

**“LA DECRIZIONE QUANTISTICA
DELLA REALTA’ FISICA PUO’
RITENERSI COMPRENSIBILE?”**

*Parafrasi della memoria del 1935 con cui
Albert Einstein presentò il paradosso noto come EPR.*

*alberto sacchi
ing.sacchi@alice.it*

NOTA

E' opinione ampiamente diffusa non solo nel grande pubblico, ma condivisa anche dai più eminenti scienziati del XX e del XXI secolo che la Meccanica Quantistica sia condivisibile, sperimentalmente provata ma del tutto incomprensibile.

Scrivendo Richard Feynman: *“Penso si possa tranquillamente affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica.”* ed ancora: *“Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l'avete capita”* mentre lo stesso Einstein affermava che: *“Più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza”*

Ed è proprio al lettore curioso, saldamente ancorato ai fenomeni che il mondo reale e macroscopico gli trasmette, forse inconsciamente condizionato dal determinismo laplaciano per il quale l' universo è retto da leggi certe ed inviolabili ed al quale possono apparire sconvolgenti i paradossi generati dalla Meccanica Quantistica, che si rivolge il presente scritto.

La letteratura esistente è tanto ampia e diversificata da renderne impossibile una sintesi ma, stranamente, è di fatto suddivisibile in due grandi sottoinsiemi: descrizione rigorosamente scientifico matematica od ampiamente spettacolaristico-divulgativa

Alla prima categoria appartengono articoli pubblicati da importanti riviste internazionali quali Physical Review, Science o Nature, alla seconda un numero pressoché infinito di libri, riviste o programmi televisivi dove, alla totale assenza di rigore scientifico si contrappone un'alta spettacolarità dei risultati.

In questo panorama letterario è assente la “ via di mezzo” dove correttezza ed ampiezza d' informazione si coniuga con semplicità e comprensibilità, ottenuta impiegando semplici esempi di meccanica classica , una briciola di logica aristotelica e qualche elementare strumento di Analisi matematica .

Infine se autoconsistenza e paradossi logici possono minare la credibilità della Meccanica Quantistica, applicazioni quali la Risonanza Magnetica Nucleare (RMN) , la Tomografia ad Emissione di Positroni (PET), la Microscopia Elettronica o la nascente Informatica Quantistica, ne confermano fattivamente la validità.

CENNI STORIOGRAFICI

La nascita della Meccanica Quantistica si può far risalire al 1927 quando fu enunciato da Werner Heisenberg il Principio di Indeterminazione e da Niels Bohr , nel Congresso di Como, il Principio di Complementarità.

Il 24 ottobre 1927 ebbe inizio, presso il Leopold Park di Bruxelles, il V Congresso Solvay. Iniziò così la più straordinaria rivoluzione scientifica della storia moderna; “Elettroni e Fotoni” questo il titolo ed il programma del Congresso.

Erano presenti 29 tra i più famosi scienziati viventi: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, T. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H.

Fowler, L. Brillouin, P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr, I. Langmuir, M. Planck, Madame Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson.

Di essi ben 17 sarebbero stati insigniti del Premio Nobel.

E fu proprio in occasione del V Congresso che iniziarono ad evidenziarsi le differenti visioni del mondo: Einstein da un lato, con il suo convinto determinismo laplaciano e Bohr con la più insondabile casualità.

E poi nel 1927 fu enunciato da Werner Heisenberg il Principio di Indeterminazione e da Niels Bohr, nel Congresso di Como, il Principio di Complementarità.

Il contrasto tra Determinismo e Casualità divenne del tutto evidente nel corso del successivo Congresso Solvay del 1930 che si svolse, sempre a Bruxelles, dal 20 al 26 ottobre di quell'anno.

Uno dei Postulati fondamentali della MQ è il Principio di Indeterminazione; esso pone un limite preciso alla possibilità di determinazione contemporanea e con precisione prefissata dei valori di grandezze fisiche coniugate quali posizione-quantità di moto o tempo-energia.

Demolire tale Postulato avrebbe significato inficiare la stessa MQ, almeno nella interpretazione classica di Copenaghen come proposta da Bohr; questo era l'intento di Einstein nel proporre l'esperimento mentale noto come "La scatola a luce".

La "Scatola a luce" immaginata da Einstein non è altro che un volume chiuso contenente una lampada emittente luce monocromatica ed un orologio estremamente preciso, L'orologio è collegato ad un attuatore che, attraverso un diaframma, apre un foro in una delle pareti ad un istante prefissato.

Il tempo di apertura del diaframma è tale da consentire la fuoriuscita di un solo fotone la cui energia è data da $E = hf$ (f = frequenza della radiazione \approx colore della luce emessa) e la cui massa è ricavabile dalla nota equazione einsteiniana $E = mc^2$).

Ne segue che la massa del fotone è $m = hf/c^2$.

La scatola a luce subirà una diminuzione di peso pari a ghf/c^2 (essendo g accelerazione gravitazionale) e quindi, sospesa ad una molla, si solleverà di un tratto assolutamente minimo, ma comunque finito e misurabile con precisione illimitata.

L'istante di rilascio del fotone viene pertanto determinato con precisione limitata solo dalle caratteristiche meccaniche dell'orologio (e non da leggi naturali).

Le due misurazioni di grandezze coniugate (tempo ed energia del fotone) eseguibili senza limiti di precisione, contrastano con il Principio di Indeterminazione e, conseguentemente, con l'intera impostazione della MQ.

Illuminante, per meglio comprendere come si svolsero i fatti, la testimonianza del fisico belga Léon Rosenfeld (1904-1974), stretto collaboratore di Bohr, che in quei giorni si trovava a Bruxelles per incontrare proprio lo scienziato danese:

«Fu un vero shock per Bohr [...] che all'inizio non riuscì a trovare una soluzione. Per tutta la sera, fu estremamente agitato e continuò a spostarsi da uno scienziato all'altro, cercando di convincerli che non poteva essere vero, che se Einstein avesse avuto ragione, allora sarebbe stata la fine della Fisica [...] Non dimenticherò mai l'immagine dei

due antagonisti quando lasciarono il club: Einstein, con la sua figura alta e imponente, che camminava tranquillo, un sorriso appena ironico, e Bohr che allungava il passo per stargli dietro, pieno di eccitazione [...] Il mattino seguente avrebbe visto il trionfo di Bohr.»

Da Wikipedia

L'obiettivo di Einstein nel proporre l' esperimento mentale era dimostrare la incompletezza della MQ obiettivo che, a quel punto, pareva pienamente raggiunto.

Negli archivi storici Solvay esiste tutt'ora una fotografia in cui Einstein, con un cappello a larghe tese, cammina per le strade di Bruxelles, sereno e sicuro mentre Bohr, con un sobrio cappello sulla testa magra, lo segue, parlando con aria preoccupata con un collega.

Il mattino seguente Bohr si presenta con la soluzione al problema; ciò che è ancor più paradossale, la soluzione deriva proprio dalla rigorosa applicazione della Teoria della Relatività Generale dello stesso Einstein.

La Relatività Generale prevede infatti che, sotto l'azione di un campo gravitazionale, il tempo scorra più lentamente.

All'istante del rilascio del fotone la Scatola a Luce si sposta verticalmente sotto l'azione della sua forza peso, ridotta del peso del fotone emesso.

La sua posizione all'interno del campo gravitazionale terrestre varia così come la misurazione del tempo.

L'istante del rilascio del fotone coincide con lo spostamento dell'orologio nel campo gravitazionale e con la relativa dilatazione dei tempi così che l'istante del rilascio risulta indeterminato.

Sono passati solo otto anni dalla disfatta di Einstein nel contenzioso concettuale con Bohr circa Determinismo e Casualità quando, nel febbraio del 1935 appare, su Physical Review Volume 47, l'articolo a firma Albert Einstein, Lucas Podolski e Nathan Rosen, dal titolo:

"La descrizione quantistica della realtà fisica può ritenersi completa?".

Una teoria fisica deve possedere, per essere auto consistente, almeno quattro caratteristiche: realismo, localismo, completezza e coerenza; questo il pensiero di Einstein: è la MQ auto consistente?

Un esempio riferito a fenomeni di Fisica Classica può essere d'aiuto, nonostante l'entanglement non vi appartenga, per illustrare il paradosso EPR, come da sempre è chiamato l'articolo del '35 di Einstein, Podolski e Rosen.

Due sfere metalliche identiche, aventi uguali dimensioni e massa di cui una ferma (rispetto ad un qualunque riferimento inerziale) ed una avente velocità v entrano in contatto con urto elastico.

Per il Teorema della Conservazione della Quantità di Moto, se $m\Delta v$ è la quantità di moto scambiata nell'urto, la sfera 1 possiederà dopo l'urto la quantità di moto $m\Delta v$ mentre per sfera 2 essa sarà $m(v - \Delta v)$.

Si supponga che le sfere si allontanino lungo l'asse delle ascisse.

L'osservatore O_1 solidale con la sfera 1 misura $m\Delta v$ con precisione illimitata e, senza ulteriori osservazioni, stabilisce la quantità di moto della sfera 2 in $m(v - \Delta v)$

Ora è possibile misurare la posizione della sfera 2, sempre con precisione illimitata, senza condizionamenti dovuti al Principio di Indeterminazione; infatti le due misure di posizione e quantità di moto non avvengono contemporaneamente ne sulla medesima sfera.

Viene ad essere così violato uno dei Principi fondamentali della MQ.

Tale affermazione è naturalmente falsa; infatti la cinematica di una sfera di massa m è data dalla sua equazione del moto strettamente deterministica; l'estrapolazione al mondo

macroscopico si rende necessaria per esemplificare macroscopicamente il paradosso EPR.

Infatti l'evoluzione dello stato fisico della sfera 2 è descritto dalla equazione di Schrodinger la cui soluzione è una serie infinita di funzioni d'onda ognuna delle quali corrisponde ad un valore della quantità di moto della sfera .

Ma la sua quantità di moto è predeterminata dalla osservazione del medesimo parametro eseguita sulla sfera1.

E qui si realizza la seconda violazione dei postulati quantistici: solo l'osservazione può generare il collasso della funzione d'onda in uno degli stati possibili.

Una possibile interpretazione del paradosso considera che sfera 1 invii alla sfera 2 un messaggio in cui comunica il proprio stato $m \Delta v$ al fine di costringere la sfera 2 ad evidenziare esclusivamente lo stato $m(v - \Delta v)$.

Ecco la III violazione dei principi della MQ: l'impossibilità di trasmissione degli effetti a velocità infinita in ossequio al postulato fondamentale della Relatività Ristretta. Einstein definì Spooky action at distance (racapricciante azione a distanza) tale ipotesi.

Infranto il principio di Realtà, di Localismo e di Coerenza non rimane che ritenere la MQ una teoria non completa in quanto mancante di "variabili nascoste" in grado di renderla deterministica ed eliminare i paradossi da essa generati.

Naturalmente l'esperimento mentale proposto da Einstein non faceva riferimento a sfere metalliche di massa m bensì a particelle subatomiche emesse contemporaneamente a seguito del decadimento radioattivo di un atomo.

MECCANICA QUANTISTICA (Assiomi, Principi e Congetture)

La meccanica Quantistica può essere illustrata partendo dal famosissimo esperimento della "Doppia fenditura" oppure, in una forma più assiomatica, descrivendo i suoi Postulati ed i Principi su cui è fondata.

Principio di Indeterminazione

Due grandezze fisiche si definiscono coniugate quando esistono relazioni fisiche tra di esse.

Benché il concetto di grandezze coniugate compaia principalmente in MQ, esso è riferibile anche alla fisica classica ove si possono considerare coniugate le grandezze forza (F) e quantità di moto (mv)

$$F = ma = m \, dv/dt = d(mv)/dt$$

Il Principio di Indeterminazione stabilisce i limiti della conoscenza dei valori che grandezze coniugate possono assumere in un sistema fisico.

In particolare esso fissa il valore minimo del prodotto delle deviazioni standard di posizione e quantità di moto di una particella elementare .

Siano σ_x e σ_p rispettivamente la deviazione standard di posizione e di quantità di moto di una particella: il Principio di Indeterminazione stabilisce che :

$$\sigma_x \cdot \sigma_p \geq h/4\pi \quad \text{dove } h = \text{costante di Planck}$$

Per illustrare in modo intuitivo il concetto di "Deviazione standard" si immagini di condurre n misure di lunghezza (ad esempio di una mazza da golf) ottenendo n valori lievemente diversi $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

La media aritmetica, cioè la loro somma divisa per il loro numero n, sia X.

La somma delle differenze tra ogni valore misurato ed X elevata al quadrato e posta sotto radice quadrata è la deviazione standard della misura interessata:

$$X = 1/n \cdot \sum_1^n x \quad \text{e} \quad \sigma_x = \sqrt{1/n \cdot \sum (x-X)^2}$$

Il Principio di Indeterminazione ha una valenza prevalentemente ontologica, nel senso di filosofico-scientifica, prima ancora che strettamente scientifico-quantistica.

Infatti, ben prima del 1927 e già dai tempi di Newton la fisica classica prevedeva una sorta di indeterminazione nella misura di grandezze coniugate.

Si immagini di misurare contemporaneamente posizione e velocità di una palla da tennis che si muove lungo una traiettoria rettilinea.

Fissata una bandierina nel punto a coordinata x_0 ci si sposti di Δx fissando una seconda bandierina in $x_0 + \Delta x$.

Rilevato il tempo t_0 al passaggio della palla in x_0 , si rilevi il tempo al passaggio in $x_0 + \Delta x = t_1$; viene definita velocità media nell'intervallo $x_0 - x$ il rapporto:

$$v = \frac{\Delta x}{t_1 - t_0}$$

Ad ognuno degli infiniti punti dell'intervallo Δx può essere assegnata la velocità v; ne deriva indecidibilità circa la posizione della palla avente velocità v.

E' naturalmente sempre possibile ridurre l'intervallo Δx aumentando di conseguenza la determinazione della posizione e, mentre matematicamente è semplice far tendere a zero tale distanza ottenendo $\Delta x \rightarrow dx$ e:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

fisicamente esiste un limite dovuto alla precisione degli strumenti oltre il quale non vi è possibilità di diminuzione ma, problema ben più grave sotto il profilo filosofico, anche con precisione tendente all'infinito (strumenti ideali e perfetti) vi è un limite intrinseco alla natura della materia: la dimensione degli atomi di cui sono fatti gli strumenti e la palla da tennis.

Heisenberg sposta il problema da un fatto strumentale, ove l'indeterminazione è generata dalla incapacità di realizzare strumentazione con precisione infinita, ad un fatto ontologico ove la indeterminazione è insita nella natura stessa dei fenomeni.

Meccanica Ondulatoria

Tra settembre e ottobre del 1923 Louis de Broglie pubblicò negli *Actes dell'Accademia di Parigi* 3 saggi che ipotizzavano come tutte le particelle dovessero possedere caratteristiche sia corpuscolari che ondulatorie.

L'onda associata ha lunghezza d'onda correlata alla quantità di moto del corpo stesso secondo la:

$$\lambda = h/mc$$

con c = velocità della particella ed h = costante di Plack.

$$h = 6,62606896 \times 10^{-34}$$

Interessante osservare che l'onda pilota non viene associata esclusivamente a particelle elementari quali elettroni, neutroni o fotoni, bensì anche a corpi materiali macroscopici; essa non è rilevabile a causa di un valore di λ tanto minuscolo da essere praticamente impercettibile qualsiasi sia la strumentazione impiegata.

Anche per corpi di massa irrisoria, dell'ordine di pochi mg ed aventi velocità di solo alcuni mm/s, il valore di h rende λ inferiore a qualsiasi possibilità di rilevamento

Principio di Complementarità

Durante il Congresso internazionale di fisica, che si tenne a Como nel 1927 in occasione del centenario della morte di Alessandro Volta, Niels Bohr presentò la propria interpretazione della apparente inconciliabilità della natura corpuscolare ed ondulatoria del mondo subatomico.

La fisica classica, sino ai primi del XX secolo, descriveva i fenomeni meccanici sulla base della dinamica newtoniana mentre i fenomeni ondulatori di origine elettromagnetica, quali luce, onde radio, radiazioni x e gamma., erano descritti compiutamente dalle equazioni di Maxwell.

Lo stato della sperimentazione era giunta, in quegli anni, ad evidenziare aspetti sia corpuscolari delle particelle subatomiche che ondulatori; l'esperimento noto come della "Doppia Fenditura" condotto da Davisson e Germer nel 1927 sancisce operativamente tale dualismo.

La relativa descrizione sulla base di equazioni meccaniche correlanti spazio e tempo (le note equazioni del moto) dovrebbe tenere presente i limiti posti dal principio di Indeterminazione mentre, abbandonando il rigoroso concetto di causalità e descrivendo i fenomeni in base alla pura osservazione, si incorre nella indeterminazione generata dalla perturbazione del fenomeno stesso dovuta alla osservazione.

Infatti "osservare" una particella significa illuminarla; tanto più precisa è la misura di posizione tanto più ridotta deve essere la lunghezza d'onda della radiazione che la illumina.

La particella deve trovarsi tra due creste d'onda affinché, nota la lunghezza d'onda, si possa individuare la sua posizione; per la nota equazione di Planck

$$E = h/\lambda$$

(con E = energia e λ = lunghezza d'onda) colpire la particella con energia E , energia tanto più elevata quanto migliore è la determinazione della posizione, significa perturbare la sua quantità di moto che assume quindi un valore indeterminato.

Il Principio di Complementarità assume, unitamente alla Equazione di Schrodinger, un paradossale valore ontologico quando spiega la indeterminazione della natura (corpuscolare od ondulatoria) con l'esistenza di valori multipli della realtà.

Non è possibile, in un solo esperimento, stabilire la natura delle particelle subatomiche per la ragione che sussistono contemporaneamente entrambe le nature (Principio di complementarità); i due aspetti, corpuscolare e ondulatorio, non possono essere osservati contemporaneamente in quanto escludentisi a vicenda.

Principio di Sovrapposizione e Funzione d'onda

L'equazione del moto, in Fisica Classica, è una relazione matematica tra le coordinate spaziali di un corpo in movimento ed il tempo; molto più banalmente essa indica dove trovasi il corpo in moto in ogni momento.

In Meccanica Quantistica il Principio di Indeterminazione e quello di Complementarità rendono tale equazione non più deterministica bensì probabilistica.

Nel 1926 Erwin Schrodinger è docente di fisica alla Università di Zurigo ed è esattamente in quell'anno che pubblica negli Annalen der Physik lo scritto "*Quantisierung als Eigenwertproblem*" dove è descritta in termini probabilistici l'evoluzione temporale di un sistema quantistico.

La soluzione dell'equazione di Schrodinger, definita "Funzione d'onda stazionaria" descrive lo stato istantaneo del sistema mentre l'equazione spaziotemporale descrive la sua evoluzione nel tempo..

In ordine alla sua linearità esistono infinite funzioni d'onda che differiscono tra loro per un solo fattore moltiplicativo. e se Ψ_1 e Ψ_2 sono entrambe soluzioni dell'equazione lo è anche :

$$\Psi = a \Psi_1 + b \Psi_2$$

Agli inizi del 900 il modello atomico standard era quello proposto da Ruthenford a seguito degli esperimenti di Hans Wilhelm Geiger e Ernest Marsden del 1909.

Esso prevedeva la concentrazione della massa atomica nel nucleo, l'esistenza dei neutroni atti a giustificare il valore di tale massa, la carica positiva del nucleo con gli elettroni orbitanti su orbite circolari; in sintesi un modello di derivazione astronomica. Anche volendo ignorare il macro problema della emissione di radiazione elettromagnetica (prevista dalle equazioni di Maxwell per un elettrone soggetto ad accelerazione centripeta) che, generando perdita di energia, avrebbe condotto l'elettrone a precipitare con orbita a spirale sul nucleo in pochi nanosecondi, il modello di Ruthenford non corrispondeva alla equazione del moto prevista da Schrodinger e, contraddiceva le equazioni di Maxwell.

Il moto degli elettroni poteva essere descritto solo in forma probabilistica; ossia erano ugualmente probabili infinite orbite comprese in una regione dello spazio a forma di guscio Sferico, cioè un orbitale elettronico e solo alcuni orbitali erano concessi in ragione della loro energia.

Ciò permise una descrizione accurata e corrispondente ai risultati sperimentali, della struttura degli atomi leggeri.

Ciò che riveste interesse fondamentale importanza è la coesistenza, con uguale

probabilità, di realtà diverse quali le orbite elettroniche o i diversi stati di un sistema subatomico e soprattutto, la realtà dello stato derivante dalla loro sovrapposizione

Entanglement quantistico e gatto di Schrodinger

Una derivazione concettuale dei principi di Indeterminazione, Complementarità e dell'equazione di Schrödinger comporta l'accettazione di realtà multiple coesistenti in un medesimo sistema fisico.

Solo l'osservazione può portare al collasso della funzione d'onda in uno solo degli stati possibili.

Nel 1935, in occasione della pubblicazione del paradosso EPR da parte di Einstein,

Schrodinger propose il paradosso noto come “Il Gatto di Schrodinger”. In esso viene evidenziato come l’interpretazione canonica (Interpretazione di Copenaghen) della MQ ed in particolare del Principio di Sovrapposizione, comporti effetti paradossali quando applicato alla macrofisica del mondo reale.

Un gatto è posto in una scatola con una fiala di gas nervino; il decadimento di un atomo radioattivo comanda un attuatore atto a rompere la fiala; le funzioni d’onda sono $\Psi_1 =$ atomo nello stato ad alta energia e $\Psi_2 =$ atomo a bassa energia post decadimento. Corrispondentemente si ha: gatto vivo e gatto morto.

Prima della apertura della scatola le due Funzioni d’onda sono ugualmente probabili così come la loro combinazione lineare, cioè “gatto vivo + gatto morto” quindi contemporaneamente “gatto vivo e morto”. All’apertura della scatola l’osservazione dello stato fisico del gatto porta al collasso di una delle due funzioni d’onda e quindi ad una sola delle due realtà.

L’Entanglement quantistico è un fenomeno proprio del mondo subatomico, privo di un corrispondente in fisica classica, tale per cui due particelle, ad esempio due fotoni, provenienti dal medesimo fenomeno, ad esempio il decadimento radioattivo di un atomo, posseggono sempre proprietà osservabili identiche in modulo ed opposte in verso indipendentemente dalla località delle particelle.

EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER

La Meccanica quantistica è l’equazione di Schrödinger. Il suo significato fisico, il suo significato ontologico, è demandato alle varie interpretazioni, da quella canonica di tipo probabilistico di Bohr (nota come interpretazione di Copenhagen) alla Many Worlds Interpretation di Hugh Everett III, sino alla interpretazione delle “Variabili nascoste “ di Albert Einstein.

Da ricordare anche la teoria GRW che, eliminando la linearità dell’Equazione originale di Schrödinger, si elimina conseguentemente la sovrapposizione degli effetti cioè la contemporanea esistenza di realtà sovrapposte, nonché la teoria di Wigner nota come “coscienza causa del collasso”.

Obiettivo iniziale di Schrödinger è stato quello di fornire una descrizione analitica formale alle proprietà di propagazione delle onde di De Broglie, ipotizzate nel 1923 nell’ambito della Meccanica Ondulatoria.

Trattandosi di esprimere analiticamente le proprietà di propagazione di un’onda Schrödinger non poteva che prendere avvio dall’equazione generale delle onde (Equazione di D’Alembert) valida per qualsiasi tipo di onda, da quelle elastiche di una corda vibrante, a quelle acustiche in un mezzo aeriforme od a quelle in un liquido.

Tale equazione è, con alcuni accorgimenti, applicabile anche alle onde elettromagnetiche. Benché ai tempi di D’Alembert (1717-1783) il problema di propagazione delle onde elettromagnetiche non si fosse ancora posto, successivamente la propagazione nell’Etere giustificò l’applicazione della Equazione d’Onda anche al Campo Elettromagnetico. L’equazione di Schrödinger consente di dotare di significato matematico l’affermazione che solo alcuni orbitali elettronici sono ammessi in funzione della loro energia.

Il problema della congruenza del modello atomico di Rutherford con l'elettromagnetismo classico (la perdita di energia per accelerazione centripeta degli elettroni in rotazione rispetto al nucleo) portò Niels Bohr a proporre, nel 1913, un nuovo modello atomico che ammetteva la quantizzazione dell'energia e l'esistenza di orbitali elettronici stabili.

Lo stesso Schroder propose, tra gennaio e settembre 1926, in ben 6 articoli pubblicati su Annalen der Physik, una correlazione tra la quantizzazione dell'energia degli elettroni e gli auto valori dell'equazione di Schrodinger concludendo che solo le soluzioni dell'equazione di Schrodinger che soddisfano la relazione $\nabla^2(\Phi) = -E \Phi$ rappresentano il moto di elettroni su orbite stabili e, poichè la energia E è quantizzata dalla relazione di Planck, solo alcuni orbitali sono ammessi.

ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA

L'esperimento della doppia fenditura è stato fondamentale per evidenziare e dimostrare sperimentalmente la dualità onda-particella sia nella materia che nella radiazione elettromagnetica, così come prevista da De Broglie ed, indirettamente, dalla equazione di Schrodinger.

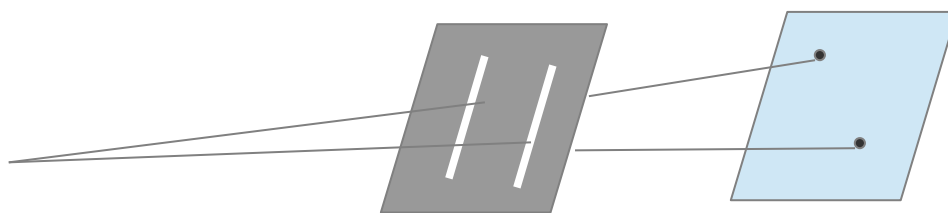
La natura della luce è stata, sin dalla antichità, un problema ontologico cui si dedicarono filosofi quali: Pitagora, Tolomeo, Euclide ed Aristotele con teorie che spaziano dai "raggi visuali" aventi natura materiale a teorie che configurano la luce come un "quinto elemento" dopo acqua, aria, terra e fuoco (Aristotele).

Lo stesso Newton, in Optikcs 1704, definisce la luce come un "fascio di corpuscoli elementari" aventi massa propria, avallando in tal modo la Teoria Corpuscolare mentre Huygens opta per la Teoria Ondulatoria in "Teorie de la Lumiere" 1690.

Il susseguirsi degli esperimenti (Young 1801 per la teoria ondulatoria, Compton 1922, Einstein 1905, e Millikan 1916 per la teoria corpuscolare) non fanno altro che rendere ancora più incerta la vera natura della luce.

L'esperimento della doppia fenditura viene condotto sullo schema del classico esperimento con cui Young aveva evidenziato interferenza luminosa e, quindi, natura ondulatoria della luce.

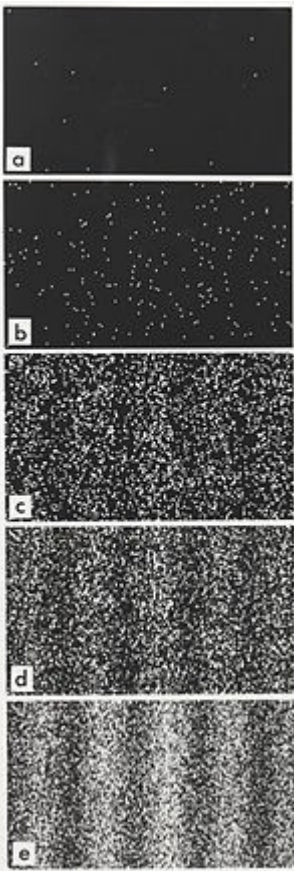
Tra una sorgente luminosa e una lastra fotografica ad alta sensibilità, viene posta una barriera opaca con due fenditure parallele.



La sorgente luminosa è a bassa intensità così da poter emettere un solo fotone per volta. L'esperimento viene condotto anche con elettroni, quindi con corpuscoli dotati di massa propria.

Inizialmente le immagini fotografiche mostrano singoli punti concentrati nella zona retrostante le due fenditure a dimostrazione del comportamento corpuscolare della

radiazione, ma, dopo un consistente numero di fotoni (o elettroni) inviati l'immagine risulta distribuita non più secondo le leggi della dinamica ma rispettando le classiche immagini d'interferenza, proprie di una radiazione ondulatoria.



Da wikipedia

Immagini ottenute con 10, 200, 6000, 40,000, 140.000 elettroni

La interpretazione più convenzionale, logica, immediata e banale è che i singoli lanci di particelle si distribuiscano casualmente tra le due fenditure generando un massimo in prossimità delle stesse a una densità via via decrescente tra i due massimi.

Ciò contraddice le leggi della dinamica; in assenza di interazione elettrone-elettrone (o fotone-fotone) avvenuta post passaggio fenditure la traiettoria delle particelle non può essere che rettilinea. Interessante anche notare che le particelle sono emesse singolarmente e, conseguentemente, non possono esservi interazione tra le stesse ne ante ne post passaggio tra le fenditure.

E non solo, le fenditure sono due e le zone ad alta densità (frange d'interferenza) sono molteplici in antitesi con ogni tipo di interpretazione corpuscolare.

Per contro il comportamento risulta perfettamente coerente con quello di una radiazione ondulatoria dove le creste d'onda si sommano generando maggiore concentrazione.

Infine la verifica sperimentale tendente ad identificare attraverso quale fessura è passata una particelle ha mostrato un comportamento tale da mascherare la sua vera natura comportandosi sempre in modo da apparire corpuscolare se l'esperimento è prefissato per rilevare frange d'interferenza od ondulatorio in caso contrario.

Ciò in perfetta aderenza con il Principio di Complementarità.

SOVRAPPOSIZIONE AUTOSTATI

La più volte citata esistenza di realtà sovrapposte, magistralmente illustrata dal famoso Paradosso del gatto di Schrodinger, deriva dalla linearità della funzione d'onda che ammette più soluzioni e quindi anche la loro combinazione lineare.

L'Equazione di Schrodinger è una rielaborazione di quella di D'Alembert ma atta a considerare la casualità generata dal principio di indeterminazione.

Quindi la sovrapposizione di stati è insita nella stessa equazione delle onde che, per semplicità espositiva, viene riferita ad un'onda monodirezionale monocromatica assumendo la forma :

$$\partial^2\Phi/\partial t^2 = c^2 \cdot \partial^2\Phi/\partial x^2$$

e la cui soluzione è: $\Phi(x,t) = F(x+ct) + G(x-ct)$ essendo c la velocità di propagazione dell'onda.

F e G sono funzioni generiche che, per onde armoniche, possono assumere la forma di funzioni trigonometriche cioè: $\Phi(x,t) = A \cos(x+ct) + B \sin(x-ct)$ dove $B \sin(x-ct)$ corrisponde ad un'onda regressiva, cioè propagantesi dall'infinito verso la sorgente, quindi fisicamente inammissibile..

L'equazione si riduce quindi a : $\Phi(x,t) = F(x+ct)$ che soddisfa l'equazione di D'Alembert

$$d\Phi/dx = d \cos(x+ct) = -\sin(x+ct) \qquad d\Phi/dt = d \cos(x+ct) = -\sin(x+ct) \cdot c$$

$$d^2\Phi/dx^2 = -\cos(x+ct) \text{ identica salvo } c^2 \text{ alla } \rightarrow \quad d^2\Phi/dt^2 = -\cos(x+ct) \cdot c^2$$

Ma anche altre funzioni non trigonometriche sono soluzione dell'equazione delle onde; ad esempio la funzione radice quadrata :

$$\Phi(x,t) = \sqrt{(x+ct)} = (x+ct)^{1/2}$$

la verifica è immediata Infatti:

$$\frac{\partial \sqrt{(x+ct)}}{\partial x} = \frac{1}{2}(x+ct)^{-1/2} \qquad \frac{\partial \sqrt{(x+ct)}}{\partial t} = \frac{1}{2}c(x+ct)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial^2 \sqrt{(x+ct)}}{\partial x^2} = -\frac{1}{4}(x+ct)^{-3/2} \qquad \frac{\partial^2 \sqrt{(x+ct)}}{\partial t^2} = -\frac{1}{4}c^2(x+ct)^{-3/2}$$

Le due ultime espressioni sono identiche a meno del coefficiente c^2 come da equazione di D'Alembert.

Quindi sia $\cos(x+ct)$ che $\sqrt{(x+ct)}$ sono soluzioni della equazione delle onde così come lo è la loro combinazione lineare.

In identico modo la Equazione di Schrodinger ammette infinite soluzioni cui corrispondono infinite traiettorie del corpo subatomico considerato o, trasferendo paradossalmente la situazione al mondo macroscopico, le infinite vite del gatto di Schrodinger.

INTERPRETAZIONI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Sono diverse le possibili interpretazioni del significato reale della MQ ed, ancor oggi, non vi è unanimità circa quale sia da considerare "ufficiale" .

In realtà la Fisica Classica fonda la propria enunciazione matematica su numeri reali e su funzioni a due o tre dimensioni che assumono un ben preciso significato nel mondo reale; pertanto non appare necessaria alcuna interpretazione.

Per contro la MQ fonda la sua trattazione su di una matematica altamente astratta in cui compaiono spazi di Hilbert, operatori vettoriali e numeri complessi; da tale deintuitività deriva la necessità di fornirne "Interpretazioni".

Interpretazione probabilistica (Interpretazione di Copenaghen)

Le interpretazioni della MQ concernono di fatto quale natura sia da attribuire ai fenomeni subatomici. Il Realismo Einsteiniano attribuisce sia ai fenomeni che alle "cose" un realtà oggettiva , indipendente dall' osservatore e dalla osservazione.

"Un'intelligenza che, ad un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi."
Così scriveva Laplace in "Saggio sulle probabilità" (1814).

La sua visione strettamente determinista della realtà non si limitava alle immense strutture dell'Universo, come stelle e pianeti, ma presupponeva che dinamica e gravitazione di tipo newtoniano governassero anche i più piccoli elementi della natura quali molecole ed atomi.

E' questo il mondo che descrive Laplace che, ironia del caso, in " Teoria analitica delle probabilità " (1812) pone le basi per il moderno Calcolo della Probabilità.

In realtà nella posizione filosofica di Laplace non vi è alcuna contraddizione; egli si rende conto che la conoscenza degli infiniti parametri necessari per descrivere la realtà di un fenomeno all'istante iniziale va oltre le capacità umane e, sebbene necessaria per conoscere la evoluzione futura od il lontano passato, deve essere abbandonata.

E' allora necessario ricorrere alla statistica ed alla probabilità senza peraltro inficiare il concetto ontologico di realtà unica e vera che esiste indipendentemente dalla nostra possibilità di conoscerla.

E' di basilare importanza riconoscere la differenza tra la visione quantistica della realtà che, nella interpretazione di Copenaghen ovvero di Bohr, di Heisenberg e di Schrodinger, non è conoscibile poiché esistono contemporaneamente più realtà diverse rispetto alla visione probabilistica di Laplace dovuta alla sola incapacità umana di gestire una massa enorme di dati deterministici.

Per Einstein "Dio non gioca a dadi" significa che Egli ci ha donato un mondo ed uno solo, così come è, indipendentemente dalla nostra capacità di descriverlo matematicamente in modo rigoroso e non equivoco, cioè con leggi deterministiche.

Per contro, l'interpretazione probabilistica vede i risultati delle misurazioni di variabili coniugate come imprevedibili poiché è la misura stessa a determinarne il risultato interagendo con il fenomeno. E' l'atto della misura a generare il collasso della funzione d'onda verso uno dei numerosi valori permessi in modo sostanzialmente casuale.

L' interpretazione di Copenaghen è ritenuta, per la Fisica, " interpretazione ufficiale" sebbene presenti alcune problematiche irrisolte: l'abbandono del Realismo la cui evidenza è palese per i macro- fenomeni del mondo reale e il limite di separabilità tra fisica classica e fisica quantistica.

Tale ultimo problema non è peraltro tipico della MQ ma era già stato posto, sebbene con altra valenza ontologica, sino dal IV Sec. a.C. da Eubulide di Mileto ed è noto come paradosso del Sorite.

Dato un cumulo di sabbia se ne tolga un granello: il cumulo rimane tale. Procedendo analogamente ci si domanda quando il mucchio cessi di essere tale per divenire solo un granello di sabbia.

E benché per Eubulide il problema sia solo semantico mentre per la MQ esso sia ontologico, rimane aperto il problema di individuare quale sia la dimensione dei corpi o dei fenomeni per i quali sia valida la Fisica quantistica (probabilistica) anziché la Fisica classica (deterministica).

Interpretazione a Varibili Nascoste

Nel già più volte citato lavoro del **1935** di **Einstein, Podolsky e Rosen** venivano poste tre condizioni affinché una Teoria scientifica potesse essere ritenuta valida: Realismo, Località, Coerenza.

Ecco alcune frasi dello stesso Einstein riportate nella sua "Autobiografia scientifica"

"Esiste qualcosa come lo stato reale di un sistema fisico, che esiste oggettivamente indipendentemente da ogni osservazione o misura, e che può in linea di principio essere descritto usando i mezzi di espressione della fisica."

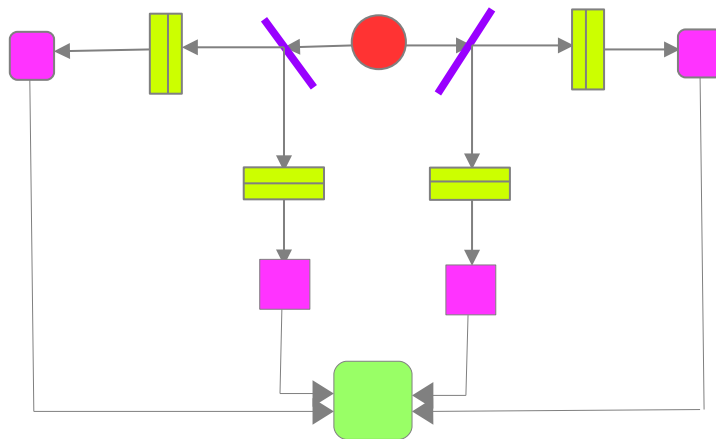
"Tutti gli uomini, compresi i teorici quantistici, effettivamente tengono fermamente a questa tesi sulla realtà, finché non discutono i fondamenti della teoria quantistica ... Io non mi vergogno di mettere il concetto di stato reale di un sistema al centro stesso della mia meditazione."






« La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti molto lontani nello spazio: un'influenza esterna su A non ha un'influenza diretta su B; ciò è noto come il Principio di Azione Locale, che è usato regolarmente solo nella teoria di campo. Se questo assioma venisse ad essere completamente abolito, l'idea dell'esistenza di sistemi quasi-chiusi, e perciò la postulazione delle leggi che possono essere verificate empiricamente nel senso accettato, diverrebbe impossibile. »

Per Einstein la MQ, così come configurata nella interpretazione canonica di Copenaghen, non possedeva né Realismo né Località poiché ammetteva che fosse la misurazione a stabilire quale realtà accettare tra le infinite possibilità offerte dalla Equazione di Schrodinger e perché l'entanglement ammetteva l'interazione non locale tra due particelle subatomiche. Quindi solo ammettendo l'esistenza di variabili ignote (che tramite sperimentazione ancora da scoprire potevano essere rivelate) poteva essere eliminata la casualità quantistica ripristinando il determinismo dei fenomeni ed il realismo della natura.

Poi, tra il 1981 ed il 1982 Alain Aspect verifica sperimentalmente l'entanglement quantistico tra i fotoni emessi dal decadimento di un atomo di calcio.

Lo schema è essenzialmente quello di figura seguente:



- Sorgente di fotoni 
- Specchi semitrasparenti 
- Polarizzatori 
- Convertitori foto elettronici 
- Contatore di coincidenza 

L'esperimento è consistito nel verificare se gli elettroni emessi lungo il ramo destro (orizzontale) e polarizzati verticalmente avessero corrispondenza con i fotoni emessi lungo il lato sinistro orizzontale o verticale del polarizzatore.

Perché il fenomeno sia coerente con le ipotesi della MQ i due fotoni emessi contemporaneamente dalla medesima sorgente devono avere polarizzazione opposta; cioè i fotoni del lato destro (polarizzazione verticale) devono essere in coincidenza con i fotoni del lato sinistro verticale, cioè quelli dotati di polarizzazione orizzontale.

Poiché i due specchi semitrasparenti nonché i relativi polarizzatori vennero posti ad alcune decine di metri di distanza non vi fu alcuna *azione causale a distanza*, ovvero non fu l'atto di misura sul primo a causare il comportamento del secondo poiché tale azione avrebbe dovuto essere istantanea in contrasto con i limiti posti dalla Relatività Generale.

Inoltre, in alcuni esperimenti successivi fu possibile variare l'angolo di polarizzazione DOPO che i fotoni erano stati emessi, dando luogo ad una ipotetica trasmissione d'informazione tra i due fotoni retroattiva nel tempo.

Inoltre, studiando la polarizzazione su angolazioni intermedie, rispetto a quelle considerate, Bell ha dimostrato che realismo e località imporrebbero dei limiti alla correlazione prevista dalla meccanica quantistica, per contro previsioni in completo accordo con la teoria quantistica implicano la rinuncia ad almeno una delle due condizioni di realismo e località.

I limiti imposti dalle prove di Aspect sono noti come disuguaglianze di Bell e sono tali da fornire con elevata probabilità una prova di validità della interpretazione canonica della MQ, negando (comunque con una determinata incertezza) validità alla ipotesi delle Variabili Nascoste.

Interpretazione di Bohm

La componente strettamente filosofica della interpretazione quantistica di Bohm è racchiusa nella seguente frase:

“Il concetto di totalità indivisa nega l’idea classica che il mondo sia analizzabile in parti separate ed esistenti autonomamente. Abbiamo invertito la classica nozione per cui le “parti elementari” indipendenti del mondo sono la realtà fondamentale e i vari sistemi sono solo arrangiamenti e forme particolari contingenti di queste parti. Piuttosto, noi diciamo che le interconnessioni quantistiche inseparabili dell’intero universo sono la realtà fondamentale e che le parti, anche se si comportano come relativamente indipendenti, sono solamente forme contingenti e particolari di questa totalità”. (David Bohm, *On the Intuitive Understanding of Nonlocality as Implied by Quantum Theory, Foundations of Physics, vol 5, 1975*).

In antitesi con l’interpretazione probabilistica di Bohr, dove una particella subatomica ha una doppia esistenza (corpuscolare ed ondulatoria) e dove solo la misura può evidenziare una ed una sola di tali esistenze attraverso il collasso della Funzione d’Onda, per Bohm e De Broglie *“... l’elettrone è una particella reale, ma possiede anche un campo reale attorno. La particella non è mai separata da tale campo e il campo influisce sul movimento della particella in certi modi”* (Bohm). Già nel 1927, durante il V Congresso Solvay, De Broglie aveva presentato una teoria prevedente l’accoppiamento di ogni particella ad un’onda “pilota”.

Secondo il fisico francese non esiste alcun dualismo onda -corpuscolo poiché entrambe le nature sono reali e la propagazione della particella è determinata dall’onda associata assolutamente reale che durante la sua propagazione la trascina lungo una traiettoria ben definita. Per de Broglie la particella non deve essere pensata distinta dalla sua onda ma essa rappresenta una singolarità di un campo reale U avente la medesima fase della soluzione ψ di Schrodinger, ma un’ampiezza tale da presentare una singolarità nella posizione in cui trovasi la particella. Le due funzioni u e ψ devono essere soluzioni della medesima equazione di Schrodinger.

La interpretazione di Bohm fornisce una spiegazione teoricamente coerente ad alcune problematiche non completamente risolte dalla interpretazione canonica, a partire dal comportamento evidenziato nell’esperimento della doppia fenditura

dove la coesistenza di particella ed onda pilota porta alla coesistenza di rilievi sia puntiformi che da frange d'interferenza.

Parallelamente cade la necessità di ipotizzare il collasso della funzione d'onda dovuta alla misurazione dato che la stessa viene effettuata su due entità reali quali corpuscolo ed onda pilota.

Il problema dell'entanglement tra particelle correlate è superato dalla ipotesi che la misura sulla particella A comporta una distribuzione del relativo risultato a livello universale, sia pure a differenti livelli d'intensità, e quindi coinvolga necessariamente anche la particella B.

Lo stesso Bohm affermava che le particelle correlate cioè entangled, che vediamo distinte ma interconnesse dal Principio di Complementarità sono in realtà una particella unica ad un livello di realtà più profondo.

Un banale esempio può illustrare meglio il concetto: si osservi un oggetto da angolazioni diverse ottenendo due figure correlate ma apparentemente indipendenti; la correlazione è garantita dalla coerenza dei movimenti delle due figure. Ad un primo livello di osservazione le due figure appaiono reali, distinte e correlate mentre ad un livello più profondo esse non sono altro che la visione del medesimo oggetto sotto diversi punti di osservazione. (FIG.F).

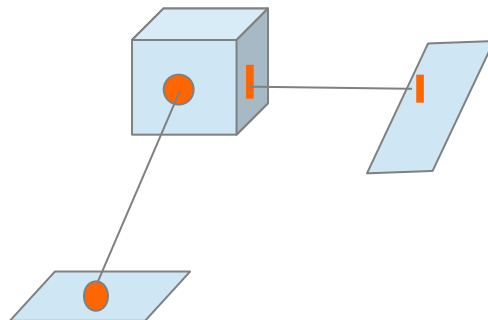


FIG.F

Interpretazione "Coscienza causa del collasso"

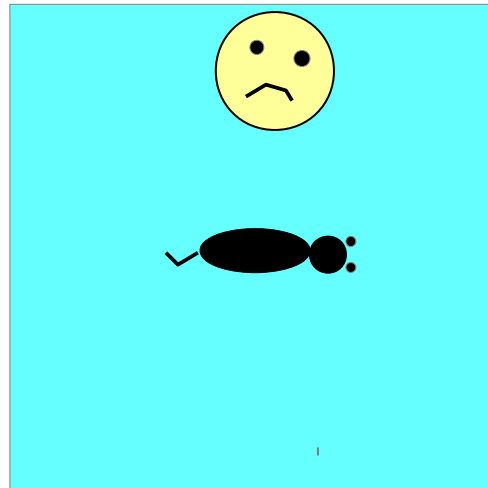
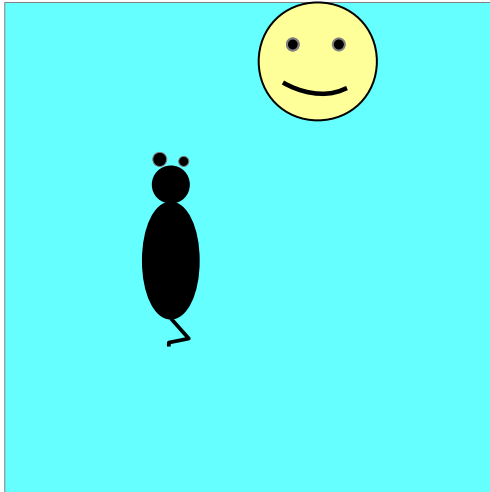
Tale interpretazione ha come obiettivo dare una giustificazione teorica al paradosso ideato da Eugene Wigner negli anni 30.

Tale paradosso prende spunto da quello di Schrodinger relativo al "gatto vivo/gatto morto" ed ipotizza che in un laboratorio sia posta la scatola contenente il "gatto di Schrodinger" ed un amico di Wigner definito appunto "amico di Wigner".

Si tratta quindi di due sistemi interagenti (in sostanza un insieme Laboratorio costituito da Amico di Wigner+ Scatola con gatto) e di ed un suo sottoinsieme costituito da Scatola + gatto).

Per Wigner, esterno al laboratorio, il sistema si trova in una sovrapposizione di stati; precisamente: (gatto vivo+amico felice)/(gatto morto/amico triste), mentre per il sottoinsieme (Scatola + gatto) la sovrapposizione di stati è data da ("vivo/gatto morto").

Per la MQ canonica il gatto si trova in una sovrapposizione di stati (morto/vivo) tale che solo l'osservazione, attraverso il collasso della Funzione d'Onda, può dirimere (ciò è valido per il sottoinsieme (Scatola + gatto) dove l'osservatore è l'Amico di Wigner); mentre per l'insieme più ampio, cioè (Amico di Wigner + Scatola con gatto), ossia per il



Laboratorio, la sovrapposizione di stati è (Gatto vivo/Amico felice)/(Gatto morto/Amico triste), ove l'osservatore è lo stesso Wigner.

Il collasso del sistema Laboratorio può avvenire solo all'atto della osservazione da parte di Wigner ma, ed in ciò sta il paradosso, il sistema (Scatola + gatto) può essere già collassato a causa della osservazione dell'Amico di Wigner e, conseguentemente, il collasso del sistema Laboratorio è avvenuto prima dell'osservazione da parte di Wigner.

Ciò risulterebbe in conflitto con l'assioma che il collasso (in questo caso del sistema Laboratorio) possa avvenire solo a seguito di osservazione.

La interpretazione "coscienza causa del collasso" ipotizza sia l'osservazione del primo Osservatore Cosciente a provocare il collasso della Funzione d'Onda, escludendo quindi che esso possa venire generato dalle misurazioni strumentali; poichè tale posizione risulta in contrasto con l'esperienza che vede misurazioni strumentali assolutamente valide, viene ipotizzata una sorta di entanglement tra coscienza e strumento.

Tale teoria appare come non-scientifica, dato che non è verificabile e che introduce in fisica elementi non necessari, mentre la questione se l'intervento della mente in fisica sia o meno necessaria rimane aperta.

Interpretazione statistica

Tale interpretazione considera la funzione d'onda di Schrodinger come una pura entità matematico probabilistica senza alcuna valenza reale. Essa può essere applicata a sistemi complessi ma non a singole unità subatomiche essendo in grado di descrivere il comportamento statistico di un sistema di molteplici unità, quali elettroni o fotoni.

La teoria ha quindi le caratteristiche di Realismo e Località richiesta da Einstein affinché una Congettura possa essere definita Teoria fisica.

A tale proposito lo stesso Einstein scriveva: *"Il tentativo di concepire la descrizione quantistica teorica come la descrizione completa dei sistemi individuali porta a interpretazioni teoriche innaturali, che diventano immediatamente non necessarie se si accetta che l'interpretazione si riferisca ad insiemi di sistemi e non a sistemi individuali"*.

Un esempio riferito al comportamento statistico di un sistema complesso a molteplici unità è quello elaborato da J.C.Maxwell e, soprattutto, a L.E.Boltzmann sul finire del XIX secolo

e riferito alle molecole di un gas.

Tale modello è noto come Termodinamica Statistica ed essendo una tipica teoria classica soddisfa i requisiti di Realismo e Località.

Un modello fisico su macro elementi è stato quello sviluppato nel 1907 da Paul Ehrenfest con la moglie Tatiana, Modello che porta il suo nome. Obiettivo era quello di sottoporre a validazione sperimentale la teoria statistica di Ludwig Boltzmann, di cui Ehrenfest era stato allievo.

Studiare sistemi complessi composti da quantità notevolissime di elementi con metodi statistico probabilistici servì a Boltzmann come strumento per spiegare il comportamento di sistemi complessi molto popolati.

Siano:

- A e B due contenitori
- N il numero di sfere identificate con numeri progressivi da 1 ad N
- N_A e N_B il numero di sfere contenute rispettivamente in A e in B

Naturalmente sarà: $N_A + N_B = N$

Sia fornita una sequenza di numeri casuali compresi tra 1 ed N, (ad esempio estraendo casualmente da un ulteriore contenitore dei biglietti numerati da 1 ad N) e spostando la sfera avente tale numero dal contenitore in cui si trova nel contenitore restante.

- K il numero di operazioni di estrazione e spostamento sfere

Dall'Analisi Combinatoria si ricava che:

- W = numero delle combinazioni generante la distribuzione $\{N_A / N_B\}$
- $\{N_A / N_B\}$ = distribuzione delle sfere N_A in A ed N_B in B
- $W = \frac{N!}{N_A! N_B!}$

L'entropia termodinamica è data dalla famosa equazione di Boltzmann:

- $S = k \log \frac{N!}{N_A! N_B!}$
- k = costante di Boltzmann = $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Essa è pertanto vista come una funzione di W, cioè del numero di microstati in grado di generare la $\{N_A / N_B\}$.

Benché una trattazione completa e dotata di esemplificazioni numeriche sia reperibile in ogni scritto di Termodinamica Statistica e di Analisi Combinatoria, un cenno banalmente elementare può essere d'aiuto alla comprensione.

Sia $N = 4$ ($\alpha\beta\gamma\delta$) ed i contenitori di cui al Modello siano A e B.

Le 4 sfere possono essere distribuite in A e B secondo i seguenti 5 Macrostat $\{N_A/N_B\}$

A	B	
//	●●●●	$\{0/4\}$
●	●●●	$\{1/3\}$
●●	●●	$\{2/2\}$
●●●	●	$\{3/1\}$
●●●●	//	$\{4/0\}$

cui corrispondono le seguenti possibili combinazioni di elementi (Microstati)

$\{0/4\}$ $\{1/3\}$ $\{2/2\}$ $\{3/1\}$ $\{4/0\}$

A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0	$\alpha\beta\gamma\delta$	α	$\beta\gamma\delta$	$\alpha\beta$	$\gamma\delta$	$\beta\gamma\delta$	α	$\alpha\beta\gamma\delta$	0
		β	$\alpha\gamma\delta$	$\alpha\gamma$	$\beta\delta$	$\alpha\gamma\delta$	β		
		γ	$\alpha\beta\delta$	$\alpha\delta$	$\beta\gamma$	$\alpha\beta\delta$	γ		
		δ	$\delta\beta\gamma$	$\beta\gamma$	$\alpha\delta$	$\delta\beta\gamma$	δ		
				$\beta\delta$	$\alpha\gamma$				
				$\gamma\delta$	$\alpha\beta$				
1		4		6		4		1	
		Totale = 16 Microstati							
					$= 2^4$				

In generale:

$$\text{Totale Microstati} = 2^N$$

La probabilità che si verifichi un Macrostatto qualsiasi corrisponde al numero dei Microstati che lo possono generare diviso il numero totale di Microstati.

Ad esempio la probabilità che si verifichi:

- il Macrostatto $\{1/3\}$ è $4/16 = 25\%$
- il Macrostatto $\{0/4\}$ è $1/16 = 6\%$
- il Macrostatto $\{2/2\}$ è $6/16 = 37,5\%$
- il Macrostatto $\{4/0\}$ è $1/16 = 6\%$
- il Macrostatto $\{3/1\}$ è $4/16 = 25\%$

In perfetto accordo con la Termodinamica classica si verifica che lo stato avente maggiore probabilità è quello cui corrisponde una equiripartizione degli elementi tra le due zone A e B; cioè il Macrostatto $\{2/2\}$.

Ciò che in questa sede è però interessante evidenziare è che la sperimentazione condotta con il Modello di Eherenfest mette in evidenza fluttuazioni della probabilità che uno specifico Microstatto possa verificarsi, fluttuazioni che tendono a diminuire al crescere di N.

Una differenza fondamentale tra il Modello di Ehrenfest e l'interpretazione probabilistica della Meccanica Quantistica consiste nella natura stessa dei fenomeni: la MQ considera la natura delle particelle elementari come casuale (realtà sovrapposte con uguale probabilità) e come semi-deterministiche le macro leggi che governano un loro insieme ad elevata numerosità, mentre il Modello Di Ehrenfest considera le molecole come entità reale aventi natura (e quindi moto) deterministica mentre probabilistico è il comportamento di un loro insieme.

Interpretazione di Bohr

Il sistema di due particelle generate dal medesimo evento quantistico deve essere considerato un sistema unico ed inscindibile, indipendentemente dalla localizzazione delle Particelle.

La funzione d'onda rappresenta lo stato dell'intero sistema e quindi si otterrà un solo stato rappresentato da $\Psi(v+\Delta v; v-\Delta v)$ fluttuante casualmente nello spaziotempo. Non è necessaria l'azione a distanza prevista dal paradosso EPR ottenendosi una interpretazione rispettante il criterio di Località.

Interpretazione a Molti Mondi (Everett)

Anno 1957. Un giovane ricercatore dell'Università di Princeton, Hugh Everett III, nella sua tesi di dottorato avanza una ipotesi straordinaria: non è vero che è reale solo lo stato messo in evidenza dal collasso della funzione d'onda, bensì assumono esistenza reale anche tutti gli stati del sistema che le misure non hanno rilevato, ma che sono intrinsecamente contenuti nella Equazione Schrödinger; tali stati esistono ognuno in un altro **universo**.

Se è reale sia lo stato Ψ_1 che lo stato Ψ_2 nel senso che entrambi rappresentano una possibilità del sistema, ossia ognuno di essi è soluzione dell'equazione di Schrödinger, ogni loro combinazione lineare deve essere non solo possibile ma anche reale. Se lo sperimentatore trova il gatto morto ma esiste anche la possibilità che lo avrebbe potuto trovare vivo (stato possibile e quindi reale) entrambi gli stati coesistono in Mondi Diversi.

Come da Capitolo MECCANICA QUANTISTICA (Assiomi, Principi e Congetture), il Principio di Indeterminazione stabilisce che la misura con precisione illimitata di un parametro di due grandezze tra loro correlate genera indeterminazione proporzionale ad h nella misura dell'altra grandezza. Interessante osservare che anche l'ordine con cui avvengono le misure influenza il risultato.

Infatti siano A e B due grandezze correlate (ad esempio posizione e quantità di moto). Misurando A con infinita precisione risulta totalmente indeterminata B e viceversa; ciò indica che la stessa scelta di quale grandezza misurare per prima influenza il risultato finale, ma la scelta dell'ordine delle misurazioni è a discrezione dell'operatore che, quindi influenza il risultato attraverso la propria volontà

Ne deriva che le osservazioni di un fenomeno, e quindi l'insieme "fenomeno osservato + osservatori", diventano protagonisti dell'evoluzione temporale dei sistemi fisici, cosicché non si può più assumere l'esistenza di una natura senza un osservatore che attivamente la misura.

L'interpretazione Multiuniverso si pone l'obiettivo di evitare che la stessa scelta dell'osservatore possa intervenire nel definire la natura di un fenomeno; infatti tale interpretazione considera fenomeno+osservatore come facenti parte del medesimo sistema (cioè del medesimo Universo) che si evolve in modo deterministico.

In tale ottica l'Universo stesso è governato da leggi deterministiche (ogni soluzione dell'equazione di Schrodinger rappresenta uno stato reale del sistema) e, al momento della osservazione, l'Universo si divide in numerosi Mondi uno per ciascuno dei possibili risultati della misura senza che uno solo di essi divenga reale a seguito del collasso della funzione d'onda (collasso non più necessario).

" L'osservazione è un processo che modifica sempre gli stati dei sistemi misurati, ma adesso, al contrario dell'interpretazione di Copenaghen, i sistemi osservati più gli osservatori evolvono insieme secondo leggi deterministiche che stabiliscono come sono fatti i "singoli mondi", con i loro possibili risultati, e come è strutturata la totalità di essi: l'"universo". Wikipedia

Lo stesso Paradosso del "gatto di Schrodinger" perde la sua valenza antilogica e viene interpretato come "Gatto vivo + osservatore felice" in uno dei due Mondi e "gatto morto + osservatore triste" in un mondo parallelo entrambi reali e coesistenti.

Le soluzioni Ψ_1 e Ψ_2 della Equazione di Schrodinger sono entrambi rappresentative di stati reali del sistema gatto+osservatore ma coesistenti in mondi diversi.

Una diversa versione nota come “suicidio quantistico” venne proposta in maniera indipendente da Hans Moravec nel 1987 e da Bruno Marchal nel 1988, per poi essere ripresa e sviluppata da Max Tegmark nel 1998.

Una pistola carica è in grado di sparare solo al compimento di un evento quantistico (ad esempio il decadimento di un atomo radioattivo) ed è puntata verso uno sperimentatore.

Il decadimento avviene entro un tempo prefissato t con il 50% di probabilità cui corrisponde il 50% di probabilità che la pistola spari e lo sperimentatore muoia.

La visione quantistica convenzionale (classica) della MQ è la seguente: solo la osservazione dell'evento, ovviamente a posteriori, attraverso il collasso della funzione d'onda stabilisce se la pistola ha sparato e lo sperimentatore è morto (50% probabilità) oppure non ha sparato e lo sperimentatore è vivo.

La interpretazione a Molti Mondi vede l'esperimento come segue: l'osservatore viene sdoppiato al momento dell'esperimento; in un mondo la pistola non spara ed egli rimane in vita mentre in un altro mondo la pistola spara ed egli muore.

Il clone vivo può continuare l'esperimento all'infinito poiché in ognuno di essi una copia muore ed una sopravvive

Quindi, da un punto di vista soggettivo, il clone vivo può considerarsi immortale benché ad ogni ripetizione dell'esperimento le copie rimaste in vita si dimezzino senza, per altro, mai annullarsi.

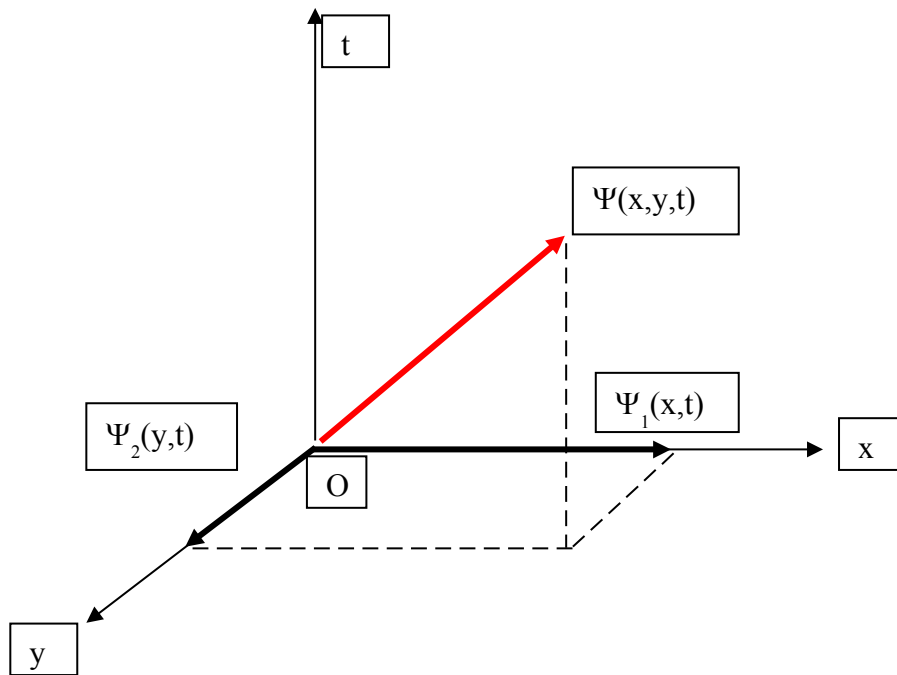
Interpretazione nota come “Decoerenza quantistica”

Un fenomeno ondulatorio, ed in particolare la descrizione fornita da Schrodinger della natura, può essere matematicamente rappresentato da un vettore.

Sia $\Psi(x,y,t)$ il vettore rappresentate la sovrapposizione di stati (onda/ particella) di un corpo; tale vettore deriva dalla composizione di due vettori:

$$\Psi(x,y,t) = \Psi_1(x,t) + \Psi_2(y,t)$$

di cui Ψ_1 rappresentativo della natura corpuscolare e Ψ_2 di quella ondulatoria.



Nel disegno si fa riferimento ad uno spazio Bidimensionale (x,y) affinché $\Psi(x,y,t)$ possa essere rappresentato graficamente.

Peraltro, affinché la composizione vettoriale sia possibile, i vettori Ψ_1 e Ψ_2 devono essere coerenti, cioè devono avere medesima origine (punto O).

Tale condizione, tradotta in termini d'onda significa che Ψ_1 e Ψ_2 devono essere sinfasici.

L'osservazione del fenomeno interferisce con lo stesso causando il collasso di Ψ in Ψ_1 o in Ψ_2 con uguale probabilità. (Interpretazione di Copenaghen)

Nel caso di corpi macroscopici l'interazione con il mondo esterno è immediata a causa dell'enorme numero di componenti elementari coinvolti; il collasso è immediato e comporta la assoluta impossibilità di verifica dello stato di sovrapposizione.

Per contro per particelle sub atomiche l'interazione è dovuta esclusivamente all'atto dell'osservare e , nell'esperimento della doppia fenditura, si genera la possibilità di esistenza di stati sovrapposti.