

Meccanica quantistica

Immagina per un istante che tutto ciò che consideri reale, tutto ciò che vedi, tocchi e percepisci in questo mondo sia costruito su un fondamento di assoluta follia. Il tuo tavolo, le tue mani, l'aria che respiri, il pianeta stesso sotto i tuoi piedi. **Tutto questo è composto da particelle che possono trovarsi in due posti contemporaneamente, che possono influenzarsi istantaneamente a distanze infinite, che esistono in uno stato spettrale di indeterminazione finché non le osservi.** Questo non è fantascienza né una metafora filosofica. È un fatto scientifico dimostrato, confermato da migliaia di esperimenti nel corso di oltre 100 anni. La meccanica quantistica, la teoria scientifica di maggior successo nella storia dell'umanità ci dice che il mondo microscopico funziona secondo regole che contraddicono completamente tutto ciò che conosciamo dall'esperienza quotidiana, ma ecco ciò che davvero toglie il sonno ai fisici notte dopo notte. Se ogni atomo, ogni elettrone nel tuo corpo obbedisce a queste folli leggi quantistiche, perché tu non puoi attraversare un muro come fanno gli elettroni? Perché il tuo gatto non è contemporaneamente vivo e morto come il famoso gatto di Schrödinger? **Perché il vasto mondo intorno a noi appare così stabile, prevedibile e classico se è costruito sul caos quantistico?** Questa è il grande mistero che ha tormentato le menti più brillanti per oltre un secolo, il mistero della transizione dal quantistico al classico. Ed è proprio questo mistero che ha portato a una delle scoperte più rivoluzionarie della fisica moderna. Una scoperta premiata con il Nobel per la fisica 2025. Esploriamo non solo la scienza, ma la natura stessa della realtà, svelando segreti che ribaltano la nostra comprensione dell'esistenza. E allora iniziamo dalle basi di questo paradosso. Nel X secolo e all'inizio del XXo i fisici scoprirono qualcosa di sbalorditivo quando cercavano di studiare il comportamento di atomi e particelle subatomiche. tutte le leggi classiche della fisica che funzionavano alla perfezione per descrivere mele che cadono, pianeti che ruotano e proiettili che volano crollavano completamente. Gli elettroni si comportavano come se fossero contemporaneamente particelle e onde. I fotoni di luce potevano passare attraverso due fessure allo stesso tempo, creando figure di interferenza impossibili se

fossero stati semplici palline. **L'atto stesso dell'osservazione sembrava cambiare i risultati degli esperimenti, come se l'universo sapesse di essere osservato e si comportasse di conseguenza.** I fisici furono costretti a sviluppare una teoria completamente nuova, la meccanica quantistica. Un insieme di regole che descrivevano questo strano micromondo. Ma ecco cosa sembrava ovvio a tutti, compresi i creatori della meccanica quantistica. Queste regole si applicavano solo a oggetti minuscoli. Esisteva un confine invisibile, una sorta di soglia dimensionale, oltre la quale la stranezza quantistica svaniva e iniziavano a valere le familiari leggi classiche. **Niels Bohr, uno dei padri della teoria quantistica, chiamò questo il principio di corrispondenza.** L'idea era semplice. Più grande è l'oggetto, più classicamente si comporta. Una molecola di 10 atomi può mostrare effetti quantistici. Una molecola di 1000 atomi è già dubbia e un oggetto delle dimensioni di un batterio, per non parlare di qualcosa di più grande, è assolutamente impossibile. **Il mondo quantistico era confinato nel regno dell'invisibile microscopico, inaccessibile ai nostri sensi. Questo confine sembrava non solo pratico, ma fondamentale. La ragione era in un fenomeno che i fisici chiamano decoerenza.** Immagina una particella quantistica come una nota musicale che risuona nel silenzio perfetto. Quella nota può creare armonie con altre note quantistiche, generando ciò che chiamiamo coerenza quantistica, uno stato in cui le particelle coordinano il loro comportamento a livello quantistico. Ma non appena quella particella inizia a interagire con l'ambiente, con altri atomi, con fotoni di luce, con il calore, è come accendere un'orchestra di un milione di strumenti che suonano note casuali. La delicata melodia quantistica affoga immediatamente in quel caos. La particella perde la sua coerenza quantistica e inizia a comportarsi in modo classico. Più grande è l'oggetto, più particelle contiene e più modi ha ad interagire con il mondo circostante. Per un oggetto delle dimensioni di un granello di polvere. La decoerenza avviene praticamente istantaneamente in frazioni di secondo così piccole da non poter essere misurate. **Questo spiegava perché non vediamo effetti quantistici nella vita quotidiana. I nostri corpi, composti da trilioni di trilioni di atomi, sono costantemente bombardati da luce, calore, aria. Esistiamo in un oceano di interazioni**

che distruggono senza pietà qualsiasi coerenza quantistica in un tempo molto inferiore a un battito di ciglia. Sembrava che la natura stessa avesse eretto una barriera insormontabile tra il mondo quantistico e quello classico.

Ma se ti dicessi che questa barriera è un'illusione e se oggetti grandi, oggetti che puoi vedere a occhio nudo oggetti composti da miliardi e miliardi di atomi, potessero comunque comportarsi in modo quantistico. il confine che consideravamo una legge fondamentale della natura fosse in realtà solo un problema tecnico che possiamo risolvere. È esattamente questa la scoperta che ha scosso il mondo della fisica e ha portato al Nobel per la fisica 2025. Gli scienziati hanno trovato modi per creare condizioni in cui oggetti macroscopici, oggetti che puoi vedere e toccare, dimostrano un autentico comportamento quantistico. Non stiamo parlando di singoli atomi o molecole. Parliamo di sistemi che contengono trilioni di particelle che agiscono come un'unica entità quantistica. Parliamo di liquidi che scorrono senza attrito, salendo lungo le pareti dei contenitori contro la gravità. Parliamo di materiali che conducono elettricità senza la minima resistenza, permettendo correnti che fluiscono eternamente. Parliamo di cristalli delle dimensioni di un'unghia che si trovano in sovrapposizione quantistica, vibrando contemporaneamente in due stati diversi. Non sono speculazioni teoriche o esperimenti mentali, sono fenomeni reali, misurabili, riproducibili che riscrivono le regole di ciò che consideravamo possibile. Perché è così importante? Perché significa che il mondo quantistico non è separato dal nostro, non è rinchiuso in un regno microscopico inaccessibile. La meccanica quantistica non è solo una regola per particelle minuscole, è le leggi fondamentali che governano tutta la realtà, compreso il mondo macroscopico in cui viviamo. La differenza è che di solito questi effetti quantistici ci sono nascosti dal rumore e dal caos dell'ambiente. **Ma quando gli scienziati creano le condizioni giuste, freddo estremo, isolamento perfetto, controllo accurato, la natura quantistica della realtà emerge anche a livello di oggetti che possiamo vedere.** Questa scoperta ha conseguenze profondissime. Significa che il confine tra quantistico e classico non è una legge della natura, ma una questione di tecnologie e condizioni. apre la porta a tipi completamente nuovi di tecnologie, computer quantistici di potenza

inimmaginabile, sensori in grado di rilevare onde gravitazionali da catastrofi cosmiche lontane, sistemi di comunicazione protetti dalle stesse leggi della fisica. Ma ciò che è ancora più importante cambia fundamentalmente la nostra visione filosofica della realtà. Se oggetti grandi possono essere quantistici, dove passa il vero confine? Una cellula vivente può sfruttare effetti quantistici. Il tuo cervello può farlo. La coscienza stessa può essere un fenomeno quantistico. Davanti a noi si apre un nuovo capitolo nella comprensione dell'universo. Un capitolo in cui le vecchie regole vengono riscritte e nuovi orizzonti si aprono. Nelle prossime parti del nostro viaggio esploreremo fenomeni specifici che dimostrano comportamento quantistico a livello macroscopico. Vedremo come il freddo può trasformare la materia ordinaria in una sinfonia quantistica. Scopriremo come gli scienziati raffreddano atomi a temperature più fredde del vuoto cosmico, creando stati della materia che non esistono naturalmente in nessun luogo dell'universo. Sveleremo il mistero di come miliardi di particelle possano perdere la loro individualità e fondersi in un unico insieme quantistico. Preparati a un viaggio in un mondo dove il grande diventa piccolo, dove il classico diventa quantistico e dove i confini della realtà si rivelano molto più sfumati di quanto tu abbia mai potuto immaginare. Immagina di trovarti sulla riva di un oceano infinito. **Ai tuoi piedi le onde si infrangono con precisione matematica, seguendo leggi che Isaac Newton avrebbe potuto formulare più di 300 anni fa. Ogni goccia d'acqua obbedisce a regole prevedibili. Cade quando la lasci andare, scorre verso il basso sotto l'azione della gravità, evapora quando la riscaldi. Questo è il mondo che conosci, il mondo classico, dove le cose sono come appaiono e si comportano esattamente come ti aspetti.**

Ma ora immagina di immergerti sotto la superficie di quell'oceano e man mano che scendi sempre più in profondità, le regole iniziano a cambiare. La luce si comporta in modo strano, le correnti fluiscono in direzioni impossibili e all'improvviso capisci di trovarti in un regno completamente diverso, governato da leggi che contraddicono ogni logica. Questo confine tra la superficie e le profondità, tra il mondo classico e quello quantistico, è uno dei misteri più profondi della fisica moderna. Per decenni gli scienziati hanno creduto che questo confine fosse assoluto e insormontabile. Pensavano che esistesse una linea

netta, anche se invisibile, che separava il mondo microscopico delle particelle dal mondo macroscopico degli oggetti quotidiani. **Nel mondo microscopico regnava la stranezza quantistica, particelle che esistevano contemporaneamente in più stati che si teletrasportavano attraverso barriere che si intrecciavano a distanze infinite.** Ma nel mondo macroscopico tutto questo svaniva come un sogno al risveglio e regnavano le leggi classiche di Newton. La domanda che tormentava i fisici era semplice ma profonda. **Dove avviene esattamente questa transizione?** In quale momento una particella quantistica smette di essere quantistica e diventa un oggetto classico? La risposta che ha dominato il pensiero scientifico per quasi un secolo era la decoerenza. Questo concetto sviluppato nella seconda metà del XXo secolo offriva una spiegazione elegante ma devastante. Immagina un ballerino solitario su un palcoscenico vuoto che esegue una coreografia con precisione squisita. Ogni movimento perfettamente sincronizzato con una musica silenziosa che sente solo lui. Quel ballerino è come una particella quantistica isolata che mantiene la sua delicata sovrapposizione quantistica, la sua capacità di trovarsi in più stati contemporaneamente, ma ora immagina che il palcoscenico si riempia di migliaia di persone che si muovono caoticamente, si spingono, inciampano creando il caos. Il ballerino perde il ritmo, la grazia, la coordinazione, non può più mantenere quella perfetta danza quantistica. Questa è la decoerenza, il processo in cui l'interazione con l'ambiente distrugge la coerenza quantistica. Ed ecco il problema devastante. Nel nostro mondo il palcoscenico non è mai vuoto. Ogni oggetto è costantemente bombardato da fotoni di luce, molecole d'aria, radiazione termica, campi elettromagnetici. Anche nel vuoto dello spazio esistono particelle virtuali che appaiono e scompaiono dal nulla. La radiazione cosmica di fondo che permea tutto l'universo. Più grande è l'oggetto, più particelle contiene e più interazioni ha con l'ambiente. Un atomo può mantenere la sua coerenza quantistica per microsecondi o anche millisecondi, se ben isolata, una grande molecola forse per nanosecondi, ma un oggetto delle dimensioni di un batterio composto da trilioni di atomi, perderebbe la sua coerenza quantistica in un tempo così incredibilmente breve che non abbiamo strumenti per misurarlo. Sarebbe come cercare di sentire un sussurro in mezzo a una tempesta. I calcoli erano inesorabili e deprimenti,

secondo la teoria della decoerenza. Un oggetto delle dimensioni di un granello di polvere perderebbe tutta la coerenza quantistica in meno di un trilionesimo di trilionesimo di secondo. un oggetto delle dimensioni di una cellula il tempo sarebbe ancora più ridicolmente breve e per qualsiasi cosa visibile a occhio umano la decoerenza sarebbe praticamente istantanea, avvenendo molto più velocemente di qualsiasi processo quantistico significativo. Questo spiegava perfettamente perché non osserviamo gatti in sovrapposizione quantistica o sedie che si teletrasportano. **Non è che le leggi quantistiche smettono di valere per oggetti grandi. È che l'ambiente distrugge qualsiasi manifestazione di queste leggi prima che possiamo notarla.** Il mondo quantistico esisteva solo nel regno microscopico protetto, lontano dal rumore caotico del mondo macroscopico. Questa comprensione portò a una visione profondamente divisa dell'universo. **Da una parte esisteva il micromondo quantistico, strano, probabilistico, pieno di sovrapposizioni e intrecci, dove una particella poteva trovarsi in tutti i posti consentiti contemporaneamente finché non la osservavi. Dall'altra parte esisteva il macromondo classico, deterministico, prevedibile, dove gli oggetti hanno posizioni e velocità definite, dove non ci sono fantasmi né ambiguità. E tra questi due mondi c'era un confine sfumato, ma efficace, mantenuto non da una nuova legge fondamentale, ma semplicemente dal processo inesorabile della decoerenza.** Era come vivere in due universi separati che si toccavano a malapena, uno dentro l'altro, ma senza mischiarsi davvero. Ma qui la storia prende una svolta straordinaria. Si scopre che questo concetto, apparentemente così convincente e matematicamente fondato, era incompleto. Gli scienziati iniziarono a chiedersi cosa succederebbe se potessimo proteggere un oggetto grande dalla decoerenza. Cosa succederebbe se potessimo creare condizioni così estreme, isolate e controllate, che anche un sistema macroscopico potesse mantenere la sua coerenza quantistica? Non parlo di isolare l'oggetto per miliardesimi di secondo, ma per secondi, minuti o anche di più. È possibile? Se fosse possibile, cosa vedremmo? Potremmo finalmente vedere il comportamento quantistico di oggetti abbastanza grandi da vederli a occhio nudo. La risposta, trovata dopo decenni di esperimenti sempre più complessi, fu un sì deciso che scosse le fondamenta della fisica.

Si scoprì che la barriera tra il mondo quantistico e quello classico non è un muro d'acciaio impenetrabile, è piuttosto una nebbia densa che può essere dissipata in certe condizioni e queste condizioni hanno un nome: freddo estremo e isolamento estremo. Quando raffreddiamo la materia a temperature vicine allo zero assoluto -273° Cus. accade qualcosa di magico. Le particelle perdono la loro energia termica, smettono di muoversi caoticamente e iniziano a coordinarsi. È come se il caos, che di solito distrugge la coerenza quantistica, si congelasse, permettendo all'ordine quantistico sottostante di emergere. Ma il freddo da solo non basta. Serve anche l'isolamento dall'ambiente. Vuoto ultraelevato per rimuovere le molecole d'aria, schermatura elettromagnetica per bloccare le radiazioni esterne, vibrazioni minime per prevenire disturbi meccanici. **Quando gli scienziati crearono queste condizioni estreme in laboratori di tutto il mondo, assisterono a ciò che, secondo i calcoli classici della decoerenza, avrebbe dovuto essere impossibile vedere oggetti che contenevano miliardi, triloni e persino quadriloni di atomi comportarsi in modo puramente quantistico, correnti elettriche fluire senza resistenza in anelli superconduttori delle dimensioni di una moneta.**

Videro liquidi salire lungo le pareti dei contenitori sfidando la gravità, videro minuscoli, ma visibili cristalli vibrare contemporaneamente in due diversi stati quantistici, come se esistessero in due realtà parallele allo stesso tempo. **Queste scoperte non solo provarono che il comportamento quantistico su larga scala è possibile, rivelarono qualcosa di ancora più profondo sulla natura della realtà. mostrarono che la distinzione tra mondo quantistico e classico non è fondamentale, è condizionale e dipende dall'ambiente. In condizioni normali la decoerenza agisce così rapidamente e completamente che il mondo appare classico, ma in condizioni speciali il velo della decoerenza si solleva e vediamo che tutto, assolutamente tutto, compresi gli oggetti macroscopici, è fondamentalmente quantistico.** Il mondo classico non sostituisce il mondo quantistico su larga scala, lo nasconde semplicemente. È come un'orchestra sinfonica che suona sotto il ruggito assordante di uno stadio di calcio. La musica c'è sempre, perfettamente coordinata, ma di solito non si sente per il rumore. Elimina il rumore e la sinfonia emerge in tutta la sua bellezza.

Questa scoperta ha implicazioni filosofiche sbalorditive. Significa che nell'universo non ci sono due insiemi di regole, uno per il piccolo e uno per il grande. C'è solo un insieme di regole, quelle quantistiche. Tutto è quantistico, dal più piccolo elettrone alla più grande galassia. La differenza sta solo in quanto facilmente possiamo osservare questo comportamento quantistico prima che l'ambiente lo distrugga. Se tutto è quantistico, allora le domande più strane diventano improvvisamente appropriate. Un virus può trovarsi in sovrapposizione quantistica e una molecola di DNA. Le reazioni chimiche nel tuo cervello possono usare effetti quantistici. La coscienza stessa può avere una componente quantistica. Queste domande, che prima sembravano fantascienza, ora sono aree di ricerca scientifica seria. La danza tra due mondi, come si scopre, non è mai stata una danza tra due entità separate. È una danza tra la natura quantistica fondamentale di tutta la realtà e le condizioni ambientali che determinano se possiamo osservare o meno questa natura. Abbiamo imparato a controllare queste condizioni, a creare isole di purezza quantistica in un oceano di caos classico. E così facendo abbiamo aperto una finestra su un nuovo mondo di possibilità tecnologiche e comprensione scientifica. Nei prossimi stadi, esploreremo i fenomeni specifici che rendono possibile questa manifestazione macroscopica del quantistico. Vedremo come gli elettroni possono perdere la loro identità individuale e fondersi in uno stato collettivo che sfida ogni logica classica. Scopriremo come questo comportamento collettivo produce effetti così drammatici che puoi vederli con i tuoi occhi, toccarli con le tue mani. Preparati a immergerti in un mondo dove l'impossibile diventa reale, dove i confini si dissolvono e dove la realtà rivela il suo vero volto quantistico. Scrivete se te gusta il video e adesso immagina di tenere in mano un normale filo di rame collegato a una batteria. La corrente elettrica scorre attraverso di esso, alimentando una lampadina, facendola brillare. Ma ecco cosa succede davvero all'interno di quel filo. Miliardi e miliardi di elettroni si fanno strada attraverso la rete cristallina del metallo, scontrandosi con gli atomi, rimbalzando contro le impurità, urtandosi l'un l'altro, perdendo energia a ogni collisione. È come cercare di spingere una folla di persone attraverso un mercato affollato, ovunque ostacoli, ovunque attrito,

ovunque perdite. Questa perdita di energia si chiama resistenza elettrica. È per questo che i fili si scaldano. È per questo che perdiamo enormi quantità di elettricità nella trasmissione. È per questo che il tuo telefono si scarica. è un fatto fondamentale del mondo classico. Il movimento incontra sempre resistenza, l'energia si dissipa sempre e nulla può fluire eternamente. Ma se ti dicessi che esistono materiali in cui gli elettroni si muovono senza la minima resistenza, materiali dove la corrente, una volta avviata, può fluire per sempre, letteralmente per sempre, senza perdere nemmeno un joule di energia, anche se scolleghi la fonte di alimentazione. materiali in cui gli elettroni non si scontrano con gli atomi, non perdono energia, ma scivolano attraverso la rete cristallina come fantasmi che attraversano i muri. Non è fantascienza di un futuro lontano e non viola le leggi della termodinamica. è un fenomeno reale, osservabile, misurabile, noto come **superconduttività** ed è uno degli esempi più drammatici di comportamento quantistico che si manifesta a livello macroscopico, a un livello che puoi vedere e toccare. E la cosa più sorprendente è che non accade con singoli elettroni, ma con trilioni di elettroni che agiscono come un'unica entità quantistica, come un enorme oggetto quantistico. La storia della superconduttività inizia nel 1911 quando il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes fece una scoperta che lasciò perplesso il mondo scientifico. Raffreddò il Mercurio a una temperatura di $4^{\circ} \text{ e}2$ sopra lo zero assoluto, la temperatura più bassa che poteva raggiungere con l'elio liquido. E all'improvviso la resistenza elettrica del mercurio non diminuì semplicemente come ci si aspettava, svanì completamente. Non divenne minore, non si avvicinò a zero, divenne assolutamente perfettamente, misurabilmente uguale a zero. Fu come se la materia avesse improvvisamente cambiato la sua natura fondamentale, smesso di obbedire alle regole della fisica classica ed entrato in un nuovo stato di esistenza.

Il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes chiamò questo fenomeno

superconduttività, ma non aveva la minima idea di cosa stesse realmente accadendo.

Per decenni i fisici si arrovellarono su questo enigma. **Come può un materiale condurre elettricità senza resistenza? Sembrava impossibile dal punto di vista della fisica classica. Gli elettroni devono scontrarsi con gli atomi, devono perdere energia,**

devono generare calore. Nessuna quantità di raffreddamento avrebbe dovuto eliminare completamente queste collisioni. Inoltre, i superconduttori mostravano altre proprietà completamente incredibili, respingevano completamente i campi magnetici dal loro volume, un fenomeno noto come effetto Meissner, facendo levitare magneti sopra la loro superficie, come se respinti da una forza invisibile, potevano mantenere correnti elettriche che circolavano in anelli per anni, decenni.

Teoricamente per sempre, senza il minimo indebolimento, qualcosa di fondamentale accadeva all'interno di questi materiali, qualcosa che andava oltre tutta la fisica conosciuta dell'epoca. La risposta arrivò solo nel 1957, quando tre fisici, John Bordin, Leon Cooper e John Robert Schriiffer, svilupparono una teoria che finalmente spiegò la superconduttività e la spiegazione fu sbalorditiva. La

superconduttività è un fenomeno quantistico. Non solo quantistico a livello di singole particelle, ma quantistico a livello di tutto il materiale. Ciò che accade all'interno di un superconduttore è una coerenza quantistica di massa, uno stato in cui letteralmente tutti gli elettroni di conduzione nel materiale, che possono essere trilioni di trilioni, perdono la loro individualità e iniziano ad agire come un unico sistema quantistico. È come se miliardi di persone perdessero improvvisamente le loro personalità separate e si fondessero in un unico organismo collettivo con una sola mente e un solo scopo. Ecco come funziona e preparati perché è davvero strano. In condizioni normali gli elettroni sono fermioni, particelle che non amano trovarsi nello stesso stato. respingono, si scontrano, si sparpagliano, ma a temperature estremamente basse in alcuni materiali accade qualcosa di magico. Gli elettroni iniziano a formare coppie note come coppie di Cooper. Ora potresti pensare come possono gli elettroni formare coppie. Hanno la stessa carica negativa e dovrebbero respingersi. E hai ragione, si respingono. Ma nella rete cristallina del metallo esiste un'attrazione molto sottile, molto debole, mediata dalle vibrazioni della rete chiamate fononi. Quando un elettrone passa, attira leggermente i nuclei carichi positivamente, creando una minuscola area di carica positiva che attira un altro elettrone. Questa attrazione è incredibilmente debole, tanto debole che a temperatura ambiente il movimento termico la distrugge completamente, ma raffredda il materiale abbastanza,

elimina il rumore termico e questa debole attrazione diventa sufficiente a legare gli elettroni in coppie. **Ed è qui che inizia la vera magia quantistica. Quando due fermioni si uniscono in una coppia, iniziano a comportarsi come un bosone, un tipo completamente diverso di particella. A differenza dei fermioni, i bosoni adorano trovarsi nello stesso stato. Amano l'uniformità, la coordinazione, il comportamento collettivo e a una temperatura abbastanza bassa tutte queste coppie di Cooper, trilioni e trilioni di esse, si condensano in un unico stato quantistico.** Smettono di essere coppie separate di elettroni con energie e momenti separati. diventano un'enorme onda quantistica che si estende attraverso tutto il materiale da un'estremità all'altra.

Questo stato si chiama condensato di Binstein ed è uno degli esempi più puri di coerenza quantistica macroscopica che conosciamo. Immaginalo così. Normalmente gli elettroni in un metallo sono come una folla di persone in una stazione in ora di punta. Ognuno va nella sua direzione, si scontra, si spinge, crea caos, ma in un superconduttore gli elettroni diventano come un esercito perfettamente sincronizzato che marcia in formazione perfetta. Ogni passo è coordinato, ogni movimento fa parte di una coreografia unica e poiché tutti si trovano nello stesso stato quantistico, si muovono come un tuttuno. Quando un elettrone si muove, tutti gli elettroni lo sentono. E la cosa sorprendente è questa. In questo stato collettivo quantistico, il condensato non può dissipare energia in piccole porzioni, può perdere energia solo in grandi quanti, passando a uno stato quantistico completamente diverso, ma a basse temperature. Non c'è abbastanza energia nell'ambiente per provocare una tale transizione. Risultato: il condensato scorre senza resistenza perché non c'è modo per lui di perdere energia attraverso piccole collisioni. Non è solo un'astrazione teorica. Le conseguenze di questo comportamento quantistico sono drammatiche e visibili. Avvia una corrente in un anello superconduttore e circola per sempre, creando un campo magnetico che non si indebolirà per migliaia, milioni di anni, forse finché la temperatura non supererà il valore critico e distruggerà lo stato quantistico. avvicina un magnete a un superconduttore e leviterà, sostenuto dall'effetto diamagnetico perfetto, risultato di correnti indotte automaticamente sulla superficie per espellere il campo magnetico. Puoi vederlo con i tuoi occhi. Un

magnete che fluttua nell'aria, sostenuto non da un dispositivo meccanico, ma da un puro effetto quantistico che coinvolge trilioni di elettroni che agiscono in perfetta armonia. La scala di questo fenomeno è davvero sbalorditiva. Non stiamo parlando di una manciata di elettroni o anche di milioni. In un tipico campione superconduttore delle dimensioni di un dado da zucchero, il numero di elettroni nel condensato superconduttore può raggiungere 10^{23} , un uno seguito da 23 zeri, è più del numero di stelle nell'universo osservabile e tutti questi elettroni sono descritti da una singola funzione d'onda quantistica, un unico oggetto matematico. È un oggetto di dimensioni macroscopiche che puoi tenere in mano, ma si comporta come una singola gigantesca particella quantistica. Il confine tra micro e macro, tra quantistico e classico, è completamente distrutto. Un superconduttore è un oggetto quantistico, tanto quantistico quanto un elettrone o un fotone, ma visibile a occhio nudo. La scoperta della superconduttività e della sua natura quantistica fu rivoluzionaria non solo dal punto di vista scientifico, ma anche filosofico. mostrò che gli effetti quantistici non scompaiono su larga scala, richiedono solo condizioni speciali per manifestarsi. Dimostrò che la materia può esistere in stati che la fisica classica considerava impossibili e aprì la porta a tecnologie incredibili. **Le macchine per la risonanza magnetica negli ospedali usano magneti superconduttori per creare campi magnetici super veloci. I collisori di particelle, come il Large Hadron Collider, usano migliaia di magneti superconduttori per dirigere particelle quasi alla velocità della luce. I computer quantistici usano qubit superconduttori per eseguire calcoli che i computer classici non possono nemmeno avvicinarsi a risolvere.** Tutto questo è diventato possibile grazie alla capacità della materia. di entrare in questo strano stato quantistico macroscopico. Ma la superconduttività è solo l'inizio della storia. Fu il primo esempio, il più antico scoperto, ma lontano dall'essere l'unico caso di coerenza quantistica macroscopica. Il freddo che congelò il movimento termico e permise agli elettroni di coordinarsi può fare cose ancora più strane con altre forme di materia. Può trasformare liquidi ordinari in sostanze che si comportano come se tutte le leggi della meccanica classica dei fluidi

avessero smesso di esistere, può creare uno stato in cui gli atomi perdono la loro individualità completamente come gli elettroni in un superconduttore. Nella prossima parte del nostro viaggio esploreremo uno degli esempi più visivamente sbalorditivi e concettualmente sconcertanti di comportamento quantistico macroscopico, liquidi che scorrono verso l'alto contro la gravità, che ruotano eternamente, che non hanno viscosità. Preparati a incontrare il liquido quantistico, una sostanza che sfida tutto ciò che pensavi di sapere su come la materia dovrebbe comportarsi. Prendi un bicchiere d'acqua e inclinalo. Cosa succede? L'acqua scorre verso il basso, obbedendo docilmente al richiamo della gravità, riversandosi oltre il bordo, cadendo a terra con una prevedibilità che ci conforta nella sua familiarità. **È uno dei fatti più basilari della nostra esistenza. I liquidi scorrono verso il basso, non verso l'alto. Obbediscono alla gravità, hanno viscosità. Attrito interno che rallenta il loro movimento, che alla fine ferma qualsiasi flusso. Se non c'è una forza costante che li spinge, versa acqua in una ciotola e falla girare. In pochi secondi o minuti la rotazione si fermerà, dissipata dall'attrito tra gli strati di liquido e la natura. fondamentale dei liquidi, basata su trilioni di esperimenti condotti dall'umanità nel corso della sua storia, o almeno così pensavamo fino al 1938.**

Quell'anno due fisici, **Pëtr Leonidovič Kapica** a Mosca e indipendentemente **John Ellen** e **Don Misener** a Cambridge fecero una scoperta così strana, così in contraddizione con tutto ciò che si sapeva sui liquidi, che ci volero decenni per capire davvero cosa avessero trovato, lavoravano con elio liquido, raffreddato a poco più di 2° sopra lo zero assoluto, le temperature più estreme disponibili all'epoca. E a quella temperatura critica l'elio cambiò improvvisamente. Le sue proprietà si trasformarono in modo così radicale che sembrava diventata una sostanza completamente diversa. iniziò a fluire attraverso le fessure e i pori più minuscoli, attraverso i quali l'elio normale non sarebbe mai passato. Iniziò a strisciare lungo le pareti dei contenitori, arrampicandosi verso l'alto contro la gravità, riversandosi oltre i bordi come un essere vivente che cerca di scappare. E la cosa più incredibile sembrava fluire senza la minima viscosità, senza il minimo attrito. **Kapica** chiamò questo fenomeno superfluidità e questo nome a malapena inizia a descrivere la stranezza di ciò

che osservava. Immagina un liquido che può fluire eternamente senza rallentare una volta messo in movimento. Un liquido che può passare attraverso pori così piccoli che persino i gas faticano a penetrarli. Un liquido che può formare una pellicola sottile di poche decine di atomi di spessore e su quella pellicola strisciare su qualsiasi superficie pignorando la gravità, pignorando la forma del contenitore, filtrando attraverso qualsiasi fessura disponibile, versi helio super fluido in un contenitore aperto e aspetti abbastanza a lungo, il contenitore si svuoterà completamente perché l'elio formerà una pellicola sulle pareti interne, striscerà verso l'alto e oltre il bordo e scenderà lungo il lato esterno finché tutto l'elio non sarà sul pavimento. È come se il liquido avesse acquisito una volontà propria, un desiderio proprio di muoversi, non limitato dalle leggi che consideravamo assolute. Ma le stranezze non finiscono qui. e fai ruotare un contenitore con elio super fluido e poi fermi il contenitore, l'elio continua a ruotare senza rallentare, senza fermarsi, mantenendo gradualmente la stessa velocità all'infinito, finché non lo riscaldi sopra la temperatura critica e ruota non come un liquido ordinario, non come una massa unica, invece forma un array di microscopici vortici tornato quanto ognuno dei quali ha una circolazione esattamente quantizzata. Questo significa che la velocità di rotazione intorno a ogni vortice non può assumere qualsiasi valore, può essere solo multipla di un'unità quantistica fondamentale. I vortici non possono essere a metà o un quarto o 1,3, solo 1 2 3. Numeri interi moltiplicati per una costante quantistica. è una manifestazione diretta della quantizzazione a livello macroscopico, visibile nel comportamento di una sostanza che puoi tenere in mano. Per decenni i fisici non riuscirono a capire il meccanismo della superfluidità, cosa faceva comportare l'elio in modo così folle, perché le normali leggi dell'idrodinamica smettevano di funzionare. La svolta arrivò quando gli scienziati capirono che la **superfluidità** è un fenomeno quantistico sorprendentemente simile alla **superconduttività**, ma che avviene con atomi invece che con elettroni. L'elio 4 isotope con due protoni e due neutroni nel nucleo è un bosone e ha una temperatura abbastanza bassa. Quando l'energia termica non può più sostenere il movimento caotico, gli atomi di helio iniziano a condensarsi in un unico stato quantistico, esattamente come le

coppie di Cooper di elettroni in un superconduttore, formano un condensato di Bose-Einstein, una funzione d'onda quantistica macroscopica che si estende attraverso tutto il liquido. In questo stato quantistico gli atomi di elio smettono di essere particelle separate con traiettorie e velocità individuali. Diventano parte di un unico sistema quantistico coerente, descritto da una singola funzione d'onda. Immagina miliardi di gocce di pioggia che cadono indipendentemente, ognuna con la sua direzione e velocità. E ora immagina che tutte queste gocce si fondano improvvisamente in un'enorme cascata dove ogni molecola si muove in perfetta coordinazione con tutte le altre, come se facessero parte di un unico organismo. Questo è il condensato di Bose Einstein nell'elio super fluido. E poiché questo sistema quantistico non può dissipare energia attraverso piccole collisioni, esattamente come il condensato superconduttore di elettroni scorre senza viscosità, senza attrito, senza resistenza. Ora potresti chiederti se tutti gli atomi sono nel condensato, perché l'elio rimane un liquido? Perché non diventa qualcosa di completamente diverso? La risposta è che in realtà l'elio superfluido è una miscela di due componenti che vivono nello stesso spazio contemporaneamente. Un componente è il condensato superfluido, dove tutti gli atomi sono nello stato quantistico fondamentale, si muovono senza attrito e mostrano tutti gli strani effetti quantistici. L'altro componente è il liquido normale, composto da atomi in stati eccitati che si comportano in modo più classico. A temperature vicine allo zero assoluto, quasi tutto l'elio è nel componente superfluido. Man mano che la temperatura aumenta, sempre più atomi passano nel componente normale. Finché ha la temperatura critica di circa 2.17 Kelvin la superfluidità scompare completamente. Questo è il modello a due fluidi e spiega molte strane osservazioni. Ma la manifestazione visivamente più affascinante della natura quantistica della superfluidità sono i vortici quantistici. In un liquido ordinario, quando lo fai ruotare, ruota come un tuttuno con un gradiente di velocità fluido dal centro ai bordi. Ma il componente superfluido non può ruotare in quel modo perché la sua funzione d'onda deve essere univoca. Deve tornare allo stesso valore dopo un giro completo intorno a qualsiasi punto. L'unico modo in cui la superfluidità può ruotare è formando fili di vortice separati

intorno ai quali circola il flusso e la circolazione intorno a ogni vortice è strettamente quantizzata, deve essere un numero intero moltiplicato per la costante di plank divisa per la massa dell'atomo di helio. È una manifestazione diretta della quantizzazione del momento angolare, esattamente come la quantizzazione delle orbite degli elettroni in un atomo, ma visibile in un liquido macroscopico. Questi vortici quantistici sono stati visualizzati in esperimenti. Gli scienziati hanno congelato minuscole particelle di idrogeno solido nell'elio superfluido e usato luce laser per vedere come queste particelle venivano catturate dai vortici e ruotavano intorno a essi. I risultati sono sbalorditivi, un array perfettamente ordinato di vortici che forma una rete cristallina. Ogni vortice è una copia esatta dell'altro. Tutti ruotano con la stessa circolazione quantizzata. È come guardare la meccanica quantistica a occhio nudo, come vedere equazioni matematiche incarnate nella realtà fisica. Ogni vortice è un difetto topologico nel condensato quantistico, un posto dove la funzione d'onda si azzerava, creando una singolarità intorno alla quale circola il flusso e tutta questa struttura è stabile. Può esistere indefinitamente a una temperatura abbastanza bassa. La scoperta della superfluidità e la comprensione della sua natura quantistica ebbero conseguenze rivoluzionarie non solo per la fisica della materia condensata, ma per la cosmologia e l'astrofisica. Si scoprì che le stelle di neutroni, incredibilmente dense reliquie di stelle massive, dove la materia è così compressa che gli elettroni sono spinti nei protoni formando un oceano di neutroni. Probabilmente contengono strati di neutroni superfluidi e protoni superconduttori. I vortici quantistici in queste superfluidità cosmiche possono spiegare l'improvvisa accelerazione della rotazione dei pulsar noti come glitch. I fenomeni che scopriamo in laboratorio sulla Terra, a temperature di pochi gradi sopra lo zero assoluto, possono accadere negli oggetti più estremi dell'universo. All'interno di stelle così dense che un cucchiaino della loro materia peserebbe miliardi di tonnellate. La superfluidità ha anche aperto la via a nuove tecnologie ed esperimenti. L'elio superfluido è usato come refrigerante in magneti potenti e rivelatori di particelle, perché può trasferire calore in modo incredibilmente efficiente attraverso la convezione del componente superfluido. È usato in esperimenti per la ricerca della materia oscura, dove i rivelatori sono raffreddati a milly Kelvin per minimizzare il rumore termico e

serve come sistema modello per studiare la turbolenza quantistica, i vortici quantistici e altri fenomeni esotici che non possono essere osservati in altri sistemi. Ogni volta che studiamo la superfluidità impariamo qualcosa di nuovo su come la meccanica quantistica si manifesta su scale macroscopiche. Ma forse il significato più profondo della superfluidità è filosofico. Ci mostra che la materia può esistere in stati radicalmente diversi da tutto ciò che conosciamo dall'esperienza quotidiana, un liquido senza viscosità. vortici con circolazione quantizzata, pellicole che strisciano contro la gravità. Tutto questo è reale, tutto questo è misurabile, tutto questo fa parte del nostro universo. È un promemoria che la nostra intuizione, costruita sull'esperienza con oggetti caldi classici, è completamente inadeguata per comprendere l'intera gamma di possibilità che la natura offre. L'universo è molto più strano, molto più ricco, molto più sorprendente di quanto possiamo immaginare, basandoci solo su ciò che vediamo intorno a noi, a temperatura ambiente. La superfluidità è solo una forma di coerenza quantistica, macroscopica. Ce ne sono altre, ancora più esotiche. I fisici hanno imparato a creare condensati di Bose-Einstein non solo dall'elio liquido, ma da gas rarefatti di atomi raffreddati a temperature miliardi di volte più fredde di qualsiasi punto conosciuto nello spazio. Queste nuvole di atomi ultracoli mostrano comportamento quantistico in una forma così pura e controllata che permettono agli scienziati di esplorare domande fondamentali della meccanica quantistica con precisione senza precedenti. Nella prossima parte del nostro viaggio scenderemo nei luoghi più freddi, mai creati dall'uomo. luoghi più freddi dello spazio interstellare, più freddi persino della radiazione cosmica di fondo residua del Big Bang. Lì incontreremo atomi raffreddati così tanto che il tempo per loro quasi si ferma e la meccanica quantistica regna sovrana. Preparati a entrare nel regno del freddo assoluto, dove la materia rivela i suoi segreti quantistici più profondi. Immagina di avere il potere di fermare il tempo, non completamente, non istantaneamente, ma gradualmente, grado dopo grado, rallentando ogni movimento, ogni vibrazione, ogni oscillazione della materia, finché l'universo praticamente non si congela intorno a te. Non è fantascienza né una superpotenza da fumetto. È esattamente ciò che i fisici fanno nei laboratori di tutto il mondo ogni giorno,

quando raffreddano la materia a temperature così basse da far girare la testa solo a nominarle. Parliamo di temperature di milionesimi di grado sopra lo zero assoluto. Temperature più fredde di qualsiasi punto nell'universo conosciuto, più fredde del vuoto intergalattico, più fredde persino della radiazione cosmica di fondo residua del Big Bang. E a queste temperature la materia entra in uno stato così strano, così lontano da tutto ciò che conosciamo, che ridefinisce il concetto stesso di cosa significhi essere sostanza. Questo stato si chiama condensato di Bose-Einstein ed è forse la manifestazione più pura, più non diluita della meccanica quantistica a livello macroscopico che l'umanità abbia mai creato. **La teoria della sua esistenza fu predetta quasi un secolo fa, nel 1924 e 1925, quando Albert Einstein, basandosi sui lavori del fisico indiano Satiendra Nat Bose, dimostrò matematicamente che se raffreddi un gas di bosoni abbastanza, tutte le particelle devono cadere nello stato quantistico più basso, formando una nuova fase della materia.** Ma allora era pura teoria, un'astrazione matematica. Le temperature necessarie per creare un tale condensato sembravano irraggiungibili, così estreme che gli scienziati pensavano che sarebbero passati secoli prima che qualcuno potesse realizzarlo. Si sbagliavano. **La svolta avvenne nel 1995 quando due gruppi di scienziati, uno guidato da Eric Cornell e Carl Wean a Boulder, Colorado, e l'altro da Wolfgan Ketterle a MIT, crearono indipendentemente i primi condensati di Bose-Einstein da gas rarefatti di atomi di rubidio e sodio.** Per questo risultato ricevettero il Nobel per la fisica nel 2001. E giustamente perché ciò che fecero non fu solo un trionfo tecnico, fu la scoperta di una nuova finestra sul mondo quantistico, la possibilità di osservare e manipolare fenomeni quantistici a un livello che prima esisteva solo nell'immaginazione dei teorici. raffreddarono semplicemente atomi, fecero rivelare alla materia la sua natura quantistica più profonda in una forma che poteva essere studiata, misurata, compresa. Ma come raffreddi esattamente atomi a temperature così inimmaginabili? Non puoi semplicemente metterli in un freezer o immergerli in elio liquido. Le temperature necessarie per creare un condensato di Bose-Einstein si misurano in nanokelvin, miliardesimi di grado sopra lo zero assoluto. A queste temperature persino un singolo fotone di luce può portare abbastanza energia da riscaldare gli atomi e distruggere il

condensato. Il processo richiede un'ingegnosità incredibile, una combinazione di raffreddamento laser e raffreddamento evaporativo. Tecniche così sottili e precise da rassentare l'arte. Prima gli atomi vengono rallentati con laser, sintonizzati su frequenze precise che permettono ai fotoni di spingere gli atomi in direzione opposta al loro movimento, come un vento contrario che rallenta un corridore. Questo si chiama raffreddamento laser e può rallentare atomi da centinaia di metri al secondo a pochi centimetri al secondo. Ma il raffreddamento laser ha un limite fondamentale: non può raffreddare atomi sotto una certa temperatura a causa della natura casuale, dell'assorbimento ed emissione di fotoni per raggiungere le temperature necessarie per il condensato di Bose-Einstein, gli scienziati usano un secondo trucco, il raffreddamento evaporativo. Esattamente lo stesso processo che raffredda la tua pelle quando sudi. Gli atomi più veloci, più energetici vengono selettivamente rimossi dalla nuvola e gli atomi rimanenti ridistribuiscono la loro energia, diventando in media più freddi. Questo si ripete ancora e ancora, ogni volta rimuovendo gli atomi più caldi finché la temperatura della nuvola non scende a nano kelvin. L'intero processo deve avvenire in un vuoto ultraelevato, perché una collisione, anche con una singola molecola d'aria, riscalderebbe gli atomi e distruggerebbe l'esperimento. E gli atomi sono tenuti al loro posto non da pareti fisiche, ma da trappole magnetiche o ottiche, celle invisibili di luce e campi magnetici. Quando la temperatura raggiunge il punto critico, accade qualcosa di magico. Gli atomi, che fino a quel momento si comportavano come particelle separate, ognuna con la propria energia. momento improvvisamente perdono la loro individualità, le loro funzioni d'onda quantistiche che descrivono la probabilità di trovare ogni atomo in un certo posto iniziano a sovrapporsi e poiché questi atomi sono bosoni, non si sovrappongono semplicemente, si fondono, si condensano in un'unica gigantesca funzione d'onda quantistica che si estende attraverso Tutta la nuvola. Migliaia, milioni di atomi smettono di essere migliaia o milioni di oggetti separati. diventano un'unica entità quantistica, un unico oggetto quantistico macroscopico descritto da una singola funzione d'onda. È come se milioni di gocce d'acqua si fondessero improvvisamente in un'unica enorme goccia, ma a livello quantistico. Visivamente appare sbalorditivo. Gli scienziati fotografano la nuvola di

atomi usando laser per creare immagini in ombra. Prima di raggiungere la temperatura critica, la nuvola appare come una macchia sfocata, una distribuzione di atomi con velocità e posizioni diverse che forma una struttura ampia e diffusa. È un gas classico dove ogni atomo fa i fatti suoi, ma nel momento della transizione, e si tratta davvero di una transizione di fase altrettanto netta quanto il congelamento dell'acqua in ghiaccio, la nuvola si contrae improvvisamente in un picco denso e nitido al centro. Quel picco è il condensato di Bose-Einstein. Tutti gli atomi sono in un unico stato quantistico con momento zero. Intorno può rimanere una nuvola termica di atomi che non si sono ancora condensati, ma il condensato stesso è visibile come una caratteristica distinta, chiara. Stai guardando la meccanica quantistica diventata visibile, una funzione d'onda che puoi fotografare. Le proprietà del condensato di Bose-Einstein sono strane quanto il suo aspetto, poiché tutti gli atomi sono in un unico stato quantistico, mostrano una coerenza perfetta. Se crei due condensati separati e poi permetti loro di espandersi e sovrapporsi, interferiranno come onde sull'acqua, creando una figura di interferenza di strisce di alta e bassa densità. È una dimostrazione diretta della natura ondulatoria della materia, ma non a livello di singole particelle, a livello di una nuvola di milioni di atomi. Il condensato mostra anche superfluidità, esattamente come l'elio liquido. Metti il condensato in un contenitore rotante, forma un array di vortici quantistici, ognuno con circolazione quantizzata. Se ecciti il condensato, sostiene onde di densità che si propagano senza attenuazione perché non c'è meccanismo per dissipare energia. Ma forse la cosa più notevole dei condensati di Bose-Einstein è il grado di controllo che offrono agli scienziati. A differenza dei superconduttori o dell'elio superfluido, dove le proprietà sono determinate da caratteristiche fisse del materiale, i condensati di atomi ultraoldi sono incredibilmente regolabili. Puoi cambiare la forza delle interazioni tra atomi usando campi magnetici e risonanze di Feshbach. Puoi creare reticoli ottici, potenziali periodici formati da onde stazionarie di luce laser che agiscono come cristalli artificiali per gli atomi. Puoi manipolare la forma della trappola creando condensati in geometrie unidimensionali, bidimensionali o tridimensionali. Puoi persino far formare coppie agli atomi, creando un

analogo delle coppie di Cooper nei superconduttori e studiando la transizione dal condensato di Bose-Einstein allo stato superfluido fermionico. **Questa regolabilità ha trasformato i condensati di Bose-Einstein in simulatori universali di sistemi quantistici.** I fisici li usano per modellare fenomeni della fisica dello stato solido, dalla superconduttività al magnetismo. Li usano per studiare transizioni di fase quantistiche, cambiamenti nello stato della materia che avvengono allo zero assoluto a causa di fluttuazioni quantistiche non termiche. Li usano per ricercare stati topologici della materia. fasi esotiche con proprietà protette dalla topologia che potrebbero essere alla base dei computer quantistici del futuro. Li usano persino per modellare condizioni nell'universo primordiale, studiando come fluttuazioni quantistiche in materia superba potrebbero aver portato alla formazione delle strutture che vediamo nello spazio oggi. I condensati di Bose-Einstein sono diventati un laboratorio per studiare la fisica quantistica a molti corpi, un campo così complesso che persino i supercomputer più potenti non possono simularlo esattamente per sistemi grandi. Ma i condensati di Bose-Einstein non sono solo uno strumento per la ricerca fondamentale. la via a tecnologie rivoluzionarie. Gli interferometri atomici basati su condensati sono i sensori di gravità e inerzia più precisi mai creati. possono rilevare onde gravitazionali, misurare minuscoli cambiamenti nel campo gravitazionale terrestre per cercare risorse sotterranee, persino testare principi fondamentali della teoria della relatività generale con precisione e senza precedenti. Gli orologi atomici che usano atomi ultra coloidi sono così stabili da non perdere un secondo nell'età dell'universo. definiscono la nostra comprensione del tempo e possono portare a nuove scoperte in fisica, rilevando minuscoli spostamenti nelle costanti fondamentali della natura. I computer quantistici costruiti su atomi neutri in reticoli ottici promettono di risolvere problemi che i computer classici non potranno mai risolvere. E siamo solo all'inizio di questo viaggio. Ogni anno porta nuove scoperte, nuove possibilità, nuovi stati della materia creati in laboratori con atomi ultra freddi. Gli scienziati hanno creato condensati da molecole, non solo da atomi, aprendo la possibilità di studiare chimica quantistica e reazioni quantistiche a livello di eventi singoli. Hanno creato gas quantistici di

fermioni che formano coppie e diventano superfluidi, esattamente come gli elettroni nei superconduttori. hanno creato stati di spin esotici dove gli atomi sono intrecciati l'uno con l'altro in modi che non hanno analogo classico. Stanno persino lavorando per creare condensati di Bose-Einstein nello spazio sulla stazione spaziale internazionale dove l'assenza di gravità permette ai condensati di esistere più a lungo ed espandersi più di quanto sia possibile sulla Terra. **Il significato filosofico dei condensati di Bose-Einstein è profondo e multistrato. Ci mostrano che la meccanica quantistica non è solo una teoria su cosa succede negli atomi e nelle particelle subatomiche. è una teoria sulla natura della materia stessa a tutte le scale. Dimostrano che il confine tra classico e quantistico non è fisso né fondamentale, ma dipende dalla temperatura, dall'isolamento e dalle condizioni ambientali. Rvelano che in condizioni giuste la materia può esistere in stati così lontani dalla nostra esperienza quotidiana, da sfidare la nostra comprensione di cosa significhi essere sostanza, cosa significhi essere oggetto, cosa significhi esistere. Quando un milione di atomi si fonde in un'unica entità quantistica, dov'è il confine tra loro? Sono ancora oggetti separati o sono diventati qualcosa di nuovo, qualcosa di unitario? Queste domande non sono solo riflessioni filosofiche astratte, riguardano la natura stessa dell'identità, dell'individualità e della realtà.** Se gli atomi possono perdere la loro individualità e fondersi in stati collettivi quantistici, cosa dice questo sulla natura di altri fenomeni collettivi? Gli elettroni nel tuo cervello possono formare stati quantisticamente coerenti. La coscienza può avere una componente quantistica. Sono idee speculative, ma i condensati di Bose-Einstein ci mostrano che la coerenza quantistica a livello macroscopico non è solo possibile, è reale, misurabile e controllabile. Le porte sono aperte a ricerche che solo 10 anni fa sembravano pura fantasia e davanti a noi ci sono ancora più stranezze, ancora più meraviglie. Nella prossima parte del nostro viaggio esploreremo come la coerenza quantistica può estendersi non solo all'interno di un singolo oggetto, ma tra oggetti separati, creando correlazioni che Einstein chiamava azione spettrale a distanza. Preparati a incontrare l'intreccio a livello macroscopico, un fenomeno che sfida il concetto stesso di località e separazione. Immagina di avere due monete, ma

non monete ordinarie, monete magiche. Lanci una moneta qui sulla terra e viene testa. Nello stesso identico momento, senza ritardo, senza trasmissione di segnale, la seconda moneta che si trova dall'altra parte della galassia esce immediatamente croce. Non perché qualcuno ha trasmesso informazioni alla velocità della luce, non perché esiste un legame nascosto tra loro, ma semplicemente perché entrambe le monete fanno parte di un unico sistema quantistico, un'unica realtà indivisibile che non riconosce il concetto di distanza. Sembra pura follia, una violazione di tutte le leggi della fisica, magia mascherata da scienza, ma non è magia, è l'intreccio quantistico, uno dei fenomeni più profondi, sconcertanti e fondamentali della natura. E ciò che davvero sconvolge è che non accade solo con particelle minuscole, ma con oggetti che puoi vedere composti da miliardi di atomi. Albert Einstein odiava questa idea. Nel 1935 lui, insieme a due colleghi Boris Podolski e Nathan Rosen, pubblicò un famoso articolo in cui cercava di dimostrare che la meccanica quantistica era incompleta proprio a causa di questo fenomeno che chiamò sprezzantemente azione spettrale a distanza. Einstein credeva che se due particelle potessero influenzarsi istantaneamente a distanze arbitrarie, allora o la meccanica quantistica mancava qualcosa di fondamentale o esistevano variabili nascoste, informazioni che semplicemente non vedevamo. Per lui era inaccettabile perché violava il principio di località, l'idea che un oggetto possa essere influenzato direttamente solo dal suo ambiente immediato. Ma Einstein, il più grande fisico del suo tempo, si sbagliava. La meccanica quantistica aveva ragione e l'intreccio è reale. La prova arrivò decenni dopo, negli anni 70 e 80 del XXo secolo, quando i fisici iniziarono a condurre esperimenti che testavano le disuguaglianze di Bell, condizioni matematiche che devono essere soddisfatte se il mondo è locale, realistico. I risultati furono inequivocabili e scioccanti. Le disuguaglianze di Bell venivano violate esattamente come predetto dalla meccanica quantistica. Le particelle intrecciate mostravano correlazioni troppo forti, troppo perfette per essere spiegate da qualsiasi teoria con variabili nascoste locali. L'universo non è locale nel senso in cui pensava Einstein. L'intreccio quantistico è reale, misurabile e fondamentale per la struttura stessa della realtà. Due particelle intrecciate non sono due oggetti separati, sono un unico sistema, un'unica entità quantistica indivisibile distribuita

nello spazio. Ma come appare nei dettagli, quando due particelle sono intrecciate, i loro stati quantistici diventano inestricabilmente legati, in modo tale che non puoi descrivere una particella indipendentemente dall'altra. Misurare una proprietà di una particella determina istantaneamente la proprietà corrispondente dell'altra, indipendentemente da quanto sono lontane. Questo non significa che l'informazione viaggi più veloce della luce. Nessun segnale utile può essere inviato attraverso l'intreccio, ma significa che il mondo non è composto da oggetti indipendenti separati. Invece la meccanica quantistica ci dice che ciò che è fondamentale non sono gli oggetti separati, ma le relazioni tra loro. Le correlazioni possono estendersi attraverso lo spazio senza diminuire. Per particelle intrecciate la distanza non ha importanza, rimangono parte di un unico sistema quantistico, indipendentemente dal fatto che siano separate da millimetri o miliardi di chilometri. Per molto tempo l'intreccio è stato considerato un fenomeno limitato a particelle microscopiche come fotoni o elettroni. Creare e mantenere l'intreccio è fragile e complicato. Qualsiasi interazione con l'ambiente, qualsiasi misurazione, qualsiasi disturbo può distruggerlo. Un processo noto come decoerenza. Più grande è il sistema, più modi ha di interagire con l'ambiente e più velocemente perde l'intreccio. Sembrava ovvio che oggetti macroscopici, composti da trilioni di atomi, non potessero mai mostrare intreccio, perché la decoerenza lo distruggerebbe in un tempo troppo breve per misurarlo. Ma come abbiamo già visto in questo viaggio, ciò che sembra ovvio spesso si rivela sbagliato quando guardiamo più a fondo nella natura quantistica della realtà. Negli ultimi due decenni i fisici hanno raggiunto ciò che prima sembrava impossibile. Hanno creato e misurato l'intreccio quantistico non tra singole particelle, ma tra oggetti macroscopici, sistemi che contengono miliardi o persino trilioni di atomi. Questi esperimenti richiedono condizioni estreme, simili a quelle necessarie per la superconduttività e i condensati di Bose-Einstein. Freddo estremo, isolamento quasi perfetto, controllo preciso. Ma quando queste condizioni sono raggiunte i risultati sono sbalorditivi. Due pezzi di metallo, separati da distanze di centimetri o metri, vibrano in sovrapposizione quantistica. I loro movimenti sono perfettamente correlati in un modo che la fisica classica non può spiegare. Due cristalli, ognuno contenente trilioni di atomi, mostra intreccio nei loro stati collettivi. Due

nuvole di atomi, separate da distanze macroscopiche mostrano correlazioni che violano le disuguaglianze di Bell. Uno degli esempi più sconcertanti è l'intreccio di oscillatori meccanici. Immagina una minuscola membrana o cantilever, più sottile di un capello umano, ma che contiene ancora miliardi di atomi. A temperatura ambiente vibra in modo casuale a causa del movimento termico. Ogni atomo trema indipendentemente, ma raffreddala quasi allo zero assoluto e isolala dall'ambiente e il suo movimento diventa quantistico. Può trovarsi in sovrapposizione di diversi stati di vibrazione, vibrando su e giù contemporaneamente in senso quantistico. Ora prendi due di queste membrane e collegale attraverso una cavità ottica o un circuito elettrico, in modo che i loro movimenti siano coordinati in condizioni giuste diventano intrecciate. I loro stati quantistici si fondono in un unico sistema indivisibile. Misurare il movimento di una membrana ti dà istantaneamente informazioni sul movimento dell'altra, anche se sono fisicamente separate. Ancora più sbalorditivo, gli scienziati hanno creato intreccio tra oggetti da natura diversa. hanno intrecciato un fotone di luce con il movimento collettivo di trilioni di atomi in un cristallo. Hanno intrecciato stati di spin di nuvole di atomi contenenti milioni di particelle con fotoni di microonde. Hanno persino intrecciato un oscillatore meccanico con un qubit di un circuito superconduttore, creando sistemi quantistici ibridi che uniscono diverse piattaforme fisiche. Ognuno di questi esperimenti prova la stessa affermazione fondamentale. L'intreccio non è un privilegio di singole particelle, è una caratteristica universale della meccanica quantistica che può manifestarsi a qualsiasi scala in condizioni giuste. La dimensione non ha importanza per la meccanica quantistica, solo il grado di isolamento dalla decoerenza. Ciò che rende questi risultati particolarmente impressionanti è che aprono le porte a tecnologie rivoluzionarie. L'intreccio quantistico è una risorsa, il carburante per le tecnologie quantistiche del futuro. I computer quantistici usano l'intreccio tra Qubit per eseguire calcoli paralleli che i computer classici non possono riprodurre. Il teletrasporto quantistico, non fantascienza sul movimento di materia, ma un processo reale di trasmissione di uno stato quantistico da un posto all'altro attraverso l'intreccio è già stato dimostrato su distanze di centinaia di chilometri attraverso fibre ottiche e persino attraverso satelliti nello spazio. La crittografia quantistica usa l'intreccio per creare canali di

comunicazione assolutamente sicuri, protetti dalle stesse leggi della fisica. Qualsiasi tentativo di intercettare distruggerebbe l'intreccio avvisando immediatamente gli utenti legittimi dell'intrusione. Ma forse l'applicazione più profonda dell'intreccio macroscopico è nel sensoriamento e metrologia quantistica. Quando due oggetti sono intrecciati, possono agire come un sensore collettivo con sensibilità superiore a ciò che è classicamente possibile. Questo si chiama vantaggio quantistico nelle misurazioni ed è raggiunto grazie alla natura del dispositivo di misurazione. I rivelatori di onde gravitazionali del futuro possono usare specchi o membrane intrecciate per raggiungere sensibilità oltre il limite quantistico standard, permettendoci di osservare eventi cosmici attualmente troppo deboli per essere rilevati. I radar quantistici possono usare l'intreccio per rilevare oggetti con tecnologia stealth o in ambienti rumorosi dove i radar classici falliscono. Sensori biologici basati su intreccio possono rilevare singole molecole o persino singoli fotoni con precisione inaccessibile ai dispositivi classici. Ma le tecnologie sono solo parte della storia. Le implicazioni filosofiche dell'intreccio macroscopico sono profonde e inquietanti, ci costringono a ripensare la nostra comprensione di cosa significhi essere un oggetto separato, cosa significhi essere localizzato nello spazio, se due oggetti possono essere intrecciati in modo da formare un unico sistema quantistico, indipendentemente dalla distanza tra loro, dove è il confine tra loro, dove finisce un oggetto e inizia l'altro, la fisica tradizionale ci dice che gli oggetti sono separati dallo spazio, che hanno confini chiari, che ciò che accade qui non può influenzare istantaneamente ciò che accade là. Ma la meccanica quantistica dice il contrario. Dice che lo spazio non separa i sistemi intrecciati, crea solo l'illusione della separazione. Questo ha strane conseguenze per la nostra comprensione della realtà. Se ciò che è fondamentale non è la separazione degli oggetti, ma la loro interconnessione, se le correlazioni tra eventi sono più importanti degli eventi stessi, allora la struttura della realtà è molto più olistica e interconnessa di quanto abbiamo mai immaginato. Alcuni fisici vanno ancora oltre, supponendo che lo spazio-tempo stesso possa emergere dall'intreccio, che la geometria dell'universo non sia una cosa fondamentale, ma una proprietà emergente che nasce da pattern di intreccio quantistico tra gradi di libertà fondamentali. Questa idea nota come ER e PR collega i wormhole di

Einstein Rosen con l'intreccio di Einstein Podolski Rosen, suggerendo che queste due concetti apparentemente non correlati sono in realtà due facce della stessa medaglia. Gli esperimenti con intreccio macroscopico sollevano anche domande sulla natura della misurazione e dell'osservazione. Quando misuri un sistema intrecciato, distruggi l'intreccio collassando la sovrapposizione quantistica in uno stato classico definito. Ma cosa conta esattamente come misurazione? Serve un osservatore cosciente o qualsiasi interazione con l'ambiente è sufficiente? Se due oggetti macroscopici possono essere intrecciati, il dispositivo di misurazione stesso può essere intrecciato con il sistema misurato. Dove tracciare il confine tra sistema quantistico e osservatore classico? Queste domande riguardano le basi della teoria quantistica della misurazione, una delle aree più controverse e meno comprese della fisica. L'intreccio macroscopico ci fornisce un'arena sperimentale per esplorare queste domande in un modo che era impossibile quando potevamo intrecciare solo singole particelle e stiamo solo iniziando a grattare la superficie di ciò che è possibile. Ogni anno gli scienziati creano sistemi intrecciati sempre più grandi, più complessi. stanno lavorando per intrecciare oggetti separati non da centimetri o metri, ma da chilometri o distanze ancora maggiori. Stanno studiando come l'intreccio può persistere in condizioni reali, rumorose, non solo in laboratori perfettamente isolati. stanno esplorando l'intreccio a molte particelle, dove non due, ma centinaia, migliaia o più oggetti sono intrecciati in stati quantistici complessi che non possono essere descritti classicamente. Ogni di questi progressi ci avvicina a un futuro in cui le tecnologie quantistiche diventeranno comuni, dove pratico per comunicazione, calcolo e sensoriamento. L'intreccio su scala macroscopica ci mostra che la meccanica quantistica non è solo una teoria sul piccolo e lo strano. È la teoria fondamentale della natura, applicabile a tutto, dalle particelle subatomiche alle strutture