

# Fisica quantistica, oggi: strade nuove per ripensare alla struttura della realtà.

Un momento di riflessione per capire grandi questioni.

di Franco Saporetti

Il XX secolo è stato il secolo d'oro della scienza. Tramite straordinarie intuizioni, dibattiti e un lavoro matematico di estrema bellezza, un gruppo di giovani fisici colmi di entusiasmo con l'assistenza di Maestri della fisica ci hanno regalato una teoria che ha cambiato il mondo. Sì... quella stravagante teoria, che nessuno ancora capisce e che ci lascia confusi e increduli ... ma che funziona; anzi, fino ad ora non ha mai sbagliato! È la teoria il cui impatto *tecnologico* ha rivoluzionato i comportamenti dell'uomo moderno e che ha fatto luce sui processi responsabili della vita di noi esseri viventi. La teoria di cui stiamo parlando è la cosiddetta **Meccanica Quantistica** che, oggi, schiude a prospettive nuove per comprendere **la struttura della realtà** e riconsiderare come conseguenza anche i **grandi problemi** dell'Universo. Secondo molti scienziati la meccanica quantistica rappresenta oggi la migliore e più esaustiva descrizione del mondo fisico.

Un'interpretazione moderna della meccanica quantistica oggi ci viene offerta dalla cosiddetta "**Interpretazione relazionale**" dell'autorevole fisico italiano Carlo Rovelli, uno degli attori principali del suo sviluppo. Questa è presentata, tramite il suo solito stile piacevole, nel suo ultimo libro dal titolo "*Helgoland*". La teoria ci invita a vedere il mondo fisico *non* come un insieme di oggetti indipendenti con proprietà definite come propone la fisica classica, ma come una "**rete di relazioni**" di cui gli oggetti sono i "nodi". Questo cambia la nostra concezione di materia. Le implicazioni, anche in discipline diverse dalla fisica, sono enormi.

Dichiarava Einstein, un tenace oppositore della meccanica quantistica: "*Il problema quantistico è così straordinariamente importante e difficile che dovrebbe essere all'attenzione di tutti*". Credo appropriato che, alla platea di lettori curiosi ma senza specifica competenza, sia offerta **l'opportunità** di conoscere *con consapevolezza* i risultati ottenuti in questo campo. Riceverebbe così anche uno **stimolo**, cosa non trascurabile, a riflettere su questioni che ci toccano nel nostro profondo di esseri umani e coscienti.

Ma, ovviamente, capire una teoria oscura e per di più non ancora compresa neppure da chi l'ha formulata, non è proprio così banale. Nel capitolo iniziale ho quindi ritenuto indispensabile raccontare *brevemente*, e per quanto possibile in modo *semplice*, l'avventurosa storia della nascita ed evoluzione della teoria quantistica, limitandomi a toccare solo i temi di maggiore interesse. Potrebbe costituire qualcosa di simile a un sintetico manuale divulgativo per non addetti ai lavori. La conoscenza delle varie *singole* tessere con cui la teoria è costruita può essere anche molto utile per districarsi in una materia complessa e a riflettere "*a ragione*" sui risultati suggeriti dalla teoria.

Se il lettore non desidera leggere il capitolo1 può saltare al capitolo successivo. Credo tuttavia che non sia una buona idea e che la fatica per la lettura della storia verrebbe ripagata. Sì... forse il lettore potrà rimanere incredulo e sconcertato... ma certamente sarà affascinato dal lavoro svolto da un gruppo di giovani fisici appena ventenni che ha ottenuto così tanti successi. Tutto ha dell'incredibile: un incessante emergere di idee geniali, scoperte rivoluzionarie che si susseguono, continui e sconcertanti colpi di scena, dibattiti scientificamente anche aspri, paradossi su cui riflettere. Una vera bella "favola" per chi la vuole conoscere.

## 1. COME LA FISICA QUANTISTICA VEDE IL MONDO

Andiamo a dare uno sguardo veloce a *come* è nata e si è *sviluppata* la Fisica dei Quanti, oggi il cuore pulsante della scienza moderna.

### L'idea dei quanti e granulosità della materia

All'inizio del secolo scorso i problemi di scambio (*emissione ed assorbimento*) di energia fra materia e radiazione erano tutt'altro che chiari. Nell'anno 1900 il fisico Max Planck ebbe una felicissima intuizione. Avanzò l'ipotesi che lo scambio di energia non avvenisse in modo continuo, ma tramite "*quantità discrete*" ovvero "*pacchetti definiti di energia*". A questi venne dato il nome di "**quanti**" di energia. Per ottenere l'accordo fra teoria ed esperimento ipotizzò che il più piccolo pacchetto trasferito in uno scambio fosse proporzionale alla frequenza dell'onda ( $E=h\nu$ , dove  $h$  è un coefficiente di proporzionalità, *costante di Planck*, di cui lo stesso Planck ne calcolò il valore). Ma quella di Planck era soltanto una "ipotesi" e non si basava su alcuna prova sperimentale. Lo stesso Planck non sapeva come giustificare la sua ipotesi di "*quantizzazione*" dell'energia.

Così l'idea rimase nel dimenticatoio per parecchi anni finché Einstein nel 1905 trovò che l'ipotesi di Planck era *necessaria* per spiegare un certo fenomeno, chiamato "**effetto fotoelettrico**". Questo consiste nel fatto che, quando una radiazione elettromagnetica di frequenza opportuna colpisce certi metalli, questi emettono elettroni. Con questa idea Einstein vinse il Premio Nobel per la fisica 1921.

Ebbene Einstein fu più radicale dello stesso Planck: estese l'idea dello scambio quantizzato di energia e ipotizzò che tutta la radiazione elettromagnetica consistesse in **granuli** discreti di energia, chiamati *quanti* o *fotoni*. Seguirono accurati esperimenti che confermarono l'idea che i fenomeni quantistici mostrano un aspetto "**granulare**" a piccolissima scala.

### Geniale intuizione e il principio di indeterminazione

Tutto procedeva tranquillo. Vigeva il determinismo, la fisica classica, le leggi di Newton: tutto quello che accade nell'universo è *fissato* in ogni più piccolo dettaglio. Il moto di un corpo nello spazio è completamente *determinato* dalle forze agenti su di esso, una volta fissata la sua posizione e velocità iniziale. In natura nulla avviene per *caso*, tutto accade secondo rapporti di *causa-effetto*. Ed Einstein ci credeva fermamente.

Poi... nel 1925 arrivò un giovane fisico tedesco ventiduenne, di nome Werner Heisenberg, che ebbe una geniale intuizione con la quale riuscì a calcolare i valori di energia delle orbite del "modello dell'atomo di Bohr". L'intuizione si basava sul fatto di limitarsi a descrivere solo quanto è "**osservabile**"; nel caso citato, si trattava delle variabili ricavabili mediante misurazione: *intensità* e *frequenza* della luce emessa dall'elettrone nel salto da un'orbita ad un'altra.

Seguendo questa idea veniamo a conoscenza come la natura, a scala microscopica, sia molto capricciosa. Nel mondo microscopico vale un principio, chiamato dai fisici "**Principio di indeterminazione di Heisenberg**", che definisce i "*limiti*" dell'osservazione stessa applicata a grandezze fisiche "incompatibili" di un sistema fisico, intendendo come grandezze incompatibili la misura della "posizione e della velocità" di un sistema fisico oppure la misura dell'"energia e del tempo" di un processo fisico. Un esempio? *Il principio afferma l'impossibilità di conoscere, con precisione arbitraria, posizione e velocità di un elettrone!* La misurazione della posizione di un elettrone ha l'effetto di rendere incerta la velocità; e viceversa. E questa, notate bene, è una proprietà di tutta la materia, non solo degli elettroni.

A cosa è dovuta questa incertezza? L'indeterminazione nasce a seguito dell'intervento dell'**osservatore** che, col suo tentativo di misurazione, **interferisce** inesorabilmente con l'osservazione stessa. Misurando la posizione di un elettrone, causiamo sempre qualche **perturbazione** al suo

moto. Un esempio? Supponiamo di voler localizzare un elettrone. Possiamo pensare di illuminarlo, quindi colpirlo, con dei fotoni. E questi fotoni alterano la velocità dell'elettrone e il suo stato di moto futuro. Non c'è risposta alla domanda: "Dove si trova e a quale velocità sta andando una certa particella?".

Tutte le entità misurabili sono soggette all'**incertezza** e alla **casualità**. Le leggi di natura sono quelle della roulette, quelle dove regna incontrastata la "**probabilità**"!!!

### **Dio non gioca a dadi**

Einstein respinse questa conclusione, dichiarando che: "*Dio non gioca a dadi!*", cioè le leggi della natura sono deterministiche e non indeterministiche! Aggiunse: "Sottile è il Signore, ma non maligno...". Tuttavia vari esperimenti chiave hanno confermato che l'indeterminazione quantistica è veramente una proprietà **intrinseca** della natura!

Per Einstein fu un duro colpo. Questa scoperta si presentò a lui come un ostacolo all'idea della formulazione di una *teoria unificata* della fisica, fino a fargli credere di apparire agli occhi della nuova generazione di scienziati come un vecchio fossile, divenuto cieco e sordo col passare degli anni.

Ancora oggi, dopo tanti anni, l'affermazione continua a far discutere! Ne ripareremo.

### **Idee geniali e sconcertanti colpi di scena: un vero spettacolo pirotecnico**

Nel 1926 Erwin Schrödinger, il fisico che darà fondamentali contributi allo sviluppo della teoria quantistica, formula l'**equazione** che determina l'evoluzione temporale dello stato di un sistema (ad esempio, un elettrone). Quindi calcola le energie dell'atomo di Bohr ed ottiene lo stesso risultato di Eisenberg, però con una differenza fondamentale: calcola le energie seguendo l'idea che le traiettorie degli elettroni siano approssimazioni del comportamento di un'**onda**! Le energie calcolate tornano. L'equazione funziona. Un successo. Il risultato sembra mostrare che il mondo microscopico non è fatto di particelle ma di onde. Queste onde sono rappresentate nella *equazione di Schrödinger* dalla cosiddetta "**funzione d'onda**", il cui significato sarà chiarito solo più tardi.

Notate che già nel 1923 Louis de Broglie aveva ipotizzato che la materia potesse comportarsi come un'onda. Aveva suggerito che nel mondo microscopico bisogna abbandonare il buon senso, che ci dice che un oggetto è un'*onda* oppure una *particella* e contemplare la possibilità che sia *entrambe* le cose. Sembra esistere un **dualismo onda-particella**: un elettrone può propagarsi come un'onda e la luce può interagire come un corpuscolo materiale.

Allora il gioco è fatto? L'idea dell'onda di Schrödinger è buona... Sì, però... Altro colpo di scena. Il fisico Max Born, il quarantenne professore di cui Heisenberg è assistente, intuisce che la funzione d'onda non rappresenta un'entità "reale", come Schrödinger sosteneva, ma è "solo" uno strumento di calcolo: *l'ampiezza dell'onda in un punto dello spazio ci fornisce solo la **probabilità** di osservare l'elettrone in quel punto.*

Vediamo come si "immagina" che funzionino le cose: l'onda evolve nel tempo governata dall'equazione di Schrödinger. E questo *fino a quando* non la *osserviamo*, cioè ne facciamo una misura. Nel momento in cui la osserviamo... oplà... l'onda si concentra in un punto e "lì" vediamo la particella. Fra fisici teorici, per questo importante fenomeno, si parla di "**collasso**" dell'onda.

In entrambe le visioni, quella di Heisenberg (che in virtù del principio di indeterminazione pone *limiti* all'osservazione) e l'altra di Schrödinger (che predice solo *probabilità*, secondo l'interpretazione di Max Born), non si hanno certezze! Tanto che il fisico Niels Bohr (uno dei maggiori fisici dell'epoca e punto di riferimento dei giovani leoni che hanno costruito la fisica dei quanti) nel 1927

così afferma: **“il compito della fisica non è quello di descrivere come la natura è. La fisica si occupa solo di quanto possiamo dire della natura”!!!**

La teoria non ci dice *dove* si trova una qualunque particella di materia quando non la osserviamo. Ci dice solo quale sia la *probabilità* di trovarla in un punto quando la osserviamo.

### **Esperimento della doppia fenditura: il cuore della fisica quantistica**

Questo esperimento, eseguito da Thomas Young nel 1801, è considerato R. Feynman (premio Nobel per la Fisica 1965) il cuore della meccanica quantistica. Ci permette di mostrare il **dualismo onda-particella** della materia: le onde e le particelle possono comportarsi sia come onde che come un particelle! Ci racconta pure tante altre fondamentali storielle, decisamente bizzarre e incredibili. Mette in luce l'importante concetto di **“sovrapposizione quantistica”** e il cosiddetto fenomeno del **“collasso”**. L'esperimento è riportato in modo più dettagliato in Appendice.

### **Entanglement quantistico: un grande mistero della fisica**

Di grande interesse è pure il fenomeno quantistico dell'**Entanglement** (*allacciamento*), che il matematico A.D. Aczel ha definito **“il più grande mistero della fisica”**. Questo fenomeno mostra il magico *legame* sussistente fra oggetti intrecciati (esempio, due fotoni o due elettroni) quando vengono distanziati. È privo di un analogo nella fisica classica ed è uno dei fenomeni più **“contro-intuitivi”** della meccanica quantistica. Il fenomeno è presentato brevemente in Appendice.

### **Paradosso del gatto di Schrödinger: momento di riflessione**

Nel 1935 Schrödinger propose un celeberrimo paradosso. Una sorta di esperimento mentale molto istruttivo, che ha portato a infinite discussioni. Lo scopo era quello di illustrare come la meccanica quantistica fornisca risultati paradossali se applicata a un sistema fisico macroscopico e di mettere in evidenza i **“limiti”** di questa visione.

Ancora oggi le discussioni sono frequenti. Il paradosso rappresenta un importante momento di riflessione per la fisica moderna e un'occasione per riflettere sulle implicazioni filosofiche insite nella meccanica quantistica. Il paradosso è descritto in modo più esteso in Appendice.

## **2. INTERPRETAZIONE RELAZIONALE**

Rilassatevi. Rovelli ha una straordinaria capacità nel rendere facili argomenti difficili ed esporli in modo accattivante. Nel seguito, farò il tentativo di riassumere i punti chiave della teoria restituendo diligentemente il contenuto.

Si tende a pensare che il mondo sia fatto di *spazio, tempo e particelle...* che il tempo *scorra*, che lo spazio sia un *contenitore vuoto* e che le particelle siano *oggetti con proprietà ben definite*. Ma è proprio così? **“La realtà non è come ci appare”**, avverte Rovelli nel suo libro dal titolo omonimo del 2014.

Successivamente, nel libro *Helgoland* del 2020, Rovelli ci racconta in dettaglio l'idea che il mondo fisico *non* è un insieme di **“oggetti indipendenti con proprietà definite”** come propone la fisica classica. La nuova visione è quella di sostituire un mondo fatto di sostanze (cose, oggetti) con un mondo fatto di relazioni.

### **Rovelli e Anassimandro**

Nel capitolo precedente abbiamo visto come, secondo la fisica quantistica ufficiale, **nessun fenomeno fisico esiste realmente finché non viene osservato**. Abbiamo visto anche, come emerge dal paradosso del gatto di Schrödinger, che, pur esistendo oggi varie interpretazioni, la teoria lascia

molti fisici e filosofi insoddisfatti. Anche Rovelli lo è. Però - riflette Rovelli - la soluzione dell'enigma esiste ... per conoscerlo basta rinunciare ai pregiudizi e sfoderare coraggio! E così scrive:

*“Non aver paura di ripensare il mondo, è la forza della scienza: da quando Anassimandro ha eliminato le colonne su cui si appoggiava la terra, Copernico l'ha lanciata a roteare nel cielo, Einstein ha sciolto la rigidità della geometria dello spazio e del tempo e Darwin ha smascherato l'illusione dell'alterità degli umani... la **realtà si ridisegna in continuazione** in forme via via più efficaci.*

Andiamo quindi a vedere la soluzione proposta da Rovelli.

### **Il mondo? Una “rete di relazioni” della quale gli oggetti sono i nodi**

Per comprendere le idee che Rovelli ci racconta in *Helgoland* è importante capire innanzi tutto cosa, in una misura, si intende per “osservazione” e chi sia l’“osservatore”. In un laboratorio di fisica dove si studia il comportamento del mondo subatomico (come, ad esempio, elettroni e fotoni) è chiaro chi sia l’osservatore: è lo scienziato che fa la misura degli oggetti microscopici usando i suoi strumenti di misura. Ma il mondo non è fatto solo di scienziati in laboratorio, con camice bianco, occhiali al naso, capelli arruffati e strumenti di misura. E allora? Cosa ci racconta la teoria quantistica, là dove non ci sono scienziati che misurano?

Il concetto di base della teoria si fonda sulla semplice constatazione che lo scienziato e il suo strumento di misura sono anch’essi parte della natura; quindi quello che la teoria descrive è il modo in cui una parte della natura si manifesta a un’altra parte della natura. Scrive Rovelli: *“Il cuore dell’interpretazione relazionale della teoria dei quanti è l’idea che la teoria non descriva il modo in cui gli oggetti si manifestano a “noi” (o a speciali entità che osservano). Descrive come un qualunque oggetto si manifesti a qualunque altro oggetto fisico. Come qualunque oggetto fisico agisca su qualunque altro oggetto fisico”.*

Il mondo è pieno di oggetti, cose, entità, chiamati “*sistemi fisici*”; e questi non fanno altro che *agire* uno sull’altro. Il mondo che osserviamo è un continuo *interagire*, è una fitta rete di interazioni. Ed è proprio questa rete che noi chiamiamo: “*realtà*”.

Secondo la teoria, *qualunque* interazione fra due oggetti fisici vale come un’*osservazione* e *qualunque* oggetto come *osservatore*, quando consideriamo il manifestarsi di altri oggetti ad esso.

È opportuno mettere in evidenza come la teoria non è valida solo nell’ambito circoscritto di un fenomeno misurato in laboratorio con uno strumento di misura ma *tutti* i fenomeni, in ultima analisi, sono *quantistici*. La natura è quantistica. Non esiste nulla di speciale in laboratorio. La consapevolezza di questo fatto nasce da quasi un secolo di successi della teoria.

È doveroso notare come buona parte della comprensione attuale della teoria è il risultato delle brillanti e fondamentali intuizioni di Niels Bohr. Queste intuizioni ci suggeriscono come in fisica quantistica *“l’interazione è parte inseparabile di un fenomeno e la sua descrizione richiede di includere tutti gli oggetti coinvolti”*. Le **proprietà** di un oggetto sono il modo in cui esso agisce su altri oggetti. L’oggetto stesso non è che un insieme di interazioni su altri oggetti. Invece di vedere il mondo fisico come un insieme di oggetti con proprietà definite, la teoria ci invita a vederlo come una **“rete di relazioni”** della quale gli oggetti sono i **nodi**.

### **Un oggetto senza interazione non ha proprietà. Le proprietà sono relative**

E allora, cambia qualcosa nel modo di vedere il mondo? Direi proprio di sì e anche molto! Attribuire proprietà a un oggetto anche quando non interagisce è come parlare di qualcosa che non esiste: *“non ci sono proprietà al di fuori delle interazioni”*.

Pensate a un elettrone (forse un po’ seccato perché è sempre lui ad essere chiamato in causa come esempio): quando l’elettrone non interagisce con alcunché è spoglio (e credo anche triste):

non ha né posizione né velocità, non ha proprietà fisiche. Una posizione oppure una velocità prendono valore, relativamente a qualcosa, nel corso di una interazione con questo qualcosa.

Da notare anche che le proprietà sono solo **relative**. Le proprietà di un oggetto che sono reali rispetto a un certo oggetto non lo sono necessariamente rispetto a un altro. Un qualcosa, che è reale rispetto a me, può non essere reale rispetto a te.

### **Uno strano mondo, lontano anni luce dalla fisica classica**

Quello che emerge da quanto sinora detto è un incredibile e sconcertante mondo, costituito solo da momentanee interazioni ed eventi discontinui, passeggeri, transitori; un mondo lontano anni luce da quello immaginato dalla fisica classica che concepisce gli oggetti carichi di proprietà assolute.

Pensate. In questo enigmatico mondo quantico la vita di un elettrone non è una *linea* nello spazio ma è *un punteggiato manifestarsi di eventi*, uno qui e uno là, quando interagisce con qualcos'altro. Si tratta di eventi: puntiformi, discontinui, probabilistici e relativi.

## **3. IMPLICAZIONI e RIFLESSIONI**

Scrive Rovelli: " *Il mondo è un gioco prospettico, come di specchi che esistono solo nel riflesso di uno nell'altro*"; quindi commenta: " *C'è qualcosa di disorientante in tutto questo. La solidità della realtà sembra sciogliersi fra le nostre dita in una regressione infinita di referenze*". E allora? La natura è un'accozzaglia disordinata, in cui ognuno ha il suo punto di vista, riducendo la conoscenza a un relativismo puramente soggettivo? No... Secondo Rovelli: è l'intersoggettività, cioè la condivisione di stati soggettivi da parte di due o più osservatori, che fa emergere l'immagine "oggettiva" del mondo. È questa prospettiva, a cui Rovelli cercherebbe di portare chiarezza, che ha suscitato grande interesse tra i filosofi della scienza.

### **Uno scontro storico fra due filosofie. Due grandi attori in scena.**

Esiste tuttavia un problema da risolvere, di grande rilevanza e con notevoli implicazioni che potrebbero cambiare ancora il nostro modo di vedere il mondo. Si tratta del dibattito ancora aperto fra due filosofie, due visioni diverse della natura: *determinismo* e *meccanica quantistica*. Queste sono rappresentate da due Grandi della fisica: Einstein e Bohr.

Einstein era decisamente "determinista". L'universo funziona come un meccanismo ad orologeria; una volta caricato procede per conto proprio seguendo determinate leggi. L'Ordine Cosmico è stabilito in conformità ai principi "classici" di causa-effetto. Nella sua filosofia non c'è spazio per il libero arbitrio: " *Tutto è determinato, dall'inizio alla fine, da forze su cui non abbiamo il controllo... danziamo tutti su una melodia misteriosa, intonata a distanza da un musicista invisibile*".

A proposito della fisica quantistica Einstein così scriveva nel 1926: " *La teoria dei quanti dà buoni risultati, ma difficilmente si avvicina al segreto dell'Anziano. Sono convinto che Lui non stia affatto giocando a dadi*".

Niels Bohr era un sostenitore di una teoria quantistica ancora misteriosa, su cui la comunità scientifica è ancora divisa sul modo di pensarla. Però quest'ultima teoria è soddisfacente e dà i risultati aspettati... dobbiamo "solo" arrivare a fare l'ultimo passo... *comprenderla* (!!!) ... il che significa ridefinire le condizioni e i limiti della conoscenza umana!

Bohr era il fisico che, in modo molto incisivo, aveva scritto: *“Non c’è un mondo quantistico. C’è solo un’astratta descrizione quantica. È sbagliato pensare che il compito della fisica sia di descrivere come la Natura è. La fisica si occupa solo di quanto possiamo dire della Natura”*.

L’interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica afferma che la descrizione del mondo *non* rappresenta la realtà, della quale non si può dire nulla; detto con termini più specialistici, nega che la *“funzione d’onda”* di Schrödinger rappresenti il *“reale” stato* fisico di un sistema quantico. Questa idea era in totale disaccordo con la filosofia di Einstein, che rifiutava di accettare che questa funzione rappresentasse uno strumento di calcolo che predice *“solo”* probabilità. Non poteva nemmeno pensare che il suo Dio consentisse un incredibile Ordine Cosmico e poi permettesse un indeterminismo su scala atomica.

Diceva Einstein a Bohr: *“Non posso credere nemmeno per un attimo che Dio giochi a dadi”*.

Rispondeva Bohr: *“Piantala di dire a Dio cosa deve fare”*.

Si trattava dello scontro fra due filosofie sulla natura della realtà.

Einstein pensava al suo sogno: una *teoria unificata*, cioè una formula universale in grado di descrivere il comportamento dell’Universo nella sua interezza. Pensava che l’essenza di Dio si potesse scoprire tramite una *“legge del tutto”*. Però, così facendo, riduceva Dio ad una diversa espressione della natura; in altri termini, lo riduceva a una parte di questo mondo, spogliandolo della fondamentale dimensione di *trascendenza*.

Einstein non riuscirà mai a convincersi che non sia possibile per l’uomo arrivare alla verità assoluta. Tuttavia i fatti dimostrano, per ora, che Einstein aveva torto.

A un secolo di distanza il dibattito è ancora vivo e irrisolto! E allora? Che cosa è per i fisici di oggi la teoria quantistica? - Una *falsa speranza*, che funziona per caso? - Un *pezzo incompleto* di un rompicapo pazzesco? - Un *indicatore* di qualcosa di profondo, che interessa la *“struttura elementare”* del mondo ma che noi non abbiamo ancora capito?

### **La struttura elementare del mondo**

Già... la *“struttura elementare del mondo”*, dopo che l’immagine nitida e solida della vecchia fisica classica è spazzata via... ***Qual è, oggi, la visione di questa struttura?*** Ancora una volta è Rovelli a spiegarcela nel libro *“La realtà non è come ci appare”*.

Attualmente abbiamo due teorie, relatività generale e meccanica quantistica. Queste, ciascuna nel loro campo (cioè a grande e piccolissima scala), descrivono molto bene il mondo. Tuttavia sono fra di loro incompatibili. Ebbene la teoria a cui Rovelli ha dato un massiccio contributo al suo sviluppo, cioè la *“gravità quantistica a loop”* (*loop*, anelli), cerca di mettere d’accordo relatività generale e meccanica quantistica. Tale teoria propone idee profondamente diverse da quelle intuitive che noi abbiamo di *“materia”*, *“spazio”* e *“tempo”*.

La teoria infatti ipotizza che lo spazio reale non sia continuo, ma *“granulare”*. Lo immagina costituito da minuscoli grani, cioè *“atomi di spazio”*. Questi sono piccoli anelli, *“loop”*, delle dimensioni infinitesime dell’ordine di  $10^{-35}$  m. Gli anelli sono intrecciati con altri simili e formano una ***“rete di relazioni”***, che tesse la trama dello spazio. Ancora una volta il mondo sembra essere *“relazione”*, prima che *“oggetti”*. In Fig.1 è mostrata una rappresentazione artistica del concetto.

In questa teoria, sparisce l’idea di uno ***“spazio continuo”*** che contiene le cose; così pure sparisce l’idea di un ***“tempo elementare e primitivo che scorre indipendentemente dalle cose”!!!***

Le equazioni che descrivono grani di spazio e materia non contengono più la variabile “tempo”. Questo non significa che il tempo non esiste e tutto è immobile, ma che a piccolissima scala i processi elementari non possono essere ordinati in una comune successione di istanti. Scrive Rovelli a questo proposito: “Alla piccolissima scala dei quanti di spazio, la danza della natura non si svolge al ritmo della bacchetta di un singolo direttore d’orchestra: ogni processo danza indipendentemente con i vicini, seguendo un proprio ritmo”.



Fig.1 - Gravità quantistica a loop

Nel mondo descritto dalla teoria non c’è più lo spazio che “contiene” il mondo e non c’è più il tempo “lungo il quale” avvengono gli eventi. Esistono solo processi elementari, dove quanti di spazio e materia interagiscono in continuazione. L’illusione dello spazio e del tempo “continui” attorno a noi è la visione sfocata di questo fitto proliferare di processi elementari.

Quello che noi osserviamo abitualmente sono i valori *mediati* di questo brulicare di processi. Il mondo ci sembra *determinato*, perché i fenomeni di interferenza quantistica si perdono nel brusio del mondo macroscopico. Da notare come il nostro osservare quotidiano è compatibile con il mondo quantistico: la teoria dei quanti comprende la meccanica classica e la nostra usuale visione del mondo come *approssimazioni*. La solidità della visione classica non è che la nostra miopia. L’immagine del mondo nitida e solida della vecchia fisica è un’illusione!

Quello che noi osserviamo abitualmente sono i valori *mediati* di questo brulicare di processi. Il mondo ci sembra *determinato*, perché i fenomeni di interferenza quantistica si perdono nel brusio del mondo macroscopico. Da notare come il nostro osservare quotidiano è compatibile con il mondo quantistico: la teoria dei quanti comprende la meccanica classica e la nostra usuale visione del mondo come *approssimazioni*. La solidità della visione classica non è che la nostra miopia. L’immagine del mondo nitida e solida della vecchia fisica è un’illusione!

### Materia e spirito

Scrivi Rovelli: “È difficile immaginare come noi esseri umani possiamo essere fatti solo di piccoli sassi che rimbalzano l’uno sull’altro. Ma, guardando un sasso da vicino è un vasto mondo: una galassia di entità quantistiche rutilanti dove fluttuano probabilità e interazioni. Quello che chiamiamo sasso è una stratificazione di significati dei nostri pensieri, evocati dall’interazione fra noi e quella galassia di puntiformi eventi fisici relativi. La semplice materia si sfalda in strati complessi e d’un tratto ci sembra meno semplice. **Lo iato fra la semplice materia e l’evanescente dipanarsi del nostro spirito appare forse un po’ meno invalicabile**”.

La visione relazionale ci allontana dai dualismi, come soggetto-oggetto o materia-spirito. Se le cose vanno come ipotizza la quantistica relazionale, **la scienza contemporanea potrebbe essere fondamentalmente aperta alla “spiritualità”?** L’evanescente concetto quantistico-relazionale di materia aprirebbe così a nuove strade per ripensare alle grandi questioni?

Nel concetto di spiritualità di Rovelli non vi è nulla di metafisico. Per quanto riguarda i processi che avvengono nella sua visione non è attore un soggetto distinto dalla realtà fenomenica, né un punto di vista trascendente. Secondo Rovelli l’idea che esista una “fumosa sostanza immateriale” che sopravvive alla morte è del tutto implausibile. Rovelli vede la relazione come negazione della metafisica e una porta aperta a concezioni vicine a quelle del pensiero orientale; in particolare a quelle del filosofo indiano Nāgārjuna, vissuto nel II secolo, per il quale: “Non ci sono cose che hanno esistenza in sé, indipendentemente da altro” e “la realtà ultima, l’essenza, è assenza, vacuità. Non c’è”.

Non tutti però vedono le cose a questo modo. La percezione teologica del pensiero cristiano scorge invece nella fisica quantistica relazionale una **finestra aperta alla spiritualità**; direi di più, intravede proprio nella Trinità l’attuazione stessa della relazione. La Trinità è relazione in se stessa, in relazione con l’universo e relazione con tutti gli esseri viventi, senzienti o meno. L’astrofisico



gesuita Paolo Beltrame, ad esempio, vede nella fisica quantistica moderna un invito a un dialogo teologico più ricco e variegato di quello a cui siamo abituati. Accoglie così l'invito e, in un eloquente e significativo articolo dal titolo *"Forse Dio gioca a Dadi?"*, così scrive: *"La meccanica quantistica rappresenta oggi la migliore e più esaustiva descrizione del mondo fisico. La sua comprensione seria e onesta offre scenari inaspettati, affascinanti e aperti verso una realtà più vasta. In essa si può intravedere un orizzonte verso il Mistero, perfino in **ottica cristiana**"*.

### **Materia e mente**

Non è certo possibile in questo breve scritto di entrare nei dettagli del funzionamento della mente e del suo rapporto con il corpo, senza dubbio di grande rilevanza e a cui Rovelli dedica la dovuta attenzione.

Nel pensiero scientifico moderno il tentativo di soluzione dell'enigma del rapporto fra materia e mente è sempre stato difficile dalla radicata visione meccanicistica della materia. Questa viene a noi dal XVII secolo, cioè dai tempi di Cartesio e Newton in cui la cultura subì profondi cambiamenti: se la materia è costituita da una massa inerte, come è possibile che da questa emerga la mente? Ebbene Rovelli ritiene che la fisica quantistica, proprio perché fa a meno del concetto tradizionale di *proprietà oggettiva*, possa aprire uno *"spiraglio"* per risolvere il problema: se le proprietà dei corpi sono relazioni, la loro distanza dai fenomeni mentali sembra ridotta.

A questo proposito Rovelli, citando un'idea per lui poco convincente di qualcuno che tenta di collegare fenomeni quantistici e coscienza, così scrive: *"E' sufficiente avere osservato che il mondo è meglio descritto da variabili relative e dalle loro correlazioni. Questo ci permette forse di uscire dalla prigione della radicale opposizione fra oggettività della materia e vita mentale. La rigida distinzione fra mondo mentale e mondo fisico **si attenua**". Possiamo provare a considerare i fenomeni mentali e fenomeni fisici, entrambi, come fenomeni naturali: entrambi prodotti da interazioni fra parti del mondo fisico"*.

### **L'allucinazione meglio in armonia con il mondo**

A proposito di quello che Rovelli ha provato durante il tempo trascorso a riflettere sull'avventuroso viaggio fatto per giungere alla sua visione del mondo, così scrive: *"Spazio, tempo, materia, pensiero, l'intera realtà non ha fatto che ridisegnarsi davanti ai miei occhi, come in un vasto caleidoscopio magico"*. E ancora: *"Il mondo frammentato e insostanziale della teoria dei quanti è, per il momento, **l'allucinazione** meglio in armonia con il mondo..."*.

Scrivendo Einstein nel 1954 al fisico David Bohm: *"Se Dio ha creato il mondo, non possiamo dire che si sia preoccupato molto di facilitarne la comprensione!"*

## APPENDICE

### Esperimento della doppia fenditura

Si immagina una parete divisoria in cui siano state praticate due strette fenditure parallele (Fig.2). Da un lato del divisorio è disposta una sorgente di luce monocromatica e dall'altro uno schermo che riceve la luce proveniente dalle due aperture.

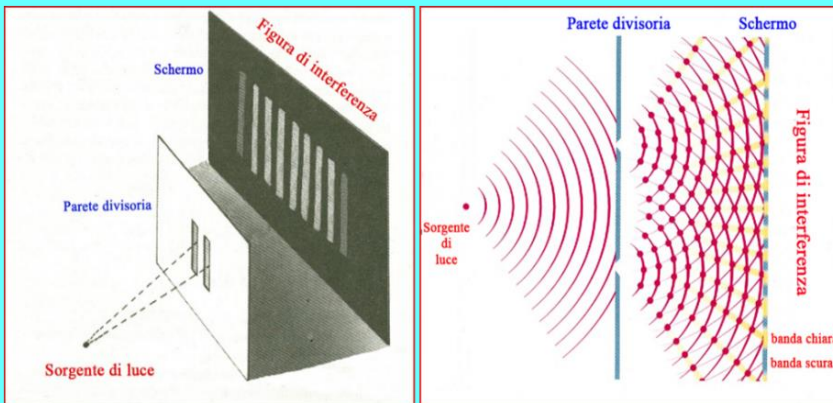


Fig. 2 – Esperimento della doppia fenditura

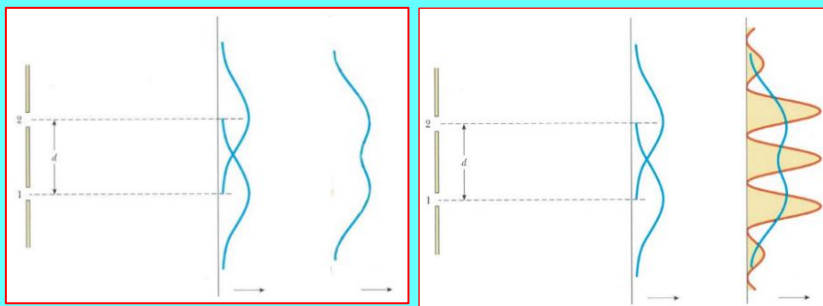


Fig. 2.1- Comportamento corpuscolare

Fig. 2.2 - Comportamento ondulatorio

bande (strisce) alternate chiare e scure, disegnate in giallo in (Fig.2.2). La figura osservata è dovuta alla **sovrapposizione** delle onde che giungono dalle due fenditure e che, sullo schermo, danno luogo a **interferenza**: in alcuni punti le ampiezze delle onde si sommano mostrando dei massimi di intensità di luce e in altri si distruggono dando luogo a dei minimi. È la cosiddetta “*figura di interferenza*”. È il marchio caratteristico delle onde, spiegabile con la **teoria ondulatoria** della luce. Quindi, l’esperimento mostra che la luce ha proprietà ondulatorie!

Ma come? Sappiamo che il fenomeno dell’*effetto fotoelettrico* mostra che la luce ha proprietà corpuscolari. E allora? Conclusione: la luce ha proprietà sia corpuscolari che ondulatorie.

E se nell’esperimento descritto usassimo una *sorgente di elettroni* in luogo di fotoni? L’esperimento è stato eseguito nel 1927 da Davisson e Germer. Si sono ottenute le stesse frange riportate in Fig.1.2, che mostra come ogni elettrone ha in sé, oltre alla consueta proprietà **particellare**, una caratteristica **ondulatoria**.

B) Ma non è finita qui. Se i fotoni vengono emessi “uno alla volta” ci si attenderebbe che ogni fotone passasse o per l’una oppure per l’altra fenditura, dando luogo sullo schermo a un’unica immagine luminosa unione delle immagini di quando è aperta una singola fenditura (Fig.2.1). Invece... nella realtà, perfino quando i fotoni vengono emessi uno alla volta, appaiono *frange di interferenza*! (Fig.2.2) Ogni fotone perciò si comporta come se passasse contemporaneamente attraverso **entrambe** le due fenditure! Questa è la cosiddetta “**sovrapposizione quantistica**”. Cosa da non credere!!! È “*come se*” il fotone non facesse un solo percorso, non avesse una sola traiettoria in cui passare, ma fosse in più luoghi, quindi avesse più posizioni *contemporaneamente*.

C) Ma c'è dell'altro ancora. Se osservo il fotone, cioè vado a fare una "misura" per conoscere quale dei due percorsi fa il fotone, **l'interferenza sparisce!** Si ipotizza che le traiettorie possibili che la particella può percorrere anche contemporaneamente, siano infinite e che la misura obbliga il fotone a prendere un solo percorso fra i percorsi permessi; e questo diventa così l'unico ad esistere nella realtà. Si tratta del cosiddetto fenomeno del "**collasso**" della funzione d'onda, la quale viene completamente soppressa al momento della misurazione.

### Entanglement quantistico

Un esempio di fenomeno quantistico, che mostra il **legame fra oggetti distanti** (esempio, due fotoni), è il cosiddetto "**Entanglement**" (*allacciamento, intreccio, groviglio*) (Fig.3).

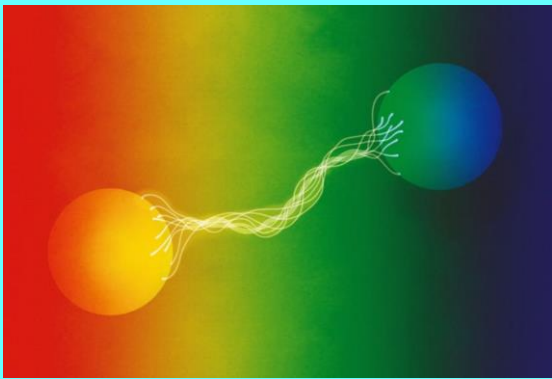


Fig. 3 – Entanglement quantistico

Questo fenomeno si manifesta quando, ad esempio, due particelle interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separate. Quando poi si trovano distanti mantengono uno strano e magico legame. Qualsiasi azione o misura sulla prima ha un effetto istantaneo anche sulla seconda e viceversa. Tutto quello che accade a una particella continua a influenzare il destino dell'altra.

L'Entanglement è considerato la **sovrapposizione** degli stati di due (o più) particelle, ritenuti come un **unico sistema**.

Due particelle *entangled* sono (in un certo senso) due entità non separate, ma parti dello stesso sistema. E quel sistema non viene influenzato dalla **distanza fisica** che divide i suoi componenti. Il sistema si comporta come un'entità unica.

Curiosità: ad oggi si è riusciti a mantenere due fotoni, in uno stato di allacciamento, a distanza di migliaia di chilometri l'uno dall'altro. L'entanglement quantistico è alla base di tecnologie emergenti come i "**computer quantistici**" e la "**crittografia quantistica**" ed ha inoltre permesso esperimenti attinenti al "**teletrasporto quantistico**" su cui si appuntano le speranze di nuove tecnologie.

### Paradosso del gatto di Schrödinger

Consideriamo un gatto rinchiuso in una scatola, che contiene una bottiglietta con del cianuro (Fig.4). Sopra alla bottiglietta c'è un piccolo martello, la cui caduta è determinata dalla disintegrazione di una sostanza radioattiva. Non appena il primo atomo della sostanza si disintegra, il martello cade. Questo rompe la bottiglietta e libera il veleno: il gatto è morto. Fino a questo punto l'esperimento non rileva nulla di straordinario.

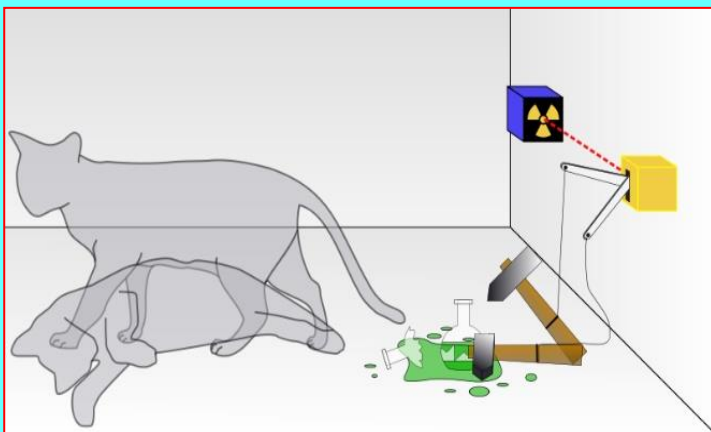


Fig.4 – Gatto di Schrödinger

Non appena il primo atomo della sostanza si disintegra, il martello cade. Questo rompe la bottiglietta e libera il veleno: il gatto è morto. Fino a questo punto l'esperimento non rileva nulla di straordinario.

Le cose cambiano e diventano più complesse quando noi cerchiamo di fare delle "**predizioni**" su ciò che è successo all'interno della scatola senza aprirla.

Secondo la fisica quantistica, non è possibile sapere in quale istante è avvenuta la disintegrazione che farà cadere il

martello. Stando alle leggi della fisica, non c'è alcun mezzo di sapere in quale istante ha origine la

disintegrazione radioattiva che metterà in moto il dispositivo mortale. Tutt'al più si può dire, in termini di *probabilità*, che c'è ad esempio il cinquanta per cento di probabilità perché una disintegrazione avvenga nel giro di un'ora. Di conseguenza, se non guardiamo all'interno della scatola, il nostro potere di predizione sarà *limitato*: avremo una probabilità su due di indovinare nell'affermare, per esempio, che il gatto è vivo. In effetti, all'interno della scatola esiste uno strano "miscuglio di stati quantistici", composta al cinquanta per cento di *gatto-vivo* e al cinquanta per cento di *gatto-morto*.

L'interpretazione ufficiale della meccanica quantistica, la cosiddetta *Interpretazione di Copenhagen*, afferma che: **“Nessun fenomeno fisico esiste realmente finché non viene osservato”**. Applicata al gatto: all'interno della scatola esistono due stati irreali del gatto e solo quando apriamo la scatola, uno dei due si *materializza*. Detto in altri termini, il gatto è in una **“sovrapposizione quantistica”** di gatto-vivo e gatto morto. E resta tale finché non lo osserviamo. È l'atto stesso della osservazione che determina la realtà. E allora? Questo cosa significa? È una condizione **incredibile** di vita-morte e in apparenza **assurda**! Per molti è inaccettabile. Il paradosso ci rivela i limiti della visione.

---

### Elementi bibliografici

- A. D. Aczel, *Entanglement. Il più grande mistero della fisica*, Cortina Editore, Milano 2004.  
 C. Rovelli, *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*, Raffaello Cortina, Milano 2014.  
 C. Rovelli, *Helgoland*, Adelphi, Milano 2020.  
 C. Rovelli, *Sette brevi lezioni di fisica*, Adelphi, Milano 2014.  
 F. Agnoli, *Filosofia, religione e politica in Albert Einstein*, Edizioni Studio Domenicano, Bologna 2015  
 F. Saporetti, *Big Bang: chi ha acceso la miccia? Una straordinaria avventura scientifica*, Pendragon, Bologna 2014.  
 J. Al-Khalili e J. McFadden, *La fisica della vita. La nuova scienza della biologia quantistica*, Bollati Boringhieri, 2015.  
 P. Beltrame, *Forse Dio gioca a dadi?* La Civiltà Cattolica, 4097, Roma 2021.  
 P. Davies, *Dio e la nuova fisica*, Oscar Saggi Mondadori 1994.  
 S. Hawking e L. Mlodinow, *Il grande disegno, Perché non serve Dio per spiegare l'universo*, Mondadori, Milano 2011.  
 S. Hawking, *Dal Big Bang ai buchi neri, Breve storia del tempo*, Superbur Scienza, Milano 2001.

### Ringraziamenti

Un sentito grazie va a Enrico Pedna per una attenta lettura critica e costruttivi commenti.

\*\*\*\*\*

Franco Saporetti, già professore di fisica per molti anni alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, ha svolto ricerche in "Fisica delle Particelle Elementari" e in "Fisica del Nucleo" presso il CERN di Ginevra e l'INFN di Bologna. Ha al suo attivo più di sessanta lavori scientifici su riviste internazionali e vari libri e articoli di divulgazione. Tra i libri: *“Big Bang: chi ha acceso la miccia? Una straordinaria avventura scientifica”* (Pendragon, 2014). Ha pure pubblicato favole di fisica sul sito di divulgazione scientifica dell'Università di Bologna dedicato ai giovani.