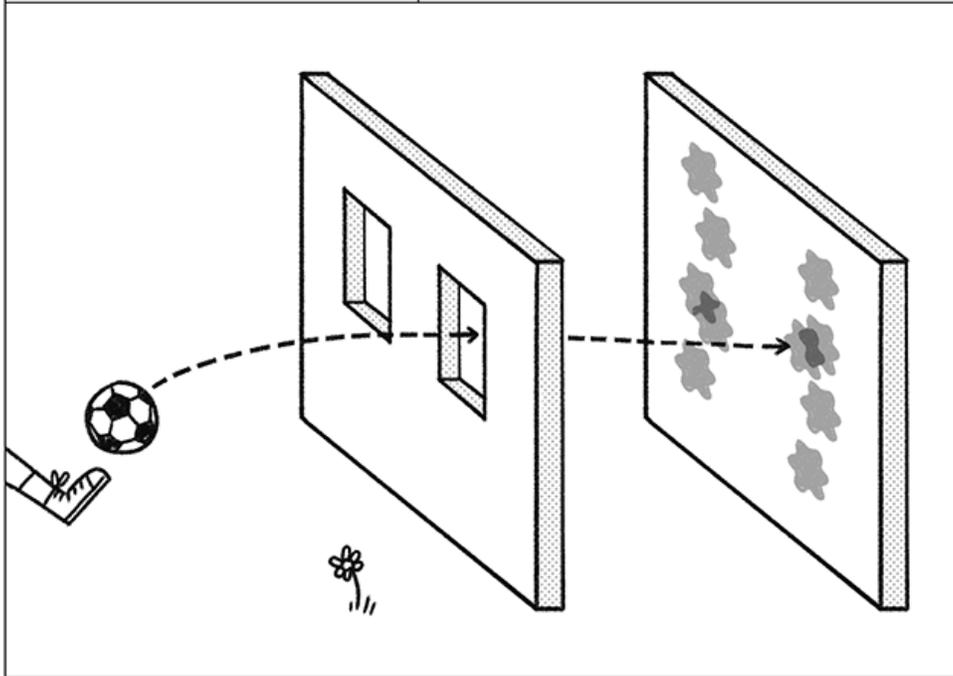
«Be', puoi visualizzare meglio l'esperimento pensando a quel giorno: il nostro elettrone è la palla infangata, le due finestre sulla parete della vicina sono la doppia fenditura e infine il muro del soggiorno è il rivelatore! Ora, cosa accadrebbe se tu calciassi a caso cento palle contro le due finestre?»



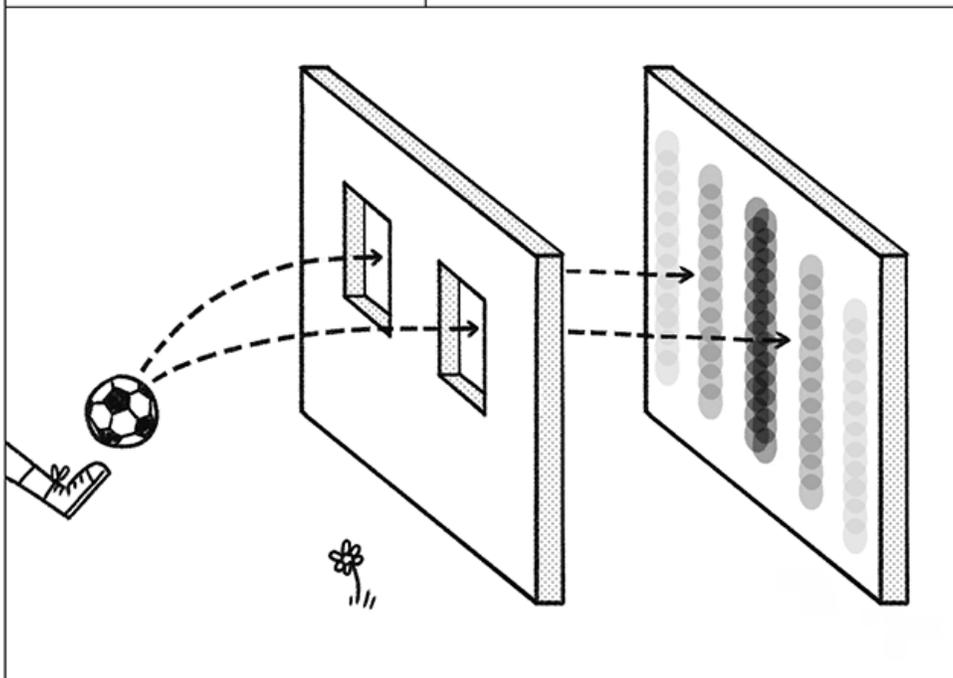
«Mmm, tralasciando il fatto che la vicina mi farebbe arrestare, immagino che troverei sulla parete del soggiorno un insieme di macchie concentrate a destra e un insieme di macchie concentrate a sinistra, in corrispondenza delle due finestre. Direi una cinquantina di macchie da entrambe le parti.»

«Esatto! Questa è la risposta giusta, ma... solo nel mondo della meccanica classica, dove il pallone è veramente un pallone, cioè un grande corpuscolo. Ma se immaginiamo per assurdo di compiere questo esperimento con un “pallone quantistico” quello che vedremmo sarebbe completamente diverso: il muro non avrebbe solo due aree piene di fango, ma una lunga serie di strisce verticali infangate, intermezate da strisce di muro perfettamente pulito.»

PALLONE CLASSICO



PALLONE QUANTISTICO



«Ma questo non ha assolutamente senso!» esclama Alberto. «Innanzitutto, dovrebbero esserci solo due macchie, dato che le finestre sono soltanto due.

Anche se, la cosa che proprio non mi torna, è che è impossibile che la palla colpisca anche l'area della parete senza nessuna finestra davanti.»

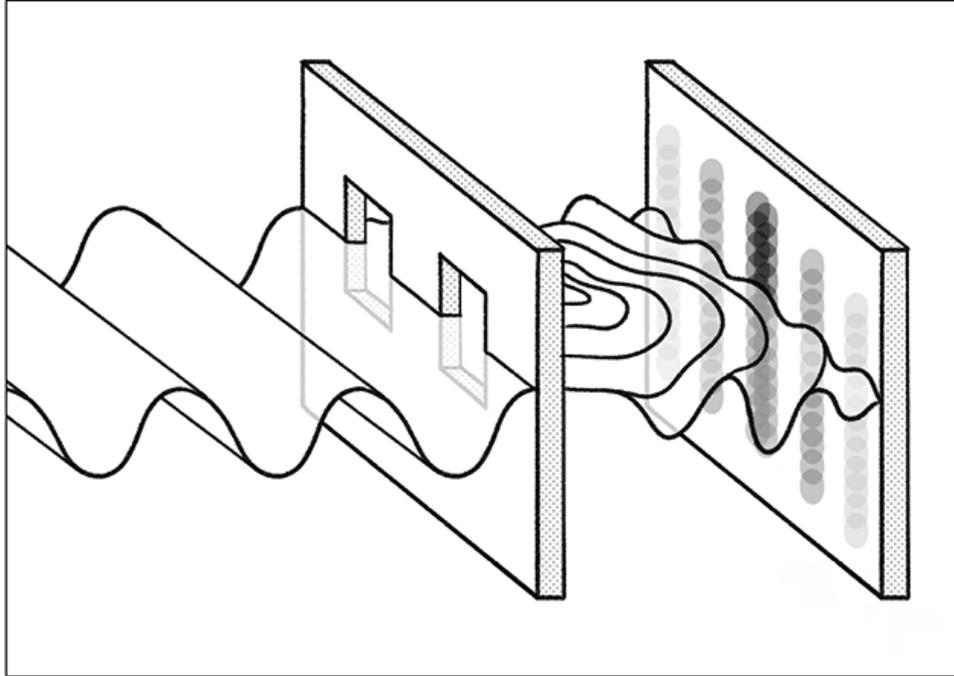
«Assurdo, vero?» ribatte Matteo, contento che l'amico dimostri una vera e propria passione per questi argomenti che possono sembrare ostici. «Be', sappi che questa strana ripetizione di strisce si chiama figura di interferenza e, anche se sembra strana, in realtà è facile da spiegare se si immagina che quello che attraversa le due finestre sia... un'onda!»

«Un'onda? Frena, frena, frena» lo blocca Alberto. «Fammi un esempio, altrimenti mi perdo...»

«Okay, d'accordo... Allora, fai finta di essere a Venezia quando c'è l'acqua alta, tanto alta... Se un'onda arriva a colpire le finestre aperte di una casa, vedrai una parte di onda passare attraverso la finestra di sinistra, e un'altra parte passare la finestra di destra. La parte di onda passata da sinistra *interferirà* con quella di destra, nel senso che le increspature d'acqua provenienti dalla finestra di destra si combineranno con quelle provenienti dalla finestra di sinistra. Quando due creste d'onda, ovvero i punti più alti, si sovrappongono, infatti, l'altezza risultante è la somma delle altezze delle due onde, creando così un "picco d'onda". Al contrario, quando la cresta di un'onda incontra il punto più basso di un'altra onda, le onde si annullano. La figura d'interferenza è proprio questo: l'alternanza di massimi e minimi di onde che si scontrano!»

«Fin qui ti seguo, Matte, vai avanti...»

«Bene, allora torniamo alla tua domanda di prima: se ti chiedi come mai le macchie di fango possano apparire anche nell'area di parete senza nessuna finestra di fronte, per risponderti ti basterà ricordare che le onde si propagano in tutte le direzioni, raggiungendo prima o poi qualsiasi punto.»



Alberto prova così a immaginarsi quello scenario, ma gli viene un altro dubbio: «Se penso ai palloni da calcio come a delle onde, effettivamente la cosa ha senso ma, se li penso come a dei corpuscoli, non c'è modo di spiegare questa interferenza...».

«Proprio così! Anche perché non dimenticarti che stavamo immaginando di calciare i palloni uno per uno! L'idea non è che calciando tanti palloni assieme questi formino un'onda, bensì che ogni singolo pallone si comporti come un'onda! In ogni istante c'è soltanto un solo pallone che sta viaggiando dal tuo piede al muro della vicina. Quindi, per poter spiegare che dopo aver calciato decine di palloni si viene a creare una figura d'interferenza dobbiamo ammettere che ogni singolo pallone abbia attraversato sia la finestra di sinistra sia quella di destra, interferendo con se stesso!»

«Eh, no, Matte, scusa, ma com'è possibile che un singolo pallone passi sia a sinistra sia a destra? Come fa a interferire con se stesso?! Non può essere... Il pallone non si divide mica a metà. Infatti, se la vicina fosse dentro la stanza, immagino che vedrebbe un solo pallone, che entra o dalla finestra di sinistra o da quella di destra.»

«Certo, se la vicina, o una telecamera, stesse a guardare le due finestre, vedrebbe un singolo pallone entrare da una sola delle due finestre...»

«Ah, ecco, allora lo ammetti anche tu!»

«Aspetta, Albe, fammi finire... perché io ho detto “se”.»

«E quindi?»

«Quindi l'atto stesso di compiere questa osservazione comporterà che non potrà formarsi nessuna figura di interferenza sulla parete della stanza. Nell'esperimento della doppia fenditura noi sappiamo dove si trova la particella solo in due momenti: all'inizio, ovvero nel momento in cui viene emessa dalla sorgente, e alla fine, quando colpisce il rivelatore. In questi due momenti la particella è ben descritta dall'idea di corpuscolo. Durante il suo spostamento, tuttavia, la particella si comporta come un'onda, propagandosi in tutto lo spazio che ha a disposizione. Per questo colpirà entrambe le fenditure passando attraverso di esse simultaneamente.»

«Mmm, nel senso che l'esperimento funziona perché non osservo la particella durante il tragitto?»

«Esatto! La situazione, infatti, cambia drasticamente se decidiamo di scoprire cosa accade in corrispondenza delle due fenditure, cioè se vogliamo osservare la particella *durante* il tragitto. A ogni istante in cui vogliamo osservare la particella, stiamo effettivamente misurando dove essa si trova, e questa dovrà necessariamente essere in una posizione ben definita. Perciò, a ogni misura, la particella dovrà comportarsi come un corpuscolo e, se questa misura è fatta in prossimità delle fenditure, allora la particella non potrà attraversarle entrambe.»

Alberto a questo punto da una parte crede di aver capito, dall'altra è ancora confuso, per questo chiede: «Quindi se gli elettroni vengono osservati in prossimità delle fenditure da alcuni sensori, sul rivelatore si vedranno solo due aree colpite, e la figura di interferenza scompare? Come dei veri e propri palloni che creano solo due grandi macchie sulla parete, una a sinistra e una a destra, in corrispondenza delle due finestre?».

«Sì, esattamente come hai ipotizzato all'inizio... Questo perché un corpuscolo si muove in maniera pressoché rettilinea e non si propaga ovunque come un'onda. Tuttavia, una particella quantistica è come se possedesse entrambi questi comportamenti, allo stesso tempo di onda e di corpuscolo. Sono un po' come due facce della stessa medaglia. Osservare la particella è quello che andrà a cambiare e a determinare il suo comportamento. So che sembra ridicolo, ma ti ricordi quando abbiamo parlato di probabilità poco fa? Tutto questo risulta sensato se consideriamo

l'onda come la probabilità di trovare la particella in una determinata posizione. Solo osservando la particella abbiamo la sicurezza di trovarla in un punto specifico, e questo comporta la perdita delle sue proprietà ondulatorie.»

«Quindi, se ho capito bene» azzarda Alberto, «sparando elettroni uno per uno contro una doppia fenditura, si vedono queste strisce di interferenza, a dimostrazione che non sono dei semplici corpuscoli, ma anche onde. Perché gli elettroni sono particelle quantistiche, giusto?»

«Giusto, e ti dirò di più: questo non vale solo per gli elettroni. Il dualismo onda-particella è una proprietà fondamentale della meccanica quantistica! Esperimenti di doppia fenditura sono stati fatti non solo con elettroni, ma anche con neutroni, atomi e persino molecole! Già nel 1999 il gruppo di Anton Zeilinger a Vienna condusse un esperimento con delle molecole sferiche composte da 60 atomi di carbonio, chiamate "fullereni". Per darti un'idea delle loro dimensioni, pensa che se una palla da calcio fosse grande come la terra, allora il fullerene sarebbe grande come una palla da calcio. Anche se può sembrare minuscolo, è qualcosa di decisamente più grande di un atomo. Nei decenni successivi sono stati usati composti ben più massicci, formati anche da migliaia di atomi. Tutti questi hanno dimostrato che la meccanica quantistica, e in particolare l'idea della natura ondulatoria della materia, non si applica soltanto a particelle microscopiche, ma anche a strutture ben più complesse.» Nel pronunciare queste parole gli occhi di Matteo si illuminano: in effetti si entusiasma sempre quando racconta quei risultati apparentemente impossibili, e questo perché sono gli stessi che lo hanno spinto a compiere esperimenti simili in passato e, in qualche modo, anche quello che è impaziente di mostrare ad Alberto.

«Quindi mi stai dicendo che il dualismo onda-particella è stato già dimostrato per elettroni, neutroni, atomi, fullereni e altre molecole molto complesse... ma allora perché non funziona se usiamo dei veri palloni da calcio, o almeno dei granelli di sabbia? Fino a quali dimensioni ci si può spingere prima di veder scomparire questo dualismo e tornare a vedere solo il comportamento corpuscolare della fisica classica?»

«Vedi? In un modo o nell'altro torniamo sempre al mio campo di ricerca: dov'è il limite a tutto questo? Magari potremmo eseguire l'esperimento con dei granelli di sabbia, o addirittura con delle palle da bowling, se solo avessimo a disposizione la tecnologia necessaria. Il problema principale

infatti è che, nel momento in cui una particella viene osservata, questa smette di comportarsi come un'onda e si comporta come un corpuscolo, proprio come nell'esempio che facevamo prima, quando volevamo provare a guardare da quale finestra passava il pallone. Ma attenzione, quando uso il termine "osservare" non voglio dire che ci sia per forza una persona o una videocamera a guardare ciò che accade, vuol dire piuttosto che la particella *interagisce* con qualcosa, anche solo con un raggio di luce, o una molecola d'aria. In un esperimento di doppia fenditura non possiamo più osservare il fenomeno di interferenza nel momento in cui la particella viene "osservata" o, in altre parole, nel momento in cui interagisce con un elemento esterno.»

«Ah, a questo non avevo pensato...» commenta Alberto perplesso.

«Eh, questo in verità è il punto cruciale: quando si conducono esperimenti sulla meccanica quantistica è necessario creare un ambiente il più isolato possibile. Per farlo di solito si sfruttano ambienti bui, contenitori che raggiungono temperature bassissime o il vuoto quasi assoluto, rivestimenti per schermare radiazioni elettromagnetiche eccetera eccetera.»

«Ho capito: è per questo che il tuo laboratorio è sottoterra e che qui il cellulare non prende!!!»

«Esatto, è per questo. Alcuni degli esperimenti, inoltre, li conduciamo di notte, così siamo ulteriormente schermati dalla radiazione solare, ma anche dal rumore creato dalle attività umane, come le vibrazioni causate dai mezzi di trasporto. Comunque, ricorda che è praticamente impossibile schermare completamente un sistema da interazioni non volute con l'ambiente circostante: ci sarà sempre qualche molecola d'aria, qualche fotone, qualche particella proveniente dal cosmo che interagirà con esso, "osservandolo" e distruggendo quindi ogni comportamento quantistico.»

«Già...»

«Ora, prova a immaginare di isolare al meglio possibile un ambiente per fare l'esperimento della doppia fenditura con un oggetto macroscopico. Dato che l'isolamento non potrà mai essere completo, è chiaro che più grande è l'oggetto e maggiore sarà la probabilità che interagisca con qualche molecola d'aria residua o con qualche fotone. In aggiunta, ci sono anche altre complicazioni. Per esempio, ogni corpo ha una certa temperatura ed emette quindi lui stesso raggi infrarossi, cioè fotoni, che possono andare a intralciare l'esperimento. Bisognerebbe prima raffreddare il pallone a temperature vicine allo zero assoluto, ma capisci che non è

banale. Inoltre, più un corpo è grande, più è difficile costruire delle fenditure appropriate. Sembra un controsenso ma, per vedere l'effetto di interferenza, la larghezza delle fenditure dovrebbe diventare tanto più piccola quanto più l'oggetto che vogliamo analizzare è grande. Quindi, tenendo conto di tutti questi fattori, realizzare l'esperimento di doppia fenditura con un pallone da calcio è praticamente impossibile...» sentenza alla fine Matteo.

«Aspetta, però» prosegue Alberto “esaltato”: gli è appena venuta un'intuizione delle sue. «Allora *la risposta* dev'essere questa! Il limite dove la meccanica quantistica smette di essere valida e tutto torna a seguire la fisica classica è determinato dall'interazione con l'ambiente circostante!» esclama Alberto convinto, credendo di aver risolto il problema.

«Eh eh, non è così semplice, purtroppo» Matteo in un secondo riporta l'amico con i piedi per terra. «Tu stai dando per scontato che non ci sia alcun altro limite, che qualsiasi cosa possa seguire le leggi della meccanica quantistica a patto che sia isolata sufficientemente bene. È come se stessi dicendo che il limite è tecnologico, legato a quanto bene riusciamo a ideare e condurre un esperimento... ma può esserci dell'altro. Alcune teorie prevedono che la meccanica quantistica stessa possa fallire per oggetti composti da molte particelle anche se perfettamente isolati dall'esterno. Questo perché potrebbe benissimo essere che le leggi quantistiche a cui siamo abituati siano solo un'approssimazione di qualcosa di più fondamentale...»

«In che senso, scusa?»

«Nel senso che potrebbero esserci delle correzioni a queste leggi, che si amplificano quante più sono le particelle in gioco. Ecco, io sto cercando di capire se è questo il caso.»

«E come pensi di riuscire a risolvere tutte le difficoltà pratiche relative all'esperimento della doppia fenditura?»

«Be', semplicemente cambiando esperimento. Ci sono tantissimi approcci per testare le predizioni della meccanica quantistica, la doppia fenditura è solo uno di questi. Con ciò non voglio dire che gli altri metodi siano privi di difficoltà, ma ognuno ha delle difficoltà diverse, più o meno semplici da trattare a seconda dei casi.»

«Okay, ma allora tu che approccio intendi utilizzare?»

«Ora lo vedrai» risponde Matteo, aprendo la porta di metallo che dovrebbe portare al laboratorio. «Seguimi!»

## La pentola a pressione

Quando entra, Alberto resta senza parole: si era immaginato una marea di strumenti, apparecchiature futuristiche e chissà che altro, praticamente uno spazio simile all'interno di una navicella spaziale fantascientifica, e invece non c'è... niente!

O meglio, quasi niente: la stanza è completamente bianca, così bianca che dà fastidio alla vista, come quando si va a sciare senza occhiali; al centro c'è una specie di colonnina che funge da supporto a un contenitore giallo, il quale è collegato, tramite uno spesso cavo, a uno strano parallelepipedo molto scuro appoggiato al pavimento, una specie di scatola nera. Infine, nell'angolo opposto alla porta c'è la scrivania di Matteo, sulla quale sono disposti un computer, qualche foglio di carta e l'immane cubo di Rubik.

«Tutto qui?» chiede Alberto, cercando di non sembrare deluso per non offendere l'amico.

«Proprio così! Bello, vero? Ma non farti ingannare dall'apparente semplicità di questo apparato, perché è più complesso di quello che sembra. Ciò che riesce a fare ti sbalordirà!»

«Va bene, se lo dici tu...»

«Sì, sì, fidati! Allora... iniziamo da qui: vedi questo contenitore giallo?» chiede Matteo aprendo il coperchio. «Non vorrai mica aprirlo, spero, dato che c'è il segnale di radioattività!»

«Sì, perché dentro c'è il polonio 210 che usiamo come sorgente radioattiva.»

«Polonio? Sorgente radioattiva?! Ma sei impazzito? Non è pericoloso? Non abbiamo nessuna protezione contro le radiazioni!»

«Ma no, stai tranquillo, Albe. È un campione piccolissimo, se stai a una certa distanza e non te lo mangi è praticamente innocuo.»

«Perché dovrei mangiarmi un sasso radioattivo? Comunque, il tuo “praticamente” non mi rassicura per nulla.»

«Guarda che dico davvero, non hai di che preoccuparti! Ci sono diversi tipi di radiazioni, alcune più pericolose e altre meno. Tra le più pericolose ci sono i raggi gamma, che sono fotoni ad altissima energia e quindi molto penetranti. Pensa che per schermarli ci vogliono delle spesse lastre di piombo. Le radiazioni beta, invece, composte da elettroni o positroni, per quanto siano comunque pericolose, sono già molto meno penetranti. Per schermarle si può usare una semplice lastra di alluminio spessa pochi millimetri. Queste qui che abbiamo noi sono le meno pericolose di tutte, si chiamano radiazioni alfa e possono essere schermate anche da un semplice foglio di carta. Il contenitore che vedi è più che sufficiente a proteggerci.»

«Questo mi rincuora, ma per farmi stare ancora più tranquillo puoi dirmi di cosa sono fatte le radiazioni alfa?»

«Di particelle alfa, ovviamente!» esclama Matteo.

«Sì, okay, ma quindi?» ribatte Alberto sconsolato.

«Hai ragione, Albe, allora facciamo un passo indietro, così ti spiego meglio. Come immagino saprai, i nuclei degli atomi sono composti da neutroni – particelle che, come dice il nome, sono “neutre” – e da protoni, che sono invece particelle con carica positiva. Avendo la stessa carica, i protoni tendono a respingersi tra di loro, come quando cerchi di unire due calamite avvicinando poli uguali. Se non ci fosse nulla a contrastare questa forza repulsiva, gli atomi per come li conosciamo non esisterebbero, e quindi non esisteremmo neanche noi. Fortunatamente, però, c’è una forza che permette di mantenere vicini i protoni tra di loro: la forza forte, o meglio, l’interazione nucleare forte. Questa è la più forte delle forze fondamentali della natura, anche se agisce solo a distanze piccolissime.»

«Certo che non siete molto creativi coi nomi, voi fisici» commenta Alberto scherzando.

«In effetti... Comunque, puoi pensare a questa forza come a un contenitore, per esempio una pentola a pressione ben chiusa. Immagina che questa pentola sia piena di polpette, ovvero i protoni e i neutroni, *et voilà*, ecco un bel nucleo atomico.»

«Questo è facile da immaginare!»

«Ah, bene, allora saprai rispondere a questa domanda: cosa succede se ci sono più polpette del dovuto?»

«Mmm, credo che a un certo punto la pentola non riuscirà più a contenerle tutte e in qualche modo dovrà liberarsene.»

«Esatto, questo è esattamente ciò che succede agli atomi di massa elevata: quando ci sono troppe particelle nel nucleo diventano instabili e la forza nucleare forte non riesce più a trattenere la repulsione tra i protoni. Ecco allora che per ritrovare un equilibrio la pentola “spara fuori” delle polpette, così da liberarsi di quelle in eccesso. Questo processo si chiama fissione del nucleo: è lo stesso processo che avviene in maniera controllata nelle centrali nucleari, o incontrollata quando esplode una bomba atomica.»

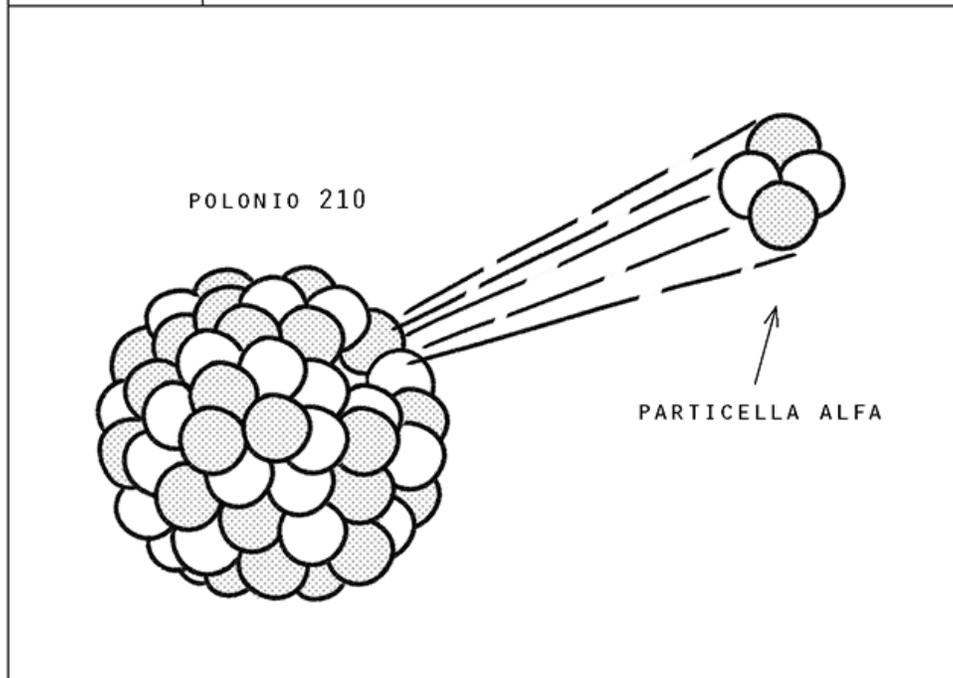
«Fin qui ci sono... ora, però, possiamo tornare al polonio che c'è in quella scatola?»

«Sì, sì, certo, ci stavo arrivando. Dunque, nel polonio 210 accade esattamente quello che ti ho appena raccontato; infatti il “210” rappresenta il numero di particelle presenti nel nucleo atomico, che ti assicuro sono veramente tante... Per questo è *instabile*! Per trovare un equilibrio questo atomo “decade” rilasciando delle particelle e trasformandosi in un atomo più stabile, il piombo. Ora, anziché liberarsi di una particella per volta, il polonio 210 si libera direttamente di quattro particelle legate tra loro, due protoni e due neutroni. Questo piccolo “grappolo” di particelle prende il nome di “particella alfa” e cioè, in altre parole, un nucleo di elio.»

«Ah, ecco cosa sono le particelle alfa! Praticamente è un po' come se la pentola in qualche modo assemblasse quattro polpette e le sparasse fuori tutte assieme.»

«Bravo, vedo che hai centrato il punto! Adesso quindi puoi capire il motivo per cui le radiazioni alfa sono meno pericolose rispetto alle altre: perché sono molto grandi e possono essere bloccate facilmente. Detto in parole povere, a parità di energia, più una particella è grande e meno potere penetrante ha. Pensa a un banco di pesci che cerca di nuotare attraverso delle reti da pesca: più un pesce è grande e meno strada riuscirà a percorrere prima di rimanere impigliato. Se , continuando con questa similitudine marina, le particelle beta sono come delle sardine, capaci di attraversare agevolmente le barriere, le particelle alfa sono come dei tonni enormi! Per questo sono facilmente schermabili.»

## FISSIONE



«Ora mi è tutto già più chiaro e sono decisamente più tranquillo» commenta Alberto. Un dubbio, però, gli è rimasto, per questo aggiunge: «C'è una cosa che ancora mi sfugge, a dir la verità. Quando hai fatto l'esempio della pentola ben chiusa che “spara” polpette, cosa intendevi? Come fanno queste a uscire se sono dentro un contenitore di metallo? Questo non riesco proprio a immaginarlo.»

«Be', il decadimento alfa è un processo quantistico e, come sempre, cercare di raccontare la meccanica quantistica tramite similitudini con la meccanica classica porta a immaginare cose impossibili. La meccanica quantistica ha un comportamento completamente diverso, bizzarro, controintuitivo, a volte paradossale. Da un punto di vista formale, questi fenomeni sono descritti tramite modelli matematici molto avanzati, ogni paragone con il mondo classico serve solo per aiutarci a renderli meno astratti. Anche se non è semplice, lascia che provi a spiegarti come potresti immaginarti la scena della pentola piena di polpette, ovvero come le particelle alfa riescano a fuoriuscire dal “contenitore” della forza forte...»

Quando Matteo inizia a parlare non c'è fine: ogni concetto sembra rimandare a un altro e a un altro e a un altro ancora, ma Alberto è ben contento di ascoltarlo.

«Allora» continua Matteo, «immagina di essere in cucina: a un certo punto alcune polpette vengono sparate fuori, ma non da una fessura tra la pentola e il coperchio, bensì direttamente dalle pareti. È come se le polpette riuscissero ad attraversare il metallo della pentola, fuoriuscendo così nella stanza. Questo fenomeno è assolutamente impossibile che avvenga nel mondo macroscopico, anche perché, altrimenti, sai quanto scomodo sarebbe cucinare?»

«Voi fisici adorare questi paragoni, eh?» lo riprende Alberto.

«Può darsi» sogghigna Matteo. «Comunque, tornando al nostro discorso, la capacità di attraversare barriere apparentemente impossibili da superare è alla base di tantissimi fenomeni del mondo microscopico, come appunto il processo di fissione nucleare. Questo fenomeno si chiama effetto tunnel.»

«Effetto tunnel? Questo non l'ho mai sentito...»

«Eh, si chiama proprio così, anche se secondo me il nome non rende abbastanza l'idea: con questo termine, uno si può immaginare che le polpette in qualche modo scavino un cunicolo nella parete metallica, la buchino e passino attraverso, e invece non funziona in questo modo.»

«E come funziona allora?»

«Eh eh, è una cosa sconcertante: quello che in realtà accade, infatti, è che prima le polpette si trovano nella parte interna della parete e, un istante dopo, si trovano al di là della parete! In pratica alcune particelle del nucleo riescono a vincere la forza forte e a fuoriuscire dal nucleo.»

«Quindi più che effetto tunnel dovremmo chiamarlo “teletrasporto”?» chiede Alberto pensando alle polpette che attraversano la parete della pentola senza bucarla.

«Diciamo che teletrasporto è un termine un po' esagerato, però rende l'idea! E pensa che lo stesso effetto può accadere anche al contrario!»

«Cioè posso sparare delle polpette contro la parete di una pentola, e queste prima o poi entreranno?»

«Sì, più o meno, e sai *dove* accade questo? Non indovinerai mai!»

«Non dirmi che accade qui nel tuo laboratorio!?»

«No, non direi... Avviene in un luogo gigantesco e distantissimo da noi, nel nucleo del Sole! L'effetto tunnel è uno dei fenomeni quantistici che permette al Sole, e a tutte le altre stelle, di brillare. Pensare che la fisica che descrive l'infinitamente piccolo sia la stessa che permette di far nascere e vivere questi giganti dell'universo mi fa impazzire. La prossima volta che

guardi quei puntini luminosi di notte saprai che funzionano anche grazie all'effetto tunnel, un fenomeno assurdo per il nostro modo di concepire, ma indispensabile per la loro esistenza. Non affascina anche te questa cosa?» chiede Matteo con sguardo sognante.

«Be', sì, ma probabilmente mi affascinerrebbe ancora di più se mi spiegassi a cosa ti stai riferendo: in che modo questo effetto permette alle stelle di esistere e di brillare?»

«Sì, giusto, è che quando comincio a riflettere sulla differenza tra la dimensione di quello che studio tutti i giorni e gli oggetti che popolano il nostro universo rimango sempre disorientato. Cosa stavo dicendo? Ah, sì: le polpette che *entrano* nella pentola, ovvero l'opposto della fissione nucleare di cui abbiamo parlato prima! Sì perché se "fissione" deriva dal sostantivo latino *fissio*, che a sua volta deriva da *findere*, cioè "fendere", "dividere in due", il fenomeno contrario è proprio la fusione. Nel processo di fissione nucleare, infatti, un atomo pesante si divide in due atomi più leggeri. Il polonio, come ti dicevo, si divide in un atomo di piombo e in un nucleo di elio. Nel processo di fusione nucleare, invece, accade l'opposto: due atomi leggeri si fondono per formare un atomo più pesante.»

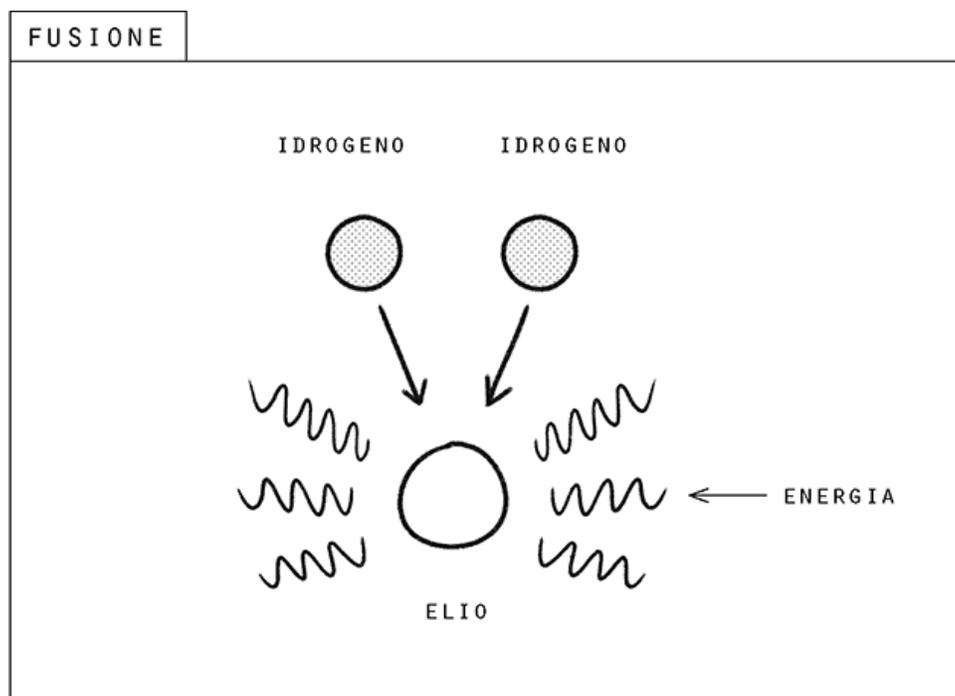
«Mmm...» Alberto è confuso. «Matte, lo so che le stelle vengono alimentate dal processo di fusione nucleare, ma non riesco ancora a capire in che modo l'effetto tunnel giochi un ruolo in tutto questo.»

«Te lo spiego con un esempio concreto: dove ora c'è il Sistema Solare, miliardi di anni fa c'era un'enorme nube di polveri e gas leggeri, principalmente idrogeno. La forza di gravità, in un processo lungo ma inevitabile, ha fatto sì che questa nube diventasse sempre più densa. E più diventava densa più gli atomi si avvicinavano tra di loro e la temperatura all'interno saliva. A un certo punto, però, la pressione e la temperatura nel nucleo della nube raggiunsero livelli così elevati che gli atomi di idrogeno, incredibilmente energetici, cominciarono a scontrarsi e a fondersi insieme. Quando due atomi si fondono, si trasformano in un elemento più pesante, in questo caso l'elio, ma soprattutto rilasciano tanta, tantissima energia, anche sotto forma di luce. Questo processo fa aumentare ulteriormente la temperatura, rendendo ancora più probabili gli scontri tra altri atomi di idrogeno e, quindi, ulteriori fusioni nucleari. A un certo punto questo processo diventa inarrestabile! Tutto ciò per dirti come nasce una stella e da

dove arriva tutta la sua energia. Quanto all'effetto tunnel, esso svolge un ruolo cruciale nella reazione, favorendo la fusione tra atomi.»

«E come?»

«Ecco, vedi, i nuclei atomici tendono a respingersi tra di loro perché sono formati da protoni con la stessa carica: è l'effetto tunnel che invece consente loro di avvicinarsi così tanto da permettere alla forza nucleare forte di fonderli assieme. Questa volta, quindi, è come se delle polpette entrassero dentro la pentola. Se questo effetto non ci fosse, il Sole dovrebbe avere una temperatura mille volte superiore a quella che osserviamo affinché gli scontri tra particelle abbiano un'energia tale da permettere di fondersi.»



«Ora capisco perché prima eri così meravigliato da tutto questo, in effetti è stupendo!» esclama Alberto. Ora che ha capito, apprezza anche lui la bellezza dei fenomeni che l'amico gli sta illustrando.

«Già! E sai una cosa?»

«Dimmi, Matte.»

«So che, parlandoti di questi esempi di fusione e fissione, possa sembrarti che l'effetto tunnel, o la meccanica quantistica in generale, sia coinvolto in fenomeni molto distanti dalla nostra quotidianità, ma non è

così... anzi! Anche i dispositivi elettronici che usiamo tutti i giorni, per funzionare, sfruttano la meccanica quantistica e, ancora una volta, l'effetto tunnel.»

«Davvero?»

«Eh, sì. Per esempio, hai presente le memorie flash, quelle schede piccolissime che riescono a contenere tantissima memoria e che ormai sono integrate in tutti gli smartphone, computer o tablet?»

«Sì, direi di sì» risponde Alberto.

«Ecco, loro funzionano proprio grazie all'effetto tunnel. Quando scatti una foto vuoi che rimanga memorizzata per sempre sul tuo dispositivo, o almeno fino a quando non decidi di cancellarla. Per fare questo, le informazioni della foto vengono stoccate in tantissime piccole celle presenti all'interno della scheda di memoria: puoi immaginartela come un enorme alveare di microscopiche scatolette una vicino all'altra, che vengono piano piano riempite con degli elettroni in base a cosa vuoi salvare. Per essere sicuri che gli elettroni non fuoriescano, e quindi si perda la memoria immagazzinata, le celle sono costruite in modo tale che siano completamente isolate l'una dall'altra. Niente cavetti che le uniscono, celle impossibili da evadere, molto più sicure di Alcatraz!»

«Ma se sono così isolate, com'è possibile che gli elettroni ci entrino? Com'è possibile leggere o scrivere nella memoria? Forse così isolate non sono, allora...»

«Eh eh, Albe, è proprio qui che viene il bello!» esclama Matteo. «Le celle sono estremamente isolate per la fisica classica, così come sono apparentemente isolate le polpette all'interno della pentola. Le celle di memoria sono tantissime pentole a pressione una vicino all'altra, nelle quali, grazie all'effetto tunnel, le polpette possono uscire ed entrare. Nelle memorie siamo noi a controllare quando l'effetto tunnel avviene, e quindi il passaggio di elettroni tra l'una e l'altra, aumentando o diminuendo il voltaggio applicato alle celle. Fisici e ingegneri che lavorano a queste tecnologie stanno cercando di realizzare celle sempre più piccole ed efficienti, ed è grazie a loro e alla meccanica quantistica che noi oggi abbiamo tutta questa tecnologia.»

Alberto è affascinato, non ha mai sentito parlare dell'effetto tunnel e di sicuro non ha mai pensato che tutto questo possa avvenire tra le sue mani. A un certo punto sente un impulso irrefrenabile: *deve* fissare tutto quello che

gli ha raccontato Matteo per non dimenticarsi nulla. E così si mette la mano in tasca e tira fuori l'oggetto che aveva cercato prima di uscire di casa: il suo inseparabile taccuino nero. Nonostante tutti i dispositivi tecnologici che possiede – tra smartphone, tablet, registratori e videocamere –, lui ama ancora usare carta e penna per scrivere le cose più importanti.

«Dammi solo un secondo...» dice rivolto all'amico, poi inizia a scrivere con la sua calligrafia incomprensibile. Ha appena girato la pagina, quando all'improvviso si blocca e chiede: «Però, Matte, non riesco ancora a capire come possa funzionare l'effetto tunnel... Cioè, ho compreso il fenomeno e la sua importanza, ma non ho capito fino in fondo come sia possibile che ciò avvenga...»

Matteo ci pensa un po' su, poi esclama con entusiasmo: «Forse il modo più intuitivo di comprendere l'effetto tunnel è collegarlo al principio di indeterminazione di Heisenberg!».

## Le falene di notte

«Principio di indeterminazione!» esulta Alberto. «Questo lo conosco... più o meno...» e segna ancora qualcosa sul taccuino.

Nel frattempo, Matteo si è chinato e si è messo a controllare l'interno del contenitore giallo.

«E adesso cosa stai combinando?» gli chiede Alberto.

«Aspetta un secondo, devo assicurarmi che sia tutto pronto per l'esperimento.»

«Quindi posso vederlo dal vivo? Finalmente!»

«Ma certo, ti ho fatto venire qui apposta. Dammi solo un attimo: tutto deve essere sistemato alla perfezione, altrimenti potrebbe non funzionare. O, peggio, potrebbe avere ripercussioni negative.»

«In che senso? Ripercussioni negative su cosa?» chiede Alberto quasi preoccupato.

«Stai tranquillo, nella peggiore delle ipotesi non vedrai nulla di particolare» risponde Matteo accennando un sorriso. Poi si rimette a controllare, questa volta passa in rassegna il cavo collegato al parallelepipedo nero al centro della stanza.

Mentre si assicura che ogni elemento del complicato dispositivo sia al suo posto, inizia a raccontare ad Alberto di quando aveva studiato per la prima volta l'effetto tunnel all'università. Era stato lì, infatti, che si era presto reso conto del suo stretto legame con un altro principio fondamentale della meccanica quantistica, il principio di indeterminazione di Heisenberg.

«Quindi ti ricordi di cosa parla il principio di indeterminazione?» chiede Matteo a un certo punto.

Al che Alberto ribatte: «Be', sì, ma se me lo rispolveri un attimo è meglio».

Matteo non se lo fa ripetere due volte e comincia la spiegazione con quel suo fare solenne e nello stesso tempo schietto e sincero: «Allora, Albe, il

principio di indeterminazione spiega che è impossibile conoscere con precisione arbitraria tutte le proprietà di un oggetto. Per esempio, è impossibile conoscere esattamente sia la posizione sia la velocità di una particella. Se vogliamo conoscere con altissima precisione la sua posizione, infatti, non possiamo conoscere con altrettanta precisione la sua velocità, e viceversa».

«Un *aut aut* insomma...»

«Sì, in un certo senso... Ma il punto è che per conoscere una proprietà è necessario misurarla, e Heisenberg si rese conto che l'atto stesso di compiere questa misura "disturba" altre proprietà. È un concetto che può sembrare molto astratto, ma in realtà diventa abbastanza intuitivo se consideri questo esperimento mentale: prendiamo una macchina fotografica dotata di uno zoom potentissimo. Ora, l'obiettivo è misurare, attraverso delle fotografie, la posizione e la velocità di un elettrone all'interno di una teca completamente buia. Un po' come fotografare delle falene che volano di notte per cercare di comprendere il loro movimento attraverso le foto.»

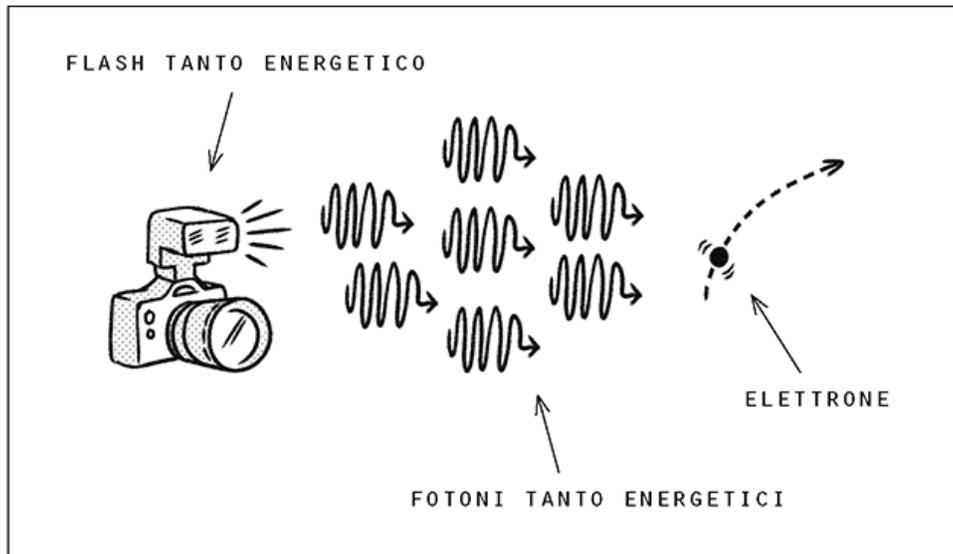
«Okay, vai avanti, ti seguo.»

«Bene, se è tutto buio, come prima cosa bisogna attivare il flash della macchina fotografica, in modo da poter vedere dove si trova l'elettrone. Poi scattiamo la foto e le diamo un'occhiata: eccolo lì, il nostro elettrone è perfettamente visibile, la sua posizione adesso è nota con precisione! Ora vogliamo sapere la sua velocità, perciò abbiamo bisogno di conoscere la sua posizione in funzione del tempo. Facciamo quindi una sequenza di foto ravvicinate tra loro, sempre con il flash attivo. Conoscendo il tempo tra una foto e l'altra e osservando la distanza percorsa, possiamo ricavare la velocità dell'elettrone: spazio percorso diviso tempo impiegato. O almeno così dovrebbe andare. Infatti, se guardiamo le foto scattate ci rendiamo conto di una cosa alquanto strana: la velocità dell'elettrone non è costante come ci saremmo aspettati, ma cambia di foto in foto, accelerando e deviando.»

«Ah, davvero? E come mai?»

«Eh, perché l'atto di fotografare l'elettrone fa cambiare il suo moto, rendendo quindi impossibile calcolare la sua velocità con precisione. In pratica accade questo: ogni volta che il flash si accende per scattare una fotografia, il moto della particella viene perturbato. Questo accade perché la luce del flash è composta da fotoni che colpiscono l'elettrone, e ogni volta

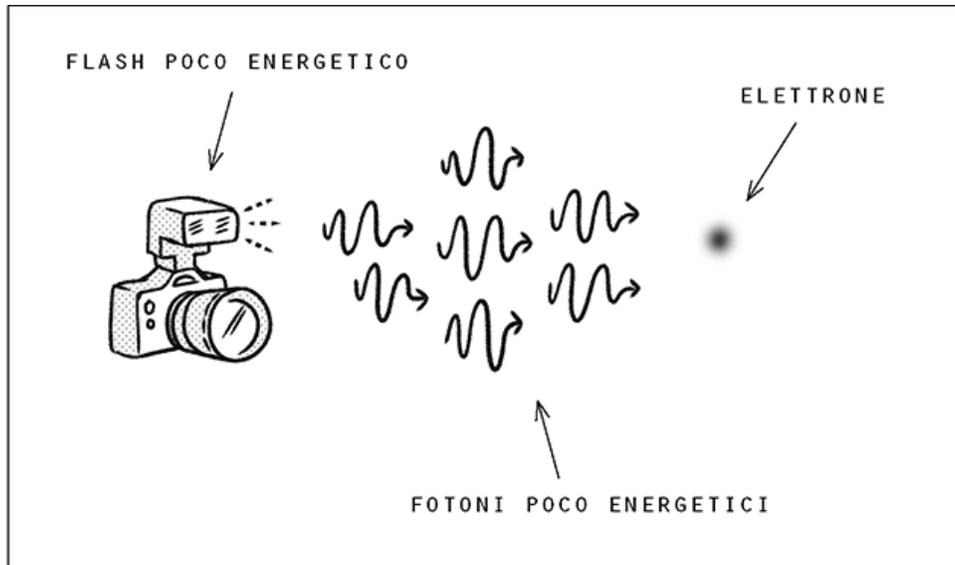
che l'elettrone viene colpito la sua velocità varia. Se ci pensi, qualcosa del genere potrebbe accadere anche alle falene: se le fotografiamo in piena notte, la luce potente del flash potrebbe spaventarle e far cambiare il loro moto.»



«Giusto... E quindi?»

«Quindi possiamo provare a diminuire l'energia del flash, fino a un punto tale da non disturbare nessuno. Ora rifacciamo la serie di fotografie ravvicinate tra loro e poi guardiamole: perfetto, la velocità è costante! Il flash meno energetico questa volta non ha modificato il moto dell'elettrone, e noi possiamo calcolare con precisione la sua velocità! Però... ci accorgiamo di una cosa: data l'energia ridotta del flash, l'elettrone nelle foto appare come una macchia non ben definita, sfocata. Se infatti provi a fotografare una falena in piena notte e con pochissima luce, non la disturberai, ma nella foto si vedrà appena appena.»

«Verissimo!» esclama Alberto che sta ascoltando con estrema attenzione.



«Bene, bene, allora senti qua: se è tutto sfocato, vuol dire che non sappiamo in quale punto di quella macchia si trovi effettivamente l'elettrone, quindi questa volta in maniera precisa conosciamo la velocità, ma non la posizione. Se rifacciamo l'esperimento con un'energia del flash intermedia scopriremo che potremmo conoscere un po' meglio la posizione, ma un po' meno la velocità. Insomma, aumentando o diminuendo l'energia del flash si può arbitrariamente scegliere se conoscere di più una proprietà o l'altra, ma non si potranno mai conoscere perfettamente entrambe contemporaneamente!»

«Insomma, non si può avere capra e cavoli» commenta Alberto alla fine.

Matteo sorride e poi aggiunge: «Questo esperimento mentale è di certo una semplificazione, ma il concetto di fondo è molto simile a quello descritto da Heisenberg».

Alberto annota ancora qualcosa sul taccuino: per un tipo curioso come lui, non c'è mai fine al desiderio di scoprire ogni volta qualcosa di nuovo. E di sicuro le spiegazioni di Matteo sono pane per i suoi denti!

Dopo un paio di minuti in cui l'uno termina di riempire una pagina di parole fitte fitte e l'altro esegue ancora qualche controllo, a un certo punto Alberto solleva la testa dal taccuino, guarda l'amico dritto negli occhi e gli chiede: «Scusa, Matte, forse mi sono perso un passaggio... ma quindi cosa c'entra il principio di indeterminazione con l'effetto tunnel?».

«Ah, sì, giusto, eravamo partiti da lì! Allora... Ritorniamo un attimo al nucleo del nostro atomo, ovvero la pentola con le polpette. I protoni e i neutroni di un atomo hanno una posizione ben definita: sono localizzati nel nucleo, difficile sbagliarsi! Ma cosa succede se conosciamo bene la loro posizione?»

«Be', secondo il principio di indeterminazione, allora la loro velocità deve essere indeterminata.»

«Esatto! Ed è così indeterminata che alcune particelle potrebbero avere una velocità talmente elevata da vincere la forza nucleare forte, e scappare dal nucleo. Ecco quindi perché se fossimo nel mondo quantistico alcune polpette potrebbero schizzare fuori dalla pentola, grazie all'effetto tunnel.»

«Che dire? Bellissima la connessione tra questi due concetti, ma non ci sarei mai arrivato! Però, in effetti, ha perfettamente senso...»

«Eh eh, sono contento che apprezzi. Sai, vista dall'esterno la meccanica quantistica può sembrare un insieme di fenomeni assurdi, di effetti paradossali, ma più ti immergi in questa materia più trovi dei punti di contatto tra i vari elementi, scopri collegamenti indistricabili. E poi ti rendi conto che tutto ha origine da pochi principi fondamentali, certo inconcepibili secondo la nostra intuizione classica, ma che, una volta accettati, danno un senso a tutto il resto... È un puzzle che si completa. Quindi, lascia che ti porti ancora di più all'interno di questo strano mondo, così potrai trovare tu stesso gli altri tasselli mancanti. Vedrai che con un po' di immaginazione e con la giusta curiosità tutto diventerà più comprensibile.» Matteo a questo punto si ferma un secondo, dubbioso, poi aggiunge: «Be', più o meno!».

Alberto scoppia a ridere, poi ritorna sul suo taccuino, gira pagina e dichiara: «Dai, Matte, sono pronto per addentrarmi nel tuo mondo assurdo e paradossale, dimmi qualcosa di più, credo che tutto questo mi servirà per il mio prossimo articolo...».

«Il tuo prossimo articolo? Non vedo l'ora di leggerlo!» esclama Matteo, poi prosegue: «Sai, Albe, anche i grandi fisici del Novecento rimasero sconcertati dalle possibili implicazioni concettuali del principio di indeterminazione. Cosa voleva dire che la velocità di una particella, per esempio, è indeterminata? Questa indeterminazione è causata dal processo di misura, oppure è qualcosa di più profondo, di inevitabile e intrinseco nella natura? Sono serviti decenni di studi teorici e sperimentali e numerose

menti brillanti per far luce su questi interrogativi. Secondo la meccanica quantistica, non ha alcun senso attribuire delle proprietà a un oggetto prima che queste siano state misurate. Questo concetto ha qualcosa di incredibile, e sembra rispecchiare la filosofia proposta già nel Settecento dal filosofo George Berkeley, secondo il quale “essere significa essere percepito”. Se nel mondo classico sembra ridicolo chiedersi se un albero che cade nella foresta faccia rumore anche se non c’è nessuno ad ascoltare, in una foresta quantistica il rumore di un albero che cade esiste *soltanto se* qualcuno è lì a percepirlo. E così per ogni altra proprietà. Non possiamo dire che una particella è in una determinata posizione, se non l’abbiamo osservata in quella posizione, così come non possiamo dire che abbia una certa velocità, se non l’abbiamo osservata con quella velocità. La ragione di questo è più facile da capire se riprendiamo il concetto di funzione d’onda e di dualismo onda-particella».

«Ah, e cioè?»

«Come abbiamo detto poco fa, prima di essere osservata, una particella è descritta da un’onda distribuita su tutto lo spazio. La sua posizione, quindi, è definita solo in termini probabilistici, per esempio tramite una curva a campana. Questo vuol dire che, prima che venga effettuata una misura, la particella può trovarsi *ovunque*, e l’unica informazione che abbiamo è la probabilità di osservarla in un determinato punto in un determinato momento. Questa probabilità sarà alta in corrispondenza dell’apice della curva a campana, ma ciò non vuol dire che sia zero in qualche altro punto molto lontano. Ancora una volta, è importante tenere a mente che questa incapacità di assegnare una posizione ben precisa alla particella non è dovuta a una mancanza di informazione sul sistema, ma è intrinseca alla sua stessa natura...»

Alberto non lascia finire l’amico e gli domanda: «Sì, ho capito, ma puoi andare più piano che sto scrivendo?».

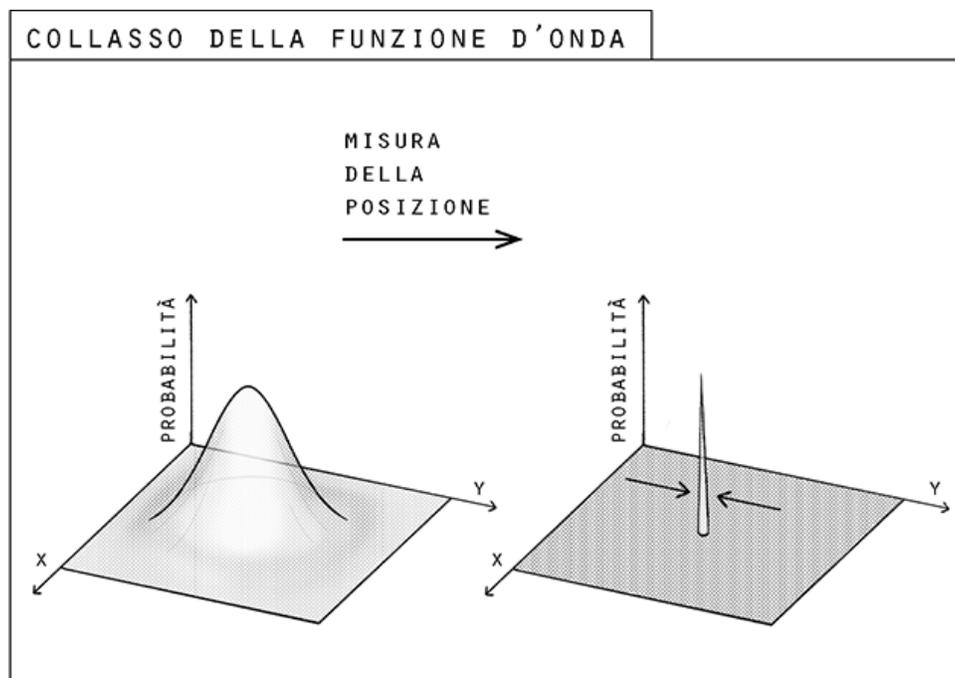
«Sì, certo, scusami! Allora, dicevamo... se ci pensi bene, è qualcosa di veramente surreale non poter assegnare delle proprietà a un oggetto indipendentemente dal fatto che queste siano state osservate. Sarebbe come se nel nostro mondo macroscopico dicessimo che è impossibile sapere il gusto di un barattolino di gelato prima di averlo assaggiato. Ma questo non perché il produttore abbia confezionato dei gusti casuali all’interno dei barattolini, ma perché è il gelato stesso a non avere un sapore prima di

essere assaggiato. Questa proprietà esiste solo come conseguenza dell'atto di assaggiare.»

«Davvero incredibile!» commenta Alberto.

«Già... Prima di tale azione, infatti, l'unica cosa che possiamo fare è assegnare una probabilità a quello che sarà il gusto che percepiremo, come se un'etichetta con su scritto GELATO ALLA FRAGOLA ci dicesse solo che la probabilità che è alla fragola sia del 60 per cento, ma nulla toglie che dentro potremmo trovare del gelato alla vaniglia o al cioccolato. Tornando alle particelle, nel momento in cui osserviamo la posizione di una particella, la curva a campana a essa associata cambierà drasticamente. Da inizialmente larga, a seguito della misurazione, la curva a campana diventerà estremamente più stretta e allungata, più "piccata" insomma, con l'apice centrato sulla posizione osservata. Questo processo è ciò che in meccanica quantistica prende il nome di collasso della funzione d'onda. Un po' come il sapore del gelato che "collassa" su un gusto determinato solo nel momento in cui viene assaggiato.»

«Il gusto che collassa... Mmm, non so se mi piacerebbe assaggiarlo» ridacchia Alberto.



«Tornando alla nostra particella» continua Matteo riportando una certa serietà, «conoscerne la posizione significa che, se effettuassimo una seconda osservazione immediatamente successiva alla prima, la probabilità di trovarla nello stesso punto sarà *quasi* del 100 per cento. Ho detto “quasi”, perché nella realtà pratica ci sono sempre errori di misura tali per cui due misure della stessa quantità possono dare risultati leggermente diversi. Ecco, quindi, ancora una volta, la possibilità che si verifichi qualcosa di paradossale da un punto di vista classico. A proposito di “paradossale”... Hai presente il paradosso della freccia di Zenone?» chiede Matteo. In risposta, però, riceve solo silenzio da parte di Alberto, che si è perso nei suoi ragionamenti. «Albe? Ci sei?»

Alberto in effetti è troppo impegnato a immaginare come sarebbe avere dei gelati il cui gusto si materializza solo nel momento in cui vengono mangiati per dar retta all'amico. “Sembra qualcosa uscito da un racconto di fantascienza...” pensa.

«Ehi!» lo richiama di nuovo Matteo.

Questa volta Alberto risponde, anche se un po' frastornato: «Oh, Matte, cosa stavi dicendo?».

«Il paradosso della freccia di Zenone, il filosofo dell'antica Grecia, lo conosci?»

«Fammi ripescare tra le mie reminiscenze liceali... Se non mi ricordo male parla di come una freccia in volo possa essere considerata immobile, giusto?»

«Esatto, ottima memoria!» esclama Matteo. «In particolare, questo paradosso afferma che se osservo per un brevissimo istante di tempo la freccia, la vedrò sospesa per aria, totalmente immobile. Quindi, visto che lo scorrere del tempo è una successione di istanti, e visto che in ognuno di essi la freccia non si muove, allora verrebbe da concludere che una freccia in volo è ferma. E “ovviamente” questo non ha senso, è ridicolo... sì, ma nel mondo classico, nel quale sappiamo bene che la freccia percorrerà una certa distanza dopo essere stata scoccata. Nel mondo quantistico, invece, è un effetto osservabile. Funziona più o meno così. Se immaginiamo di osservare ripetutamente e in maniera molto rapida la posizione di una particella quantistica, questa non potrà mai cambiare. Ogni osservazione successiva alla prima, infatti, mostrerà che la particella è sempre nella stessa posizione, perché tra un'osservazione e l'altra la sua funzione d'onda non farà in

tempo a cambiare, restando quindi sempre piccata nello stesso punto. Il movimento della particella viene “congelato” dall’atto della ripetuta misura, un processo che prende il nome di effetto Zenone quantistico.»

«In pratica mi stai dicendo che nel mondo classico posso scoccare una freccia, osservarla e questa continuerà indisturbata il suo tragitto fino al bersaglio, ma se osservassi una freccia quantistica questa apparirebbe realmente ferma, immobile, in aria?»

«È così! E chissà cosa direbbe Zenone se potesse ascoltare questi discorsi...»

“Zenone, gelato, posizione, indeterminazione...” rimugina Alberto tra sé e sé. E più ci pensa più si convince che qualcosa ancora non gli torna. «Matte... però non ho capito perché finora mi hai sempre parlato di una singola proprietà alla volta, come la posizione, o il gusto del gelato, ma Heisenberg ci parla di due proprietà associate tra loro, come la posizione e la velocità.»

«Hai ragione, manca un tassello per completare il puzzle. Ricordi quando ti dicevo che la posizione è definita da una curva di probabilità a forma di campana? Ecco, lo stesso vale anche per la velocità e per ogni altra proprietà fisica. Il principio di indeterminazione ci dice come queste campane siano collegate tra loro. Per esempio, una campana stretta per la posizione implica una campana larga per la velocità, e viceversa. Queste due curve non potranno mai essere strette allo stesso tempo, esattamente come non potrai mai avere una foto precisa di una falena e allo stesso tempo predire con certezza la sua velocità.»

Alberto si gratta la testa perplesso. «Se ho capito bene» dice non senza indugio, «nel momento in cui osservo dove si trova una particella, la curva a campana associata alla posizione collasserà in una curva molto piccata, mentre la curva a campana associata alla velocità diventerà allo stesso tempo molto più larga.»

«Sì, esatto, proprio così. E dato che questa curva sarà estremamente larga, la velocità della particella sarà appunto estremamente incerta. Non c’è modo di predire con una probabilità elevata quale sarebbe il risultato ottenuto se si decidesse di misurare questa proprietà. Potrebbe essere un risultato qualsiasi. È per questo che l’effetto Zenone quantistico si manifesta solo facendo misure ripetute molto velocemente: se aspettiamo troppo tempo tra una misura e l’altra, l’incertezza in velocità si tradurrebbe

in un'incertezza in posizione, perché non osservandola per un po' la posizione diventerebbe incerta, offuscata, e quindi la particella potrebbe trovarsi ovunque. La curva a campana che è stata collassata a un picco dalla prima misura, torna a espandersi col passare del tempo, rendendo di nuovo indeterminata anche la posizione. L'unico modo per mantenere la curva collassata nello stesso punto, e fermare così il movimento della particella, è di continuare a misurare prima che questa possa cambiare.»

L'occhio di Alberto cade casualmente sul contenitore giallo con dentro il polonio, e a questo punto lui sembra avere una rivelazione, tanto che dice all'amico: «Aspetta! Forse ho capito una cosa. Se l'effetto tunnel si basa anche sul principio di indeterminazione, vuol dire che a sua volta è probabilistico?».

«Hai centrato il punto! È proprio per questo che l'effetto tunnel è un processo assolutamente casuale, probabilistico: non c'è nessun modo di predire in quale istante il nucleo di un atomo instabile decadrà emettendo una particella alfa, cioè in quale istante le polpette usciranno dalla pentola. Sarebbe come se a ogni istante l'atomo dovesse lanciare un dado, e potesse decadere solo facendo sei. L'unica cosa che possiamo predire è la probabilità che in un dato istante l'atomo decada o, in altre parole, quanto tempo ci vorrà in media a un atomo per decadere.»

«E... quanto tempo ci vorrà?»

«Eh, questo tempo potrebbe anche essere lunghissimo, pensa che per far decadere metà di un blocco di uranio 238 ci vogliono oltre quattro miliardi di anni. Quanto al polonio 210, un atomo impiega in media circa 200 giorni per decadere. Facendo i calcoli, questo vuol dire che se prendiamo un chilo di polonio, dopo circa 138 giorni metà degli atomi saranno decaduti e, credimi, sono davvero tanti!»

A sentire quei dati, Alberto non può che rimanere stupito e domanda a Matteo: «Ma come si fanno a misurare questi tempi? Cioè, come fai a sapere quando un atomo decade?».

«Con questo dispositivo qui» risponde prontamente l'amico, indicando uno strano oggetto posizionato a fianco del campione radioattivo.

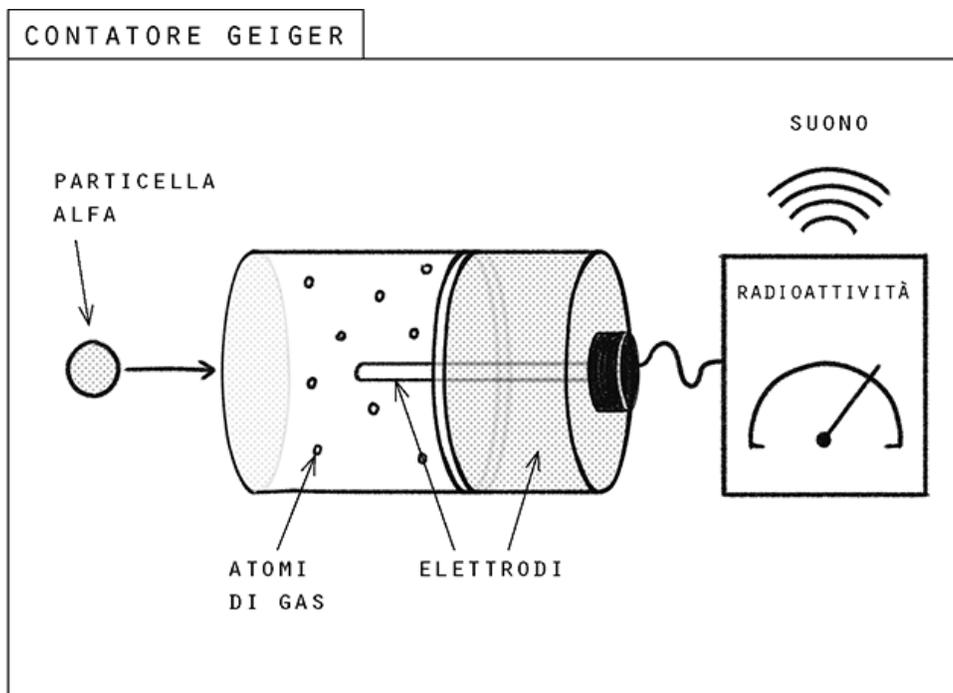
## Testa o croce

La curiosità di Alberto è davvero alle stelle, sembra proprio che il mistero stia diventando sempre più fitto! Si allunga verso il dispositivo indicato, quindi commenta: «Ah, sì, ho visto aggeggi simili nei film o nei videogiochi...».

«Eh eh, però non è né fantascienza né un videogioco: si tratta invece di un contatore Geiger, uno strumento per misurare le radiazioni... Fammi spostare questo interruttore, così colleghiamo il piccolo altoparlante» dice Matteo muovendo una levetta all'interno della scatola.

«Ma... perché fa questo rumore?» In effetti il dispositivo ha iniziato a gracchiare.

«Vuol dire che qui c'è della radioattività! Ma lascia che ti spieghi... il suo funzionamento è davvero geniale. Questa che sembra una lampadina è un tubo che contiene del gas e due elettrodi a cui è applicato un alto voltaggio. Normalmente i due elettrodi sono isolati tra di loro, perché il gas non conduce elettricità. Tuttavia, le cose cambiano nel momento in cui una particella alfa attraversa il tubo. La particella, infatti, scontrandosi con gli atomi del gas (o più precisamente con i loro elettroni) fa sì che degli elettroni vengano "spinti" via dalle loro orbite, un processo che si chiama "ionizzazione". Ma non è finita qui: gli elettroni così liberati dagli atomi del gas vengono accelerati dall'alto voltaggio, diventando a loro volta dei proiettili in grado di spingere via altri elettroni da altri atomi di gas, creando cioè una reazione a catena di ionizzazioni.»



«Una valanga?»

«Sì, proprio così. Ma cosa accade nel momento in cui abbiamo così tanti elettroni liberi di muoversi?»

«Mmm... cosa abbiamo? Fammi pensare... Ho capito! Una scarica elettrica!» esclama Alberto trionfante.

«Esatto» conferma Matteo. «E una scarica elettrica diventa un segnale che è possibile misurare facilmente con questo piccolo circuito elettronico. Il suono gracchiante che senti è proprio l'amplificazione della scarica elettrica che avviene nel momento in cui una particella alfa colpisce il contatore, ovvero quando un atomo di polonio è decaduto.»

Alberto si gratta la tempia con l'indice, come chi sta riflettendo e cerca di capirci qualcosa, poi dopo una breve pausa esordisce: «Un po' complesso, ma interessante: un atomo di polonio decade emettendo una particella alfa, questa attraversa il tubo Geiger ionizzando il gas all'interno, si crea una scarica elettrica, un circuito elettronico la rivela e ci fornisce un impulso. Giusto?»

«Proprio così, Albe! Vedo che mi stai seguendo» si compiace Matteo. «E a questo punto posso rispondere alla tua domanda di poco fa sui tempi di decadimento.»

«Ecco, sì, giusto.»

«Dunque, studiando quanto frequenti sono gli impulsi possiamo calcolare il tempo di decadimento degli atomi radioattivi. Basta conoscere quanto materiale radioattivo c'è in partenza, fare un piccolo calcolo, e il gioco è fatto.»

«Okay, chiaro, Matte! Però c'è una cosa che mi stupisce... Abbiamo detto che questo decadimento radioattivo si basa sull'effetto tunnel, che è un processo quantistico. Così come abbiamo detto che la particella alfa emessa è una particella quantistica. Quanto al contatore Geiger, invece, mi sembra di aver capito che non c'è nulla di quantistico. Ma allora stiamo osservando il mondo quantistico utilizzando uno strumento che si basa sulla fisica classica?»

«Eh, sì, questo contatore Geiger è solo uno strumento di misura, un dispositivo elettronico che, tutto sommato, segue le leggi dell'elettromagnetismo di Maxwell.»

«Ma com'è possibile? Non ti sembra strano tutto questo? Mi hai sempre detto che il mondo classico e quello quantistico sono due cose totalmente diverse, come se fossero separate da un confine invalicabile. Non dovrei allora aspettarmi che per vedere fenomeni quantistici si debbano usare solo strumenti quantistici?» domanda Alberto decisamente confuso.

«A prima vista sì, può sembrare un po' strano, considerando che stiamo avendo a che fare con particelle piccolissime e fenomeni così controintuitivi. Ma il mondo che percepiamo, così come quello in cui funzionano gli strumenti che usiamo, è proprio quello della fisica classica. Noi ricercatori dobbiamo quindi trovare il modo di studiare la meccanica quantistica con la fisica classica. Non ci sono alternative, prima o poi bisogna attraversare quel confine di cui parli. Ecco allora l'idea del contatore Geiger: trattare le particelle alfa semplicemente come delle cariche capaci di produrre una corrente elettrica. Nonostante il mondo classico e quello quantistico si basino su teorie diverse, nella pratica possiamo spesso utilizzare principi della meccanica classica per misurare e interagire con fenomeni quantistici.»

A questo punto Alberto fa un azzardo tra il letterario e il poetico: «Quindi il contatore Geiger è come se fosse un portale, un ponte tra le due teorie...».

«In qualche modo sì» risponde Matteo con un sorriso, «e vedrai che questo paragone ci tornerà utile più avanti, quando ti mostrerò il resto

dell'esperimento. Comunque, al di là di portali vari, il contatore Geiger è un esempio di come un fenomeno quantistico come il decadimento di un atomo possa essere amplificato fino a diventare un segnale percepibile persino dai nostri sensi.»

«Certo, anche perché alla fine è con i sensi umani che un ricercatore prende i dati dal suo esperimento, lo strumento di misura è solo un oggetto per potenziarli in qualche modo... Comunque, che ne dici? Ora che so come funziona un contatore Geiger, ci mettiamo a calcolare il tempo di decadimento del polonio?» domanda Alberto, cercando una nuova pagina bianca sul suo taccuino dove poter fare qualche calcolo.

«Ma no, lascia stare, quello lo sai già, te l'ho detto prima, o comunque lo puoi leggere su Wikipedia. Qui non utilizziamo il contatore per caratterizzare la radioattività di una sostanza, ma per uno scopo molto più particolare, che è fondamentale per l'esperimento che sto per fare: emettere degli impulsi... imprevedibili.»

«Imprevedibili? Cosa intendi, scusa?»

«Ti ricordi quello che dicevamo sul decadimento degli atomi instabili?»

«Sì, credo di sì»

«Ecco, si tratta di un fenomeno totalmente imprevedibile, perché è un processo quantistico e quindi probabilistico. Possiamo stimare solo la probabilità che un atomo decada in un determinato istante, ma non potremo mai sapere l'istante esatto in cui ciò avverrà. Noi sfruttiamo questo fenomeno a nostro vantaggio per generare degli impulsi a tempi completamente casuali.»

«Ma perché usare il polonio e il contatore Geiger? Non ti stai complicando la vita? Se avevi bisogno di generare degli impulsi casuali, ti sarebbe bastato usare un computer, no? È pieno di programmi che generano numeri random, che poi puoi convertire in impulsi.»

«Sapevo che mi avresti proposto questa alternativa, e apparentemente può sembrare valida. Tuttavia, questi programmi che hai in mente si basano su algoritmi e dati che, se conosciuti, potrebbero consentire di prevedere con buona probabilità quale sarà l'output. I numeri così generati non sono *davvero* casuali, ma pseudo-casuali, e ciò non è abbastanza per questo esperimento.»

«Allora ti suggerisco una cosa ancora più semplice, lanci un dado e... Ah, no! Neanche il dado va bene, perché ciò che noi pensiamo essere

casuale, come il risultato del lancio di un dado, in realtà nella meccanica classica è totalmente deterministico.»

«Ottimo, vedo che hai colto nel segno, Albe. Ogni stratagemma tu riesca a concepire per generare qualcosa di casuale, se si basa sulla fisica classica, non sarà mai davvero casuale. Magari può essere difficilissimo da prevedere, come il risultato di un lancio alla roulette, ma non casuale. Questo perché il mondo classico, sotto sotto, è deterministico. L'unico modo per generare qualcosa di realmente casuale è sfruttando la meccanica quantistica. D'altronde, quale modo migliore di ottenere qualcosa di casuale, se non da ciò che è intrinsecamente non-deterministico? Misurare il decadimento di un atomo è come misurare la posizione di una particella quantistica, il risultato sarà impossibile da prevedere.»

«È davvero affascinante.»

Matteo rilancia con un «Già» quasi sognante.

“Si vede proprio che ama quello che fa” pensa Alberto, e gli scappa un sorriso.

«Perché ridi?» lo incalza Matteo

«No, no, niente, pensavo tra me e me...»

«Sì, lo so che ti perdi spesso nei tuoi pensieri!»

«Mi conosci bene» ammette Alberto.

Matteo sorride e riprende a parlare: «Senti, Albe, c'è una cosa che non ti ho detto...»

«Dimmela, allora!»

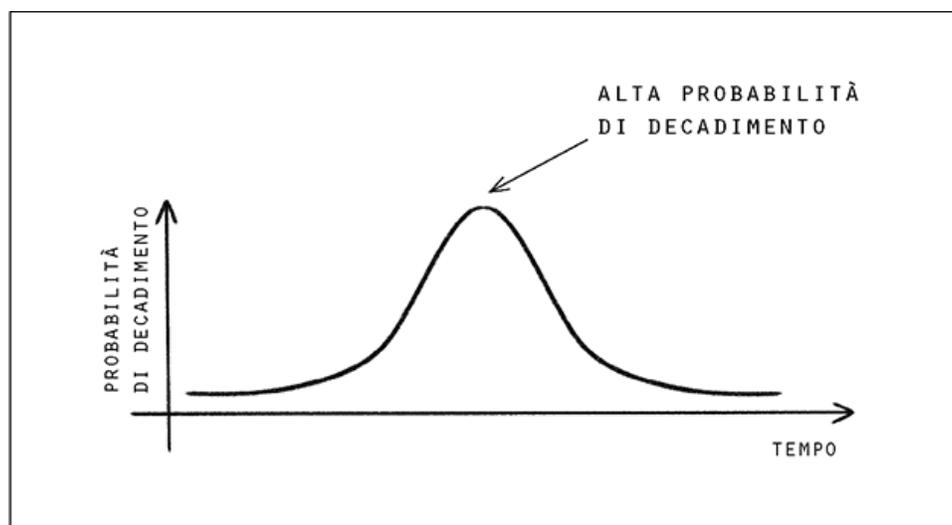
«Ecco, a proposito di “casualità”... Noi finora l'abbiamo vista come conseguenza del principio di indeterminazione, ma può essere considerata anche come conseguenza di un altro principio fondamentale della meccanica quantistica, il principio di sovrapposizione...»

Matteo vorrebbe proseguire, ma Alberto lo blocca: «Aspetta un attimo che qui mi conviene girare pagina e appuntarmi tutto».

«Okay, fai pure! Ma vorrei anche che tu provassi a rispondere alla mia domanda... Come può essere definito un atomo di polonio se non c'è nessuno a osservare il suo decadimento? Cioè, se prendessimo un singolo atomo e lo mettessimo nel vuoto più assoluto e lontano da qualsiasi rivelatore, in quale stato si troverebbe, decaduto o non decaduto?»

Alberto ci pensa su ma poi si arrende: «Dimmelo tu, Matte, ti prego!».

«Va bene, va bene... Allora, per il polonio 210 sappiamo che la probabilità più alta di decadere si ha dopo circa 200 giorni, ma questa è appunto solo una considerazione probabilistica. In realtà potrebbe decadere dopo pochi secondi o dopo anni. La funzione d'onda che descrive lo stato del polonio può anch'essa essere descritta da una curva a campana, ma “nel tempo”.»



«Nel tempo?»

«Sì, Albe, perché in questo caso la curva a campana non descrive la probabilità di trovare l'atomo in quel punto, come abbiamo visto prima, ma la probabilità che l'atomo decada in quel preciso istante di tempo. Per il polonio troveremo un picco a 200 giorni, in corrispondenza del suo tempo di decadimento medio. È solo osservando lo stato dell'atomo in un determinato istante che la sua funzione d'onda collasserà in uno stato definito: decaduto o non decaduto. Tuttavia, così come una particella quantistica è ovunque nello spazio prima che la sua posizione venga osservata, così anche lo stato di un atomo instabile è una sovrapposizione di stati, decaduto e non decaduto, prima di essere osservato.»

«Scusa, ma “sovrapposizione di stati” non è così facile da immaginare...»

«Lo so, Albe, lo so! Per comprendere appieno il principio di sovrapposizione bisogna avere una mente elastica, e staccarsi drasticamente dal mondo classico. In pratica, quando si parla di “principio di

sovrapposizione” si indica quella proprietà quantistica che permette a un sistema fisico di coesistere contemporaneamente in più stati. Una singola particella nello stesso istante può essere in posizioni distinte, può avere energie diverse, o essere appunto sia decaduta sia non decaduta. La chiave infatti è capire che quando diciamo che un sistema si trova in una sovrapposizione, non vogliamo dire che siamo incapaci di attribuirgli uno stato preciso per mancanza di informazioni. Non è che la particella è in una sovrapposizione di posizioni solo perché non conosciamo dove essa si trovi, così come non è l’ignoranza nel sapere se un atomo è decaduto o no a far sì che esso sia in una sovrapposizione di questi due stati. Quello che accade è che, prima di venire osservato, il sistema “vive” in una combinazione di stati.»

«Mmm, mi sembra di capire, ma non è che puoi farmi un esempio più pratico?»

«Okay, okay, allora, vediamo se questo ti fa capire meglio: se lanciassimo una moneta senza poi guardare come atterra, questa non sarà in una sovrapposizione di stati. Non sarà contemporaneamente sia testa sia croce. Sarà semplicemente testa con una probabilità del 50 per cento, e croce per il restante 50 per cento, ma ovviamente la moneta starà mostrando solo una faccia verso l’alto, anche se noi non sappiamo quale.»

«Fin qui tutto fila liscio, ma immagino che quello che stai per dirmi non lo sia più tanto...»

«Eh eh, hai ragione! Se infatti facessimo lo stesso esperimento con una moneta quantistica, ecco che, prima di essere osservata, questa coesisterà nei due stati opposti, avrebbe sia la testa sia la croce verso l’alto. Qualcosa di impossibile da immaginare con la logica quotidiana, ma che nel mondo quantistico è la norma. È solo nel momento in cui si guarda la moneta che questa collasserà in un unico stato ben definito, mostrandoci una sola faccia.»

«Un po’ come il gelato di prima... Ma toglimi una curiosità: come facciamo a sapere che una moneta quantistica è *davvero* in una sovrapposizione di stati prima di essere osservata? Tanto abbiamo detto che nel momento in cui la osserviamo ci mostrerà comunque una sola faccia, testa o croce, esattamente come una moneta classica» ribatte Alberto.

«Senza scomodare troppo l’immaginazione, posso risponderti riprendendo l’esperimento della doppia fenditura: abbiamo visto che una

singola particella, per esempio un elettrone, passa contemporaneamente sia dalla fenditura di destra sia da quella di sinistra. Perciò, poco prima di scontrarsi contro il rivelatore dove darà luogo alla figura d'interferenza, la particella si troverà in una sovrapposizione di due stati: uno corrispondente a "passata dalla fenditura di destra" e l'altro a "passata dalla fenditura di sinistra". Come ti stavo dicendo, è l'interpretazione ondulatoria di una particella quantistica che permette questa situazione senza un analogo classico, e non il fatto che non sappiamo da che fenditura sia passata. Se la particella non fosse in questo stato di sovrapposizione, cioè se si comportasse in modo puramente classico, non si vedrebbe nessuna figura di interferenza sullo schermo posto dopo le fenditure. Uno stato di sovrapposizione quantistico è completamente diverso da un'incertezza classica.»

Matteo si ferma un secondo, l'amico sta scrivendo ininterrottamente, vuole aspettare che abbia finito e che sia "alla pari" con quello che gli sta spiegando per proseguire. Quando Alberto finalmente smette di prendere appunti e solleva lo sguardo, Matteo ricomincia da dove si è interrotto: «Osservare se la moneta quantistica è testa o croce è esattamente come osservare se la particella nell'esperimento della doppia fenditura sia passata da destra o da sinistra. Certo, è possibile compiere tale osservazione ma, come sappiamo, al costo di far collassare la funzione d'onda, cioè al costo di distruggere la sovrapposizione di due stati e quindi di distruggere anche la figura d'interferenza. Questo perché uno stato di sovrapposizione quantistico non è mai direttamente osservabile, nel senso che non è mai possibile vedere il sistema in più stati diversi allo stesso tempo. Neanche con una videocamera. Tuttavia, possiamo concludere che il sistema si trovi in una sovrapposizione osservando... gli effetti che esso produce! Come, per esempio, la figura d'interferenza creata da una particella che attraversa una doppia fenditura.»

«Okay, ho capito, sono gli effetti a dimostrare la sovrapposizione, ma... per la moneta quantistica? Quali effetti si vedrebbero?» domanda Alberto.

«Eh eh, difficile da immaginare... Se mai dovesse esistere una moneta così, credo che il modo migliore per capire effettivamente se sia in uno stato di sovrapposizione sarebbe quello di usare dei sensori speciali per raccogliere dati sul suo comportamento, analizzarli tramite un computer e constatare se il risultato è compatibile con uno stato di sovrapposizione.»

«Be', comunque sarebbe divertente giocare a testa o croce con una moneta così: prima di osservarla, entrambi i giocatori avrebbero sia vinto sia perso!»

«Divertente!» esclama Matteo sorridendo, ma l'ilarità dura davvero poco, perché ritorna subito a essere il fisico serio e tutto d'un pezzo, e infatti dice: «Ora torniamo al nostro atomo di polonio, però. Esso sarà in una sovrapposizione – è “decaduto” e “non decaduto” – fintanto che il suo stato non viene osservato, per esempio tramite un contatore Geiger. Se dopo un intervallo di tempo il contatore avrà registrato una scarica elettrica, allora la funzione d'onda sarà collassata nello stato “atomo decaduto”. Al contrario, se non si è registrata nessuna scarica, allora la funzione sarà collassata nello stato “atomo non decaduto”».

Alberto a queste parole mette una mano sulla spalla dell'amico e ribatte: «Forse sarebbe stato meglio se stanotte non ti avessi risposto al telefono...».

«Dai, non scherzare! Non vedi la coerenza della meccanica quantistica? Siamo partiti notando come essa sia un mondo di probabilità, composto da particelle che sono anche onde, per poi parlare del principio di indeterminazione, dell'effetto tunnel e ora del principio di sovrapposizione. Ognuno di questi concetti è strettamente legato agli altri, come se fossero tutte facce della stessa medaglia. Se ne togliessimo anche uno solo, ecco che crollerebbe tutto. Senza il dualismo onda-particella, infatti, non ci sarebbe il principio di indeterminazione, come neanche il principio di sovrapposizione o l'effetto tunnel. Di conseguenza, gli atomi non sarebbero così come li conosciamo, e lo stesso per la fusione nucleare che alimenta il Sole. In sostanza, noi stessi non saremmo qui a parlare dei principi della meccanica quantistica!»

«A questo preferirei non pensare» ridacchia Alberto.

«Però, se ci pensi, tutto l'universo è regolato da minuscole interazioni a livello subatomico, cambi una singola legge della meccanica quantistica e addio a tutto. O magari esisterebbe un altro universo con altre leggi, e in questo momento due esseri completamente diversi da noi starebbero discutendo di fenomeni altrettanto diversi da quelli che conosciamo...»

Alberto dà uno sguardo veloce all'immagine che ha disegnato frettolosamente sul taccuino e poi cerca di riportare l'amico nel mondo della realtà: «Matte, fermati un secondo, torniamo a noi: mi stavi spiegando

che quando un atomo di polonio decade viene generato un impulso elettrico nel contatore Geiger... e che, prima di venire osservato, un atomo può essere definito sia come decaduto sia come non decaduto, giusto?»

Matteo sistema qualche contatto all'interno del contatore Geiger, poi dice: «L'impulso elettrico che viene generato viaggia poi lungo questi fili...». Indica alcuni cavi che corrono lungo il pavimento e prosegue: «Fino a raggiungere questa grossa scatola!».

Lo sguardo di Alberto segue le indicazioni dell'amico e termina sul parallelepipedo di metallo nero riflettente che ha tanto attratto la sua attenzione quando è entrato. Gli sembra un oggetto molto pesante, solido e dall'aspetto di sicuro insolito.

I due amici rimangono qualche secondo in silenzio a fissare il parallelepipedo, sembra quasi la scena iniziale di *2001: Odissea nello spazio*, nella quale un branco di scimmie osserva il monolite.

A interrompere la loro contemplazione è l'improvvisa uscita di Matteo: «Ah, aspetta! C'è qualcuno che sta suonando alla porta, fammi andare a vedere chi è... Sarà un mio studente che è venuto a chiedermi qualcosa, torno tra un attimo... Mi raccomando, tu non toccare nulla!».

Alberto non ha nemmeno il tempo per controbattere che l'amico ha già chiuso il contenitore con il polonio, ha alzato una levetta gialla a lato del dispositivo e... *Sbam!* La pesante porta del laboratorio ha fatto un fragoroso rumore nel chiudersi. Rimane lì, da solo, e non può fare altro che pensare: “Cavolo, mi chiama nel cuore della notte per un esperimento sensazionale e poi se ne va senza dirmi niente. E poi... ‘qualcuno che sta suonando alla porta’?! Io non ho sentito alcun campanello. Bah, magari Matteo ha detto così perché ha visto qualche spia luminosa della quale non mi sono accorto...”.

## Dentro il laboratorio

Quando Matteo gli ha detto che il laboratorio è isolato dal mondo esterno, Alberto non ci ha fatto caso più di tanto, ma ora che si ritrova lì da solo si rende conto che in effetti sembra che il mondo esterno proprio non esista. La stanza è così silenziosa che può sentire il suono delle pulsazioni del suo cuore nelle orecchie.

E dire che lui è abituato a stare sempre immerso nel “rumore”, che siano voci, canzoni, note di uno strumento musicale... A casa, in macchina e anche in palestra non c'è un momento in cui non ascolti della musica o qualche podcast con le sue inseparabili cuffiette. Non è proprio abituato a quel profondo silenzio, e il pensiero di essere del tutto abbandonato a se stesso in un laboratorio sotterraneo di fisica comincia ad angosciarlo terribilmente.

A farlo sentire a disagio non è solo il silenzio surreale, ma anche le pareti estremamente bianche, la scatola monolitica al centro della stanza e l'ordine maniacale con cui tutto è disposto: l'esatto opposto di casa sua, caotica e disordinata.

“Però, che ansia questo posto! Ma come fa Matteo a passarci ore chiuso dentro a lavorare?” si chiede. “Forse il trucco è tenersi impegnati con qualcosa, in modo da non farci caso... Ma sì, posso sfruttare questo tempo per finire di scrivere gli appunti su tutto ciò che ho visto e imparato finora.”

Alberto fa un respiro profondo, prende il taccuino che ha messo in tasca non appena Matteo è uscito e ricomincia a scrivere. “Reazione a catena... scarica elettrica... segnale casuale... sovrapposizione... Okay, diciamo che non c'è nulla di semplice, ma fin qui più o meno ci sono” dice tra sé e sé.

È entusiasta: piano piano sta entrando nel mondo della meccanica quantistica, con i suoi effetti e le relazioni tra i vari principi! Tutto sta gradualmente prendendo forma, tutto sembra avere un senso. Sa perfettamente che ci sono ancora diversi pezzi mancanti in quell'intricato

puzzle quantistico, ma non è certo la complessità a spaventarlo. Anzi, non vede l'ora che Matteo torni per scoprire ancora di più e per sapere finalmente qual è l'esperimento per cui lo ha fatto venire fin lì. Alberto spera che il fatidico risultato possa portare una svolta anche alla sua, di carriera.

I minuti passano, l'amico ancora non torna e nel frattempo Alberto riempie pagine, ogni tanto inserisce qualche schizzo per esprimere meglio ciò che ha capito. È nel pieno di un flusso di creatività che raramente ha provato.

«Oh, no, questa non ci voleva!» esclama ad alta voce. Il fiume di parole sul taccuino si interrompe improvvisamente, dalla penna non esce più inchiostro. «Proprio adesso doveva finire?» Ma di certo non vuole smettere di annotare le sue idee proprio nel bel mezzo della descrizione del principio di sovrapposizione. “Devo trovare assolutamente un'altra penna, ci sarà di sicuro qualcosa per scrivere su quel tavolo” pensa, avvicinandosi all'angolo della stanza dove c'è la scrivania di Matteo. Inizia a curiosare, ma gli unici oggetti in vista sono un ingombrante computer, il cubo di Rubik e dei fogli scarabocchiati. “Magari dentro questo cassetto... Ecco!” Tra fogli pieni di formule, una grossa calcolatrice e un righello, ci sono anche due penne.

Alberto afferra quella nera e riprende a scrivere, ma si blocca subito. “Maledizione! L'inchiostro è rosso! Qualcuno deve aver scambiato i tappi delle penne per sbaglio. Che pasticcio...”

Nella vita di tutti i giorni lui è confusionario e disordinato, ma nel lavoro ama fare le cose con cura, specialmente quando si tratta di prendere preziosi appunti. Odia vedere colori diversi sulla stessa pagina, per lui sono un'inammissibile distrazione dal contenuto. Rimette quindi a posto la penna con l'idea di provare l'altra, nonostante abbia il tappo rosso. Però non intende fare lo stesso errore, finendo per pasticciare ancora di più gli appunti, e così prova a fare un piccolo segno sul palmo della mano. “Effettivamente scrive in nero... Meno male, così posso almeno finire questa parte.”

Alberto scambia i tappi così che ognuno corrisponda al colore corretto, rimette la penna rossa nel cassetto e tiene l'altra, poi riprende da dove si è fermato. Ci mette un secondo a ritrovare la concentrazione e a dimenticarsi del senso di inquietudine che gli trasmette il laboratorio. È così assorbito

dal mondo della meccanica quantistica che non si accorge più neanche del tempo che passa.

“Decaduto e non decaduto” alla fine è così che conclude il paragrafo dedicato alla sovrapposizione quantistica: ora ha annotato tutto ciò che gli è stato detto e mostrato. I concetti principali, o almeno la maggior parte di essi, sembrano chiari. Certo, per nulla semplici o intuitivi, ma chiari. Ha lasciato giusto un paio di frasi con dei punti di domanda. “Probabilmente a un certo punto mi sono distratto” pensa, ma è comunque soddisfatto, di materiale ne ha, eccome, e rimette in tasca il taccuino.

“Ma da quanto sono qua? Matteo non arriva più?” Non sa se sono passati cinque minuti o cinquanta. “Che ore si sono fatte?” si domanda sollevandosi la manica per guardare il suo inseparabile orologio da polso. “Ma come è possibile? Le cinque del pomeriggio? Va bene che mi sono tenuto impegnato, ma di sicuro non sono stato qui dentro tutto il giorno!” Continua a guardare incredulo l’orologio, poi si rende conto che in effetti non funziona: le lancette dei secondi sono completamente immobili. “È di nuovo scarico...” Alberto comincia a girare delicatamente la corona laterale per ricaricarlo. “Povero orologio, mi dimentico sempre che non è a batteria. Chissà da quanto sarà fermo...”

L’orologio è un regalo di suo nonno, per questo ha un grande valore affettivo. Non ha mai smesso di indossarlo nonostante la carica manuale non sia comodissima, soprattutto per lui che è super sbadato. Gli risulta praticamente impossibile tenerlo carico, al punto che è più il tempo in cui l’orologio sta fermo che quello in cui segna l’ora corretta.

Dopo pochi giri della ghiera, il meccanismo è carico. Tuttavia, Alberto si rende conto che non sa come regolare nuovamente l’ora. “Certo, se avessi il mio telefono saprei come fare, però Matteo me l’ha fatto lasciare fuori...” Si guarda attorno alla ricerca di una soluzione, finché il suono sordo di qualcosa che cade a terra non attira la sua attenzione. Guarda ai suoi piedi e vede il taccuino sul pavimento. “E questo come ci è finito a terra? Devo comprarmi dei pantaloni con le tasche più strette se non voglio perdere cose in giro.” Si china per raccogliarlo, e si accorge che sul pavimento, sparsi qui e là, ci sono dei sottili peli neri. “Be’, forse questo posto non è così impeccabile come sembra...” pensa, mentre strofina il taccuino contro i pantaloni per spolverarlo prima di rimetterlo in tasca.

«Il computer! Ecco dove posso leggere l'ora!» esclama all'improvviso a voce alta. Alberto si avvicina di nuovo alla scrivania e scuote rapidamente il mouse per vedere se è in standby, ma nulla, lo schermo resta nero. “Cavolo, è spento... certo, potrei accenderlo, ma Matteo si è raccomandato di non toccare nulla... Già mi sono messo a rovistare tra le sue cose, forse è meglio se tengo le mani a posto adesso. Tanto mi cambia poco sapere l'ora o meno.” Messa da parte l'idea di accendere il computer, dà una seconda occhiata all'orologio, e questa volta rimane ancora più perplesso. “Le 2.03? Ma è impazzito? E perché le lancette sono ancora ferme se l'ho appena caricato? Mi sa che si è davvero guastato... devo portarlo dall'orologiaio appena ho un attimo di tempo.”

Mentre osserva il quadrante, Alberto nota che la luce nella stanza sta iniziando a tremolare, come fanno i vecchi neon poco prima di spegnersi definitivamente. “Oh, no, proprio adesso? Cosa sta succedendo?” Guarda in alto e, in effetti, i tubi luminosi del laboratorio sembrano tutti ondeggiare sempre di più. Alcuni, a momenti, si accendono e spengono completamente. Ad Alberto questa situazione non piace per nulla. “Ci manca solo di restare qui dentro al buio! È proprio l'ultima cosa che voglio... Questo posto ha qualcosa di strano! Forse sarebbe il caso di uscir...” Ma non fa in tempo a elaborare tutto il pensiero che...

BUIO.

Le luci si spengono definitivamente, lasciando in un istante tutto il laboratorio nelle tenebre più profonde. Alberto sussulta e dice: «Oddio! E adesso?». Rimane impietrito. “Devo trovare la porta e uscire subito da qui.” Comincia a muoversi in preda a un senso di angoscia, ma in fondo ottimista: per quanto lui sia sbadato, il suo senso dell'orientamento non lo ha mai tradito. Sa grossomodo dov'è la porta, e visto che lui quando la luce ha deciso di smettere di funzionare era dalla parte opposta della stanza, vicino alla scrivania, non dovrebbe essere difficile trovare l'uscita.

Inizia a fare qualche passo muovendo lentamente le braccia attorno a sé. «Ma dove diavole è?» gli esce di bocca. Vuole trovare la parete, e poi camminare di lato fino alla porta, ma nonostante abbia l'impressione di essersi già spostato abbastanza nella direzione giusta, la parete non la sfiora nemmeno.

Fa ancora un altro passo, andando a sbattere con la gamba contro qualcosa. Inizia a tastare con le mani l'oggetto contro il quale ha urtato per capire di cosa si tratta. "Ma questa è ancora la scrivania! Com'è possibile? Mi sembrava di aver camminato in linea retta, eppure ho finito per girare su me stesso... sono ancora al punto di partenza." Il buio pesto lo ha decisamente disorientato, deve ricominciare tutto da capo. Tocca ripetutamente la scrivania per capire meglio la propria posizione rispetto a essa, e quindi rispetto alla stanza. Muovendo le braccia, però, colpisce bruscamente il cubo di Rubik che oltrepassa il bordo del tavolo. "Ops! Spero non si sia rotto... Ma dov'è finito?" si chiede, perché il cubo, cadendo, non ha fatto alcun rumore. "Che strano, prima non mi è sembrato di aver visto nulla sul pavimento che potesse attutire la caduta..."

Ma lascia subito perdere il cubo, perché tanto non c'è modo di trovarlo in quel buio, e riprende a camminare, un passo alla volta, nella direzione in cui ritiene di trovare la parete. «Eccola, finalmente! Ci sono. Non mi resta che camminare di lato finché non arrivo all'uscita.» Detto, fatto: tiene la mano appoggiata al muro per essere sicuro di non perdersi. Prosegue aspettandosi di trovare presto l'angolo del laboratorio, per poi girare a destra lungo la parete con la porta, quando tocca qualcosa con la mano. "E questo?" si chiede mentre cerca di capire cos'è, tastandolo. "Ah, ma è *già* la porta! Come ho fatto a essere *già* qui? Non avrò fatto neanche cinque passi dalla scrivania, e non ho neppure cambiato parete. Sto impazzendo?" Alberto a questo punto è proprio angosciato: non capisce come sia possibile ritrovarsi praticamente già all'altro lato del laboratorio, non sa se è tutto frutto della sua mente disorientata dal buio e dal silenzio, o se sta succedendo qualcosa di assurdo. Il bisogno di uscire da lì è così impellente che smette di pensare e comincia a muovere la mano alla ricerca della maniglia. «Eccola finalmente!» esclama.

Non fa in tempo a ruotarla che, in modo del tutto inaspettato, la luce si riaccende: sembra abbia ripreso a funzionare normalmente, nessuno sfarfallio, nessun tremolio o quant'altro. Il laboratorio è inondato di luce, che si riflette sulle superfici bianche accecando Alberto. Le sue pupille si sono dilatate al massimo per adattarsi al buio, e adesso devono adeguarsi alla nuova situazione.

Toglie la mano dalla maniglia per stropicciarsi gli occhi e per cercare di farsi un po' d'ombra. Almeno non si sente più così nel panico. Appena i

suoi occhi si abituano di nuovo alla luminosità della stanza, però, vede qualcosa che lo lascia impietrito, ancora una volta. “Non è possibile! Non è reale!” Se prima, al buio, credeva di essere impazzito, ora con la luce ne ha la conferma.

Al centro del laboratorio, vicino alla scrivania di Matteo, c'è il cubo di Rubik sospeso come per magia a pochi centimetri da terra. Alberto resta ammutolito, sconvolto, di fronte all'oggetto fluttuante nell'aria. “Tutto questo non ha senso...”

Si stropiccia di nuovo gli occhi, con la speranza che ciò che ha davanti sia solamente frutto della sua immaginazione... e in effetti la sua speranza diventa realtà, perché quando riguarda il cubo, questo è lì ben piantato a terra. “Meno male, era solo un'allucinazione. Questo pavimento è di un bianco così riflettente che gli oggetti sembrano fluttuare nel vuoto...” Non vede l'ora di uscire da quel posto, prendere una boccata d'aria e calmarsi, ma c'è una cosa che deve fare prima: “Meglio se rimetto a posto il cubo di Rubik sulla scrivania, non voglio che Matteo pensi che mi sia messo a curiosare in giro”.

Mentre si appresta a raccoglierglielo, non può non osservare la scatola nera lì vicino, scatola che rimane senza dubbio l'oggetto più interessante nella stanza. “Davvero bizzarro... Chissà cosa c'è dentro.” La scatola è completamente liscia, tranne che per una piccola rientranza. Sembra una specie di maniglia, una sorta di appiglio per aprirla. Alberto la scruta con discrezione, cercando di capirne l'utilità. “Eh sì, è proprio una maniglia per aprire il coperchio.”

La sua curiosità sta cominciando a scalpitare, è qualcosa più forte di lui, e i suoi pensieri si fanno insistenti: “È vero, Matteo mi ha detto di non toccare niente, ma cosa vuoi che ci sia di così pericoloso qui dentro? Se ci fosse qualcosa di cui preoccuparsi, Matteo avrebbe messo un avviso evidente, come quello di radioattività sul contenitore con dentro il polonio...”.

Alberto è davvero combattuto: essere prudente e seguire le direttive dell'amico oppure soddisfare la sua curiosità? Alla fine è quest'ultima ad avere il sopravvento: “Devo dare per forza una sbirciatina... vediamo se si riesce a sollevare un po' il coperchio...” Con un movimento molto lento infila le dita nella maniglia, trattiene un secondo il fiato e, con un leggero sforzo, solleva abbastanza il coperchio per guardarci dentro.

«Oh, mio Dio! Oh, mio Dio!» urla terrorizzato.

## L'esperimento del gatto

Alberto non sa più se credere o no a ciò che sta vedendo. Dentro la scatola c'è... un gatto. Un gatto morto stecchito!

La richiude subito e per l'ennesima volta si stropiccia gli occhi: "Forse anche questa è un'allucinazione", e invece quando guarda di nuovo la scatola, l'animale è ancora lì. "Ecco perché ci sono tutti quei peli sul pavimento: allora non è un'allucinazione!"

Una serie di pensieri sconnessi iniziano ad affollargli la mente. "Ma cosa ci fa un gatto in un laboratorio di fisica? Morto, poi. Devo fare qualcosa! Lo devo dire a Matteo... o forse meglio di no? Se gli dicessi che c'è un gatto morto nella scatola saprà che ci ho guardato dentro, che l'ho aperta, e lui mi aveva detto di non toccare assolutamente niente. Oh, no, magari gli ho rovinato qualche esperimento!? Ma da quando si possono fare esperimenti che prevedono di far fuori un gatto?"

Passano diversi interminabili minuti, Alberto è rimasto quasi paralizzato dalla situazione, e non sa cosa fare. All'improvviso, però, sente un rumore provenire dalla porta del laboratorio, la maniglia ruota, e Matteo rientra. «Eccomi qua!» esordisce con voce squillante, ma quando vede la faccia dell'amico cambia tono: «Ehi, stai bene? Sei davvero pallido».

Alberto, che si sente colto in flagrante, risponde con una certa apprensione: «Ehm, sì... tutto bene... perché me lo chiedi?». Non sa che altro dire, il ritorno improvviso di Matteo l'ha preso alla sprovvista, e ora ha la terribile sensazione di aver fatto qualcosa di sbagliato.

Vedendo chiaramente che c'è qualcosa che non va, Matteo lo guarda con fare quasi minaccioso, e a quel punto Alberto confessa: «Guarda, devo rivelarti una cosa, ma ti prego di non arrabbiarti... Lo so che mi avevi detto di non toccare nulla, però la curiosità è stata più forte di me e ho dato una sbirciatina dentro la scatola nera e... c'è un gatto morto!».

«Oh, no! Come un gatto morto!? Ma non è possibile!» Matteo è in preda al panico e si precipita verso la scatola nera. Apre di scatto il coperchio, non dice niente per qualche secondo e poi commenta con un sospiro di sollievo: «Ah, meno male! Non vedi che respira ancora? Sta solo dormendo! Mi hai fatto prendere uno spavento! Pensavo fosse morto davvero!».

«Sta dormendo? Un gatto sta dormendo dentro la scatola?»

«Sì, esatto» risponde brusco Matteo.

«Ma cosa diamine ci fa nel laboratorio un gatto che dorme? È un esperimento?»

«Perché credi ti abbia fatto venire qui con tutta questa urgenza?! Te lo stavo per spiegare, ma come al solito fai sempre di testa tua, rischiando di mettere a repentaglio oltre dieci anni di lavoro.»

Matteo sembra irritato, o forse è proprio arrabbiato, ma comunque non è di certo di buonumore. Alberto non proferisce parola per l'imbarazzo: si rende conto di averla fatta grossa. È convinto che la sua opportunità di scrivere un articolo su un esperimento rivoluzionario per il mondo scientifico sia ormai svanita.

«Non capisci? Il gatto è il fulcro dell'esperimento!» esclama Matteo di punto in bianco, per poi precipitarsi al computer. Preme un pulsante, il monitor si accende, e subito appare un insieme caotico di grafici, calcoli e numeri in elaborazione. Ha tutta l'aria di essere qualcosa di complesso.

«Cosa stai facendo?» chiede Alberto incuriosito.

Matteo gli risponde in maniera concitata: «Un attimo, lasciami completare l'analisi dei dati». Intanto digita sulla tastiera una serie di istruzioni utilizzando uno di quegli strani linguaggi di programmazione. Alla fine sullo schermo appare una finestra con la scritta:

CARICAMENTO DATI...

«Okay, tra pochi secondi sapremo la verità» annuncia Matteo.

Alberto non ha idea di cosa voglia dire, e vede Matteo rosicchiarsi le unghie nell'attesa di scoprire il risultato: è evidentemente in ansia, magari per la preoccupazione che l'apertura della scatola abbia rovinato l'esperimento.

La barra di caricamento passa velocemente dal 23 al 58 per cento. «Dai, muoviti!» borbotta Matteo rivolto al computer. Adesso è al 92 per cento, 98, 99... «Ecco, lo sapevo, si blocca sempre al 99 per cento» dice infuriato.

Alberto cerca di sdrammatizzare: «Eh già, fa sempre così anche a me».

Matteo, però, resta impassibile in silenzio, non era il momento di fare battute.

«100 per cento, finalmente!»

La barra di caricamento scompare per lasciare posto alla scritta:

ANALISI COMPLETATA.

Matteo, servendosi del mouse, si mette ad aprire una serie di finestre con i risultati tanto attesi. Il cursore trema, Matteo è agitatissimo. «Ci siamo, è giunto il momento...»

Alberto avrebbe un milione di domande da fargli, proprio non capisce cosa stia accadendo, ma si trattiene.

*Clic!*

Matteo ha schiacciato il tasto del mouse e si è aperta un'ultima finestra: appaiono altri grafici e numeri incomprensibili, oltre a un'evidente scritta verde:

RISULTATO ESPERIMENTO: POSITIVO.

Matteo rimane a fissare lo schermo, sembra congelato. Poi gli sguardi dei due amici si incrociano, ma né l'uno né l'altro dice una parola. Gli occhi di Matteo si fanno lucidi per la commozione. Per un momento Alberto ha l'impressione che ci sia più silenzio persino di quando era rimasto da solo in laboratorio. Ma la sua sensazione dura solo pochi secondi: Matteo infatti scoppia in una fragorosa risata, quasi isterica. È difficile spiegare cosa stia provando, è un'emozione che in pochi potrebbero capire. L'emozione di uno scienziato nel vedere finalmente funzionare ciò che ha richiesto anni di impegno e sacrifici, e nel sapere di essere il primo al mondo a osservare qualcosa che mai nessuno aveva visto prima.

«Ce l'ho fatta! Ce l'ho fatta! Ti rendi conto? Ha funzionato!»

Alberto non sa cosa rispondere, sta per fare una domanda, ma non fa in tempo ad aprire la bocca che Matteo esclama: «Guarda l'analisi, il risultato è positivo! Dopo anni e anni di lavoro sono finalmente riuscito a realizzare quello che da sempre è l'esperimento più famoso della meccanica quantistica, forse il più famoso di tutta la scienza: l'esperimento del gatto di Schrödinger!».

Alberto ha già sentito parlare di questo esperimento, anche se non lo ha mai capito appieno. Però di una cosa è certo: si tratta di qualcosa di puramente immaginario. «Ma è impossibile! Come avresti fatto a realizzare l'esperimento del gatto di Schrödinger? Non è un esperimento mentale? Un esercizio intellettuale, impossibile da riproporre nella realtà? E poi... il gatto non doveva essere morto?»

«Prima di tutto, noi qui non vogliamo uccidere nessun essere vivente. Quindi, invece di creare un dispositivo che uccide gatti, questo li addormenta per una mezz'ora con del leggero sonnifero» risponde Matteo. «Per quanto riguarda l'esperimento, invece, sì, hai ragione, venne concepito da Schrödinger come un esperimento puramente mentale, è per questo che quello che sono riuscito a fare ha dell'incredibile. L'intera comunità scientifica ha sempre pensato che fosse impossibile realizzare qualcosa del genere, eppure eccoci qui, come puoi vedere ci sono riuscito!» esulta Matteo con orgoglio.

Alberto, per cercare di rifarsi dopo la figuraccia che ha fatto, si complimenta vivamente con l'amico, anche se non sa bene per cosa.

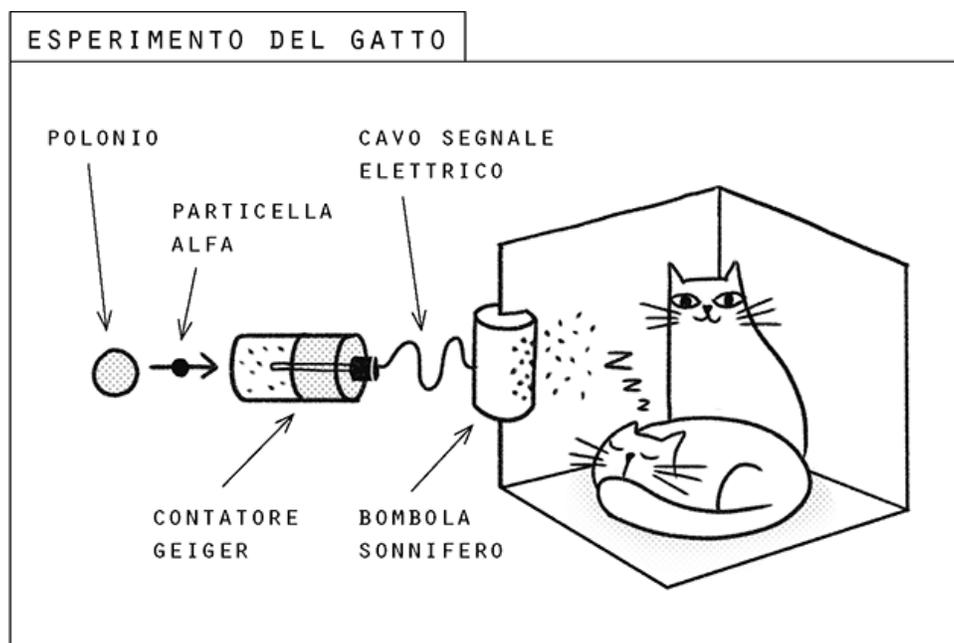
«Grazie, grazie, Alberto, e sono felice che sia tu la prima persona ad assistere a questo evento di portata storica per la scienza.»

Alberto, dopo quelle parole, non riesce più a restare nella sua "ignoranza": «Senti, Matte... ma, esattamente, cosa sei riuscito a fare? E poi, riguardo all'esperimento del gatto di Schrödinger, cosa mi sai dire a parte il fatto che c'entrano una scatola e un gatto?».

I due amici si guardano in silenzio. Ad Alberto sembra di aver detto un'eresia confessando di non sapere qualcosa di così "comune". È convinto che da un momento all'altro Matteo lo scaccerà dal suo laboratorio. Ma la tensione si trasforma quasi subito in una delle sonore risate dell'amico che in men che non si dica contagia anche Alberto.

«Lo sapevo... Albe, sei sempre il solito, ma ti voglio bene lo stesso!» dice Matteo dandogli una pacca sulla spalla. «Allora, per prima cosa

partiamo dall'esperimento che ho realizzato, di per sé molto simile all'idea originale di Schrödinger. Tutto ha inizio dal polonio che, ormai l'avrai capito, è un elemento instabile. Prima o poi uno degli atomi decade, emettendo una particella alfa che viene rilevata dal contatore Geiger. Quest'ultimo manda un impulso elettrico alla grande scatola nera, che rilascia del gas soporifero per far addormentare il gatto al suo interno. Dato però che l'emissione radioattiva è completamente casuale, poco dopo aver acceso il contatore Geiger è impossibile sapere se una particella alfa sia stata rivelata oppure no, e quindi sarà anche impossibile sapere se il gatto nella scatola sia sveglio oppure addormentato. Non per ignoranza, ma perché appunto l'emissione di una particella alfa è un processo intrinsecamente casuale. Così come un atomo di polonio si troverà in una sovrapposizione di stati "decaduto/non decaduto", così anche il gatto si troverà in una sovrapposizione di stati "sveglio/addormentato"! È solo nel momento in cui hai aperto la scatola e osservato il gatto che la sua funzione d'onda è collassata nello stato "addormentato", ma prima era sia sveglio sia addormentato contemporaneamente!»



Alberto non riesce a capire: «No, aspetta, mi stai dicendo che anche un gatto è descrivibile da una funzione d'onda? Ma non ha senso... La funzione d'onda è una descrizione quantistica, che quindi vale solo per

particelle minuscole. Come avresti fatto a realizzare un “gatto quantistico” o, meglio, a mettere in uno stato quantistico un gatto? Pensavo che questo fosse impossibile proprio perché il gatto è qualcosa di macroscopico, e non una particella piccolissima».

«Certo, la funzione d’onda descrive particelle minuscole, o atomi e molecole composte da queste particelle. Ma non è composto da particelle minuscole anche un gatto? La parte più difficile è riuscire a controllare la funzione d’onda del gatto, affinché descriva una sovrapposizione di stati “sveglio/addormentato”.»

«Matte, non mi sembra per nulla semplice... Come fai a mettere in uno stato di sovrapposizione qualcosa di così complesso come un gatto?» gli chiede Alberto.

«Okay, te lo spiego facendo un passo indietro: prima di capire come si è arrivati all’idea dell’esperimento del gatto di Schrödinger e di come l’ho messo in pratica, partiamo proprio da lui, dal fisico Erwin Schrödinger, uno dei padri fondatori della meccanica quantistica. Nel 1926 questo signore formulò il pilastro della materia che preferisco, ovvero l’equazione di Schrödinger. Come ormai avrai capito, la funzione d’onda ci dice la probabilità di osservare una determinata proprietà di un sistema quantistico.»

Alberto non si trattiene dal commentare: «Sì, infatti, l’ho capito!».

«Okay, Schrödinger però andò oltre, fornendo un’equazione in grado non solo di darci l’aspetto di tale funzione, ma anche di dirci come essa cambi nel tempo. Può avere infatti l’aspetto di una curva a campana, ma anche di tante altre curve. Col passare del tempo, poi, questa curva può spostarsi o cambiare forma. L’equazione di Schrödinger determina tutto ciò, è lei che descrive come un sistema quantistico evolve nel tempo!»

«Direi che è fantastico...»

«Già, e ti faccio un esempio concreto. Pensa a una pallina in equilibrio sulla cima di una collina: se a un certo punto viene sbilanciata da un soffio di vento, rotolerà giù a valle. La pallina ovviamente seguirà le regole della fisica classica, cioè si comporterà secondo le leggi di Newton. Queste ci permettono di prevedere esattamente il percorso che la pallina seguirà: un’unica traiettoria definita e prevedibile, che ha per origine la cima della collina e come termine un punto ben preciso a valle.»

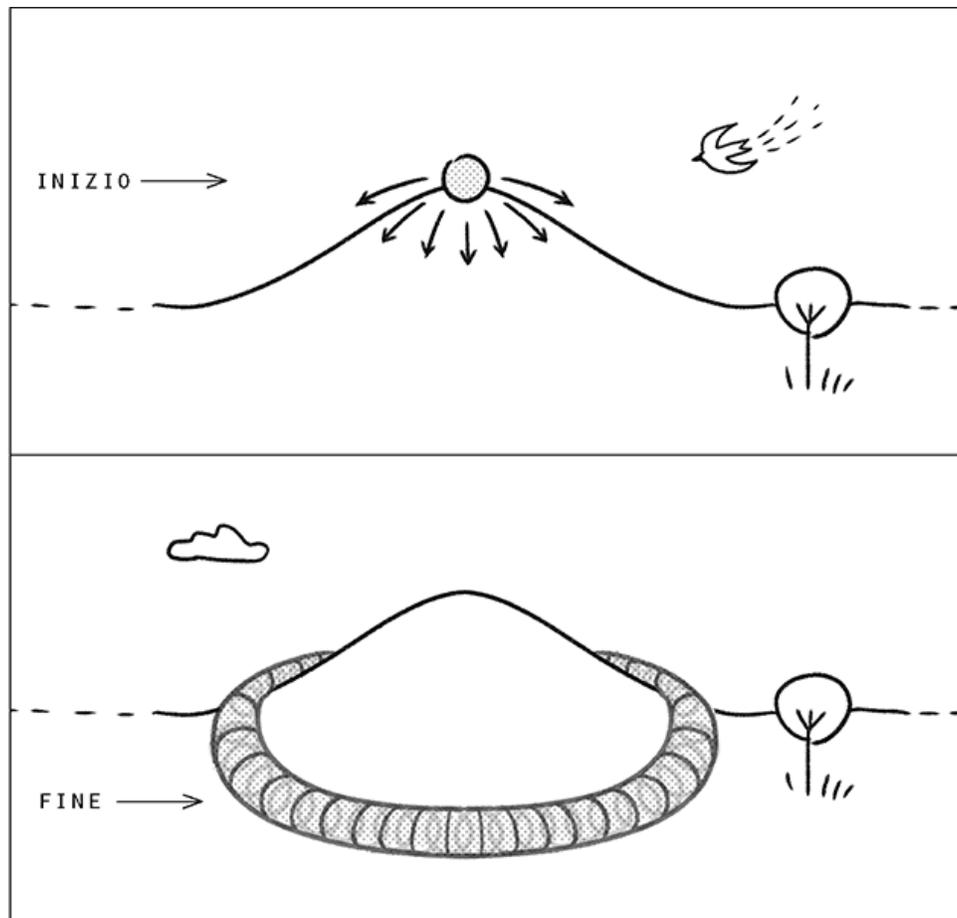
«Matte, fin qui il tuo discorso non fa una piega!»

«Bene, ora, se mettessimo invece in cima alla collina un'ipotetica pallina quantistica, ecco che sarà l'equazione di Schrödinger, e non le leggi di Newton, a entrare in gioco. Innanzitutto, essendo inizialmente la pallina localizzata con precisione sulla cima della collina, la sua velocità sarà indeterminata per via del principio di indeterminazione, facendola quindi rotolare giù senza bisogno di altre cause per sbilanciarla. Comportandosi però in modo quantistico, la pallina non prenderà una singola traiettoria verso valle, ma sarà in una sovrapposizione di prendere tutte le possibili traiettorie. Questo è più intuitivo da immaginare se pensi che la pallina può essere descritta anche come un'onda che si espande nello spazio, come se versassi dell'acqua in cima alla collina che scenderà poi uniformemente su tutta la superficie.»

Alberto, che nel frattempo ha estratto dalla tasca il solito taccuino e la penna che aveva trovato nel cassetto, non smette di scrivere i suoi appunti.

«All'inizio» continua Matteo dopo una pausa per prendere fiato «la probabilità di trovare la pallina sarà descritta da una curva a campana molto piccata in corrispondenza della cima della collina. Con il passare del tempo, però, man mano che la pallina quantistica inizia a rotolare verso valle seguendo una sovrapposizione di tutte le possibili traiettorie, ecco che la sua funzione d'onda non avrà più una forma a campana. La probabilità di trovare la pallina in cima alla collina sarà adesso pressoché zero, mentre sarà massima quella di trovare la pallina a valle. La curva a campana, "rotolando" giù dalla collina, si sarà trasformata in una curva a "ciambella" dato che la pallina potrebbe trovarsi in un punto qualsiasi attorno ai piedi della collina.»

«Aspetta un attimo...» fa Alberto, e dopo qualche secondo aggiunge: «Tipo questa?», e poi mostra a Matteo lo schizzo che ha fatto sulla pagina.



«Sì, molto bravo! Ora, ascoltami... L'evoluzione nel tempo di un sistema corrisponde quindi a un'evoluzione della sua funzione d'onda: nel caso della pallina quantistica siamo partiti da una classica forma a campana per poi arrivare a una forma a ciambella. L'equazione di Schrödinger descrive in modo matematico proprio questo: il modo in cui la funzione d'onda di un sistema cambia nel tempo. In questo senso, è *l'analogo quantistico* di quelle che in meccanica classica sarebbero le equazioni del moto di un sistema derivate dalle leggi di Newton.»

«Davvero interessante!»

«In sostanza» continua Matteo, «anche se in meccanica quantistica non possiamo prevedere con certezza in quale stato si troverà il sistema prima di essere osservato, l'equazione di Schrödinger ci permette di prevedere con certezza, e per qualsiasi istante di tempo, quale sarà la probabilità di osservare il sistema in un determinato stato. Tuttavia, al contrario delle leggi di Newton che prevedono come evolverà un sistema in termini di una

traiettoria ben definita, ecco che l'equazione di Schrödinger permette che un sistema possa evolvere in una sovrapposizione di traiettorie ben definite, cioè permette la validità del principio di sovrapposizione. Se ci pensi bene, questo rappresenta una svolta radicale rispetto alla visione deterministica del mondo offerta dalla fisica classica. Schrödinger stesso, a causa della stranezza di questa equazione e dei risultati paradossali che essa può portare, era convinto che fosse sbagliata!»

«Povera equazione, rinnegata dal suo stesso padre!» Alberto si sente quasi rincuorato: non è soltanto lui a non capire appieno la meccanica quantistica, ma perfino chi la meccanica quantistica l'ha fondata.

«Proprio così. Ecco perché Schrödinger formulò il paradosso del gatto: per evidenziare l'assurdità delle conclusioni che comporterebbe un'equazione del genere. Se si volesse accettare il fatto che un atomo possa trovarsi in una sovrapposizione di stati, decaduto e non decaduto, non è chiaro cosa vieti a un gatto di essere a sua volta in una sovrapposizione di stati: vivo e morto. Non c'è nessun principio nella teoria della meccanica quantistica a precludere questa possibilità perché, così come la conosciamo, l'equazione di Schrödinger può essere applicata a qualsiasi sistema fisico. Perciò, se è vero che un atomo può evolvere in una sovrapposizione di stati, e sappiamo che questo è vero, non è chiaro perché un insieme arbitrariamente grande di atomi non possa anch'esso evolvere in una sovrapposizione. Quel che è certo è che noi non vediamo nulla di tutto ciò nella nostra vita quotidiana, non vediamo gatti in sovrapposizione di stati, almeno fino a oggi! E perché non li vediamo secondo te?»

«Mmm...»

«Dai, Albe, considerando tutto ciò che ti ho detto fin qui, secondo me puoi arrivarci...»

«Un attimo che ci penso.» Alberto vuole dimostrare di aver capito almeno qualcosa. «Mi viene in mente quello che mi stavi raccontando prima, e cioè che si possono fare esperimenti di doppia fenditura, e vedere il dualismo onda-particella con sistemi composti da centinaia, o anche migliaia, di atomi... come con il fullerene. Quindi fino ad alcune grandezze l'equazione di Schrödinger funziona ancora. Superate certe dimensioni, forse questa cosa non funziona più... ma non saprei proprio dirti il perché.»

«Il ragionamento è corretto! Vedere effetti quantistici in sistemi composti da un numero sempre più grande di atomi è estremamente complesso. Gli

esperimenti, come quelli con il fullerene, servono proprio a testare la validità dell'equazione di Schrödinger e a capire se prima o poi smette di essere valida. L'esperimento del gatto porta questo all'estremo, proponendo di realizzare un dispositivo capace di "amplificare" stati di sovrapposizione dal mondo microscopico a quello macroscopico, rendendo quantistico qualcosa che dovrebbe non esserlo!»

Alberto a questo punto si sente di aggiungere una cosa: «Però io il gatto l'ho visto solo dormiente, mica in una sovrapposizione di stati...».

«Certo, perché il gatto era in una sovrapposizione di stati fino a un attimo prima che tu aprissi la scatola, facendo così collassare la sua funzione d'onda. Anche se tu non hai potuto vederlo, possiamo essere certi che il gatto era sia sveglio sia dormiente contemporaneamente grazie a dei sensori posti all'interno della scatola. Ti ricordi l'esperimento della doppia fenditura? Il fatto che la particella sia in una sovrapposizione di stati "passata da destra / passata da sinistra" si può osservare solo indirettamente grazie agli effetti che essa comporta, cioè alla figura d'interferenza. Qui siamo di fronte a un sistema molto più complesso, per cui abbiamo dovuto usare dei sensori avanzatissimi e un'analisi dei dati molto complicata per dimostrare che il gatto fosse in uno stato quantistico.»

«Non ti chiedo dell'analisi dei dati, perché tanto non capirei nulla, ma mi spieghi almeno come hai fatto a realizzare l'esperimento?»

«Il trucco sta tutto nella scatola che vedi. Una volta chiusa, questa scatola è probabilmente il luogo più isolato dell'intero pianeta, è schermata talmente bene che è possibile tenere persino un gatto in sovrapposizione per un po' di tempo. Ti ricordi quando abbiamo detto che una particella non possiede una posizione precisa finché qualcuno non compie una misura? Ecco, lo stesso avviene con il gatto: rimane in sovrapposizione finché qualcuno non osserva se dorme o no. Ma non necessariamente devi essere tu a compiere questa misura, basta anche solo l'interazione con altre cose che stanno intorno. Per esempio, se il gatto non fosse dentro la scatola, la luce che viene dalle lampade sul soffitto ci rimbalzerebbe contro, portando con sé l'informazione dello stato del gatto.»

«Sì, giusto, questo mi è chiaro!»

«Molto bene, e infatti, quando guardi il gatto, non fai altro che raccogliere con gli occhi questa luce riflessa, da cui poi il tuo cervello estrae un'informazione. La stessa cosa vale per suono, vibrazioni,

radiazioni elettromagnetiche di tante frequenze diverse... praticamente per tutto. È questa la parte più difficile, e che ha richiesto più tempo. Il materiale futuristico di cui è fatta questa scatola consente l'isolamento perfetto, frutto di decenni di ricerca in scienze dei materiali, e io sono il primo a usarlo per un esperimento quantistico.»

«Sei un grande, Matte!»

Matteo sorride al complimento entusiasta dell'amico, in effetti è molto orgoglioso di quello che è riuscito a fare. «Grazie, grazie. Ma adesso senti qua: una volta isolato dall'ambiente esterno il sistema polonio-Geiger-gatto, ciò che avviene è una catena di eventi in sovrapposizione: il polonio sarà nella sovrapposizione "decaduto/non decaduto", e di conseguenza il contatore Geiger si troverà nella sovrapposizione "mandato impulso/non mandato impulso". Questo porterà il sonnifero nella sovrapposizione "attivato/non attivato", e di conseguenza il gatto nella sovrapposizione "sveglio/non sveglio". Ecco come viene amplificato uno stato di sovrapposizione da un singolo atomo a un oggetto macroscopico!»

«Caspita, è proprio una reazione a catena...»

«Eh eh, già, e se il sistema non fosse isolato, basterebbe una piccolissima interazione con l'esterno a "osservare" il suo stato, facendo così collassare la funzione d'onda in una delle due possibilità. In poche parole, addio sovrapposizione.»

«Polonio, contatore Geiger, sonnifero, gatto... tutto in sovrapposizione e allo stesso tempo! Ma allora, l'osservazione anche solo di una di queste componenti farebbe collassare la funzione d'onda di tutto il resto?»

«Sì, esatto. Bisogna isolare perfettamente tutto, non solo il gatto. Questo per via dell'entanglement quantistico tra le componenti.»

«Ecco che ci risiamo: mi sembra di avere tutto chiaro e poi tiri fuori dal cilindro dei termini di cui, anche se li ho sentiti mille volte, non saprei dare una definizione precisa.»

«Me l'aspettavo, tranquillo! L'entanglement è un pezzo fondamentale del puzzle: serve per capire esattamente cos'è successo dentro la scatola. Se devi scrivere un articolo sul mio esperimento, devo descrivertelo per bene, ma...»

«Ma???»

«Ma ora ho davvero bisogno di mangiare qualcosa perché sto morendo di fame. Che dici, andiamo al bar e te lo spiego mentre pranziamo? Così

lasciamo anche riposare in pace il gatto.»

Alberto guarda d'istinto il suo orologio da polso e dice: «Certo, Albe. Anche se sono solo le 11.40 ho un bel po' di fame anch'io, considerando che sono in pie...», però non riesce a terminare la frase per lo stupore, riguarda l'orologio e sono sempre le 11.40. «Matte, anche il tuo orologio segna la stessa ora?»

«Sì, perché me lo chiedi?»

«Ah, no, niente...» Alberto è contento di vedere il suo amato orologio funzionare di nuovo a dovere quando fino a un momento prima sembrava rotto, e s'incammina con Matteo verso il bar dell'università.

## Il gelato quantistico

«Buona questa focaccia!» esclama Alberto. «Ora mi sento molto meglio!»

«Già» annuisce Matteo, anche lui con in mano una fetta di focaccia, che mangia con avidità. Il bar dell'università è molto accogliente, su ogni tavolo c'è un vasetto colorato, ognuno con una piantina aromatica diversa e le tovagliette gialle danno un tocco di calore e allegria.

Quando ha finito il suo boccone, Matteo riprende il discorso: «Albe, ma in che senso ti senti “meglio”? Stavi poco bene e non mi hai detto nulla? O è per lo spavento che ti sei preso nel vedere il gatto?».

«No, no, avevo semplicemente un calo di energie. In fondo mi hai *solo* svegliato nel bel mezzo della notte per farmi venire qui a inondarmi di informazioni...»

«Ah, quindi non ti sei sconvolto per il gatto... giusto? Sei sicuro che non ti abbia dato nessun fastidio? Mi sei sembrato davvero molto pallido prima.»

Alberto non se la sente di raccontare tutto quello che è successo, è in imbarazzo a pensare che fosse frutto della sua immaginazione, e quindi preferisce sviare il discorso: «Diciamo che sono rimasto sorpreso di trovare un gatto, che credevo morto, rinchiuso in un laboratorio. Poi però la mia preoccupazione principale era di averti rovinato l'esperimento. Davvero, scusa ancora se ho aperto la scatola, nonostante tu mi avessi ordinato chiaramente di non toccare nulla in tua assenza».

Matteo sorride, evidentemente intenerito. «Non ti preoccupare, l'esperimento ha funzionato alla perfezione. Meno male che non hai aperto la scatola nel momento sbagliato... ma come hai visto anche tu, tutte le misure erano a posto.»

Ora i due piatti davanti a loro sono vuoti e le focacce sono già un lontano ricordo, ma Alberto non è “soddisfatto”, ha ancora un certo languorino.

«Scusi, che dolci avete?» chiede rivolto alla cameriera che in quel momento sta portando via i loro piatti.

«Allora, oggi abbiamo... crostata di mele, tiramisù, gelato alla fragola o al cioccolato e panna cotta al caramello.»

«Ah, ma... se prendessi il gelato alla fragola, saremmo sicuri al 100 per cento che non sia al cioccolato?» le chiede scherzando.

Alla ragazza la domanda suona strana tanto che chiede ad Alberto: «Come, scusi?».

È Matteo a intervenire: «Lo lasci perdere, vuole sempre fare il burlone... Ci porti pure due gelati alla fragola, per favore».

La cameriera fa cenno di sì con la testa e si dilegua in cucina senza aver capito il senso della battuta.

«Albe, ma perché? Perché mi fai fare queste figuracce? Qui mi conoscono tutti...»

«Ma sì, dai, non ho detto niente di male, rilassati... dopo tutto è colpa tua se l'esempio del gelato quantistico mi è rimasto così impresso» risponde Alberto.

«Be', almeno vuol dire che qualcosa di quello che dico te lo ricordi» commenta Matteo, e i due scoppiano a ridere.

«A proposito di ricordarmi quello che dici, avevi detto che mi avresti spiegato l'ultimo tassello del puzzle per comprendere appieno cos'è successo all'interno della scatola...»

«Ah, sì, giusto, l'entanglement quantistico! Allora, vediamo... da dove posso cominciare?»

Alberto tira fuori il taccuino e risponde all'amico: «Comincia da dove vuoi, basta che usi parole facili», poi scorre le pagine fino a trovarne una bianca e si mette in ascolto.

In quel momento la cameriera fa ritorno. «Ecco a voi i due gelati alla fragola» dice posando le coppe sul tavolo.

«Grazie mille» risponde Matteo. «Quale modo migliore di spiegare l'entanglement, se non con questi due gelati!»

La ragazza lo guarda con una faccia che esprime tutta la sua confusione, ma si limita a sorridere e si allontana lasciandoli soli.

«Effettivamente sa proprio di fragola!» esclama Alberto dopo averne assaggiato un cucchiaino.

Anche Matteo porta il cucchiaino alla bocca e assaggia il gelato, poi comincia a parlare: «Vedo che questo concetto ti è chiaro, e cioè che, se esistesse un gelato quantistico, a causa del principio di indeterminazione l'unica informazione che sarebbe possibile avere è la probabilità che il gelato abbia un certo sapore. È solo assaggiandolo che il sapore collassa in un unico gusto definito, che potrebbe essere quello scritto sulla confezione così come un altro».

«Sì, sì, fin qui è chiarissimo. Continua pure.»

Matteo allontana leggermente la coppa verso il centro del tavolo – la fisica per lui è sempre la cosa più interessante, anche del cibo! – e riprende il suo discorso.

«Perfetto. Il punto da sottolineare è proprio questo: se la funzione d'onda del gelato ci dice che, per esempio, il 50 per cento delle volte saprà di fragola mentre il restante 50 per cento di cioccolato, non c'è modo di conoscere il gusto prima di assaggiarlo, insomma: non puoi corrompere il produttore affinché te lo dica! Dopo tutto siamo nel mondo quantistico, non è una questione di ricetta segreta, ma di probabilità! Quindi, neanche il produttore può sapere quale sia il gusto del gelato, perché il gelato quantistico non ha nessun gusto determinato a priori!»

«Matte... ma se il produttore decidesse per esempio di assaggiarlo direttamente nella fabbrica che fa il gelato? Giusto un piccolo cucchiaino per scoprire che gusto ha, poi lo confeziona nei barattolini e lo mette in vendita: in questo caso almeno lui saprebbe di cosa sa, e potenzialmente potrei farti dire che gusto ha assaggiato... alla fine non è così difficile, no?»

«Eh, Albe, in questo caso sì, ma a quel punto non sarebbe più un gelato quantistico, dato che la funzione d'onda del gelato è già stata fatta collassare dal produttore in un unico gusto.»

«Ah già, hai ragione» dice Alberto grattandosi la tempia.

«Bene, capito questo, ora posso spiegarti, o almeno ci provo, il concetto dell'entanglement quantistico. Immagina questa scena: il produttore prepara un grande recipiente di gelato quantistico al gusto di... 50 per cento fragola e 50 per cento cioccolato. Dopodiché, senza mai assaggiarlo, ne prende un po' dal recipiente per confezionare due barattolini che, dopo essere stati sigillati, vengono inviati uno ad Alice, che vive a Sydney, e uno a Bob, che vive a Roma.»

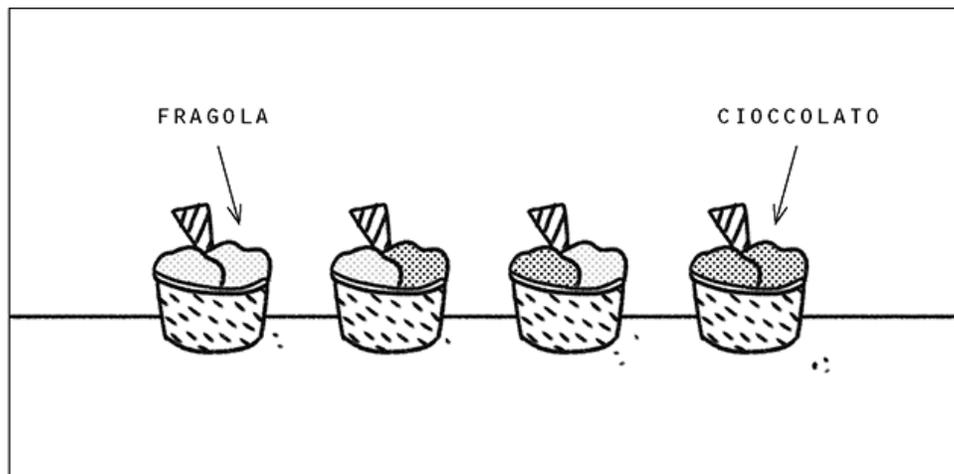
«Alice e Bob chi sono? Li conosco?»

«Ma no, è solo un esempio! Alice e Bob sono dei nomi che si usano spesso nel linguaggio scientifico: un po' come Pierino per le barzellette.»

«Ah, ecco, lo dicevo anche prima che voi fisici con i nomi siete particolari...»

«Okay, okay, ma adesso seguimi: dato che il gelato è quantistico, entrambi hanno esattamente il 50 per cento di possibilità di trovare uno dei due gusti. Quindi, secondo te, qual è la probabilità che Bob e Alice abbiano due gusti diversi tra loro, per esempio la probabilità che Bob trovi fragola e Alice cioccolato?»

Alberto ci pensa un attimo, borbotta qualcosa tra sé e sé, e infine risponde: «Considerando che le combinazioni possibili sono quattro, ovvero fragola-fragola, fragola-cioccolato, cioccolato-fragola e cioccolato-cioccolato, ci sono solo due combinazioni su quattro con i gusti diversi, quindi la risposta è 50 per cento».



«In effetti, il tuo ragionamento non fa una piega...» ribatte Matteo.

Al che Alberto esclama trionfante: «Ho finalmente detto qualcosa di giusto! Si vede che ormai sto cominciando a entrare nel mondo della meccanica quantistica!».

Matteo però smorza subito il suo entusiasmo: «Be', sì, ma... no».

«Come "no"?» Alberto è incredulo.

«Vedi, Albe, il ragionamento *sarebbe* corretto se fossimo nel mondo classico. Nel mondo quantistico, tuttavia, le cose funzionano ancora una

volta in modo diverso.»

«Ma come...»

«La tua risposta avrebbe senso per delle osservazioni fatte su oggetti indipendenti, per esempio se Alice e Bob lanciassero una moneta ciascuno e ci chiedessimo quale sia la probabilità che ottengano risultati diversi. Ovviamente il 50 per cento, come dici tu...»

«Matte, sto cominciando a impazzire, è tutto troppo diverso da come sono abituato a pensare!»

«Non scoraggiarti, aspetta che ti spiego... Il punto cruciale, e che non hai considerato, è che il gelato contenuto nei due barattolini deriva dallo stesso recipiente. Il produttore ha preso lo stesso gelato, e lo ha diviso in due parti. In questo modo i due barattolini sono fortemente correlati tra loro, legati l'uno all'altro, ovvero sono in uno stato di entanglement quantistico!»

«Fermati un secondo, che me lo segno per bene... almeno prendere appunti lo so ancora fare!»

Matteo si prende quindi una pausa, poi quando l'amico gli fa un cenno con la testa riprende: «Se Alice a Sydney assaggia il gelato e scopre che sa di cioccolato, allora anche Bob quando assaggerà il gelato a Roma scoprirà che sa di cioccolato. Certo, potresti pensare che sia solo una coincidenza, ma se ripetessi l'esperimento tantissime volte vedresti che è sempre questo il caso, il gusto che assaggiano sarà sempre lo stesso: fragola-fragola o cioccolato-cioccolato».

«Ah...» Alberto non riesce a fare altro che esprimere il suo stupore.

«Questo è diverso dal caso del lancio di due monetine: anche se coniate dallo stesso lotto di metallo non c'è alcuna correlazione tra le due, non sono "entangled", cioè non sono "legate" tra di loro. Se dal suo lancio Alice ottiene testa, questo non ci dice niente su ciò che otterrà Bob dal suo, sarà sempre 50 per cento testa e 50 per cento croce.»

«Scusa, ma tornando al gelato... Se Alice non ha alcun modo di sapere quale sarà il gusto che assaggerà, come fa il gelato di Bob a "sapere" che Alice ha assaggiato fragola, e che quindi anche Bob deve assaggiare fragola?»

«Bravo, è proprio questo il punto che sembra essere senza senso! Nonostante all'inizio entrambi abbiano il 50 per cento di probabilità di assaggiare un gusto o l'altro, sembra che l'atto di Alice di assaggiare il

gelato faccia cambiare istantaneamente la probabilità del barattolino di Bob, che passa dal 50 per cento di trovare uno dei due gusti, al 100 per cento di trovare lo stesso gusto di Alice. È un po' come se l'esito del lancio della moneta di Alice determinasse quale sarà il risultato del lancio della moneta di Bob, nonostante i due eventi siano completamente indipendenti e distanti l'uno dall'altro. Capisci che tutto questo va contro ogni logica classica?»

«Certo che ho capito che è illogico! Quello che non capisco è come mai la probabilità di Bob cambi così drasticamente subito dopo che Alice ha assaggiato il suo gelato! Ciò deve per forza voler dire che esiste uno scambio di informazioni tra i due gelati.»

Matteo fa un profondo respiro e ribatte, secco: «E invece no. Alice e Bob potrebbero anche essere rinchiusi coi loro gelati in due bunker nelle rispettive città, completamente schermati e con l'impossibilità di ricevere o inviare qualsiasi tipo di segnale. Anche se Alice e Bob non hanno alcun modo di scambiarsi informazioni, quello che accade sarà sempre lo stesso: il gusto che ognuno di loro assaggerà sarà casuale e assolutamente impossibile da prevedere, ma, ciò nonostante, entrambi troveranno lo stesso identico gusto».

«No, Matte, non mi convinci stavolta... Deve esserci per forza uno scambio di informazioni. Senti qua: magari nell'istante in cui il gelato di Alice viene assaggiato, questo assume un determinato gusto, e allo stesso tempo manda un segnale tramite qualche strano tipo di onda ancora da scoprire a quello di Bob, affinché anch'esso abbia lo stesso gusto. Non possiamo escludere l'eventualità che avvenga una sorta di "comunicazione" per mezzo di qualcosa che ancora non conosciamo. In questo caso non possiamo essere sicuri che venga schermata, no?»

«Ottima osservazione.» Matteo è rimasto stupito da questa riflessione. «Però devo contraddirti perché... possiamo! Come dici tu, infatti, si potrebbe immaginare che l'atto di assaggiare il gusto di uno dei due gelati vada a influenzare l'altro tramite una sorta di "effetto a distanza", un fenomeno misterioso ma che in qualche modo connette i due barattolini.»

«Esatto, è proprio quello che penso anche io...»

«Tuttavia, caro Albe, questa "comunicazione" non può avvenire istantaneamente. Ricordati che esiste una velocità massima con la quale l'informazione può propagarsi nello spazio, cioè la velocità della luce. Se Alice e Bob sono sufficientemente distanti, ecco che i due potrebbero

assaggiare i rispettivi gelati più velocemente di quanto un qualunque tipo di informazione possa propagarsi tra i due. Per esempio, puoi immaginare di portare all'estremo la distanza tra di loro, così è più facile da capire. Immagina che Bob, invece di essere a Roma, sia un astronauta e si trovi su Marte.»

«Okay, questa scena mi piace...» ridacchia Alberto.

«Ah, bene, sono contento, ma ascoltami: questo significa che ogni possibile informazione riguardo al gusto che Alice ha percepito nell'assaggiare il suo gelato potrà metterci fino a ventidue minuti per arrivare da Bob. Ciò nonostante, Bob si troverà ad assaggiare lo stesso gusto da ben prima che questo tempo sia trascorso. Praticamente già nell'istante successivo all'assaggio da parte di Alice.»

«Ma questo è impossibile! Non può esserci un'azione a distanza istantanea, l'hai appena detto anche tu che nulla può andare più veloce della luce. Altrimenti vorrebbe dire che l'entanglement viola la teoria della relatività di Einstein.»

«Potrebbe sembrare, sì. Eppure non è così, perché quello che sta dietro l'entanglement non è una comunicazione a distanza istantanea, bensì sono delle correlazioni che non possono essere spiegate da un punto di vista classico. Non c'è alcun modo di usare l'entanglement per trasmettere delle informazioni più veloci della luce, sarebbe troppo bello per essere vero.»

«Matte, sappi che non è facile starti dietro» sospira Alberto abbandonandosi contro lo schienale della sedia.

Matteo ha ben presente la difficoltà di Alberto nel capire questo fenomeno perché ci è passato anche lui diversi anni fa, così come gli stessi padri fondatori della meccanica quantistica. Quando Einstein e Schrödinger si resero conto che la teoria contemplava la possibilità di un fenomeno di azione a distanza apparentemente istantanea, infatti, pensarono subito che ci fosse qualcosa di fondamentalmente sbagliato sotto. Il concetto dell'entanglement era rimasto ampiamente dibattuto tra i fisici fino agli anni Settanta e Ottanta del Novecento, quando fu finalmente possibile effettuare i primi esperimenti rigorosi a riguardo. Per esempio, sviluppando tecniche per generare coppie di fotoni che mostrano entanglement tra le loro polarizzazioni, o coppie di elettroni che mostrano entanglement tra i loro spin. In parole semplici si potrebbe dire che se una particella “gira” in senso orario, anche l'altra particella in entanglement si vedrebbe girare sempre in

senso orario. Ma vale anche il contrario: una particella potrebbe girare in senso orario e l'altra sempre in senso antiorario. In entrambi i casi, però, la probabilità che questo accada in maniera continuativa non avrebbe riscontro nella fisica classica, proprio come per i gelati quantistici. Al giorno d'oggi, il fenomeno dell'entanglement è dimostrato senza ombra di dubbio, e gioca un ruolo cruciale in applicazioni tecnologiche innovative, come i sensori estremamente precisi. Inoltre, è una delle ragioni che permette ai computer quantistici di raggiungere prestazioni impossibili da ottenere con computer classici.

Le ricerche nell'ambito dell'entanglement sono così importanti che nel 2022 valsero il premio Nobel per la Fisica ai tre scienziati Alain Aspect, John Clauser e Anton Zeilinger, che furono pionieri di tale impresa.

Matteo cerca di incoraggiare l'amico: «Albe, ma guarda che in fatto di meccanica quantistica siamo tutti sulla stessa barca!».

«Okay, se lo dici tu, quasi ci credo. Senti, ma lasciando perdere il mio sconforto, mi vorresti a questo punto spiegare cosa c'entra l'entanglement con l'esperimento del gatto?»

«Con piacere!» esordisce Matteo. «Nell'esperimento che ti ho mostrato, tutte le diverse componenti sono in uno stato entangled tra di loro. Il polonio con il contatore Geiger, il contatore Geiger con il recipiente di sonnifero, il recipiente di sonnifero con il gatto. Prova a pensarci: se tu osservassi anche solo una di queste componenti, sapresti immediatamente lo stato di tutte le altre. Non serve per forza guardare il gatto per capire se è sveglio o sta dormendo, potresti guardare direttamente lo stato dell'atomo o il contatore Geiger. Tuttavia, lasciami notare che, a differenza dell'esempio del gelato, dove il produttore creava coppie di oggetti entangled – i barattolini – separando un singolo oggetto quantistico – il recipiente di gelato quantistico –, io qui ho fatto qualcosa di diverso: sono partito da oggetti indipendenti l'uno dall'altro che, interagendo tra di loro, sono finiti in uno stato entangled. Isolando dall'esterno tutte le varie componenti dell'esperimento, come il polonio, il contatore Geiger, la fiala di sonnifero e il gatto, sono riuscito a portare tutto il sistema in una sovrapposizione di stati. Questo perché il decadimento alfa degli atomi di polonio è un processo intrinsecamente quantistico, che li lascia in una sovrapposizione di stati. Tramite l'interazione con gli altri sistemi, ecco che questo stato viene

trasmesso anche al contatore Geiger, al sonnifero e al gatto. E così, dentro la scatola, tutto era in sovrapposizione, tutto era entangled!»

«Ma, aspetta, se dici che anche il contatore Geiger è in sovrapposizione, allora prima, quando mi dicevi che segue le regole della meccanica classica, mi stavi imbrogliando...»

«Giusta osservazione! Stavo solo semplificando un po' la spiegazione prima di mostrarti tutto il resto. Perché il contatore Geiger dovrebbe essere un sistema classico? Anch'esso è formato da atomi che seguono le regole della meccanica quantistica. Se ci pensi, il punto è sempre lo stesso: dov'è che finisce di essere valida la meccanica quantistica e le cose iniziano a comportarsi in modo classico? Con sistemi di migliaia di atomi? Con sistemi grandi come un contatore Geiger? Con un gatto? La teoria della meccanica quantistica non ce lo dice, è per questo che le mie ricerche vogliono trovare risposta a questa domanda.»

«È incredibile, non ci avevo mai pensato. E così, con questo esperimento, sei riuscito a dimostrare che la meccanica quantistica vale effettivamente anche per un gatto. Questo è un risultato da premio Nobel, vedrai! Non vedo l'ora di scriverci un articolo, tutto il mondo resterà esterrefatto. Pensa se Schrödinger potesse vedere tutto questo...»

«Eh, immagino resterebbe traumatizzato» ribatte Matteo scherzando. «Ti ricordo che coloro che la meccanica quantistica l'hanno fondata non pensavano che fosse possibile avere in uno stato di sovrapposizione neppure un singolo atomo. Alcuni di loro ritenevano infatti che tutte queste fossero predizioni errate della teoria, artefatti matematici, e non effetti misurabili in natura. Guarda, però, dove siamo arrivati adesso grazie agli incredibili sviluppi tecnologici della nostra società. Abbiamo potuto costruire esperimenti che ci dimostrano la validità del principio di sovrapposizione con elettroni, atomi, molecole... e anche gatti.»

## Vite parallele

Alberto continua a scrivere e ogni tanto prende qualche cucchiata di gelato; Matteo, invece, al gelato non pensa più da un pezzo.

«Spiegami una cosa, Matte» fa Alberto con la penna in una mano e il cucchiaino nell'altra, «tu ti aspettavi che questo esperimento avrebbe funzionato? Ti aspettavi che, isolando tutto per bene, anche un gatto potesse essere in sovrapposizione?»

«Onestamente? Sì, ero abbastanza convinto che avrebbe funzionato, anche se speravo il contrario.»

«Ma come, scusa!?»

«Eh, il punto è che è solo quando un esperimento non funziona come te lo aspetti che scopri qualcosa di nuovo, magari una nuova fisica. Una volta isolato benissimo il sistema dall'esterno, le alternative infatti erano principalmente due: o si sarebbe potuto mettere il gatto in sovrapposizione dimostrando la validità della meccanica quantistica, o si sarebbe vista una violazione del principio di sovrapposizione dovuta al fatto che, magari, nuovi effetti fisici entrano in gioco quando il sistema è formato da un numero elevatissimo di particelle. La prima opzione non ci direbbe nulla di nuovo, tranne che la difficoltà nel mettere un oggetto macroscopico in sovrapposizione sia tecnologica, perché è necessario isolarlo perfettamente da tutto il resto. La seconda opzione, invece, ci mostrerebbe qualcosa di nuovo, qualcosa di ancora ignoto. Ahimè, per il momento sembra che la difficoltà sia solo tecnologica. Nessuno ha ancora visto una sorta di violazione dell'equazione di Schrödinger: se si riesce a isolare il sistema sufficientemente bene, la meccanica quantistica sembra funzionare sempre... anche per quel gatto di tre chili!»

«Be', ma è comunque una scoperta eccezionale, no?»

«Sì, Albe, non c'è male ma... manca sempre un tassello. La domanda principale rimane aperta: perché nella nostra vita quotidiana non possiamo

vedere qualcosa di macroscopico in sovrapposizione?»

Alberto resta stupito dalla reazione dell'amico: non si sta affatto godendo il risultato appena ottenuto, anzi sembra quasi deluso. "Ma come è possibile" pensa, "sei riuscito a realizzare uno degli esperimenti più famosi della storia, eppure non sei ancora contento perché stai già pensando a cosa manca?!"

Matteo sembra quasi leggere nei suoi pensieri tanto che risponde: «Lo so che è difficile da capire, lo so che posso sembrare scontento ma, quando si fa ricerca, ogni nuovo risultato non fa altro che aprire nuove domande. È un processo senza fine, e io spero prima o poi di trovare qualcosa che la teoria non ha ancora predetto!».

I due amici rimangono in silenzio per qualche minuto, ognuno perso nei propri pensieri, e guardando fuori dalla finestra. Tra un discorso e l'altro i gelati sono completamente finiti e nel frattempo la cameriera ha fatto ritorno per sparecchiare il tavolo. Quasi intimorita di interromperli, posa le coppe vuote sul vassoio cercando di non fare rumore.

«Grazie!» esclama Matteo sorridendole.

«Grazie! Non sarà quantistico, ma qui il gelato è veramente buono» commenta Alberto.

Matteo lo guarda storto per l'ennesima battuta fuori luogo e poi si alza dicendo: «Già! Adesso però andiamo, dobbiamo tornare in laboratorio».

«Ma come? Pensavo avessimo finito. Ero già pronto a tornare a casa e a mettermi a scrivere l'articolo sul tuo incredibile esperimento...»

«Dai, accompagnami, devo portare fuori il gatto... Non vorrai mica che stia chiuso tutto il tempo in un laboratorio sotterraneo! E poi, c'è ancora un'ultima cosa che devo mostrarti, la più importante...»

Alberto, però, è esausto. Fino a un secondo prima pensava di aver raggiunto il massimo di informazioni assimilabili in una giornata, ed ecco che se ne prospettano altre. E poi, non è troppo contento all'idea di tornare in laboratorio dopo tutto quello che gli è successo. E così cerca di temporeggiare: «Senti, Matte, ho le gambe indolenzite... Che ne dici di farci una passeggiata prima di rientrare?».

«E va bene. Facciamo un giro nel parco qui vicino, così ti faccio vedere il resto del campus.»

Alberto tira un sospiro di sollievo e si avvia con l'amico verso l'uscita. Mentre passeggiano sul vialetto che conduce nel parco, Alberto non può

che fare a se stesso una serie di domande: “Chissà, magari Matteo si è accorto di qualcosa che non va, oppure ha notato un particolare fuori posto... O vuole davvero tornare in laboratorio soltanto per prendersi cura del gatto? Ma allora perché devo esserci anch’io? E perché dice che è *importante?*”. È dubbioso: da una parte vuole saperne di più, ma dall’altra ha paura.

A Matteo non sfugge la preoccupazione dell’amico: «Ti vedo pensieroso, c’è qualcosa che non va?».

«No, no, tutto bene» risponde Alberto. «Stavo solo pensando a... Al fatto che in realtà mi sembra abbastanza semplice determinare il limite tra meccanica quantistica e fisica classica.» In realtà voleva solo distogliere l’attenzione dell’amico dalla propria agitazione, ma Matteo lo ha preso sul serio tanto che il suo sguardo si fa attento e gli chiede: «Spiegati meglio, per favore».

Alberto non può tirarsi indietro e dice: «Allora, mi hai detto che è solo grazie al materiale super tecnologico della tua scatola che è possibile preparare qualcosa di macroscopico in uno stato di sovrapposizione, altrimenti sarebbe impossibile, perché il sistema non sarebbe isolato abbastanza e interagirebbe rapidamente con altre particelle, o onde, che farebbero collassare la sua funzione d’onda istantaneamente, giusto?».

«Sì, più o meno è così.» Matteo continua ad ascoltare interessato, è curioso di capire dove vuole arrivare Alberto con il suo ragionamento.

«Quindi, non basta questo per risolvere il problema del perché non si vedono oggetti normali in stati quantistici? Cioè, non possiamo vederli perché nulla di ciò che osserviamo attorno a noi è perfettamente isolato.»

«Alberto, Alberto... A volte aver capito qualcosa non vuol dire aver capito tutto, anzi! Il tema che hai sollevato in realtà è molto complesso, ma allo stesso tempo molto interessante, perché è dove si incontrano filosofia e scienza.»

Alberto non avrebbe mai pensato che una semplice provocazione potesse aprire tali “porte”, ma ormai il dado è tratto e tanto vale saperne di più, così domanda all’amico di continuare con questo discorso.

«Quello che dici ha senso...» ribatte allora Matteo. «Rispetto a una minuscola particella, un oggetto macroscopico ha una probabilità estremamente più grande di interagire con ciò che lo circonda, e quindi di collassare in seguito a questa interazione. Però, come ti dicevo prima,

quando un sistema quantistico interagisce con qualche altro sistema, ecco che i due finiscono per essere in uno stato entangled, come nel caso del mio esperimento. Cosa determina quindi se il contatore Geiger si comporta come “osservatore” che fa collassare lo stato del polonio in “decaduto/non decaduto” appena interagisce con una particella alfa, oppure se si comporta come un altro sistema quantistico macroscopico che interagendo con il polonio finisce in entanglement con esso? In altre parole, cosa determina se l’interazione tra due sistemi fisici fa collassare la funzione d’onda, oppure no? Nel primo caso l’interazione porterebbe al collasso della funzione d’onda, mentre nel secondo no... quindi questo collasso avviene o non avviene?»

«Difficile da capire, in effetti.»

«Eh sì, perché è una cosa che di solito non viene in mente a nessuno. Nell’esempio mentale del gatto di Schrödinger tutti si focalizzano sulla persona che osserva il gatto, dando per scontato che sia solo lui l’osservatore. Ma niente vieta di pensare che l’osservatore sia il gatto, che in effetti potrebbe far collassare la funzione d’onda appena vede la boccetta far fuoriuscire il gas soporifero. Non è neppure necessario che l’osservatore sia un essere vivente. Anche la boccetta di sonnifero potrebbe essere vista come osservatore che “riceve o non riceve” l’impulso elettrico dal contatore Geiger o, come stavo dicendo prima, il contatore Geiger potrebbe essere visto come osservatore del decadimento. Dunque, a quale livello la funzione d’onda collassa? Perché dovrebbe avvenire proprio quando è l’essere umano ad aprire la scatola?»

Anche il problema che Matteo sta cercando di spiegare ad Alberto era già noto ai padri fondatori della meccanica quantistica. Questa, infatti, predice che un sistema quantistico evolve secondo l’equazione di Schrödinger, fintanto che un osservatore fa collassare la sua funzione d’onda in seguito a una misura. Tuttavia, cosa determina se un sistema fisico è un osservatore oppure no? Ogni osservatore, che sia un contatore Geiger o uno scienziato, è esso stesso un sistema fisico, la cui evoluzione dovrebbe poter essere descritta dall’equazione di Schrödinger. Dunque, la domanda da porsi a questo punto è: in base a cosa viene decisa questa linea di separazione tra sistema quantistico e osservatore?

Alberto è incredulo: «Ma com’è possibile che un problema così importante ed evidente non abbia ancora trovato una risposta? Dovrà pur

esserci un modo per risolvere questo dilemma».

«Per comprendere meglio dove può trovarsi il confine tra meccanica quantistica e classica, bisogna innanzitutto considerare che la comunità scientifica ha alcune idee al riguardo. In particolare, ci sono due correnti di pensiero. La prima crede che il collasso della funzione d'onda sia un processo fisico che avviene realmente in natura, perché lo considera necessario affinché un sistema smetta di essere quantistico e si comporti in modo classico. La seconda corrente di pensiero, invece, non considera il collasso della funzione d'onda come fondamentale, ma pensa sia solamente un artefatto matematico della teoria.»

«Matte, toglimi una curiosità: la prima corrente di pensiero, quella relativa al collasso della funzione d'onda, è ciò che mi hai spiegato finora, giusto?»

«Esatto! Anche perché di solito è la più gettonata e popolare. Un sistema è in uno stato quantistico fino a quando la sua funzione d'onda collassa a causa di un'interazione esterna con tale sistema. Allo stesso tempo, non è così ovvio capire esattamente a che punto la funzione collassa, ovvero dove mettere la linea di demarcazione tra sistema e osservatore. Nel nostro gergo, questa separazione è chiamata l'Heisenberg cut e nessuno sa se sia solo un costrutto teorico oppure un vero e proprio confine che esiste in natura e che può essere osservato sperimentalmente.»

«Heisenberg cut... Carino questo nome!»

«Eh eh, il punto cruciale, però, non è il nome! Il punto è questo: sappiamo che un osservatore vede sempre risultati definiti in seguito a una misura e non può vedere mai la sovrapposizione di stati. Se vuoi osservare la posizione di una particella quantistica, la vedrai sempre in un singolo punto, anche se fino a un istante prima si trovava in una sovrapposizione di posizioni. Ma cosa succede se un osservatore *entra* in uno stato entangled, come nel caso del contatore Geiger nel mio esperimento, chi è che fa collassare la sua funzione d'onda? Chi osserva l'osservatore?»

«Bella domanda, Matte...»

«Vedi, di solito si pensa che un sistema fisico si comporti da osservatore quando è molto grande, come a dire che questa linea di separazione tanto cercata si manifesti in relazione al numero di particelle che costituiscono un sistema. Qui torniamo allo scopo della mia ricerca: quanto grande dev'essere qualcosa affinché smetta di essere quantistico? Ora,

relativamente a questa prima corrente di pensiero, quella che crede nel collasso della funzione d'onda, ci sono varie alternative che sono state proposte nel tentativo di dare una spiegazione fisica su come il collasso possa avvenire, e quindi comprendere perché da una certa grandezza in poi il sistema smetta di funzionare in maniera quantistica.»

«Dai, dimmele queste alternative, sono curioso!» esclama Alberto.

«Okay, allora, un'alternativa consiste nel considerare l'equazione di Schrödinger non più valida per sistemi formati da moltissime particelle. Potrebbe essere che esista una sorta di “rumore di fondo” debolissimo, che agisce su ogni singola particella in modo casuale. Questo rumore di fondo altera in qualche modo la funzione d'onda, ma per una o poche particelle può considerarsi completamente trascurabile.»

«Mi sembra sensato» commenta Alberto.

«Be', in questo modo, guardando un sistema microscopico, ecco che non si vedrebbe nessuna violazione dell'equazione di Schrödinger, nessun effetto di questo rumore di fondo, in quanto debolissimo. Tuttavia, per un sistema macroscopico formato da miliardi e miliardi di particelle, ecco che questo rumore di fondo verrebbe amplificato a tal punto da alterare considerevolmente l'evoluzione della funzione d'onda e impedire al sistema la possibilità di esistere in una sovrapposizione di stati.»

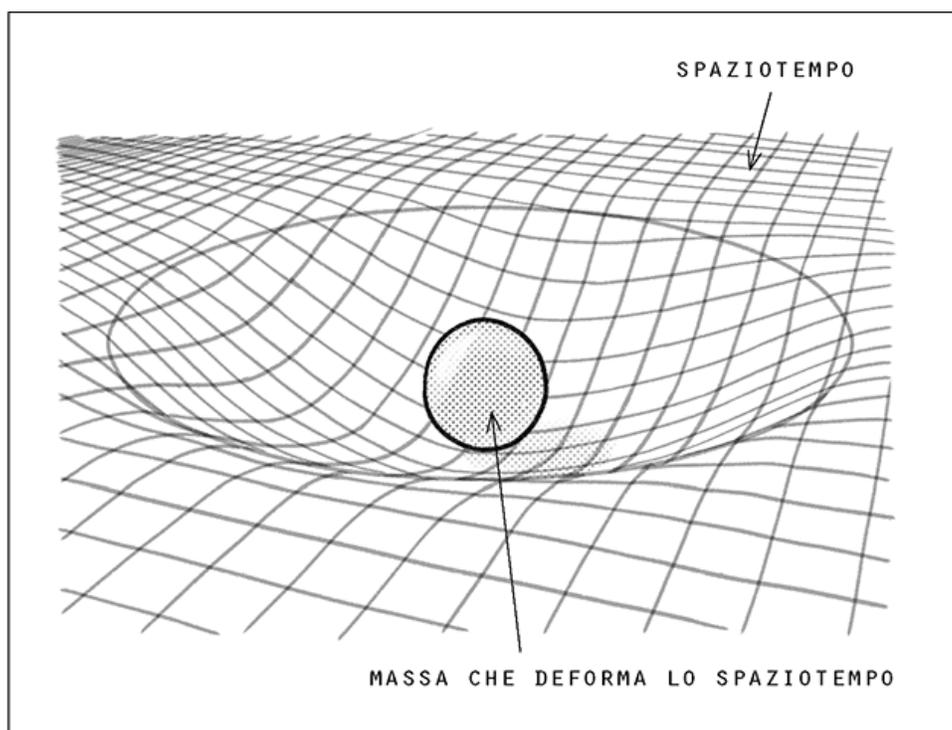
«Una questione di rumore, insomma!»

«Sì, in un certo senso sì, diciamo che sarebbe come affermare che l'equazione di Schrödinger, come la conosciamo noi, sia incompleta, ma dato che il termine ignoto – cioè il rumore di fondo – è proporzionale al numero di particelle o alla massa del sistema, ecco che per sistemi sufficientemente piccoli nessuna discrepanza è facilmente visibile. Appena si supera un certo valore, però, il rumore di fondo prende il sopravvento e fa smettere alla fisica quantistica di funzionare. Per questo, spingere nuovi esperimenti a osservare effetti quantistici in sistemi sempre più grandi serve anche a questo: a investigare possibili deviazioni dall'equazione di Schrödinger.»

«Matte, è davvero interessante! Dimmi un'altra alternativa adesso.»

«Okay, okay, obbedisco!» ridacchia Matteo. «Allora... un'altra alternativa, anch'essa relativamente complessa a livello tecnico, mischia la meccanica quantistica con la relatività di Einstein. Anche se non siamo ancora a conoscenza di una teoria completa di gravità quantistica capace di

unire in maniera coerente l'infinitamente grande con l'infinitamente piccolo, i fisici hanno costruito dei modelli semplificati con lo scopo di tentare di spiegare quello che potrebbe succedere in condizioni molto specifiche. Per capire come la gravità possa giocare un ruolo nel collasso della funzione d'onda dobbiamo tenere a mente che, secondo Einstein, la gravità può essere rappresentata da una deformazione dello spaziotempo, come se l'universo fosse un telo elastico enorme deformato dalle masse di stelle e pianeti che ci sono appoggiate sopra.»

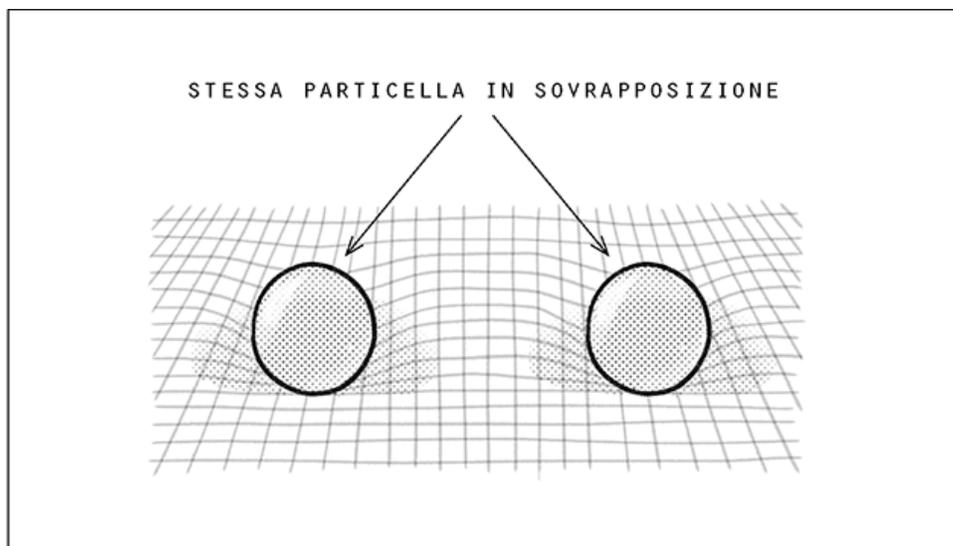


«Lo spaziotempo mi ha sempre affascinato, sai?» commenta Alberto fermandosi per un attimo a scrutare il cielo.

«Eh, anche a me» ribatte Matteo, poi prosegue: «Comunque, adesso immagina di avere una particella abbastanza massiccia che, a causa della sovrapposizione quantistica, si trovi in due posizioni distinte contemporaneamente. Ecco che, intuitivamente, questa dovrebbe provocare due deformazioni dello spaziotempo in due punti diversi o, in altre parole, dovrebbe risultare in una sovrapposizione di due spaziotempi diversi. Sarebbe come avere il telo elastico in una sovrapposizione di “essere deformato” in due modi diversi. Tuttavia, questa possibilità è assolutamente

impossibile secondo la teoria della relatività generale, e deve dunque esserci un processo fisico a impedirlo: il collasso della funzione d'onda, appunto. Magari è la natura stessa dello spaziotempo a dare origine a un limite oltre il quale la meccanica quantistica smette di funzionare. Se prima era l'eccesso di rumore di fondo che faceva collassare la funzione d'onda, con questa idea è invece l'eccesso di massa a non permettere una sovrapposizione di stati. In pratica, aggregando troppa massa insieme, un oggetto smetterebbe di comportarsi in modo quantistico, altrimenti creerebbe un "cortocircuito" nello spaziotempo.»

«Non male, come teoria...»



«Sì, non male, ma la cosa interessante da notare è un'altra: sia questa alternativa sia quella precedente implicano il collasso della funzione d'onda di un sistema senza richiedere l'interazione con nessun altro sistema. Il collasso di un sistema quantistico macroscopico dovrebbe avvenire anche se fosse perfettamente isolato dal suo esterno, anche se fosse l'unico oggetto esistente nell'universo. Se si potesse osservare un effetto simile, questo spalancherebbe le porte a una nuova teoria fisica, perché nulla di tutto ciò è descritto dalla meccanica quantistica come la conosciamo oggi!»

Alberto ci riflette un po' su, poi chiede all'amico: «Senti, Matte, ma facendo un passo indietro... prima mi hai parlato di due correnti di pensiero: la prima credo di averla ben chiara, ma la seconda? Me ne potresti parlare?».

«Sì, sì, certo, hai fatto bene a ricordarmelo! Come ti accennavo, la seconda corrente di pensiero è quella che pensa al collasso della funzione d'onda come a un processo puramente concettuale, qualcosa che esiste solamente nei conti. Anche riguardo a questa corrente, sono diverse le alternative che sono state proposte, alcune particolarmente curiose, esaltanti e capaci di sollevare interpretazioni della realtà parecchio filosofiche.»

«Dai, fammi un esempio.»

«Di sicuro, l'interpretazione multi-mondi è una delle più provocatorie, in quanto implicherebbe l'esistenza del multiverso!»

«E il multiverso è un concetto di cui sappiamo spaventosamente poco!» esclama Alberto.

«Ehm, sì» risponde Matteo senza cogliere la citazione dal film *Spider-Man: No Way Home*. «Potrà sembrarti assurdo, ma una delle possibilità per risolvere il problema dell'osservatore e del collasso della funzione d'onda è di eliminare questo concetto alla radice. Ti ricordi quando dicevo che, in seguito a una misura, un osservatore vede sempre risultati definiti? Ecco, secondo il fisico Hugh Everett questo avviene perché a ogni misura di un sistema quantistico si vengono a creare tanti universi quanti sono i possibili risultati. In ognuno di questi universi esiste una versione dell'osservatore che ha effettivamente osservato uno solo dei risultati, comportandosi di conseguenza.»

«Con tutto il rispetto, a me sembra che questa idea sia più da film di fantascienza che da teoria scientifica...»

«Forse» risponde Matteo evasivo. «Ma in realtà la sua proposta ha una certa coerenza. Secondo Everett, infatti, un sistema quantistico in sovrapposizione non collassa in un unico stato quando viene osservato, ma semplicemente esistono realtà parallele che permettono la coesistenza dei singoli stati.»

«Addirittura?» Alberto è sinceramente stupito.

«Eh, guarda, per farti un esempio concreto, pensa al gatto che hai visto in laboratorio. Secondo la prima corrente di pensiero, nel momento in cui hai aperto la scatola la funzione d'onda è collassata nello stato "gatto che dorme". Secondo l'interpretazione a multi-mondi, invece, nel momento in cui hai aperto la scatola si sono creati due universi paralleli: uno è questo, in cui hai visto il gatto che dorme, e l'altro è quello in cui un Alberto lo ha visto sveglio! Vedi? Questa interpretazione a multi-mondi fuoriesce persino

dal tema della meccanica quantistica, e lascia spazio anche a discussioni profonde sulla natura della realtà.»

«Io vedo solo un grande caos!»

«Lo so, da far girare la testa! Secondo questa interpretazione, infatti, ogni scelta che compiamo, ogni strada che prendiamo, potrebbe essere solo una visione incompleta di un qualcosa di più grande: da qualche parte, in un altro universo, potrebbe esserci un nostro alter ego a vivere esperienze complementari alle nostre.»

«Ti immagini?! Ma questa interpretazione è anche... possibile?»

«Come ti ho detto, è molto interessante dal punto di vista filosofico, e si può speculare molto su cosa accadrebbe se si potesse scoprire l'esistenza di un numero praticamente infinito di altri universi... Sfortunatamente, però, non vedo alcun modo per riuscire a dimostrare questa opzione. Bisognerebbe poter "uscire" dal nostro universo!»

«Fantascienza, appunto. Però affascinante. Chissà come si sentirebbe adesso l'altro Alberto, chissà se sta parlando delle stesse cose con l'altro Matteo...»

«Già! Come avrai capito, non c'è una singola interpretazione della meccanica quantistica, così come non c'è una sola alternativa possibile per risolvere il problema della misura. Una delle cose che possiamo fare noi fisici è tentare esperimenti per confutare alcune di queste alternative, almeno quelle che forniscono predizioni sperimentali verificabili.»

Alberto non sa quanto hanno camminato, se per metri o addirittura chilometri, ma sa per certo che gli rimangono tante domande a cui non riesce a dare risposta. Una, in particolare, è così forte che la propone a Matteo: «Senti, Matte, ma alla fine, isolando benissimo il gatto e dimostrando di averlo potuto mettere in sovrapposizione cos'hai potuto concludere?».

«Albe, alla fine ho concluso che se è un processo fisico il responsabile del collasso della funzione d'onda, allora deve essere più debole di quanto pensassi, altrimenti avrebbe fatto collassare lo stato dell'animale in "sveglio" o "addormentato". Forse non c'è nessun rumore di fondo, o nessun effetto gravitazionale, però è ancora difficile affermarlo con certezza. Il gatto è un altro tassello che si aggiunge alle varie ricerche, ma adesso bisogna spostare l'asticella ancora più in alto... Anzi, è quello che ho già fatto.»

«Cosa intendi? Cos'è che hai fatto?»

«Eccoci!» esclama Matteo che, dopo un bucolico percorso tra i giardini del campus universitario, ha riportato Alberto di fronte all'ingresso dell'edificio dove sono collocati i laboratori senza che lui se ne accorgesse.

«Ah, già... dobbiamo tornare in laboratorio» commenta Alberto quando realizza dove si trova. E non può far altro che pensare: “Il mio desiderio di svignarmela mi sa tanto che è sfumato!”.

11  
Nuova fisica

I due amici ripercorrono il cunicolo di corridoi sotterranei che conduce al LAB 42. Ad Alberto sembra di vivere un *déjà-vu*, con l'unica differenza che adesso gli basta seguire l'amico per sapere dove andare. Quando passano davanti alla saletta dove hanno bevuto il caffè, Alberto ha l'impressione che sia trascorsa un'eternità, ma sa bene che non è così e resta piacevolmente colpito nel rendersi conto di quanto abbia visto e imparato in così poche ore. È davvero un'esperienza che gli ha aperto un mondo!

«Vieni, entriamo!» esclama Matteo. Sono arrivati davanti alla fatidica porta. Oltrepassano il “ripostiglio” dove indossano nuovamente camice e ciabatte e poi Matteo apre anche la porta di metallo.

Alberto prova una sensazione strana: un misto di entusiasmo e di angoscia. I due amici vengono accolti da uno squillante «Miao» che conferma non solo che il gatto si è svegliato, ma che sta anche benissimo.

«Buongiorno!» lo saluta Matteo, prendendolo in braccio. «Ti presento Erwin!» dice rivolto all'amico. «O almeno, te lo presento ufficialmente, visto che l'ultima volta che vi siete incontrati stava dormendo beatamente.»

«E pensare che ti credevo morto!» esclama Alberto rivolgendosi al gatto. «Meno male che stai bene». Poi guarda Matteo, come se avesse avuto un'illuminazione. «Matte, ma secondo te, che cosa avrà visto o provato Erwin nell'essere in sovrapposizione?»

«Eh, già, bella domanda! Tra l'altro, si collega a un'altra interpretazione della meccanica quantistica che non ti ho ancora spiegato. È una proposta che venne formulata inizialmente da John von Neumann ed Eugene Wigner all'inizio del Novecento e ha a che fare con la coscienza...»

Alberto non gli lascia terminare la frase, è confuso già dopo le prime parole: «Coscienza? In che senso?».

«Vedi, Albe, secondo i due fisici, il collasso della funzione d'onda dovrebbe essere qualcosa che accade a livello della descrizione del sistema e quindi non un reale processo fisico che accade sul sistema. Un po' come quando guardi un albero e provi a descriverlo. Tu hai definito che è un albero basandoti solo sui tuoi sensi, sulla tua idea di albero, sul tuo linguaggio e grazie ai tuoi studi o alla tua esperienza. Un qualsiasi altro animale potrebbe percepire l'albero in una maniera completamente diversa, così come per una fotocamera digitale quello stesso albero è solo un insieme di bit registrati su una memoria. Cos'è quindi un albero, se non un mero costrutto mentale di noi umani, una descrizione soggettiva di ciò che percepiamo? Insomma, cos'è un albero senza la coscienza?»

Alberto è sbalordito da questo ragionamento, non aveva mai approfondito più di tanto il fatto che la realtà che lo circonda sia solo un insieme delle sue percezioni, elaborate dalla sua mente e alle quali viene poi assegnato un significato dalla sua coscienza. Ciò che noi crediamo essere una realtà assoluta e oggettiva non è molto altro che una collezione di stimoli sensoriali soggettivi, ma che un vasto numero di nostri simili condivide e su cui si trova in accordo.

Dopo una breve pausa Matteo riprende: «Ecco, secondo la teoria di von Neumann e Wigner, il collasso della funzione d'onda non può avvenire se non c'è un essere cosciente a descrivere ciò che sta accadendo. Per dare un senso alla meccanica quantistica, secondo questa visione, è essenziale che ci sia un essere vivente che abbia una coscienza. La linea di confine tra osservatore e sistema, cioè l'Heisenberg cut, viene definita da questo: dalla separazione tra cosciente e non cosciente. Un semplice strumento di misura non può dunque essere considerato come un osservatore, in quanto manca di coscienza».

«Di sicuro affascinante come pensiero, ma mi sembra qualcosa di estremamente difficile da testare» commenta Alberto.

«Abbastanza, sì. Senza contare che, come al solito, si aprono numerosi altri interrogativi: per e sempro, cosa vuol dire "essere cosciente"? Il gatto deve essere considerato come osservatore, oppure no?»

«Be', visto il risultato del tuo esperimento, dove hai dimostrato che il gatto era effettivamente in sovrapposizione, evidentemente no.»

«Esatto. Il gatto non ha causato un collasso oggettivo della funzione d'onda del resto dell'esperimento, quindi ci sono due possibilità: o la teoria

di von Neumann e Wigner è errata, oppure la coscienza del gatto non è sufficiente a fargli prendere il ruolo di osservatore, poverino.»

«Mi sembra un bel dilemma» commenta Alberto. «Dovresti fare uno studio approfondito sulla coscienza dei gatti, magari collaborando con qualche esperto in comportamento animale. Oppure, sai cosa? Dovresti provare a mettere un intero essere umano in sovrapposizione!»

Matteo non dice nulla, un silenzio sospetto riempie la stanza. Poi un leggero sorriso appare sul suo volto, come se non riuscisse a trattenerlo. Al che Alberto ribatte: «Non vorrai mica dirmi che è quello che stai pensando di fare nel tuo prossimo esperimento?».

«E perché no?»

«Perché sarebbe da pazzi! Già usare un gatto è discutibile... Con una persona sarebbe ancora meno etico, forse persino pericoloso. E se qualcosa andasse storto?»

«A me sembra che sia andato tutto benissimo» risponde con freddezza Matteo.

«Cosa intendi?»

«L'ho già fatto!»

«In che senso? Come? Quando?» Alberto è sempre più confuso.

A quel punto Matteo guarda l'amico dritto negli occhi e gli chiede: «Non hai capito?».

Alberto non sa davvero cosa rispondere e si limita a scrollare le spalle.

«Il vero esperimento» prosegue allora Matteo «non è stato mettere in sovrapposizione quantistica il gatto, questo lo avevo già fatto in gran segreto. Il vero esperimento è stato mettere in sovrapposizione te!»

Alberto rimane impietrito, non è più sicuro di nulla, neanche di aver capito cosa stia succedendo né a che cosa l'amico si stia riferendo.

«Sì» continua Matteo, «è per questo che ti ho fatto venire, per fare in modo che tu fossi parte dell'esperimento. Così come ne sono stati parte il polonio, il contatore Geiger, il sonnifero e il gatto. Ogni componente in uno stato di sovrapposizione quantistica. Tu stesso eri in entanglement con l'intero sistema.»

Alberto è un tantino contrariato e dice in tono scontroso: «Mi stai prendendo in giro? Mi hai usato per un esperimento senza chiedermi il permesso? Ti rendi conto di quanto sia scorretto? Mi hai fatto alzare in piena notte dicendomi che l'esperimento stava funzionando, e invece

l'esperimento ero io!» Sembra davvero arrabbiato: la sensazione di essere stato in qualche modo ingannato non gli piace per niente.

«Suvvia, non essere così esagerato! Al telefono ti ho detto così altrimenti non saresti mai venuto. Alla fine è un esperimento innocuo, l'ho ripetuto centinaia di volte sul gatto e non gli è mai successo niente. Niente di niente. E poi non potevo dirtelo, altrimenti avrei influenzato il risultato delle misure. Cerca di guardare il lato positivo, invece: sei la prima persona della storia a essere stata messa in uno stato di sovrapposizione quantistica. Pensa agli articoli che potrai scrivere su questa esperienza, pensa a quante conferenze e trasmissioni scientifiche verrai invitato... Diventerai famosissimo, il tuo nome verrà scritto sui libri di fisica!»

Alberto non ha ancora ben capito in che modo abbia partecipato all'esperimento, ma a quelle parole inizia a perdersi tra i suoi pensieri, immaginando cosa potrebbe significare tutto questo per la sua carriera. Alla fine dice all'amico: «Comunque, Matte, continuo a non capire come tutto questo sia stato possibile!».

«Ti ricordi quando sono uscito dal laboratorio dicendo che qualcuno mi stava cercando? In realtà avevo bisogno di una scusa per lasciarti qui da solo.»

Alberto sbarra gli occhi incredulo e fa cenno all'amico di proseguire.

«Hai presente quando ti ho detto del materiale innovativo di cui è fatta la scatola del gatto? Be', le pareti di questa stanza, il soffitto, il pavimento, la porta... tutto questo laboratorio è fatto di quel materiale. Questo è il posto più isolato del mondo, forse addirittura il più isolato dell'intero universo. Tutto ciò che è chiuso qui dentro, una volta preparato in maniera opportuna, può seguire indisturbato le regole della meccanica quantistica. Nel nostro caso, mi è bastato attivare l'interazione tra polonio, contatore Geiger e sonnifero per attivare l'esperimento.»

«Non ha senso, io sono un oggetto troppo grande per poter essere quantistico. E poi, quando ho aperto la scatola, ho visto il gatto addormentato, non in una sovrapposizione di stati.»

«Alla fine, non sei poi così grande. Come ti dicevo, ho già fatto altri esperimenti con il gatto senza mostrare alcuna violazione della meccanica quantistica. Quindi, perché non avrebbe dovuto funzionare con te? Peserai sì e no come venti di questi gatti. Sembra sempre che basti isolare il tutto sufficientemente bene e il gioco è fatto. Interessante, no? Per quanto

riguarda quello che hai visto, non mi sorprende. Nel momento in cui hai aperto la scatola avevi solo due possibilità: vedere il gatto sveglio o addormentato. Così come il gatto stesso, dal suo punto di vista dentro la scatola, può solo vedere il sonnifero rilasciato o non rilasciato. O almeno è così che me lo immagino. Sai, anche io avrei sempre voluto poter chiedere al gatto che cosa aveva visto, come si era sentito dentro la scatola, ma non è proprio possibile. I gatti non parlano. Così come non potevo fare l'esperimento su me stesso, perché sapere di esserne parte avrebbe sicuramente influenzato i risultati. Per questo mi servivi tu, ignaro di tutto.» Matteo conclude il discorso con un sorriso beffardo.

«Ma come fai a sapere che ero in una sovrapposizione di stati? Sempre con dei sensori? Con l'analisi dei dati?»

«Esatto, proprio come ho fatto con il gatto. Ho solo dovuto sviluppare dei sensori molto più precisi» risponde Matteo indicando dei curiosi oggetti bianchi sul soffitto che prima Alberto non ha notato. «E analizzare molti più dati. Per fortuna i computer di oggi sono sufficientemente veloci!»

«E se avessi visto il gatto sveglio? Sarebbe cambiato qualcosa?»

«No, niente. Il risultato della tua osservazione è sempre probabilistico. Anzi, magari esiste davvero un altro mondo, un'altra realtà, in cui un tuo alter ego ha visto il gatto sveglio... Comunque, dimmi, quando hai aperto la scatola non hai provato nulla di strano?»

«No, direi di no. Mi sono solo spaventato di vedere un gatto che credevo morto.»

«Nient'altro? E prima di aprire la scatola, hai notato qualcosa di particolare?»

Alberto è indeciso: raccontare tutte le stranezze che gli sono successe quando era da solo in laboratorio oppure tacere? Da una parte, non sa se c'entrano davvero con quello che gli sta chiedendo Matteo, dall'altra ha paura di essere preso per pazzo. Ci pensa un attimo e poi esordisce: «Be', le luci hanno iniziato a comportarsi in modo strano, lampeggiavano, tremolavano tipo...».

«Intendi che l'intensità luminosa cambiava a salti?»

«Sì, esatto. Per qualche minuto sono persino rimasto al buio, perdendo completamente l'orientamento.»

«È incredibile, avrai di sicuro visto la quantizzazione della luce, cioè i singoli fotoni di cui è composta! E cosa vuol dire che hai perso

l'orientamento? Ti sei ritrovato dove non ti aspettavi? Probabilmente la tua funzione d'onda era delocalizzata per tutto il laboratorio, specialmente se eri al buio la tua posizione doveva essere indeterminata. Tutto questo è interessantissimo! Te ne rendi conto? Con le informazioni che mi stai dando potremmo essere in grado di capire finalmente qualcosa in più sul confine tra il mondo quantistico e quello classico. Forse si tratta di una nuova fisica! Devi assolutamente raccontarmi tutto nel dettaglio, ogni singola cosa che hai fatto o che ti è successa da quando ti ho lasciato da solo!»

A quelle parole, Alberto mette da parte la paura e inizia a raccontare a Matteo tutti i dettagli che riesce a ricordare. Una cosa gli è chiara fin da subito: nel poco tempo trascorso da solo in laboratorio ha fatto esperienza di diversi “effetti quantistici”. E infatti Matteo trova per ogni avvenimento una risposta basata sulle leggi della meccanica quantistica: le penne avevano i colori invertiti a causa dell'entanglement quantistico e il taccuino era uscito dalla tasca per via dell'effetto tunnel. Ogni volta che Alberto osservava l'orologio vedeva le lancette bloccate, esattamente come avviene per le particelle che risultano “paralizzate” per il paradosso di Zenone quantistico. Infine Matteo intuisce che Alberto stesso era in una sovrapposizione di stati. Infatti, quando la luce era spenta e nessun fotone interagiva con lui, ecco che la sua posizione risultava indeterminata, facendogli perdere completamente il senso dell'orientamento.

Entrambi restano, ancora una volta, qualche istante in silenzio, non hanno le parole per esprimere ciò che è successo. Nessuno di loro si sarebbe aspettato di vivere qualcosa di simile, qualcosa che sarebbe rimasto nella storia.

Alberto, poi, è al settimo cielo: non vede l'ora di scrivere, sente di avere materiale a sufficienza non solo per uno, ma per una serie di articoli o persino per un libro. Oltre all'aspetto scientifico, è convinto che quell'esperimento abbia aperto domande filosofiche senza precedenti, per esempio: come può essere descritta una sovrapposizione di processi cognitivi? Un individuo in sovrapposizione rimane un singolo individuo?

Matteo, invece, per quanto entusiasta di essere riuscito a realizzare l'esperimento che stava preparando da anni, ha un'aria decisamente pensierosa, quasi malinconica, tanto che Alberto a un certo punto gli domanda: «Matte, tutto bene?».

«Sì, benissimo. Finalmente sono riuscito a spingere il limite tra meccanica quantistica e fisica classica ancora più in alto. È solo che, come ti dicevo prima per il gatto, ero abbastanza sicuro che sarei riuscito a realizzare anche questo esperimento. L'unica barriera fino a oggi era sempre tecnologica, e io l'ho superata. Tuttavia, questo vuol dire ancora poco, ho verificato soltanto che la meccanica quantistica, in determinate condizioni, può funzionare anche per masse più grandi di un gatto. Non si è ancora vista alcuna vera violazione, non si è ancora visto qualcosa che vada contro le leggi quantistiche.»

«Sei sempre insoddisfatto, amico mio! Hai realizzato un esperimento storico, il tuo nome verrà scritto sui libri di fisica... come il mio, del resto! Senza contare che, come mi stavi spiegando prima, hai anche potuto confutare la teoria sul collasso della funzione d'onda a causa di un osservatore cosciente. Se sei riuscito a mettere me, che ho una coscienza, in uno stato di sovrapposizione, allora von Neumann e Wigner avevano torto, no?»

«È vero, quella teoria è confutata adesso. Però, a dir la verità, per quanto affascinante da un punto di vista filosofico, non è che ci credessero in molti. Quindi, come risultato è relativamente marginale.» Nel finire la frase Matteo abbassa lo sguardo dirigendolo verso la scatola, e scorge qualcosa che lo lascia confuso. «E questo? Come ci è finito qui?» chiede ad Alberto, raccogliendo dal pavimento il cubo di Rubik.

«Ah, già! L'ho urtato per sbaglio quando si sono spente le luci e poi, quando si sono riaccese, il cubo era lì che sembrava fluttuare per aria a qualche centimetro da terra. Anche se penso sia stata solo un'allucinazione, perché appena mi sono stropicciato gli occhi l'ho rivisto sul pavimento.»

Alberto è un po' imbarazzato perché, nonostante tutte le stranezze che ha vissuto, questa sembra davvero esagerata.

«In che senso il cubo "fluttuava"? Volava?» chiede Matteo perplesso.

«Sì, come se galleggiasse a mezz'aria.»

«Fammi pensare...» Questa volta Matteo non riesce a trovare alcuna spiegazione nelle regole della meccanica quantistica. Certo, può essere stata effettivamente un'allucinazione, ma vuole togliersi qualsiasi dubbio. Così si precipita al computer e inserisce qualche riga di codice per analizzare ulteriormente i dati.

«Qui c'è qualcosa di strano» commenta, poi prosegue a digitare freneticamente sulla tastiera.

«Guarda qui, Albe» dice Matteo mostrando un grafico. «Vedi questa leggera curvatura nel grafico? Ebbene, non dovrebbe esserci. Ho ricontrollato i dati e sono sicuro che non sia un errore!»

«E quindi?» Alberto non capisce dove vuole arrivare l'amico.

«E quindi il cubo che fluttuava non è stata una tua allucinazione! Alcuni principi della meccanica quantistica non hanno funzionato come previsto, e credo proprio che c'entri la gravità... sì, c'entra sicuramente! Nella meccanica quantistica, infatti, la gravità non viene mai considerata, non entra proprio nelle formule per spiegare il mondo subatomico. Questo perché i suoi effetti sono troppo piccoli su scale così microscopiche e possono quindi essere trascurati. Tuttavia, portando sistemi sempre più macroscopici a comportarsi in modo quantistico, la gravità deve essere presa in considerazione, anche se non sappiamo come. Certo, ci sono stati dei primi tentativi di unire le due teorie, ma senza osservazioni sperimentali a servirci da guida è impossibile sapere quale sia la strada giusta da percorrere. Serve vedere un fenomeno associato alla gravità quando si fanno esperimenti quantistici.»

«Proprio come il cubo sospeso in aria?»

«Sì, esatto! Perché un cubo fluttuante non può essere spiegato solo dalle leggi di Heisenberg o di Schrödinger, e nemmeno con la fisica classica o con la relatività di Einstein. Qui bisogna assolutamente indagare cosa sia successo, come sia possibile un fenomeno del genere.» Alberto prende in mano il cubo di Rubik e controlla se nota qualcosa di strano. «Tranquillo, Alberto, ti assicuro che è un cubo di Rubik normalissimo ora che è soggetto alle leggi della meccanica classica. Ma quel cubo, in quelle circostanze, ha cambiato il suo comportamento.»

“Questo cubo allora potrebbe diventare uno degli oggetti più importanti di sempre, almeno per il mondo scientifico. La mela di Newton dei nostri giorni!” pensa Alberto.

Poi Matteo con voce sognante aggiunge: «Di sicuro diventerà un simbolo. Forse con questo esperimento ho davvero trovato una nuova fisica. Anzi, abbiamo! Abbiamo trovato l'indizio che ci serve per comprendere finalmente il confine della meccanica quantistica. Finalmente ora possiamo formulare una nuova teoria scientifica, una nuova mappa in grado di

colmare le lacune tra le varie leggi fisiche e soprattutto di unirle tra loro. Alberto, preparati a scrivere l'articolo che farà la storia, perché grazie a questo esperimento, e alle nuove teorie che ne scaturiranno, arriveremo a scoprire angoli dell'universo finora inesplorati!».

Questo ebook contiene materiale protetto da copyright e non può essere copiato, riprodotto, trasferito, distribuito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, o utilizzato in alcun altro modo ad eccezione di quanto è stato specificamente autorizzato dall'editore, ai termini e alle condizioni alle quali è stato acquistato o da quanto esplicitamente previsto dalla legge applicabile. Qualsiasi utilizzazione non autorizzata di questo ebook, anche per le finalità di alimentazione di sistemi di Intelligenza Artificiale, così come l'alterazione delle informazioni elettroniche sul regime dei diritti costituisce una violazione dei diritti dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla Legge 633/1941 e successive modifiche.

Questo ebook non potrà in alcun modo essere oggetto di scambio, commercio, prestito, rivendita, acquisto rateale o altrimenti diffuso senza il preventivo consenso scritto dell'editore. In caso di consenso, tale ebook non potrà avere alcuna forma diversa da quella in cui l'opera è stata pubblicata e le condizioni incluse alla presente dovranno essere imposte anche al fruitore successivo.

[www.librimondadori.it](http://www.librimondadori.it)

*Se fosse tutto Quanto*

di Alberto Giannone, Matteo Fadel

© 2024 Mondadori Libri S.p.A., Milano

Ebook ISBN 9788835736387

Per la citazione nel capitolo 10. *Vite Parallele*: © 2021, Stati Uniti d'America, *Spider-Man: No Way Home*, casa di produzione Marvel Studios, Columbia Pictures, Pascal Pictures, regia di Jon Watts.

Illustrazioni di Margherita Travaglia / studio pym

# Indice

Copertina

L'immagine

Il libro

Gli autori

Frontespizio

Se fosse tutto Quanto

*Introduzione*

1. Le tre mappe dell'universo
2. Vincere sempre alla roulette
3. Sulla cresta dell'onda
4. La pentola a pressione
5. Le falene di notte
6. Testa o croce
7. Dentro il laboratorio
8. L'esperimento del gatto
9. Il gelato quantistico
10. Vite parallele
11. Nuova fisica

Copyright