

1. Il paradosso del gatto di Schrödinger

Se si vuole approfondire la meccanica quantistica, non si può non considerare come molti fisici si siano applicati nella ricerca e nella stesura di originali paradossi che evidenziassero alcune delle stranezze e delle presunte incompletezze della teoria. Perché, come vedremo, la meccanica quantistica è una teoria molto, molto strana.

Tra i più famosi vi è senza dubbio quello noto come il “paradosso del gatto di Schrödinger” pubblicato per la prima volta nella sua opera *“La situazione attuale della meccanica quantistica”* del 1935:

Si rinchioda un gatto in una scatola d'acciaio insieme con la seguente macchina infernale (che occorre proteggere dalla possibilità d'essere afferrata direttamente dal gatto): in un contatore Geiger¹ si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegra, ma anche in modo parimenti verosimile nessuno; se ciò succede, allora il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato. La prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione d'onda Ψ dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono stati puri, ma miscelati con uguale peso².

Fino a quando non decidiamo di aprire la scatola il gatto che vi è dentro dal punto di vista fisico è “potenzialmente” sia vivo che morto, ma “attualmente” né vivo né morto, secondo il principio di sovrapposizione degli stati.

Per capire come sia concepibile una tale situazione paradossale è necessario ripercorrere il cammino che ha portato alla formulazione della teoria quantistica e analizzarne le principali caratteristiche.

2. Dal meccanicismo all'indeterminazione heisenberghiana

A partire dalla seconda metà del XIX secolo la fisica classica newtoniana fondata sul meccanicismo, che da oltre due secoli dominava il campo scientifico e che sembrava ormai saldamente radicata nella società, venne investita da questioni del tutto nuove che misero in crisi gli stessi presupposti sulla quale era basata.

Il matematico fisico francese Pierre-Simon Laplace nel suo *Essai philosophique sur les probabilités* del 1814 enunciava così il nucleo centrale del meccanicismo:

Noi dobbiamo considerare lo stato presente dell'universo come l'effetto di un dato stato anteriore e come le causa di ciò che sarà in avvenire. Una intelligenza che, in un dato istante, conoscesse tutte le forze che animano la natura e la rispettiva posizione degli esseri che la costituiscono, e che fosse abbastanza vasta per sottoporre tutti i dati alla sua analisi, abbraccerebbe in un'unica formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo come

1 Il contatore Geiger, inventato nel 1913 in Inghilterra da Hans Wilhelm Geiger, è uno strumento utile per misurare radiazioni di tipo ionizzante. In particolare può essere usato per misurare le radiazioni provenienti da decadimenti di tipo Alfa, Beta e Gamma. (Wikipedia).

2 Erwin Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*; Die Naturwissenschaften 23 (1935) p. 812



*quello dell'atomo più sottile; per una tale intelligenza tutto sarebbe chiaro e certo e così l'avvenire come il passato le sarebbero presenti*³.

Appare dunque evidente che questa teoria fosse fondata su un deciso determinismo, basato su pochi e fondamentali principi, primo fra tutti quello della causalità. Infatti, tutte le leggi della fisica classica forniscono una descrizione causale dei fenomeni sotto studio: ciò significa che conoscendo lo stato di un sistema in un dato istante è possibile prevedere il comportamento di quel sistema in qualsiasi istante del futuro, sulla base di tutte queste leggi classiche⁴.

Le nuove questioni che misero in crisi questa concezione vanno ricercate in alcune scoperte scientifiche che non furono facilmente integrate nella concezione fisica newtoniana; si assistette alla nascita di nuovi rami della fisica che affiancarono la meccanica: negli anni Venti dell'Ottocento nacque la termodinamica a partire dall'opera di Joseph Fourier, e quaranta anni dopo nacque l'elettromagnetismo. Le ricerche del fisico James Clerk Maxwell sull'esistenza dei campi elettromagnetici, presentate nel 1864 alla Royal Society⁵, furono tra le prime che misero alla prova il meccanicismo in quanto, sfuggendo dalla pratica quotidiana, risultarono apparentemente paradossali e illogiche. Tali sviluppi resero sempre più problematica la collocazione di fenomeni di nuova scoperta nel modello meccanicista e condussero gli scienziati a realizzare vari accomodamenti che avrebbero permesso di non abbandonare gli elementi essenziali del meccanicismo, come nel caso della corrente di spostamento introdotta da Maxwell per ovviare all'incompletezza della legge di Ampere sulla circuitazione del campo magnetico. Maxwell infatti era, a suo modo, un meccanicista, e riteneva che la miglior spiegazione possibile di qualunque fenomeno fosse quella della meccanica. E tentò così di fornire una modellizzazione di questo tipo anche in campo elettromagnetico, ma il modo in cui egli condusse questo tentativo lo allontanò decisamente dal meccanicismo. Maxwell riteneva che il modello meccanico non dovesse avere alcuna funzione unificante o significato ontologico: esso serviva solo come ausilio per la ricerca teorica, suggerendo utili analogie e aiutando l'immaginazione scientifica. L'importanza del modello meccanicista veniva dunque fortemente ridimensionato⁶.

Il meccanicismo fu messo definitivamente in crisi solo all'inizio del Novecento, quando le teorie di Einstein sulla relatività di spazio e tempo, quelle di Planck sulla quantizzazione dell'energia, e soprattutto quelle di Heisenberg sull'indeterminazione dimostrarono l'impossibilità di indagare la realtà basandosi esclusivamente sulle leggi della meccanica⁷.

2.1. Teoria dei quanti di Planck

In particolare Max Planck ideò la teoria dei quanti, resa nota come ipotesi nel 1889, secondo cui gli scambi di energia nei fenomeni di emissione e di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche avvengono non in forma continua, come si credeva, ma in forma discontinua (proporzionale alla loro frequenza di oscillazione e a una costante universale). Nel 1901 Planck, partendo dall'ipotesi, formulò la teoria quantistica, secondo la quale gli atomi assorbono ed emettono radiazioni in modo discontinuo, per quanti di energia⁸, cioè quantità di energia finita e discreta⁹.

3 Pierre-Simone Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*; (1814)

4 Davide Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger – Meccanica quantistica e visione del mondo*; Franco Muzio Editore (2007) p. 11

5 Wikipedia, *James Clerk Maxwell* (Licenza GNU Free Documentation License)

6 Fabio Cioffi, *I libri di dialogos*, vol. E; edizioni scolastiche Bruno Mondadori (2001) p. 132

7 Wikipedia, *Meccanicismo* (Licenza GNU Free Documentation License)

8 Si potrebbe dire che emettono energia "a pacchetti".

9 Wikipedia, *Max Planck* (Licenza GNU Free Documentation License)



2.2. Applicazioni in astronomia

La teoria di Planck portò fin da subito delle importanti novità nel campo scientifico, in particolar modo in astronomia. Infatti, grazie al modello atomico di Bohr del 1913 fondato proprio sulla teoria dei quanti, si è cominciato a studiare gli spettri di corpi celesti per misurarne temperatura e composizione superficiali. Secondo il modello atomico di Bohr un atomo può assorbire o emettere una radiazione elettromagnetica che è diversa per ogni elemento o ione. In pratica, quando un elettrone viene colpito da un fotone, viene eccitato passa a un orbitale con una maggiore energia potenziale. Quando esso ritorna all'orbitale originale, il fotone che aveva assorbito viene rilasciato con un'energia pari alla differenza tra quelle potenziali dei due orbitali, quindi secondo una frequenza definita dalla formula:

$$f = \frac{E}{h}$$

dove f indica la frequenza, E l'energia e h la costante di Planck.

Uno spettro, in pratica, consiste in una striscia formata da bande con tutti i colori dell'iride (dal rosso al violetto) le cui posizioni e il cui numero dipendono dalla natura chimica della sorgente luminosa. Non vi sono spettri comuni a due elementi e neppure singole righe. Questo è dovuto alle differenze energetiche tra gli orbitali dei vari atomi¹⁰.

Esse sono dunque un valido strumento di indagine, poiché lo spettro è determinato dalla temperatura superficiale e dalla composizione chimica del corpo che sto studiando. Questo ha permesso di classificare le stelle in classi spettrali che vanno dalla classe O, di colore bianco-azzurro e con la temperatura più alta (oltre i 30.000 K) fino alla classe M nella quale sono inserite le stelle più fredde, di colore rosso, con temperature fino a 3.500 K. Il nostro Sole appartiene alla classe G, quella delle stelle con una temperatura tra 5.000 e 6.000 K. Analisi spettrali effettuate su migliaia di stelle hanno inoltre rivelato che la maggior parte di esse hanno la propria atmosfera composta al 99% idrogeno e di elio, mentre il restante 1% comprende elementi chimici più pesanti¹¹.

Un altro fenomeno che è possibile studiare attraverso gli spettri riguarda l'individuazione di nebulose. Infatti, quando un fotone emesso da una stella attraversa i gas di una nebulosa posta tra la sorgente e la terra, può scontrarsi con un atomo e esserne alterato. Noi sappiamo che ogni atomo, così come può emettere solo un certo tipo di radiazioni, può assorbirne solo alcune. Si parla in questo caso di spettro di assorbimento. Sebbene questo fenomeno possa alterare le onde emesse da una stella, impedendoci di determinarne alcune proprietà, esso ha reso possibile l'individuazione e lo studio delle caratteristiche di molte nebulose, che spesso hanno una luminosità troppo debole per essere individuate senza alcun riferimento: potendo ipotizzarne la presenza in una certa area possiamo effettuare ricerche con strumenti più appropriati e pellicole più sensibili.

Sebbene già dal XVII secolo si studiassero gli spettri stellari, la teoria dei quanti andò a perfezionare l'uso che ne veniva fatto. Oggi infatti sappiamo con certezza quale siano gli spettri di emissione e di assorbimento di tutti gli elementi e risulta facile capire da cosa sia composta l'atmosfera di una stella.

¹⁰ Wikipedia, *Spettro (astronomia)* (Licenza GNU Free Documentation License)

¹¹ Evidio Lupia Palmieri e Maurizio Parotto, *La Terra nello spazio e nel tempo*; Zanichelli (2002)



3. Interpretazione ortodossa della meccanica quantistica

Come si accennava sopra, tra le novità introdotte nella fisica agli inizi del XX secolo compare la meccanica quantistica di Heisenberg e Bohr: essa riunisce svariate teorie fisiche formulate a partire dagli anni Venti che descrivono il comportamento della materia a livello microscopico, a scale di lunghezza inferiori o dell'ordine di quelle dell'atomo o ad energie nella scala delle interazioni interatomiche. Essa permette di interpretare e quantificare fenomeni che non possono essere giustificati dalla meccanica classica¹².

Riprendendo le intuizioni di inizio secolo di Planck e Einstein, i quali introdussero rispettivamente l'idea che l'energia fosse quantizzata e l'esistenza dei fotoni, Bohr e Heisenberg nel 1927 riuscirono finalmente a dare una spiegazione convincente a queste nuove teorie formulando due principi che sono alla base dell'interpretazione di Copenaghen, o "ortodossa"¹³, della meccanica quantistica: il principio di indeterminazione e il principio di complementarità. Entrambi si fondano su una stessa idea di fondo, secondo cui esiste una incompatibilità di fondo fra la descrizione causale e la descrizione nello spazio-tempo dei processi atomici. In una recente pubblicazione di Fisaletti è così enunciata:

Le due descrizioni fondamentali della fisica classica (spazio-tempo e causalità) sono incompatibili in meccanica quantistica. Si può scegliere l'una o l'altra, ma non è mai possibile realizzarle entrambe su uno stesso fenomeno perché si escludono a vicenda¹⁴.

3.1. Principio di indeterminazione di Heisenberg

Il fisico tedesco Werner Karl Heisenberg cominciò i suoi studi sulla meccanica quantistica a ventuno anni, subito dopo l'incontro con Niels Bohr nel 1922, dal quale scaturì una proficua collaborazione che lo portò nel 1927 alla formulazione del cosiddetto principio di indeterminazione¹⁵.

Questa teoria, stabilita l'impossibilità di conoscere, simultaneamente e con precisione arbitraria, posizione e quantità di moto di una particella¹⁶ microscopica, ne quantifica l'imprecisione con la seguente equazione:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{\hbar}{2}$$

dove Δx indica l'imprecisione con cui calcolo la posizione, Δp quella con cui calcolo la quantità di moto e \hbar la costante di Dirac¹⁷. Se dunque volessi calcolare con assoluta precisione la posizione di una particella ($\Delta x = 0$) dovrei porre $\Delta p = \infty$, cioè non potrei calcolarne in alcun modo la quantità di moto.

Questo avviene perché l'osservatore, nel momento in cui compie una misurazione, altera inevitabilmente lo stato iniziale del sistema. All'osservatore va dunque attribuita un'importanza che

¹² Va tuttavia ricordato che la meccanica quantistica è valida solo a livello microscopico, mentre per quanto riguarda il mondo macroscopico non ha risultati apprezzabili.

¹³ Per interpretazione "ortodossa" s'intende l'insieme delle teorie elaborate dagli esponenti delle scuole di Copenaghen e Göttingen, tra cui appunto gli stessi Bohr e Heisenberg.

¹⁴ Davide Fisaletti, *I gatti di Schrödinger*, p. 21

¹⁵ Wikipedia, *Werner Heisenberg* (Licenza GNU Free Documentation License)

¹⁶ Werner K. Heisenberg, *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*; (1930)

¹⁷ La costante di Dirac, chiamata anche costante ridotta di Planck, è $\hbar = h/2\pi$ dove h indica la costante di Planck. Il valore di \hbar è 1.054×10^{-34} Js



non aveva mai avuto prima nella storia: va infatti ricordato che nella fisica classica egli era del tutto influente ed esterno, e l'atto di misurazione in sé non modificava profondamente lo stato del sistema.

L'indeterminismo comunque non è per Heisenberg dovuto all'impossibilità pratica di accedere a tutte le informazioni necessarie per la conoscenza deterministica del moto delle particelle, ma si configura piuttosto come una legge fondamentale ed universale della natura.

3.2. *Principio di complementarità di Bohr*

Il principio di complementarità, viene attribuito al fisico matematico danese Niels Bohr, maestro di Heisenberg, che lo elaborò nello stesso periodo in cui Heisenberg lavorava a quello di indeterminazione.

Partendo dalla radice comune enunciata prima, Bohr ne derivò un altro concetto fondamentale, vale a dire il concetto di complementarità tra la rappresentazione corpuscolare e la rappresentazione ondulatoria. Significa che la realtà presenta una duplice natura: quella come corpo e quella come onda. Esse non si possono mai evidenziare contemporaneamente, ma solo separatamente: per esempio, la luce si propaga come onda, ma quando colpisce un oggetto si comporta come particella. Si giunge così alla strana concezione che la luce possa essere sia onda che particella, ma mai tutt'e due nello stesso momento. Tuttavia, la “trasformazione” dell'elettrone da onda a corpuscolo o viceversa non deve essere vista come una contraddizione, in quanto, per Bohr, è proprio l'interferenza dell'osservatore con il sistema osservato a causare questa “trasformazione”¹⁸.

3.3. *Funzione d'onda*

Altro importante contributo alla meccanica quantistica fu quello dato da Erwin Schrödinger con l'equazione che porta il suo nome. Le soluzioni di tale equazione sono rappresentate dalla funzione d'onda, che descrive lo stato di un sistema fisico: essa è in generale una funzione complessa delle coordinate spaziali e del tempo, e normalmente si trova in questa forma:

$$\psi(x, y, z, t)$$

Date le 4 variabili corrispondenti alle tre dimensioni spaziali e al tempo, il suo modulo quadrato restituisce un valore compreso tra 0 e 1 che indica la probabilità di trovare una particella in un determinato punto dello spazio (x, y, z) in un determinato istante t . Lo 0 corrisponde all'impossibilità di trovarvela, l'1 corrisponde alla certezza che sia in quel punto¹⁹.

La funzione d'onda spiega, ad esempio, la teoria degli orbitali degli elettroni attorno al nucleo atomico. Sull'orbitale stesso la funzione restituisce il valore 0, mentre all'interno di esso assume valori variabili. È infatti impossibile trovare un elettrone sulla superficie di un orbitale.

3.4. *Principio di sovrapposizione*

Esiste un terzo principio della meccanica quantistica che compone l'elaborazione di Copenaghen, chiamato di sovrapposizione. Per capirlo meglio ci affidiamo ad un esempio.

Prendiamo un sistema fisico classico, un temperino e due cassetti. In mia assenza un amico nasconde il temperino in uno dei due cassetti: è chiaro che se egli ha messo il temperino in un

¹⁸ Davide Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger*, p. 22

¹⁹ *ibidem*; p. 33



cassetto, secondo questo sistema e pure secondo l'evidenza dei sensi, esso occupa quella determinata posizione e non può stare contemporaneamente nell'altro cassetto. Dunque, il temperino ha delle proprietà che sono assolutamente determinate. I sistemi quantistici però funzionano in modo completamente diverso. Infatti, la posizione di un sistema quantistico non è determinata fino a che non compio un'osservazione. Nel nostro esempio, fino a che io non apro un cassetto il temperino non è in nessun posto, ma è piuttosto in uno stato che è la combinazione dei vari cassetti. Non è corretto, in un sistema quantistico, dire che il temperino è o in un cassetto o in un altro, bisogna dire che il temperino, o meglio il “concetto temperino”, è per metà in un cassetto e per metà in un altro. Nel momento in cui vado ad aprire un cassetto, modifico istantaneamente anche la condizione dell'altro cassetto: infatti, se nel cassetto che ho aperto trovassi il temperino, nell'altro scomparirebbe immediatamente quella “metà di temperino” che vi era prima.

Tutto questo avviene secondo quello che in meccanica quantistica viene chiamato principio di sovrapposizione: sovrapposizione non solo di posizione dunque, ma di tutto lo stato fisico del sistema come tale, quindi ontologica.

4. Sviluppi della meccanica quantistica

La prospettiva che si apre alla fisica del Novecento è quindi profondamente mutata. Non vi è più posto per le certezze del determinismo di un tempo, adesso regna la più assoluta casualità e in molti credettero che stesse ormai per estinguersi il modello della causalità. Una tale rivoluzione del mondo scientifico non poteva certo trovare tutti di comune accordo.

Lo stesso Einstein fu fin dall'inizio critico nei confronti della meccanica quantistica; celebre è la sua frase *“Dio non gioca a dadi con l'universo”*²⁰. Einstein era scettico verso il principio di indeterminazione: non concepiva come una teoria fisica potesse essere valida e completa pur descrivendo una realtà basata esclusivamente su mere probabilità di osservare alcuni eventi, probabilità che non sono statistiche ma propriamente ontologiche²¹.

Anche altri scienziati, tra cui Schrödinger, Planck e de Broglie, criticarono le teorie sviluppate dalla scuola di Copenaghen. Tutti infatti avevano difficoltà nell'accettare una teoria che prospettava un universo senza leggi deterministiche.

Il dibattito tra dissenzienti e ortodossi riguardò più precisamente la questione se la meccanica quantistica rappresentasse una teoria completa. Einstein in particolare riteneva che dovesse esserci un ulteriore livello, ancora più profondo, nella fisica, oltre la meccanica quantistica: il livello che determinasse una causa per ogni effetto osservato²².

Questo dibattito non ha mai trovato composizione e continua ai giorni nostri ancora più complesso. Infatti, per risolvere il problema delle operazioni di misura si sono sviluppate diverse versioni della meccanica quantistica, ciascuna con un certo numero di sostenitori²³.

20 Si racconta che Bohr rispose così a Einstein: *“Piantala di dire a Dio cosa fare coi suoi dadi”*. Tra gli altri che ripresero questa citazione, anche il premio Nobel Richard Feynman che aggiunse: *“Non solo Dio gioca a dadi, ma li getta laddove non possiamo vederli”*.

21 http://www.stoqnet.org/materials/auletta_mq1.pdf

22 Davide Fiscaletti, *I gatti di Schrödinger*, p. 45

23 *ibidem*, p. 15



5. Applicazioni odierne

5.1. Computer quantistici

Ad oggi la meccanica quantistica ha trovato numerose applicazioni in campo informatico: già si susseguono vari progetti di un cosiddetto Quantum computer, che avrebbe capacità elaborative molto superiori ai computer odierni. In pratica, il valore 0 o 1 di un bit, in un elaboratore quantistico è codificato in una proprietà di una particella elementare detta in questo caso qubit²⁴. Effettuando delle trasformazioni sulle particelle elementari, ad esempio sottoponendole ad opportuni campi elettromagnetici, se ne modificano le proprietà e quindi il valore del qubit, realizzando così delle operazioni di calcolo.

Ad esempio, con tre bit, vi sono otto combinazioni possibili di 1 o 0: 1-1-1, 0-1-1, 1-0-1, 1-1-0, 0-0-0, 1-0-0, 0-1-0 e 0-0-1. Ma tre bit in un ipotetico computer possono archiviare solo una di queste otto combinazioni alla volta. I Quantum computer, invece, sfrutteranno una meccanica diversa, dove le più piccole particelle di luce e materia possono trovarsi in stati diversi allo stesso tempo. Il qubit infatti può essere 0 e 1 allo stesso tempo. Quindi con 3 qubit di dati, un PC quantistico è in grado di archiviare tutte e otto le combinazioni di 0 e 1 simultaneamente. Se oggi i computer possono calcolare normalmente 64 bit di dati alla volta, in futuro un computer quantistico da 64 qubit potrà essere dal 200% al 6400% più veloce dei PC attuali.

Quanto tempo ci vorrà, quindi, per mettere le mani su un computer di questo genere? “Mah, diciamo che se vogliamo comparare lo sviluppo dei quantum computer con quelli normali, e un po' come se fossimo poco prima della scoperta dell'abaco”, ha sottolineato Christoph Boheme, responsabile di un progetto per un Quantum computer della University of Utah, in un'intervista a Punto Informatico del 2006. “Siamo ancora ad uno stadio iniziale”²⁵. Uno dei principali problemi degli elaboratori quantistici è però quello della decoerenza. Le particelle elementari utilizzate come qubit possono interagire con le particelle del mondo circostante e trasformarsi in modo praticamente casuale: questo ovviamente porterebbe a calcoli con risultati praticamente casuali²⁶.

5.2. Entanglement e teletrasporto

Un altro fenomeno veramente interessante e bizzarro riguarda l'*entanglement* tra due particelle. Un esperimento eseguito dallo svizzero Nicolas Gisin presso l'Università di Ginevra negli anni Novanta ha provato sperimentalmente una teoria già esistente e senza una apparente spiegazione logica, secondo la quale esiste uno strano fenomeno per cui alterando lo stato di una particella, un'altra, ad essa *entangled*, risente istantaneamente dell'alterazione anche se posta a chilometri di distanza. Sfruttando questa proprietà è teoricamente possibile realizzare un vero e proprio teletrasporto tra particelle microscopiche. Infatti, le informazioni sullo stato quantistico di una particella possono essere trasmesse sfruttando l'entanglement, mentre quelle sullo stato fisico classico possono esser trasmesse per vie “normali”. Nel 1997 due gruppi di scienziati sono riusciti a realizzare il sogno di teletrasportare lo stato quantistico di una singola particella: in linea di principio, nello stesso modo in cui Scotty, a bordo della nave spaziale Enterprise, poteva riportare a bordo il capitano Kirk nella fantascienza di Star Trek. Fino a questo momento comunque nessuno è in grado di dire se sia possibile o no teletrasportare oggetti macroscopici come un essere umano; la ricerca è ancora agli

²⁴ Il termine è stato introdotto dal fisico teorico americano Benjamin Schumacher, e sta per “quantum bit”.

²⁵ Dario d'Elia, *Quantum PC, da embrione a larva*; Punto Informatico del 22 novembre 2006

²⁶ Andrea Pasquinucci, 2008, *l'anno del computer quantistico*; Punto Informatico del 24 giugno 2005



inizi e il teletrasporto è ancora un fenomeno reale solo nel dominio del molto piccolo²⁷. Nel futuro, chissà!

6. I paradossi

Abbiamo cominciato il nostro cammino enunciando quello che probabilmente è il più famoso paradosso che sia mai stato scritto sulla stranezza della meccanica quantistica. Ve ne sono però anche molti altri, tra cui i tanti scritti da Einstein ma prontamente risolti da Bohr, a dimostrare da un lato come la meccanica quantistica si stesse diffondendo rapidamente, e dall'altro le perplessità che essa creava.

Tra quelli di Einstein, rimase insoluto da Bohr solo un paradosso, il cosiddetto paradosso EPR²⁸. In sostanza il suo significato è questo: la meccanica quantistica prevede l'esistenza dell'*entanglement* ma le interazioni tra le particelle avvengono istantaneamente, quindi a velocità infinita. Questo non convinceva Einstein, che sosteneva che la velocità massima possibile fosse quella della luce.

6.1. Una possibile spiegazione del paradosso del gatto

A tutt'oggi il paradosso del gatto non è stato completamente risolto in maniera condivisa da tutta la comunità scientifica e filosofica, e il povero gatto ancora non sa se è vivo o morto o checcnessia. Le spiegazioni che negli ultimi anni sembrano ottenere maggior successo ritengono che il fenomeno dell'interferenza sugli stati quantistici si applica esclusivamente in sistemi microscopici isolati. In sistemi macroscopici, infatti, l'elevato numero di particelle, ognuna con la propria funzione d'onda, fa sì che esse interferiscano reciprocamente annullando quelle anomalie che si verificano nel mondo atomico. Sarebbe dunque l'insieme di queste interferenze a conferire agli oggetti macroscopici le proprietà che siamo abituati ad osservare. Tale fenomeno è detto “decoerenza quantistica”.

Allo stesso modo si verrebbe a chiarire pure il principio di complementarità onda-particella. Viceversa, si può altrimenti affermare che una particella microscopica, di dimensioni compatibili con quelle di una lunghezza d'onda, può comportarsi come una particella materiale o come un'onda energetica al contempo. Ma è estremamente improbabile che un corpo macroscopico, in un qualche momento, si trovi ad avere dimensioni compatibili con quelle d'una lunghezza d'onda, comportandosi, pertanto, come un'onda vera e propria²⁹. Dunque, anche la complementarità è da riferirsi esclusivamente a sistemi microscopici, mentre perde la sua validità per sistemi più grandi.

Va comunque notato che sono stati dati anche altri tentativi di risoluzione al paradosso del gatto, che però hanno portato a interpretazioni della meccanica quantistica molto più bizzarri che non vale la pena di approfondire.

7. Dibattito filosofico

La meccanica quantistica ha avuto interessantissimi risvolti anche in campo filosofico. Infatti, essa ha rappresentato un'importante svolta in senso ontologico, soprattutto sul ruolo dell'osservatore e sul concetto di realtà.

²⁷ Amir D. Aczel, *Entanglement – Il più grande mistero della fisica*; Raffaello Cortina Editore (2004) cap. 18

²⁸ Einstein lo sviluppò con altri due fisici, Podolski e Rosen, dalle cui iniziali deriva il nome E.P.R.

²⁹ Wikipedia, *Paradosso del gatto di Schrödinger* (Licenza GNU Free Documentation License)



7.1. La realtà dopo la meccanica quantistica

La meccanica quantistica, come abbiamo visto, descrive un mondo, e lo fa creando teorie del tutto innovative che non hanno niente in comune con quelle preesistenti. Mentre nella maggior parte dei casi una nuova teoria si limita ad ampliare conoscenze già esistenti fondandosi su di esse, la meccanica quantistica presenta un mondo che supera ogni immaginazione e che per definizione non è definito né definibile, nonostante siano stati eseguiti molteplici esperimenti che ne hanno confermato la validità.

In questa nuova concezione, a noi, osservatori della realtà, per il principio di indeterminazione non è data la possibilità di giungere ad una conoscenza completa e oggettiva del mondo che ci circonda poiché ogni atto di misurazione, e quindi di osservazione, crea un'interferenza nel sistema studiato che non può essere eliminata³⁰, e che ne modifica inevitabilmente lo stato iniziale. Questo fenomeno è chiamato “collasso della funzione d'onda”: in pratica, a seguito dell'atto di misurazione, la funzione d'onda di tale sistema tende improvvisamente a un determinato valore che, si può dire, non gli è naturale.

Si tratta a questo punto di fare alcune considerazioni ontologiche. Nella filosofia del Novecento, contemporanea quindi agli sviluppi della meccanica quantistica, l'atto della percezione, cioè di osservazione, ha assunto un ruolo sempre più importante. Si pensi al filosofo francese Maurice Merleau-Ponty, sostenitore del movimento fenomenologico husserliano³¹, che ribadì il primato della percezione, e di conseguenza del corpo come organo percettivo, in quanto unica apertura al mondo della vita. Nella *Fenomenologia della percezione* del 1945 si legge:

*“Il corpo proprio è nel mondo come il cuore nell'organismo: mantiene continuamente in vita lo spettacolo visibile, lo anima e lo alimenta internamente, forma con esso un sistema”; “per me non ci sarebbe spazio se non avessi un corpo”*³².

Per Merleau-Ponty il mondo esiste indipendentemente dall'uomo, ma è l'uomo che con un atto di coscienza dà senso al mondo. È nella percezione che il mondo si istituisce e sussiste e si trasforma in un sistema di categorie reso possibile dalla preliminare fede nel mondo stesso³³. Come scriveva l'autore, “le cose sono radicate in un fondo di natura inumana”, e quindi sono imperscrutabili. Non è più l'esperienza corporea ad essere fondata su quella dell'oggetto spaziale, ma viceversa è quest'ultima a fondarsi “esistenzialmente” sulla prima.

Ma allora la realtà che cosa è, se oltretutto sfugge dalla nostra capacità conoscitiva? Una domanda questa che, agli inizi del Terzo Millennio, presenta più problemi che soluzioni. Una possibilità potrebbe essere quella di ripiegare sull'armonia prestabilita leibniziana secondo cui esiste una predisposizione di Dio al mondo, ipotesi teoreticamente discutibile ma praticamente risolutiva. Del resto, tra Scilla del razionalismo deista, che potrebbe per alcuni rasentare l'illusione, e Cariddi dello scetticismo razionalista bisognerà pur passare se vogliamo dare un senso e un minimo di speranza ai risultati delle nostre ricerche.

³⁰ È più corretto comunque dire che l'interferenza può sì essere eliminata, cioè posta uguale a zero, ma questo implicherebbe che non si sia compiuta alcuna misurazione, e quindi sarebbe inutile.

³¹ Dal filosofo tedesco Edmund Husserl, che visse a cavallo tra il XIX e il XX secolo. La fenomenologia husserliana, nata dall'esigenza di una rigorosa fondazione scientifica della filosofia, si caratterizza per la sua proposta di una razionalità intuitiva e descrittiva che va al di là dei modelli delle scienze esatte.

³² Maurice Merleau-Ponty, *Fenomenologia della percezione*; (1945)

³³ <http://www.riflessioni.it/enciclopedia/merleau-ponty.htm>



7.2. Meccanica quantistica e libertà

Un ulteriore aspetto che è interessante da approfondire riguarda la libertà dell'uomo nelle sue scelte. Prendiamo in considerazione la terza antinomia di Kant.

***Tesi:** La causalità secondo le leggi della natura non è la sola da cui possono essere derivati tutti i fenomeni del mondo. È necessario ammettere per la spiegazione di essi anche una causalità per la libertà³⁴.*

***Antitesi:** Nel mondo non c'è nessuna libertà, ma tutto accade unicamente secondo leggi della natura³⁵.*

Dandone una lettura in chiave scientifica, l'antitesi di Kant deve corrispondere a un mondo in cui tutto è determinato, quindi secondo una concezione meccanicista. Se tutti gli eventi seguono precise leggi fisiche, che sono universali, allora potrebbe esistere l'intelligenza superiore di Laplace in grado di prevedere con certezza assoluta passato e presente: a questo modo risulta evidente che non si lascerebbe spazio ad alcuna libertà.

La tesi sembrerebbe invece avvicinarsi al mondo che ci propone la meccanica quantistica: se esiste libertà, vuol dire che deve esistere qualcosa che non può essere determinato in modo completo e assoluto. Ciò corrisponde proprio al principio di indeterminazione heisenberghiano, secondo cui non è possibile creare un quadro di realtà completo a livello microscopico.

La meccanica quantistica potrebbe in qualche modo darci la certezza di essere liberi, di avere quella libertà che il determinismo definiva una semplice illusione.

Indagare più a fondo in questo campo però non ci è permesso, e probabilmente l'umanità non riuscirà mai a risolvere questo dubbio che da sempre la affascina. Ci può essere però di aiuto lo stesso Kant: egli non credeva nella libertà “assoluta”³⁶, quanto piuttosto in una libertà che possiamo definire “soggettiva”, e, perché no, magari anche “illusoria”. Il messaggio che sembra giungerci dalle sue opere è quello di vivere come persone libere ricercando il bene, senza preoccuparsi di porsi domande che vanno oltre le nostre capacità.

34 Immanuel Kant, *Critica della ragione pura*; (1781) vol. 1

35 *ibidem*

36 Ne è testimonianza il fatto che Kant chiami tesi proprio la parte dell'antinomia relativa alla presenza di libertà, mentre l'antitesi corrisponde all'assenza di libertà in un mondo deterministico.

