

IL PARADOSSO EPR

L'entanglement quantistico: definizione, storia e teoria

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

Einstein, Podolsky. Rosen (1935)

dr.ing. Alberto Sacchi

Sviluppo Progetti Avanzati srl- R&D Dept.

ing.sacchi@alice.it

1) NOTA (NOTE)

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, possono apparire sconvolgenti i paradossi generati dalla Meccanica Quantistica.

Ed è proprio impiegando elementari esempi di meccanica classica ed una briciola di logica aristotelica che questo scritto si propone di illustrare il più dirompente e sicuramente il più noto dei paradossi quantistici: il Paradosso EPR.

E 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 la validità.

2) SINTESI (ABSTRACT)

Dal dualismo tra determinismo laplaciano e casualità quantistica nasce il dibattito epistemologico tra Einstein e Bohr e ne consegue l'esperimento mentale oggetto del paradosso EPR. Breve storia dell'evoluzione del pensiero scientifico dalla fisica classica alla meccanica quantistica.

From Laplacian determinism and quantum randomness arises the epistemological debate between Einstein and Bohr and follows the EPR paradox. A brief history of science evolution from classical physics to quantum mechanics.

3) CENNI DI STORIA (BRIEF HISTORY)

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 proprio 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 poi 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 fuoruscita 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.

La disfatta di Einstein è però solo temporanea: nel 1935 la relazione scientifica avente per titolo "*La descrizione quantistica della realtà fisica può ritenersi completa?*" (Paragrafo 5 EPR) ripresenta il problema della Indeterminazione in luce diversa.

4) DETERMINISMO E CASUALITA': (DETERMINISM AND PROBABILITY)

"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.

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica vede la luce nel 1687 a cura della Royal Society ed a spese dell'astronomo Halley.

In esso Isaac Newton propone, mediante tre equazioni della Dinamica ed una equazione gravitazionale, la sua visione del mondo.

Un mondo meccanicamente perfetto, rigidamente retto da Leggi che, note le condizioni dinamiche dell'istante presente, governano il passato così come il futuro.

Non vi è spazio per il caso, per l'imponderabile, per l'aleatorietà.

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.

La condivisione della visione del mondo tra Einstein e Laplace si limita comunque al Principio di Realtà cioè di univocità del reale, ma diverge fundamentalmente sul Principio di Località ossia sulla presenza locale di causa ed effetto.

Nella equazione newtoniana che descrive l'azione gravitazionale non compare il parametro tempo; ciò equivale ad ammettere l'"Azione a Distanza" che tante perplessità ha creato tra i pensatori del XVIII e XIX secolo.

Lo stesso Newton in una lettera a Benteley scriveva : *" Non si può comprendere che la materia bruta ed inanimata possa , senza mediazione di qualche altra cosa che non sia materia, agire su altra materia e modificarla senza mutuo contatto a migliaia di miglia di distanza" .*

Solo a partire dagli inizi del XX secolo, con l'enunciazione della Relatività Speciale (1905), la velocità di propagazione della luce, così come di ogni altro fenomeno, viene stabilita come postulato ad un valore finito pari a (c.a) 300.000.000 m/s.

E con la Relatività Generale (1916) anche le azioni gravitazionali si propagano a velocità finita.

Ecco come il principio di Località, cioè la presenza di causa ed effetto entro il raggio di azione definito dalla luce, entra prepotentemente nella visione einsteiniana del mondo.

Ed ora, onde tener fede all'impegno assunto in 1) PREMESSA, due esempi di Realismo e Località ambientati nel macro mondo reale in cui siamo immersi.

N osservatori O1, O2 ed O3 ...O r...Op,...Oq..... On osservano un oggetto qualsivoglia, ad esempio una rosa (rossa?); da O1 ad Or sono visivamente normali, Op è daltonico ed Oq astigmatico.

La descrizione dell'oggetto differisce da osservatore ad osservatore: da O1 ad Or la descrizione dell'oggetto è "una rosa rossa" , per Op è un "fiore grigio" e per Oq è un fiore "dai contorni frastagliati".

Il paradigma esistente stabilisce assiomaticamente che l'oggetto sia realmente una "rosa rossa" sulla scorta della descrizione della maggioranza degli osservatori; ma cosa sia *realmente* non può derivare dalla sola osservazione.

Il Realismo ammette comunque l'esistenza di una "rosa reale" avente caratteristiche univoche e rigorose, indipendentemente dalla valutazione degli osservatori ed è compito della Scienza individuarle.

Durante un burrascoso temporale si verificano numerosi lampi seguiti, a breve distanza, dai relativi tuoni.

Essi sono l'effetto ritardato della violenta espansione dell'aria a seguito della elevatissima temperatura della scarica elettrica.

Quindi: causa = lampo ; effetto = tuono

La distanza temporale tra causa ed effetto è correlata alla velocità di propagazione del suono in atmosfera.

Affinché si possa stabilire tale rapporto la distanza non può superare il raggio d'azione dell'onda sonora senza attenuazione tale da rendere impercettibile il suono; cioè lampo e tuono debbono essere localmente prossimi.

Questo è il concetto di Località.

Per Einstein Realismo e Località sono condizioni imprescindibili per la completezza di una Teoria Scientifica.

5) I PRINCIPI FONDANTI LA MECCANICA QUANTISTICA. (QUANTUM MECHANICS PRINCIPLES)

5.1) 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)

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{dmv}{dt}$$

Il Principio di Indeterminazione fu enunciato da Werner Heisenberg nel 1927; esso 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 :

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

Ed ora due parole su “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.

Ora una operazione complessa: differenza tra ogni valore misurato ed X elevata al quadrato, somma di tutte tali differenze al quadrato ed infine radice quadrata

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

Il Principio di Indeterminazione ha una valenza prevalentemente epistemologica, 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 dalla palla in x_0 , si rilevi il tempo al passaggio in $x+\Delta x = t_1$; viene definito 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.

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 indecidibilità è insita nella natura stessa dei fenomeni.

5,2) 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 decritti 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.

5.3) 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 Werner Karl Heisenberg 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 è definita "Funzione d'onda"; essa descrive lo stato istantaneo del sistema mentre l'equazione descrive la sua evoluzione temporale.

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 anche:

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

Agli inizi del 900 il modello atomico standard era quello proposto da Rutherford 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) tale radiazione, generando perdita di energia, avrebbe condotto l'elettrone a precipitare con orbita a spirale sul nucleo in pochi nanosecondi, il modello di Rutherford non corrispondeva alla equazione del moto prevista da Schrodinger.

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; un orbitale elettronico.

E, senza addentrarci in questa sede nella complessa descrizione matematica degli autovalori della equazione di Schrodinger, 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 per l'analisi del Paradosso EPR 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

5.4) Entanglement quantistico e gatto di Schrodinger

Una derivazione concettuale dei principi di Indeterminazione, Complementarità e dell'equazione di Schrodinger 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 Ψ_1 = atomo nello stato ad alta energia e Ψ_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.

6) PARADOSSO EPR (EPR PARADOX)

Sono passati solo otto anni dalla disfatta di Einstein nel contenzioso concettuale con Bohr (riferimento pag 3) circa Determinismo e Casualità.

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 (riferimento pag 4); questo il pensiero di Einstein; è la MQ auto consistente?

Nel rispetto dell'impegno espresso in "1) Premessa" un esempio riferito a fenomeni di Fisica Classica, può essere d'aiuto nonostante l'entanglement non vi appartenga.

Due sfere metalliche identiche, aventi uguali dimensioni, massa e 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 $m(v + \Delta v)$ mentre per sfera 2 essa sarà $m(v - \Delta v)$.

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

L'osservatore O1 solidale con la sfera 1 misura $m(v + \Delta v)$ 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.

L'evoluzione dello stato fisico della sfera 2 è descritto dalla equazione di Schrodinger.

Tale affermazione è naturalmente falsa; la cinematica di una sfera di massa m è data dalla sua equazione del moto strettamente deterministica; l'extrapolazione al mondo macroscopico si rende necessaria per esemplificare macroscopicamente il paradosso EPR.

La soluzione di detta equazione è una serie infinita di funzioni d'onda ognuna delle quali corrisponde ad un valore della quantità di moto della sfera 2.

Ma la sua quantità di moto è predeterminata dalla osservazione del medesimo parametro eseguita sulla sfera 1.

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 fantasiosa interpretazione del paradosso considera che sfera 1 invii alla sfera 2 un messaggio in cui comunica il proprio stato $m(v + \Delta v)$ 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 (orripilante 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.

7) INTERPRETAZIONE DELL'ENTAGLEMENT QUANTISTICO (ENTANGLEMENT INTERPRETATION)

L'esperimento mentale EPR ammette diverse interpretazioni ed, ancor oggi, non vi è unanimità circa quale considerare "ufficiale".

7.1) Interpretazione a Variabili Nascoste

Einstein riteneva che la MQ non fosse completa mancando la valutazione dell'effetto generato da "Variabili nascoste"

A vanificare, almeno parzialmente, tale interpretazione il fisico scozzese John Stewart Bell enunciò, nel 1964, il Teorema che porta il suo nome.

Esso recita, sinteticamente ed intuitivamente, che "nessuna teoria fisica a variabili nascoste, che rispetti il principio di Località e Realismo può riprodurre le predizioni della meccanica quantistica."

7.2) 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.

7.3) Interpretazione di Von Neumann

Il sistema è perturbato dall'azione dell'osservatore o meglio dalla percezione cosciente del risultato. E' quindi la mente dell'osservatore che genera l'entanglement, ovviamente indipendentemente dalla localizzazione delle particelle. Questa interpretazione è manifestamente Non Locale.

7.4) Interpretazione di Wigner

Essa accetta la interpretazione di Von Neumann ponendo contemporaneamente il problema della percezione cosciente.

Si immagini di ripetere l'esperimento del Gatto di Schrodinger ponendo la scatola con gatto, veleno e atomo radioattivo, in un locale con un amico di Wigner. Wigner potrà constatare, con uguale probabilità, una delle due seguenti situazioni: Ψ_1 =(gatto vivo + amico felice) oppure Ψ_2 = (gatto morto + amico triste).

Il collasso della funzione d'onda è stato generato dall'osservazione dell'amico di Wigner circa la salute del gatto oppure dalla osservazione di Wigner circa la felicità o la tristezza del proprio amico ?

7.5) Interpretazione di 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.

Insomma, 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.

8) RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI (REFERENCES)

- David Z. Albert, *Meccanica quantistica e senso comune*, Adelphi.
- Gian Carlo Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore.
- Paola Dessì, *La metamorfosi del determinismo*, Franco Angeli 1997

- Fortunato Tito Arecchi (a cura di), *Determinismo e complessità*, Armando 2000
- Massimo Mori, *Libertà, necessità, determinismo*, Il Mulino 2001
- Karl R. Popper, *Nuvole e orologi. Il determinismo, la libertà e la razionalità*, Armando 2006
- Luciano Cianchi, Marco Lantieri, Paolo Moretti, *Determinismo, realismo e località in fisica classica e quantistica*, Aracne 2007
- Donata Romizi, *Fare i conti con il caso. La probabilità e l'emergere dell'indeterminismo nella fisica moderna*, Archetipo Libri 2009
- Albert Messiah, *Mécanique quantique, tome 1*, Dunod, 1966.
- Paul Dirac, *I principi della meccanica quantistica*, Bollati Boringhieri, 1971.
- John von Neumann, *Mathematical foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1955.
- Stephen Gustafson, Israel M. Sigal, *Mathematical concepts of quantum mechanics*, Springer, 2006.
- Franz Schwabl, *Quantum mechanics*, Springer, 2002..
- Lev D. Landau; Evgenij M. Lifshits, *Meccanica Quantistica Teoria non relativistica*, Roma, Editori riuniti, II Edizione marzo 1994.
- L. Pauling ed E. B. Wilson *Introduction To Quantum Mechanics With Applications To Chemistry* (McGrawHill, New York, 1935)

- M. Planck, L. Silberstein e H. T. Clarke *The origin and development of the quantum theory* (Clarendon Press, Oxford, 1922)
- F. Reiche, H. Hatfield, e L. Henry *The quantum theory* (E. P. Dutton & co., New York, 1922)
- Gian Carlo Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Net, 1997.
- A. Amadori, L. Lussardi, *Meccanica Quantistica non Relativistica*, edizioni Matematicamente.it, 2009,
- W. Heisenberg *Fisica e filosofia*, (il Saggiatore, 1958)