

Heisenberg e Schrödinger, Max Born: i Padri della Meccanica Quantistica

Una teoria c'è...anzi due!

Max Born (1882-1970) vinse il Nobel nel 1954 per l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda.

Restavano da spiegare quantisticamente la tavola periodica degli elementi e perchè i gas inerti Elio, Neon, Argon, Xenon, Cripto e Rado non partecipavano alle reazioni chimiche.

Mancava la spiegazione dello spin elettronico, come proprietà intrinseca dell'elettrone che sarebbe stata dimostrata successivamente da **Goudsmit e Uhlenbeck**

Sovapposizione quantistica: il gatto di Schrodinger, Paul Dirac e l'antimateria, il modello standard e l'entanglement e il teletrasporto

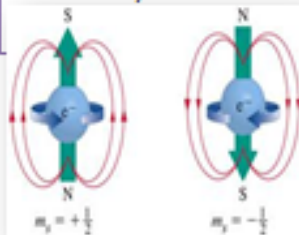
Schrödinger e Heisenberg sono considerati i padri fondatori della meccanica quantistica...



... in particolare Schrödinger fu onorato dal suo paese, l'Austria, con l'apposizione della sua effigie sulla moneta da 1000 scellini.

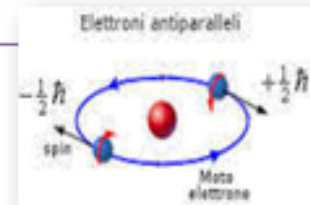
Il 4° numero quantico lo spin s

Altri «effetti magnetici» più lievi, responsabili di «sdoppiamenti» di tutte le righe spettrali, portarono a ipotizzare un ulteriore numero quantico, il numero quantico magnetico di **spin s** rappresentato come il verso di rotazione dell'elettrone attorno al proprio asse (**orario o antiorario**). A tale numero quantico **s** furono dati due valori $s = +1/2 \hbar$ ed $s = -1/2 \hbar$ dove



Nel 1925 **Pauli** dimostrò che nella stessa orbita (circolare o ellittica che sia) possono muoversi due elettroni purchè abbiano gli spin **antiparalleli**. Un terzo elettrone ne sarebbe escluso → **principio di esclusione di Pauli**.

La spiegazione è da ricercare nelle interazioni elettromagnetiche degli elettroni.



Essendo di carica uguale due elettroni si respingerebbero per la forza elettrostatica di Coulomb, ma ruotando in senso inverso (spin antiparalleli) generano intorno campi magnetici aventi orientamento Nord-Sud **invertiti** che tendono a far attrarre gli elettroni. Forza elettrica e forza magnetica, così, trovano un equilibrio mantenendo gli elettroni sulla stessa orbita, ma a debita distanza l'uno dall'altro.

Un terzo elettrone, oltre ad avere carica elettrica uguale agli altri due, si trova ad avere uno spin **parallelo** ad uno di essi. La situazione vedrebbe la repulsione avere la meglio sull'attrazione → la sommatoria delle interazioni in gioco, infatti, risulterà una repulsiva (**esclusione dall'orbita**).

Heisenberg e Schrödinger, Max Born: i Padri della Meccanica Quantistica

Una teoria c'è...anzi due!

Max Born (1882-1970) vinse il Nobel nel 1954 per l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda.

Restavano da spiegare quantisticamente [la tavola periodica degli elementi](#) e perchè i gas inerti Elio, Neon, Argon, Xenon, Cripto e Rado non partecipavano alle reazioni chimiche. Mancava la spiegazione dello spin elettronico, come proprietà intrinseca dell'elettrone che sarebbe stata dimostrata successivamente da **Goudsmit e Uhlenbeck**

[il gatto di Schrodinger](#)

[Paul Dirac e l'antimateria](#)

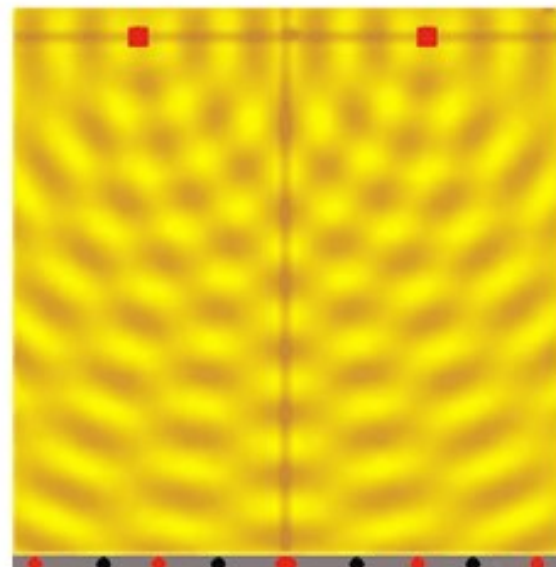
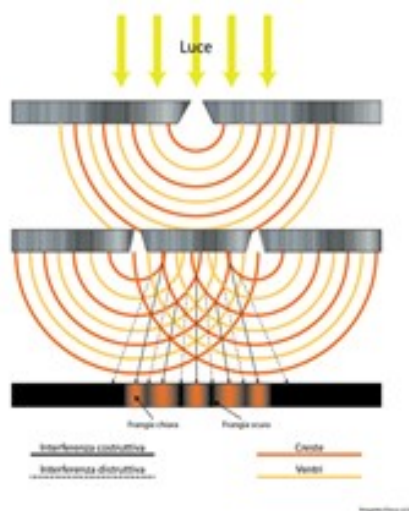
[l'entanglement e il teletrasporto](#)

[Entanglement 2](#)

[il modello standard](#)

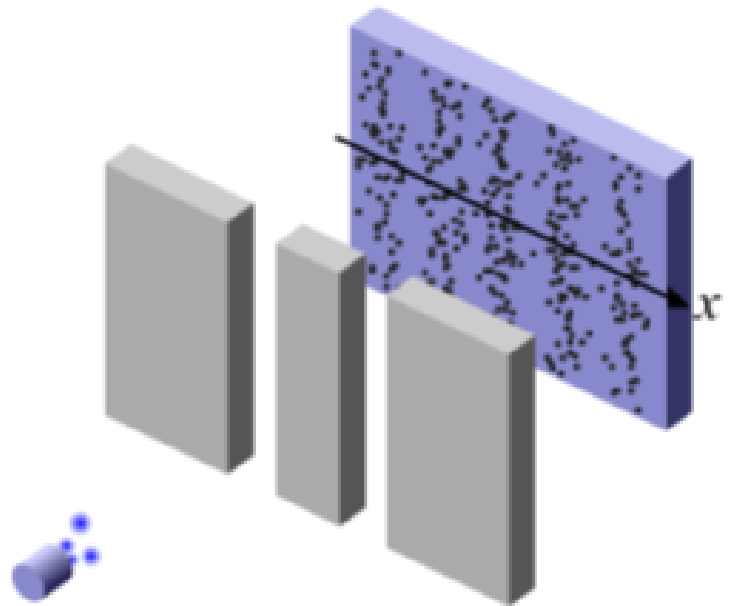
Il gatto di Schrodinger

Il fenomeno dell'interferenza è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. L'intensità dell'onda risultante in quel punto può variare tra un minimo, ed un massimo coincidente con la somma delle intensità



Se però invece di *onde* abbiamo *particelle* (fotoni), come spieghiamo l'interferenza?

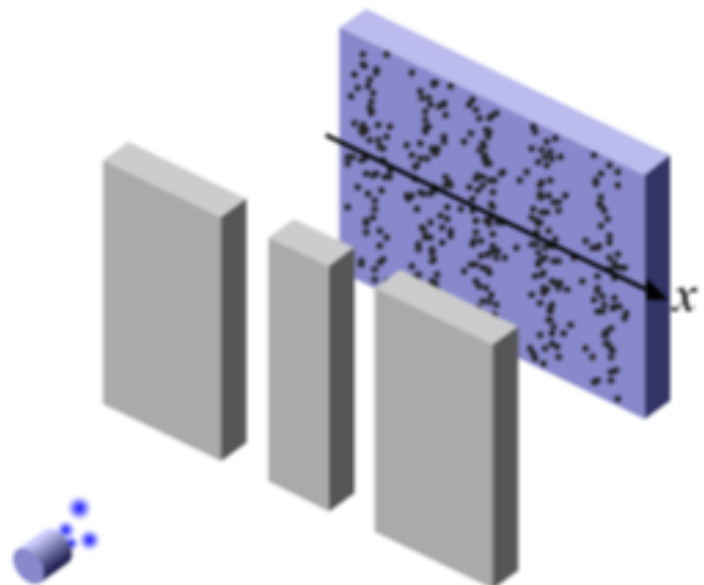
Se poi abbiamo bassissima intensità e dunque un solo fotone alla volta, lui passerà o per la fenditura di destra o per quella di sinistra... come fa ad interferire con se stesso? Come si risolve questo paradosso?



Fascio di particelle che passa attraverso due fenditure

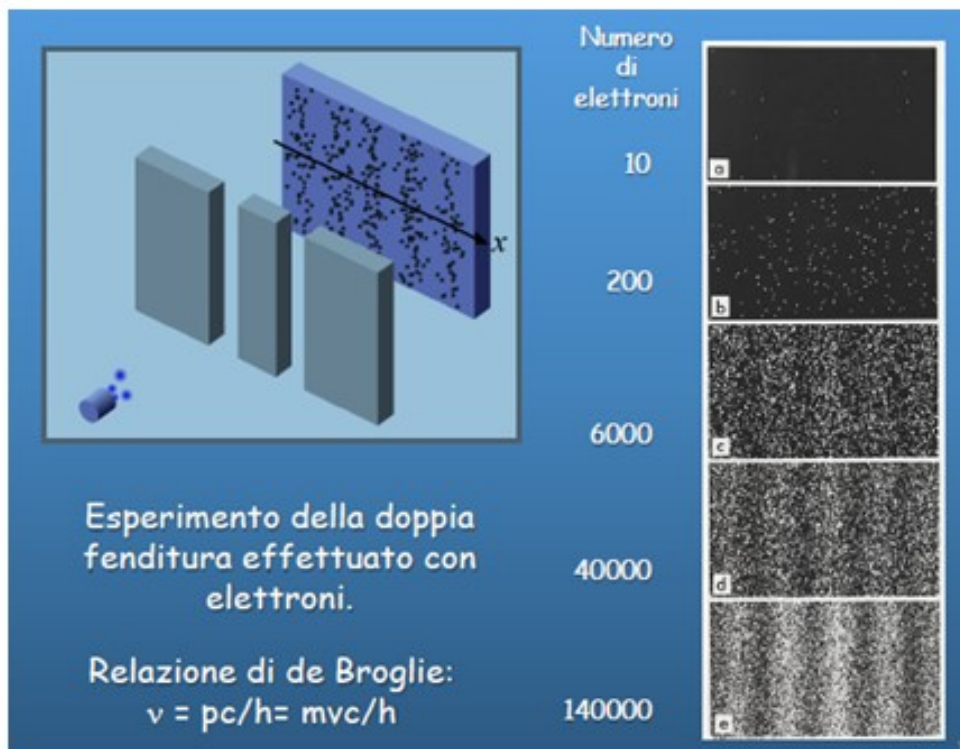
9

Vedremo poi come la soluzione di questo paradosso impegnerà varie generazioni di fisici... ed ancora li impegna!!!

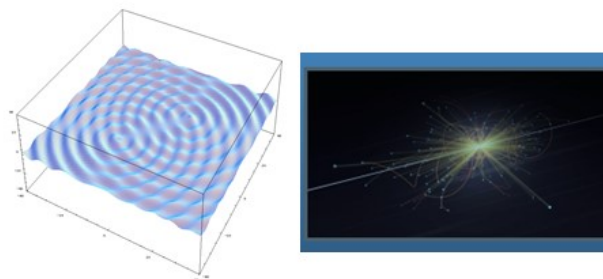


Fascio di particelle che passa attraverso due fenditure

10



Ma allora materia e luce sono onde o particelle?



12

Niels Bohr, nel 1927, prova a superare questo dilemma enunciando il **principio di complementarietà** secondo il quale una descrizione completa della materia (elettroni, protoni...) e della luce non può fare riferimento solo alla sua natura ondulatoria o solo alla sua natura particellare ma deve necessariamente includerle entrambe.

Questo porta al **Dualismo Onda-Particella**

Il Dualismo Onda-Particella è un **Principio della Fisica Quantistica**, per il quale gli oggetti fisici (particelle elementari, luce, ...) possono essere descritti sia come **Onde** sia come **Particelle**.

13

Ma questo Principio solleva problemi non piccoli, in quanto:

le *Onde* si espandono nello spazio, si rafforzano o si indeboliscono sovrapponendosi e possono stare allo stesso tempo in posti diversi,

le *Particelle* si possono trovare in un dato momento solo in un dato punto,

•le *Onde* sono descritte dalle "Funzioni d'Onda" (ad es. i campi elettromagnetici che descrivono la luce),

le *Particelle* sono caratterizzate da una ben precisa Energia, Impulso, etc.

14

La quantistica è la parte della fisica moderna che studia le leggi valide per le particelle elementari, cioè neutroni, elettroni, protoni, fotoni e così via

Secondo la fisica quantistica, il comportamento di una particella elementare non è infatti prevedibile con esattezza, ma solo in modo probabilistico: per esempio, sappiamo con certezza che un singolo atomo di uranio emetterà radiazioni, ma non possiamo dire assolutamente quando questo accadrà

15

Tali proprietà appaiono assolutamente contrastanti!

Ma innumerevoli esperimenti (con fotoni, elettroni,...) hanno mostrato che entrambe le proprietà coesistono

Cosa significa trattare oggetti materiali come onde?

Significa che le leggi fisiche non ci dicono, ad es., dove è un elettrone, ma solo la probabilità di trovarlo in un posto piuttosto che in un altro!

Significa anche che non possiamo sapere esattamente quando un atomo radioattivo decadrà, ma solo con che probabilità decadrà dopo un giorno o dopo una settimana o dopo mille anni!

16

L'interpretazione della Meccanica Quantistica basata sul Principio di Complementarietà è denominata:

Interpretazione di Copenhagen

in quanto si ispira ai lavori svolti nella capitale danese negli anni '20 del '900 da Bohr e Heisenberg

l'interpretazione di Copenhagen della Meccanica Quantistica nega l'esistenza di una realtà oggettiva a livello subatomico.

Una particella elementare, per esempio un elettrone, a livello quantico non è né un corpuscolo materiale né un'onda, l'elettrone è invece completamente descritto da una funzione d'onda che rappresenta la sovrapposizione di tutti i suoi stati potenziali. La funzione d'onda è tutto quello che c'è a livello quantico.

17

Questa interpretazione implica l'abbandono del determinismo classico e l'accettazione del fatto che gli eventi naturali seguano un andamento di tipo probabilistico. Come in una lotteria, dove la probabilità di estrarre il numero 7 sui novanta numeri del Lotto è 1/90



Nel caso del Lotto l'andamento di tipo probabilistico è dovuto al fatto che è praticamente impossibile conoscere tutte le grandezze in gioco (ad es. la posizione e la velocità iniziale di tutte le 90 palline), ma, in teoria secondo la fisica classica, se le conoscessimo saremmo in grado di predire quale numero verrà estratto

Nel caso dell'andamento probabilistico degli eventi descritti dalla meccanica quantistica (secondo l'interpretazione di Copenhagen) la nostra incapacità di predire esattamente il futuro è

ineliminabile

Il punto è che dalle leggi della Meccanica Quantistica discende il fatto che esistono precisi limiti nella misurazione e dunque nella conoscenza dei valori di grandezze fisiche coniugate, come, ad esempio, la posizione x e la quantità di moto $p_x (= mv_x)$

19

non possiamo ridurre *contemporaneamente* l'incertezza sulla posizione Δx e sulla quantità di moto Δp al di sotto di un determinato valore

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} = 5,275 \times 10^{-35} \text{ Js}$$

Ad esempio, se noi conoscessimo esattamente p , cioè $\Delta p=0$, avremmo $\Delta x=\infty$, cioè non potremmo sapere assolutamente nulla su dove si trova la particella!

20

Questa impossibilità di conoscere perfettamente i valori di tutte le grandezze fisiche in gioco viene chiamata:

Principio di indeterminazione di Heisenberg

in quanto fu enunciato nel 1927 da Heisenberg (e poi confermato da innumerevoli esperimenti).

Fu riconosciuto in seguito essere conseguenza delle leggi della Meccanica Quantistica e dunque non un Principio indipendente.

Rappresenta un concetto cardine della meccanica quantistica e sancisce una radicale rottura rispetto alle leggi della meccanica classica

21

Secondo la meccanica classica l'evoluzione da un certo momento in poi di un sistema fisico, e dunque anche dell'Universo intero, dipende dallo stato in cui si trova in quel momento il sistema. Cioè il futuro è dunque perfettamente determinato!(almeno in linea di principio)

Alla faccia del libero arbitrio

Nel mondo quantistico questo non è più vero

In questo Nuovo Mondo Quantistico quale è allora la rappresentazione di quella cosa che noi chiamiamo

Realtà?

Prima che il sistema fisico venga osservato, misurato..., si trova in una sovrapposizione di tutti gli stati possibili (cioè quelli permessi dalle leggi della fisica), in ottica si chiama interferenza.

Solo dopo l'osservazione si troverà in un ben determinato stato, per es. l'elettrone in un preciso posto... ...l'atomo radioattivo è (o non è) decaduto.

C'è di più: secondo l'interpretazione di Copenhagen il processo di misura stesso influenza il risultato!

Sono prive di senso domande come: dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione? questo in quanto la meccanica quantistica studia esclusivamente quantità osservabili, ricavabili mediante processi di misurazione. .

L'atto della misurazione causa il collasso della funzione d'onda, nel senso che quest'ultima è costretta dal processo di misurazione ad assumere uno dei valori permessi, secondo le probabilità dettate dalle leggi della meccanica quantistica stessa

24

Questo tipo di visione della realtà che discende dall'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica non pone particolari problemi filosofici quando si parla di fotoni, particelle elementari, nuclei atomici...

...il problema sorge quando la meccanica quantistica invade il nostro mondo macroscopico. Tipico esempio di questa problematica è l'esperimento mentale detto:
Il Paradosso del Gatto di Schrödinger

25

Il paradosso del gatto di Schrödinger è un esperimento mentale ideato nel 1935 da Erwin Schrödinger (che era scettico riguardo all'interpretazione di Copenhagen), con lo scopo di illustrare come l'interpretazione "ortodossa" della meccanica quantistica (per l'appunto l'interpretazione di Copenhagen) fornisca risultati paradossali se applicata ad un sistema fisico macroscopico

Il paradosso del gatto venne ideato da Schroedinger per dimostrare i limiti della fisica quantistica, benché egli stesso fosse stato tra i fondatori di questa scienza.

26

Quello del gatto di Schrödinger è un famoso esperimento mentale che esplora il modo in cui un sistema quantistico, per esempio un atomo o un fotone, possa esistere come combinazione di stati multipli - un fenomeno noto come *quantum superposition*,

"Dulcis in fundo":
Il gatto di Schrödinger



L'interpretazione classica della meccanica quantistica (Interpretazione di Copenhagen) risulta incompleta quando deve descrivere sistemi fisici in cui il livello subatomico interagisce con il livello macroscopico.

per il quale ogni stato quantico può essere rappresentato come somma di due o più differenti stati distinti e viceversa

27

La certezza dei macrosistemi.

Tale limitazione non esiste invece per i sistemi macroscopici, cioè composti da milioni di atomi riuniti: una volta conosciuti alcuni dati, si può sapere con esattezza che cosa e quando accadrà in essi.

Erwin Schroedinger, fisico austriaco (premio Nobel nel 1933), mescolò i due casi, quello quantistico e quello macroscopico e ipotizzò un gatto chiuso in una scatola con una pistola attivabile dalle radiazioni di un atomo di uranio.

Non si può sapere quando l'atomo emetterà radioattività attivando la pistola e uccidendo il gatto.

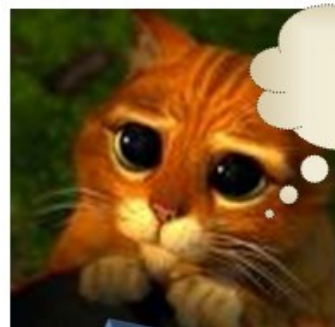
In questo modo anche il destino del gatto (sistema macroscopico) risulta regolato da leggi probabilistiche. Questo paradosso servì a Schroedinger per sostenere che l'interpretazione fisica della meccanica quantistica (ancor oggi accettata) andava ridiscussa

28

Per illustrare il principio di incertezza della meccanica quantistica, un'idea in base alla quale è l'osservatore, al momento di effettuare un rilevazione, a determinare le caratteristiche della particella esaminata (carica, spin, posizione), lo scienziato austriaco Erwin Schrödinger, premio nobel per la fisica nel 1933, ha ideato un curioso esperimento teorico, noto col nome di paradosso del gatto di Schrödinger.

Schrödinger l'ha formulato per mettere in evidenza la debolezza della cosiddetta interpretazione di Copenhagen della teoria quantistica (proposta dal fisico danese Niels Bohr), ma ha finito invece per diventare uno dei più noti simboli della nuova scienza, in quanto rappresenta perfettamente gli aspetti meno intuitivo della teoria stessa

Uno dei paradossi più intriganti della storia della fisica moderna è senza dubbio l'esperimento mentale che Edward Schrodinger ipotizzò con il suo gatto.



AIUTO!!!!!!!



Avete davanti a voi una scatola:
prendete un gatto, un atomo radioattivo e una lattina
di materiale radioattivo.

Chiudete la scatola e mettetela da parte.



Vi hanno assicurato che l'atomo decadrà entro un
giorno, in quel momento verrà attivato un dispositivo
che farà aprire la lattina, e di conseguenza morire il
gatto a causa dei gas tossici emessi.

Dopo una giornata vi ritrovate nuovamente con la
scatola in mano:

Cosa vi aspettate di trovare?



Nella nostra intuizione comune, o l'elemento decade oppure no (TERTIUM NON DATUR), e non sono possibili vie di mezzo; dunque o il gatto è al 100 % vivo, o è al 100 % morto.

Non si può sapere quando l'atomo emetterà radioattività attivando i gas tossici e uccidendo il gatto.

In questo modo anche il destino del gatto (sistema macroscopico) risulta regolato da leggi probabilistiche. Questo paradosso servì a Schroedinger per sostenere che l'interpretazione fisica della meccanica quantistica (ancor oggi accettata) andava ridiscussa



Con poca fantasia vi sono 2 possibili combinazioni:

- Gatto vivo - atomo integro
- Gatto morto - atomo disintegrato

Sembrerà scontato a tutti che le sorti dell'animaletto siano già segnate nell'istante in cui aprite la scatola.

La meccanica quantistica, invece, dice che il gatto si troverà in una condizione stranissima:



NE' VIVO NE' MORTO

questo perché, secondo Schrödinger, in uno stesso stato quantistico coesistono un 50 % di probabilità che l'elemento sia decaduto e un 50 % che non lo sia, **CONTEMPORANEAMENTE** (si dice che lo stato finale è una "sovrapposizione" dei due). Ne consegue che il gatto è, contemporaneamente, al 50 % vivo e al 50 % morto!

In tal modo il dualismo della meccanica quantistica fa clamorosamente irruzione nel mondo macroscopico, dove pensavamo che non avremmo mai avuto a che fare con simili paradossi.

Una possibile soluzione al problema del dualismo fu avanzata dal tedesco **Max Born** (1882-1970)



Secondo Schrödinger, visto che è impossibile sapere, prima di aprire la scatola, se il gas sia stato rilasciato o meno, fintanto che la scatola rimane chiusa il gatto si trova in uno stato indeterminato: **sia vivo sia morto.**

O meglio vivo e morto allo stesso tempo!

Solo aprendo la scatola questa "**sovrapposizione di stati probabilistici**" si risolverà, in un modo o nell'altro.

La vita del gatto è di fatto nelle nostre mani: può sembrare paradossale, ma il senso è che l'osservazione determina il risultato dell'osservazione stessa.

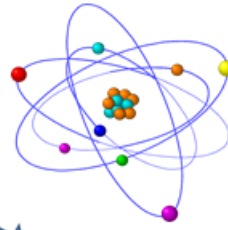
35

Per capirci, è come se la natura avesse preso le due combinazioni e proprio nell'istante in cui aprite la scatola ne estrarrà una: sarà quella che si manifesterà.

Siete voi in un certo senso a decidere riguardo alla sorte del gatto, che restano in bilico per tutto il tempo precedente perché aprendo la scatola modificiamo ciò che c'è dentro. L'uomo aprendo la scatola "sceglie", senza rendersene conto, una delle due onde di probabilità del gatto.



Da questo Schrodinger delineò un'equazione con cui volle criticare le nuove teorie quantistiche che gli parevano ridicole



$$\varphi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{n\pi}{l} x\right)$$

In sintesi l'esperimento rappresenta uno dei paradossi della fisica quantistica e una ridicolizzazione delle sue leggi che pur valendo a livello microscopico a livello macroscopico paiono ridicole come l'ipotizzare l'esistenza di un gatto vivo e morto allo stesso tempo!

..... In mezzo a questo caos ci atteniamo ad una citazione di Einstein che ci sembra saggia..

"Le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi fra loro.

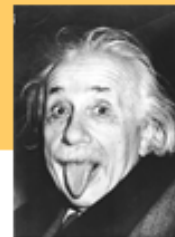
Tu ritieni che Dio giochi a dadi con il mondo: io credo invece che tutto obbedisca ad una legge, in un mondo di realtà obiettive, che certo è afferrare per via totalmente speculativa.

Lo credo fermamente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica o meglio un fondamento più tangibile di quanto non abbia saputo fare io.

Nemmeno il grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che alla base di tutto vi sia la casualità, anche se so bene che i colleghi più giovani considerano questo atteggiamento come un effetto di arteriosclerosi.

Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto."

Albert Einstein



Sono state elaborate diverse varianti della Meccanica Quantistica al fine di risolvere questa controversia:

- I molti mondi
- Interpretazione transazionale
- Meccanica quantistica relazionale
-



"El Jardín de los senderos que se bifurcan"
Jorge Luis Borges



Quella che a suo tempo ha ricevuto più credito è l'ipotesi che esistessero in natura delle **variabili nascoste**

Abbiamo visto che una caratteristica fondamentale della meccanica quantistica risiede nel dare solo la probabilità con cui un certo risultato può presentarsi.

L'importanza della statistica

- Posta l'impossibilità di determinare una legge sul comportamento di una singola particella elementare, nulla vieta di effettuare lo stesso esperimento a ripetizione, con più particelle uguali, sempre nelle stesse condizioni. Ed infatti **le leggi della fisica quantistica sono di carattere statistico**: ciò significa che esse non concernono un singolo sistema bensì un aggregato di sistemi identici.

E dunque **lo stesso tipo di misurazione, eseguita su sistemi identici, può portare a risultati diversi.**

Esiste forse una realtà nascosta che rientri in una teoria più fondamentale, in grado di prevedere con certezza il risultato di una misura?

Se esistessero tali "variabili nascoste" esisterebbero nuovi fenomeni fisici, sconosciuti all'attuale teoria, e anche nuove equazioni atte a descriverli, per spiegare l'universo come lo conosciamo in modo deterministico

Ma esistono le variabili nascoste?

Nel 1964 John Bell dimostrò che se esistessero variabili nascoste alcune configurazioni sperimentali dovrebbero soddisfare determinate relazioni di disuguaglianza non previste dalla meccanica quantistica, ovvero i risultati delle due teorie sarebbero in parte diversi.



Questa disuguaglianza è chiamata correntemente:
Disuguaglianza di Bell

43

Alain Aspect, ha condotto, nel 1982, presso École Polytechnique di Parigi, sperimentazioni che hanno registrato la violazione della disuguaglianza di Bell



Ciò depone a favore della meccanica quantistica nella sua interpretazione classica, con accettazione del fenomeno della non-località, non escludendo però la possibilità di teorie a variabili nascoste

44

E dunque contrario all'interpretazione di Copenhagen era non solo Schrödinger ma anche Einstein che già 8 anni prima, nel corso del Congresso Solvay a Bruxelles nel 1927, disse a Bohr :

"Non posso credere nemmeno per un attimo che Dio giochi a dadi!"

"Piantala di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi" pare abbia risposto Bohr

45