

Fondamenti, Interpretazioni e didattica della Meccanica Quantistica

Rodolfo Figari



Didattica della Fisica e della Matematica, Napoli
"I Lincei per la Scuola", Polo di Latina

17 e 19 Dicembre 2018

L'insegnamento della Fisica Quantistica nelle scuole secondarie superiori

► COMPETENZE

Saper riconoscere il ruolo della fisica quantistica in situazioni reali e in applicazioni tecnologiche

► ABILITÀ

Saper illustrare il modello del corpo nero in base alle leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien e interpretarne la curva di emissione in base al modello di Planck

Illustrare e saper applicare l'equazione di Einstein per l'effetto fotoelettrico e la legge dell'effetto Compton

Calcolare le frequenze emesse per transizione dai livelli dell'atomo di Bohr

Descrivere la condizione di quantizzazione dell'atomo di Bohr usando la relazione di De Broglie

Calcolare l'indeterminazione quantistica sulla posizione versus quantità di moto di una particella

Calcolare la lunghezza d'onda di una particella

Riconoscere i limiti della trattazione classica

L'insegnamento della Fisica Quantistica nelle scuole secondarie superiori

► COMPETENZE

Saper riconoscere il ruolo della fisica quantistica in situazioni reali e in applicazioni tecnologiche

► ABILITÀ

Saper illustrare il modello del corpo nero in base alle leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien e interpretarne la curva di emissione in base al modello di Planck

Illustrare e saper applicare l'equazione di Einstein per l'effetto fotoelettrico e la legge dell'effetto Compton

Calcolare le frequenze emesse per transizione dai livelli dell'atomo di Bohr

Descrivere la condizione di quantizzazione dell'atomo di Bohr usando la relazione di De Broglie

Calcolare l'indeterminazione quantistica sulla posizione versus quantità di moto di una particella

Calcolare la lunghezza d'onda di una particella

Riconoscere i limiti della trattazione classica

► CONOSCENZE

L'emissione del corpo nero e ipotesi di Planck

La spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico

Effetto Compton

Lo spettro dell'atomo di idrogeno

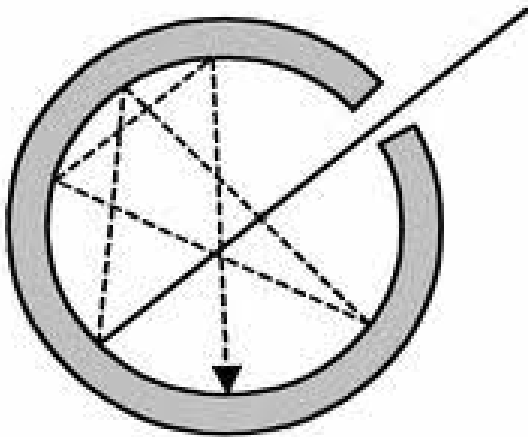
Modello di Bohr e livelli energetici

Onde di radiazione e onde di materia: ipotesi di De Broglie e la meccanica ondulatoria di Schrödinger

Principio di indeterminazione di Heisenberg

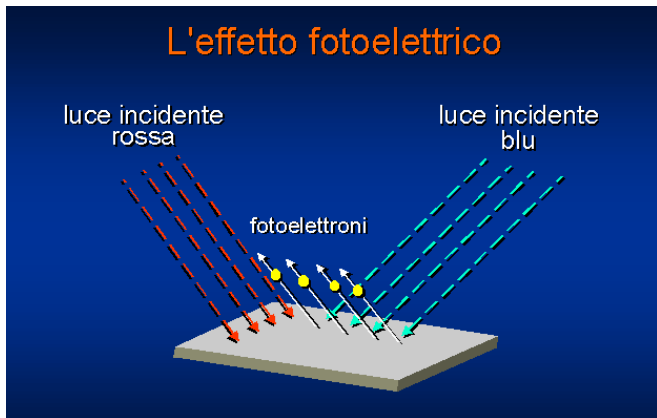
Onde di probabilità

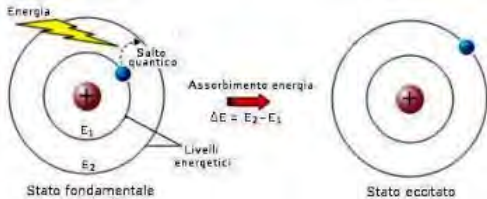
► La radiazione di corpo nero



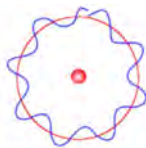
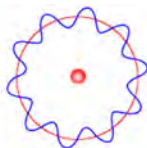
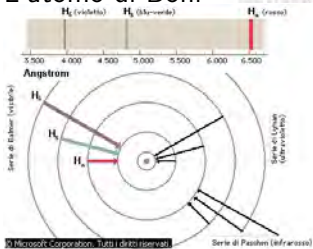
Caratterizzazione della distribuzione in frequenza della radiazione di un corpo a emissività unitaria in condizioni isothermiche

- L'interazione radiazione materia e gli spettri di emissione e assorbimento





► L'atomo di Bohr



► L'onda di De Broglie

Critiche all'introduzione "storica"

- ▶ Sono richieste sofisticate conoscenze di Termodinamica, Elettromagnetismo e Meccanica Statistica per seguire i dettagli delle trattazioni teoriche di Kirchhoff, Planck, Wien, Einstein
- ▶ Radiazione e interazione radiazione-materia spariscono successivamente dalla Fisica Quantistica fino almeno alla fine del triennio universitario
- ▶ Risulta nascosto il ruolo della probabilità nella teoria quantistica. La probabilità viene associata successivamente all'onda di De Broglie-Schrödinger del sistema microscopico
- ▶ Lo studente si deve confrontare con il tortuoso dibattito originale tra i padri fondatori impegnati nella ricerca di una teoria soddisfacente della struttura dell'atomo e della dinamica delle particelle sub-atomiche

La Babele 1900-1927 e la ripresa del dibattito

Nell'ottobre del 1927, durante la sessione "Discussione Generale", alla fine della quinta conferenza Solvay, Ehrenfest scrive alla lavagna estratti della Genesi 11:4e7

E dissero: "Orsù, edificiamoci una città ed una torre di cui la cima giunga fino al cielo, e acquistiamoci fama, onde non siamo dispersi sulla faccia di tutta la terra". E l'Eterno disse: "Orsù, scendiamo e confondiamo quivi il loro linguaggio, sicché l'uno non capisca il parlare dell'altro!"



La Babele 1900-1927 e la ripresa del dibattito

Nell'ottobre del 1927, durante la sessione "Discussione Generale", alla fine della quinta conferenza Solvay, Ehrenfest scrive alla lavagna estratti della Genesi 11:4e7

E dissero: "Orsù, edificiamoci una città ed una torre di cui la cima giunga fino al cielo, e acquistiamoci fama, onde non siamo dispersi sulla faccia di tutta la terra". E l'Eterno disse: " Orsù, scendiamo e confondiamo quivi il loro linguaggio, sicché l'uno non capisca il parlare dell'altro!"



La Babele 1900-1927 e la ripresa del dibattito

Successivo commento di Langevin sulla Conferenza “fu il momento in cui la confusione delle idee raggiunse il culmine”

A dispetto di questa incertezza, dal 1930 in poi, ogni discussione sui fondamenti della Meccanica Quantistica è stata scartata come filosofia o metafisica e la massima “zitto e calcola” è diventata prassi.

Solo successivamente i lavori di Einstein (1949), Bohm (1952), Everett (1957), Bell (1964 → 1966), Ballentine (1970), Zeh (1971→1985), Zurek (1981→1982)hanno fatto ripartire il dibattito

La Babele 1900-1927 e la ripresa del dibattito

Successivo commento di Langevin sulla Conferenza “fu il momento in cui la confusione delle idee raggiunse il culmine”

A dispetto di questa incertezza, dal 1930 in poi, ogni discussione sui fondamenti della Meccanica Quantistica è stata scartata come filosofia o metafisica e la massima “zitto e calcola” è diventata prassi.

Solo successivamente i lavori di Einstein (1949), Bohm (1952), Everett (1957), Bell (1964 → 1966), Ballentine (1970), Zeh (1971→1985), Zurek (1981→1982)hanno fatto ripartire il dibattito

La Babele 1900-1927 e la ripresa del dibattito

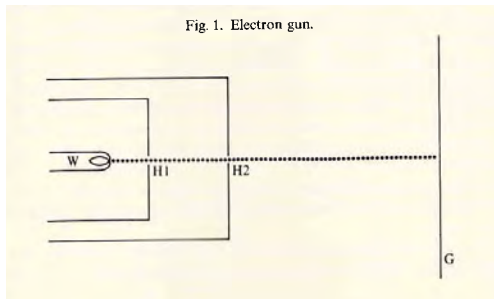
Successivo commento di Langevin sulla Conferenza “fu il momento in cui la confusione delle idee raggiunse il culmine”

A dispetto di questa incertezza, dal 1930 in poi, ogni discussione sui fondamenti della Meccanica Quantistica è stata scartata come filosofia o metafisica e la massima “zitto e calcola” è diventata prassi.

Solo successivamente i lavori di Einstein (1949), Bohm (1952), Everett (1957), Bell (1964 → 1966), Ballentine (1970), Zeh (1971→1985), Zurek (1981→1982)hanno fatto ripartire il dibattito

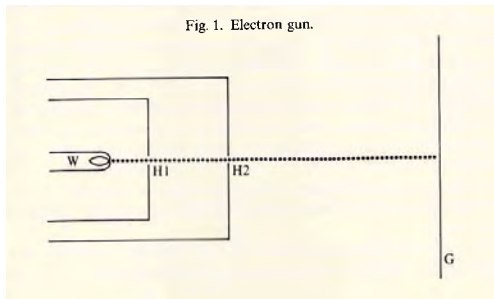
La necessità di un approccio probabilistico

Per capire come e perchè la probabilità entri ontologicamente nell'evoluzione dei sistemi microscopici è conveniente indagare gli esperimenti di diffrazione di elettroni e di “interferenza delle onde di materia”.



La necessità di un approccio probabilistico

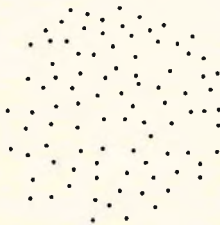
Sulla lastra fotografica G si osservano scintillazioni (che lasciano la lastra annerita) interpretate come impatti degli elettroni sulla lastra.



La necessità di un approccio probabilistico

Un tipico schema di annerimento della lastra osservato per piccole dimensioni di H_2 ha questo aspetto

Fig. 2. Pattern built up by many pulses of electron gun of Fig. 1.

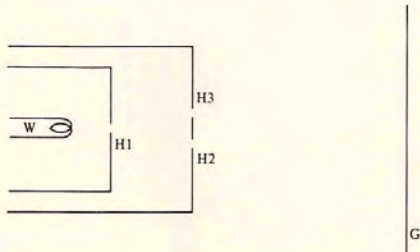


Sotto una certa dimensione lineare di H_2 si osservano lampi in una regione sempre più grande quanto minore è la dimensione del buco.

La necessità di un approccio probabilistico

Il fenomeno più eclatante si osserva quando viene utilizzato uno schermo con due fori.

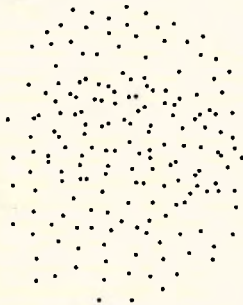
Fig. 3. Electron gun with two holes in second screen.



La necessità di un approccio probabilistico

Conoscendo i risultati delle osservazioni precedenti, ci si aspetta una figura di impatti che appaia come la somma di due registrazioni

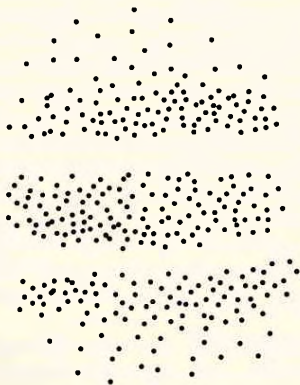
Fig. 4. Guess, on basis of classical particle mechanics, for pattern built up by many pulses of electron gun of Fig. 3.



La necessità di un approccio probabilistico

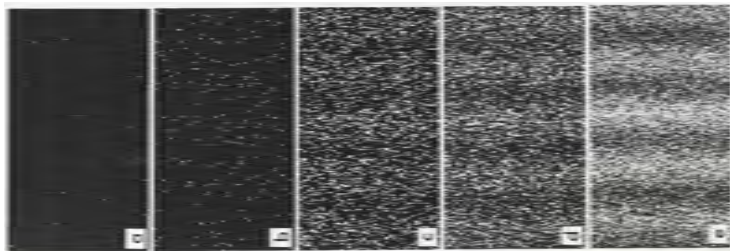
In realtà, ciò che si osserva è una figura molto differente

Fig. 5. Actual pattern from electron gun of Fig. 3.



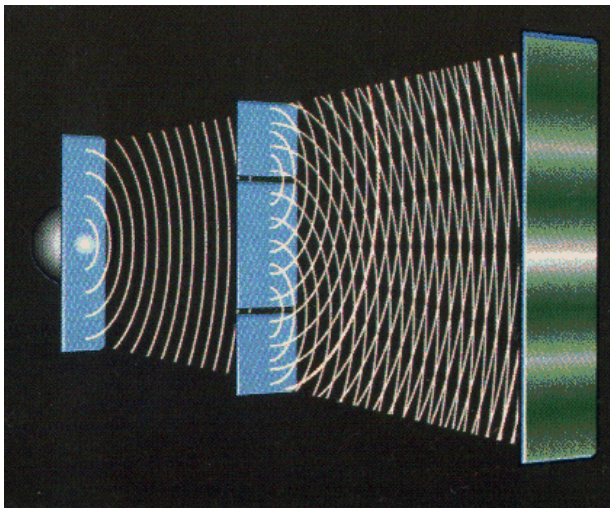
La necessità di un approccio probabilistico

la cui dinamica di formazione è mostrata in questa sequenza di immagini.



La necessità di un approccio probabilistico

Il quadro complessivo è identico alla figura di interferenza prodotta da onde che passano attraverso due fori di dimensione lineare più piccola della lunghezza d'onda media.



La necessità di un approccio probabilistico

Riassumendo

- ▶ Nonostante una preparazione iniziale identica, gli impatti sono distribuiti in varie parti dello schermo. Ne consegue che la sola cosa che può essere data è una descrizione statistica delle posizioni di impatto.
- ▶ La statistica delle posizioni di impatto differisce, qualitativamente e quantitativamente, da quella osservata quando uno dei due fori è chiuso. Inoltre, si differenzia notevolmente dalla semplice sovrapposizione delle figure osservate quando uno o l'altro foro è chiuso.
- ▶ La densità degli impatti elettronici misurata su un grande numero di esperimenti identici è simile alla tipica figura di interferenza delle onde sferiche emesse da due sorgenti puntiformi coerenti.

La necessità di un approccio probabilistico

Riassumendo

- ▶ Nonostante una preparazione iniziale identica, gli impatti sono distribuiti in varie parti dello schermo. Ne consegue che la sola cosa che può essere data è una descrizione statistica delle posizioni di impatto.
- ▶ La statistica delle posizioni di impatto differisce, qualitativamente e quantitativamente, da quella osservata quando uno dei due fori è chiuso. Inoltre, si differenzia notevolmente dalla semplice sovrapposizione delle figure osservate quando uno o l'altro foro è chiuso.
- ▶ La densità degli impatti elettronici misurata su un grande numero di esperimenti identici è simile alla tipica figura di interferenza delle onde sferiche emesse da due sorgenti puntiformi coerenti.

La necessità di un approccio probabilistico

Riassumendo

- ▶ Nonostante una preparazione iniziale identica, gli impatti sono distribuiti in varie parti dello schermo. Ne consegue che la sola cosa che può essere data è una descrizione statistica delle posizioni di impatto.
- ▶ La statistica delle posizioni di impatto differisce, qualitativamente e quantitativamente, da quella osservata quando uno dei due fori è chiuso. Inoltre, si differenzia notevolmente dalla semplice sovrapposizione delle figure osservate quando uno o l'altro foro è chiuso.
- ▶ La densità degli impatti elettronici misurata su un grande numero di esperimenti identici è simile alla tipica figura di interferenza delle onde sferiche emesse da due sorgenti puntiformi coerenti.

La necessità di un approccio probabilistico

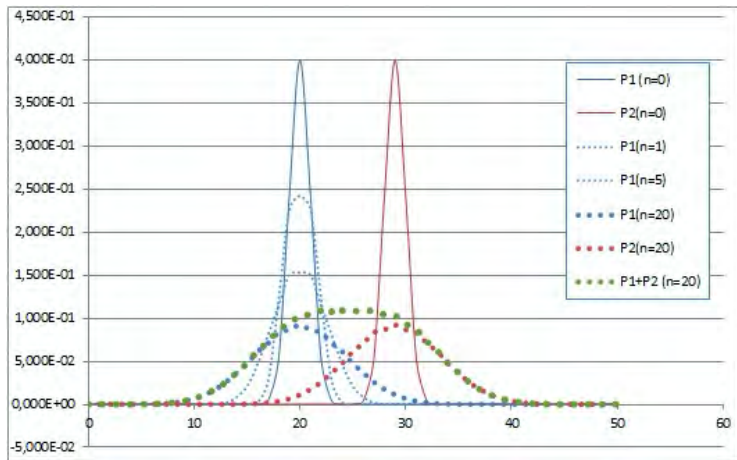
Riassumendo

- ▶ Nonostante una preparazione iniziale identica, gli impatti sono distribuiti in varie parti dello schermo. Ne consegue che la sola cosa che può essere data è una descrizione statistica delle posizioni di impatto.
- ▶ La statistica delle posizioni di impatto differisce, qualitativamente e quantitativamente, da quella osservata quando uno dei due fori è chiuso. Inoltre, si differenzia notevolmente dalla semplice sovrapposizione delle figure osservate quando uno o l'altro foro è chiuso.
- ▶ La densità degli impatti elettronici misurata su un grande numero di esperimenti identici è simile alla tipica figura di interferenza delle onde sferiche emesse da due sorgenti puntiformi coerenti.

Dall' inizio del secolo scorso, a cominciare dalla formulazione della teoria del moto Browniano, si cominciarono ad elaborare modelli di evoluzione casuale di sistemi complessi la cui dinamica dipendeva da un numero così elevato di interazioni da non poter essere deterministicamente prevista.

La probabilità in Fisica

Probabilità classica e “probabilità quantistica”



- ▶ Guidati dalla teoria delle onde (di superficie, elastiche, elettromagnetiche etc.), i fondatori della teoria individuano l'equazione d'onda e le prescrizioni necessarie per dedurre, dall'ampiezza dell'onda, la statistica osservata degli impatti.
 1. Le ampiezze sono i valori locali dei vettori che descrivono i campi di deformazione o i campi elettrici e magnetici,
 2. i valori osservati sono collegati alle corrispondenti energie (le lunghezze al quadrato dei vettori-ampiezza)

- ▶ Guidati dalla teoria delle onde (di superficie, elastiche, elettromagnetiche etc.), i fondatori della teoria individuano l'equazione d'onda e le prescrizioni necessarie per dedurre, dall'ampiezza dell'onda, la statistica osservata degli impatti.
 1. Le ampiezze sono i valori locali dei vettori che descrivono i campi di deformazione o i campi elettrici e magnetici,
 2. i valori osservati sono collegati alle corrispondenti energie (le lunghezze al quadrato dei vettori-ampiezza)

- ▶ Guidati dalla teoria delle onde (di superficie, elastiche, elettromagnetiche etc.), i fondatori della teoria individuano l'equazione d'onda e le prescrizioni necessarie per dedurre, dall'ampiezza dell'onda, la statistica osservata degli impatti.
 1. Le ampiezze sono i valori locali dei vettori che descrivono i campi di deformazione o i campi elettrici e magnetici,
 2. i valori osservati sono collegati alle corrispondenti energie (le lunghezze al quadrato dei vettori-ampiezza)

Ma che cosa è che ondeggia nella meccanica ondulatoria? Nel caso di onde nell'acqua a oscillare è la superficie dell'acqua. In quello delle onde sonore la pressione dell'aria (onde elettromagnetiche) Nel caso delle onde della meccanica ondulatoria non abbiamo idea di ciò che oscilla.... e non ci poniamo la domanda. (Bell)

Quest' "onda di possibilità" è la caratteristica che differenzia drasticamente la probabilità in meccanica quantistica dalla probabilità nelle evoluzioni stocastiche.

Ma che cosa è che ondeggia nella meccanica ondulatoria? Nel caso di onde nell'acqua a oscillare è la superficie dell'acqua. In quello delle onde sonore la pressione dell'aria (onde elettromagnetiche) Nel caso delle onde della meccanica ondulatoria non abbiamo idea di ciò che oscilla.... e non ci poniamo la domanda. (Bell)

Quest' "onda di possibilità" è la caratteristica che differenzia drasticamente la probabilità in meccanica quantistica dalla probabilità nelle evoluzioni stocastiche.

Il quadro teorico elaborato dai padri fondatori

- ▶ Lo stato dell'elettrone è codificato in un campo di vettori a due componenti che evolve secondo un'equazione d'onda (l'equazione di Schrödinger). La conoscenza dello stato permette di prevedere la statistica dei possibili risultati in una serie di misurazioni e non il risultato di una singola misura.
- ▶ L'onda non consente una descrizione delle proprietà fisiche "possedute" dall'elettrone ma indica solo informazioni su ciò che potrebbe essere osservato quando si misura il sistema. In particolare: quantità cinematiche classiche, come la posizione degli elettroni, non hanno in generale alcun significato.

Il quadro teorico elaborato dai padri fondatori

- ▶ Lo stato dell'elettrone è codificato in un campo di vettori a due componenti che evolve secondo un'equazione d'onda (l'equazione di Schrödinger). La conoscenza dello stato permette di prevedere la statistica dei possibili risultati in una serie di misurazioni e non il risultato di una singola misura.
- ▶ L'onda non consente una descrizione delle proprietà fisiche "possedute" dall'elettrone ma indica solo informazioni su ciò che potrebbe essere osservato quando si misura il sistema. In particolare: quantità cinematiche classiche, come la posizione degli elettroni, non hanno in generale alcun significato.

Il quadro teorico elaborato dai padri fondatori

- ▶ Lo stato dell'elettrone è codificato in un campo di vettori a due componenti che evolve secondo un'equazione d'onda (l'equazione di Schrödinger). La conoscenza dello stato permette di prevedere la statistica dei possibili risultati in una serie di misurazioni e non il risultato di una singola misura.
- ▶ L'onda non consente una descrizione delle proprietà fisiche "possedute" dall'elettrone ma indica solo informazioni su ciò che potrebbe essere osservato quando si misura il sistema. In particolare: quantità cinematiche classiche, come la posizione degli elettroni, non hanno in generale alcun significato.

- ▶ Al contrario, l'apparato di misura (nel nostro caso, la superficie fotografica dello schermo) ha caratteristiche che possono essere descritte esattamente in termini classici. In particolare, le posizioni di impatto sono perfettamente definite (rinuncia all'universalità della teoria)
- ▶ Nel processo di interazione tra il sistema microscopico e l'apparato di misura classico solo una delle possibilità statistiche, codificate nell'onda, si attualizza nella forma di un singolo punto sullo schermo (riduzione o collasso dello stato microscopico del sistema).

- ▶ Al contrario, l'apparato di misura (nel nostro caso, la superficie fotografica dello schermo) ha caratteristiche che possono essere descritte esattamente in termini classici. In particolare, le posizioni di impatto sono perfettamente definite (rinuncia all'universalità della teoria)
- ▶ Nel processo di interazione tra il sistema microscopico e l'apparato di misura classico solo una delle possibilità statistiche, codificate nell'onda, si attualizza nella forma di un singolo punto sullo schermo (riduzione o collasso dello stato microscopico del sistema).

La costruzione della teoria

Non c'è un mondo quantistico. C'è solo una descrizione quantistica astratta. È sbagliato pensare che il compito della fisica sia trovare come è fatta la natura. La fisica ha a che fare con quello che possiamo dire sulla natura. (Bohr)

Gli atomi o le particelle elementari non sono reali. Costituiscono un mondo di potenzialità o di possibilità piuttosto che di un mondo di cose o fatti. (Heisenberg)

La teoria ha due fatti a suo favore e solo uno contro.....
(fantastico accordo con i dati sperimentali) (bellezza e profondità matematica) La cosa che può essere detta contro è che non ha assolutamente senso! (R. Penrose)

La costruzione della teoria

Non c'è un mondo quantistico. C'è solo una descrizione quantistica astratta. È sbagliato pensare che il compito della fisica sia trovare come è fatta la natura. La fisica ha a che fare con quello che possiamo dire sulla natura. (Bohr)

Gli atomi o le particelle elementari non sono reali. Costituiscono un mondo di potenzialità o di possibilità piuttosto che di un mondo di cose o fatti. (Heisenberg)

La teoria ha due fatti a suo favore e solo uno contro.....
(fantastico accordo con i dati sperimentali) (bellezza e
profondità matematica) La cosa che può essere detta contro è
che non ha assolutamente senso! (R. Penrose)

La costruzione della teoria

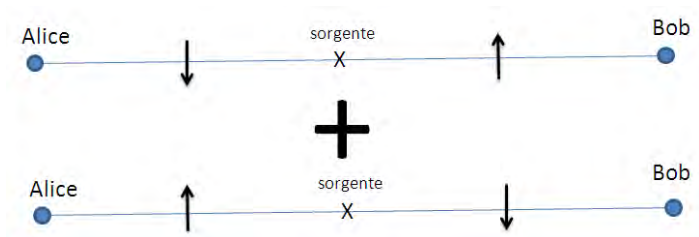
Non c'è un mondo quantistico. C'è solo una descrizione quantistica astratta. È sbagliato pensare che il compito della fisica sia trovare come è fatta la natura. La fisica ha a che fare con quello che possiamo dire sulla natura. (Bohr)

Gli atomi o le particelle elementari non sono reali. Costituiscono un mondo di potenzialità o di possibilità piuttosto che di un mondo di cose o fatti. (Heisenberg)

La teoria ha due fatti a suo favore e solo uno contro..... (fantastico accordo con i dati sperimentali) (bellezza e profondità matematica) La cosa che può essere detta contro è che non ha assolutamente senso! (R. Penrose)

Conseguenze “inquietanti” del principio di sovrapposizione

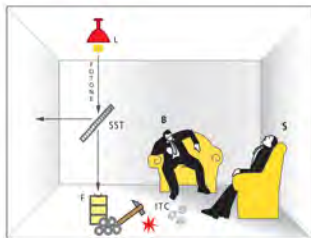
Non località delle correlazioni quantistiche



Conseguenze “inquietanti” del principio di sovrapposizione

Invasività dell'entanglement nei sistemi macroscopici che entrano in interazione con sistemi microscopici

$$\begin{aligned}
 |\Psi_0\rangle \otimes |\Phi_0\rangle \otimes |\Sigma_0\rangle &= \left[\sum_r c_r |\phi_r\rangle \right] \otimes |\Phi_0\rangle \otimes |\Sigma_0\rangle \xrightarrow{\text{int. } S + A} \\
 &\xrightarrow{\text{int. } S + A} \sum_r c_r (|\phi_r\rangle \otimes |\Phi_r\rangle) \otimes |\Sigma_0\rangle \xrightarrow{\text{int. } S + A + B} \\
 &\xrightarrow{\text{int. } S + A + B} \sum_r c_r (|\phi_r\rangle \otimes |\Phi_r\rangle \otimes |\Sigma_r\rangle)
 \end{aligned}$$



L'interpretazione statistica

Lo stato del sistema fornisce una descrizione delle proprietà statistiche dell' "ensemble" di sistemi che si ottengono dalla stessa preparazione sperimentale iniziale. Non fornisce descrizione massimale o parziale di alcun sistema individuale.

Le probabilità sono proprietà dello stato del sistema, nel senso che sono proprietà del metodo di preparazione iniziale e sono logicamente indipendenti da qualunque processo di misura successivo

I gatti sono qualche volta vivi e qualche volta morti indipendentemente dall'osservatore con una statistica che dipende solo da come è stato preparato il sistema. In particolare, la misura delle proprietà di una particella di una coppia entangled non cambia lo stato del sistema, che è l'evoluto della stessa condizione sperimentale iniziale usata in ogni ripetizione dell'esperimento.

L'interpretazione statistica

Lo stato del sistema fornisce una descrizione delle proprietà statistiche dell' "ensemble" di sistemi che si ottengono dalla stessa preparazione sperimentale iniziale. Non fornisce descrizione massimale o parziale di alcun sistema individuale.

Le probabilità sono proprietà dello stato del sistema, nel senso che sono proprietà del metodo di preparazione iniziale e sono logicamente indipendenti da qualunque processo di misura successivo

I gatti sono qualche volta vivi e qualche volta morti indipendentemente dall'osservatore con una statistica che dipende solo da come è stato preparato il sistema. In particolare, la misura delle proprietà di una particella di una coppia entangled non cambia lo stato del sistema, che è l'evoluto della stessa condizione sperimentale iniziale usata in ogni ripetizione dell'esperimento.

L'interpretazione statistica

Lo stato del sistema fornisce una descrizione delle proprietà statistiche dell' "ensemble" di sistemi che si ottengono dalla stessa preparazione sperimentale iniziale. Non fornisce descrizione massimale o parziale di alcun sistema individuale.

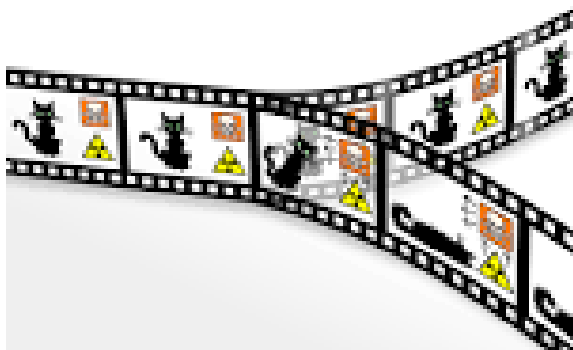
Le probabilità sono proprietà dello stato del sistema, nel senso che sono proprietà del metodo di preparazione iniziale e sono logicamente indipendenti da qualunque processo di misura successivo

I gatti sono qualche volta vivi e qualche volta morti indipendentemente dall'osservatore con una statistica che dipende solo da come è stato preparato il sistema. In particolare, la misura delle proprietà di una particella di una coppia entangled non cambia lo stato del sistema, che è l'evoluto della stessa condizione sperimentale iniziale usata in ogni ripetizione dell'esperimento.

Le interpretazioni “Onda e Particella”

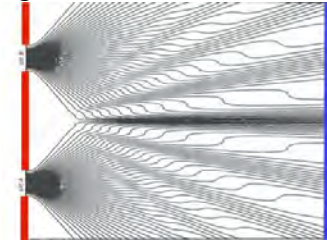
L'onda (lo stato puro) è associata al singolo sistema

- **Molti mondi:** gli stati possibili relativi a una singola funzione d'onda si oggettivano in realtà diverse (il multi-verso)



Naturalmente la teoria non ha bisogno di alcun collasso della funzione d'onda

- ▶ **Meccanica Bohmiana:** Ad ogni particella sono associate la funzione d'onda e la posizione. La funzione d'onda evolve secondo l'equazione di Schrödinger, la posizione viene "guidata" dalla funzione d'onda stessa



Se la probabilità della posizione della particella è quella prevista dalla funzione d'onda a qualche tempo t , allora la probabilità della posizione della particella è quella prevista dalla funzione d'onda a qualunque tempo successivo

Meccanica quantistica senza collasso

Da quasi mezzo secolo è in corso il programma di liberare la teoria dal collasso del pacchetto d'onda. Il programma prende generalmente il nome di decoerenza indotta dall'ambiente

Idea forza: gli stati sovrapposizione che si generano dall'interazione tra sistemi microscopici e sistemi macroscopici risultano indistinguibili da sistemi con dinamiche casuali classiche.

Il punto di partenza è la semplice considerazione che l'onda di possibilità si propaga nello spazio delle configurazioni del sistema complessivo e non è facile visualizzare come si comportino le onde in uno spazio di così alta dimensionalità.

Da quasi mezzo secolo è in corso il programma di liberare la teoria dal collasso del pacchetto d'onda. Il programma prende generalmente il nome di decoerenza indotta dall'ambiente

Idea forza: gli stati sovrapposizione che si generano dall'interazione tra sistemi microscopici e sistemi macroscopici risultano indistinguibili da sistemi con dinamiche casuali classiche.

Il punto di partenza è la semplice considerazione che l'onda di possibilità si propaga nello spazio delle configurazioni del sistema complessivo e non è facile visualizzare come si comportino le onde in uno spazio di così alta dimensionalità.

Da quasi mezzo secolo è in corso il programma di liberare la teoria dal collasso del pacchetto d'onda. Il programma prende generalmente il nome di decoerenza indotta dall'ambiente

Idea forza: gli stati sovrapposizione che si generano dall'interazione tra sistemi microscopici e sistemi macroscopici risultano indistinguibili da sistemi con dinamiche casuali classiche.

Il punto di partenza è la semplice considerazione che l'onda di possibilità si propaga nello spazio delle configurazioni del sistema complessivo e non è facile visualizzare come si comportino le onde in uno spazio di così alta dimensionalità.

Un esempio paradigmatico è costituito dalla camera a bolle:

- ▶ una particella α estremamente energetica (il sistema microscopico) evolve in un ambiente fatto di atomi (il sistema macroscopico) .
- ▶ Eventi di ionizzazione degli atomi inducono formazione locale di gocce d'acqua in un vapore soprassaturo contenuto nella camera
- ▶ ciascuna possibile direzione della velocità della particella α (il microevento) si realizza come una particolare linea retta di gocce (lo stato del puntatore)

Un esempio paradigmatico è costituito dalla camera a bolle:

- ▶ una particella α estremamente energetica (il sistema microscopico) evolve in un ambiente fatto di atomi (il sistema macroscopico) .
- ▶ Eventi di ionizzazione degli atomi inducono formazione locale di gocce d'acqua in un vapore soprassaturo contenuto nella camera
- ▶ ciascuna possibile direzione della velocità della particella α (il microevento) si realizza come una particolare linea retta di gocce (lo stato del puntatore)

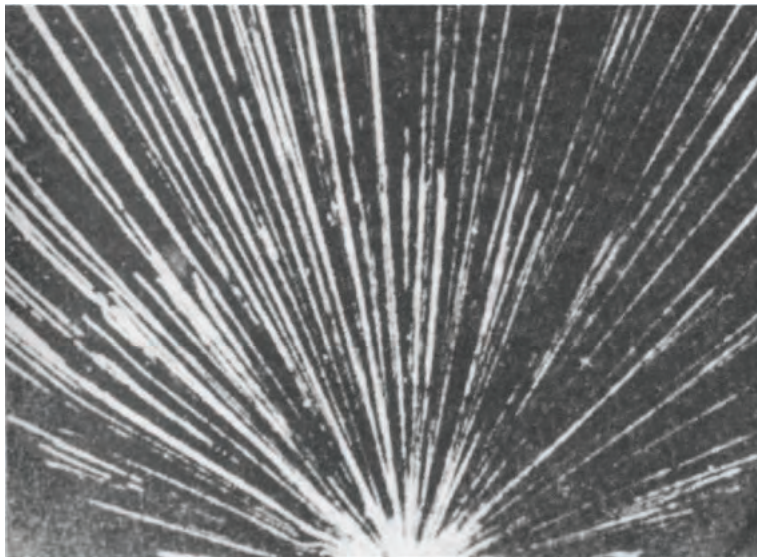
Un esempio paradigmatico è costituito dalla camera a bolle:

- ▶ una particella α estremamente energetica (il sistema microscopico) evolve in un ambiente fatto di atomi (il sistema macroscopico) .
- ▶ Eventi di ionizzazione degli atomi inducono formazione locale di gocce d'acqua in un vapore soprassaturo contenuto nella camera
- ▶ ciascuna possibile direzione della velocità della particella α (il microevento) si realizza come una particolare linea retta di gocce (lo stato del puntatore)

Un esempio paradigmatico è costituito dalla camera a bolle:

- ▶ una particella α estremamente energetica (il sistema microscopico) evolve in un ambiente fatto di atomi (il sistema macroscopico) .
- ▶ Eventi di ionizzazione degli atomi inducono formazione locale di gocce d'acqua in un vapore soprassaturo contenuto nella camera
- ▶ ciascuna possibile direzione della velocità della particella α (il microevento) si realizza come una particolare linea retta di gocce (lo stato del puntatore)

Meccanica quantistica senza collasso



Spazio-tempo discretizzato - Ipotesi di presentazione della dinamica quantistica

- Cinematica: lo stato di una particella a ogni tempo n è specificato dall'associazione a ogni punto i del reticolo, di un vettore a due componenti:

$$\Psi(n) \equiv \left\{ \vec{\psi}_j \right\}_{j=1}^N (n) \equiv \{ \psi_{j,x}, \psi_{j,y} \}_{j=1}^N (n) \equiv \{ x_j(n), y_j(n) \}_{j=1}^N.$$

Agli "osservabili" posizione e quantità di moto sono associate le due operazioni Z e P nello spazio degli stati

$$Z\Psi(n) = \left\{ \overrightarrow{(Z\Psi)}_j \right\}_{j=1}^N (n) = \{ j x_j(n), j y_j(n) \}_{j=1}^N$$

$$P\Psi(n) = \left\{ \overrightarrow{(P\Psi)}_j \right\}_{j=1}^N (n) = \{ \Delta_j y(n), -\Delta_j x(n) \}_{j=1}^N$$

con $\Delta_j x = \frac{x_{j+1} - x_j}{a}$ e $\Delta_j y = \frac{y_{j+1} - y_j}{a}$ e dove a denota il passo del reticolo spaziale.

Quando lo stato al tempo n è $\Psi(n)$, a posizione e quantità di moto sono associati i due numeri reali

$$\begin{aligned}(\Psi(n), Z \Psi(n)) &\equiv \sum_{j=1}^N (\psi_{j,x}(n) (Z\psi)_{j,x}(n) + \psi_{j,y}(n) (Z\psi)_{j,y}(n)) \\ &= \sum_{j=1}^N j (x_j^2(n) + y_j^2(n))\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\Psi(n), P \Psi(n)) &\equiv \sum_{j=1}^N (\psi_{j,x}(n) (P\psi)_{j,x}(n) + \psi_{j,y}(n) (P\psi)_{j,y}(n)) \\ &= \sum_{j=1}^N j (x_j(n) \Delta_j y(n) - y_j(n) \Delta_j x(n))\end{aligned}$$

- Statistica dei risultati di una misura: probabilità di trovare la particella nel punto i del reticolo al tempo n

$$P_j(n) = |\vec{\psi}_j(n)|^2 = x_j^2(n) + y_j^2(n).$$

Necessariamente $\sum_{j=1}^N (x_j^2(n) + y_j^2(n)) = 1$.

In particolare il valore medio della posizione sarà

$$\langle Z \rangle = (\Psi(n), Z \Psi(n)) = \sum_{j=1}^N j (x_j^2(n) + y_j^2(n))$$

e la deviazione standard

$$\langle (Z - \langle Z \rangle)^2 \rangle = \langle Z^2 \rangle - \langle Z \rangle^2 = \sum_{j=1}^N j^2 (x_j^2(n) + y_j^2(n)) - \langle Z \rangle^2$$

Il valore medio della quantità di moto $p = m v$ sarà

$$\langle P \rangle = (\Psi(n), P \Psi(n)) = \sum_{j=1}^N (x_j(n) \Delta_j y(n) - y_j(n) \Delta_j x(n))$$

con deviazione standard

$$\langle P^2 - \langle P \rangle^2 \rangle = - \sum_{j=1}^N \Delta_j^2 y(n) + \Delta_j^2 x(n)) - \langle P \rangle^2$$

- L'equazione di evoluzione: Le componenti del vettore di stato evolvono nel tempo in accordo all'equazione di Schrödinger :

$$\begin{cases} x_j(n+1) - x_j(n) = [-y_{j+1}(n) - y_{j-1}(n) + 2y_j + V_j y_j(n)] \Delta t \\ y_j(n+1) - y_j(n) = [+x_{j+1}(n) + x_{j-1}(n) - 2x_j + V_j x_j(n)] \Delta t \end{cases}$$

dove V_j è il valore assunto nel punto j dal potenziale della forza conservativa agente sulla particella quantistica.

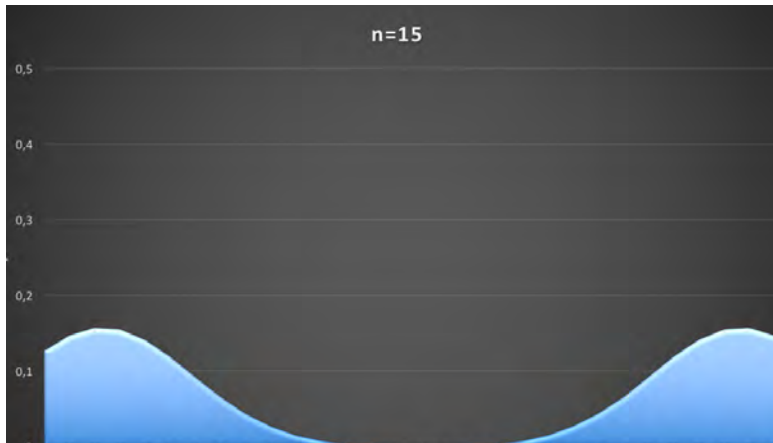
Conseguenze

a) $\Phi = \{\alpha\delta_{ij}, \beta\delta_{ij}\}_{i=1}^N$, $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ è lo stato di una particella che si trova con certezza nel punto j . Nello stato Φ la quantità di moto ha la massima deviazione standard (uguale a 2).

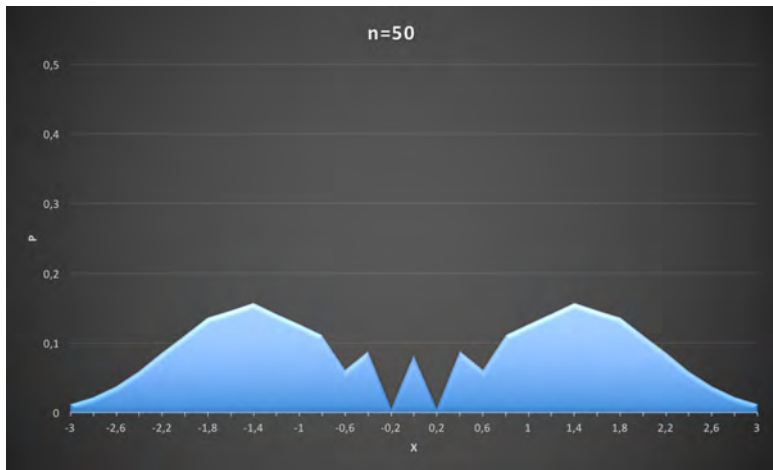
b) $\Psi = \{\frac{\alpha}{\sqrt{N}}, \frac{\beta}{\sqrt{N}}\}_{i=1}^N$, $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ è lo stato di una particella che ha con certezza quantità di moto 0. La corrispondente distribuzione della posizione è uniforme: la posizione ha la massima deviazione standard nello stato Ψ .

c) Non ci sono stati per i quali la particella ha valori certi di posizione e quantità di moto.

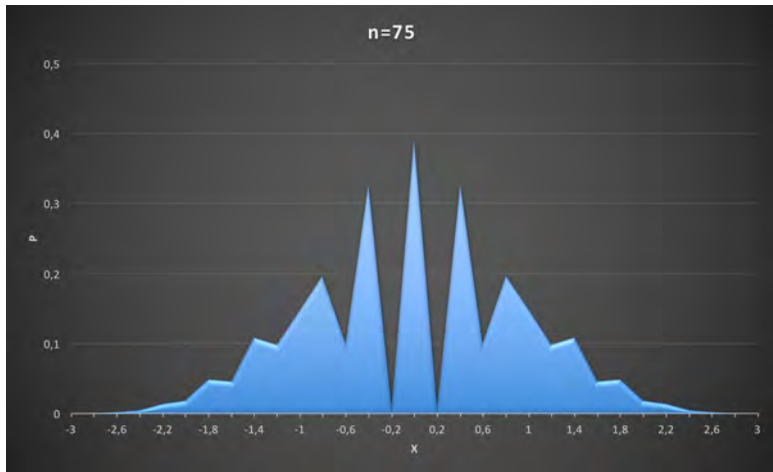
Particella libera



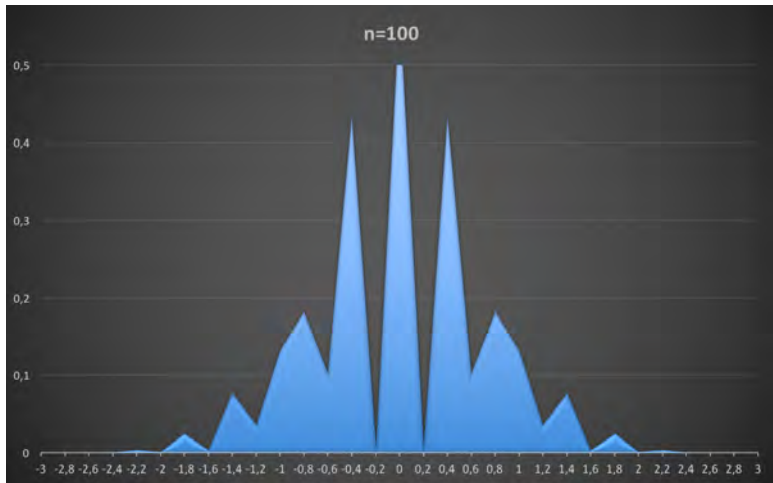
Particella libera



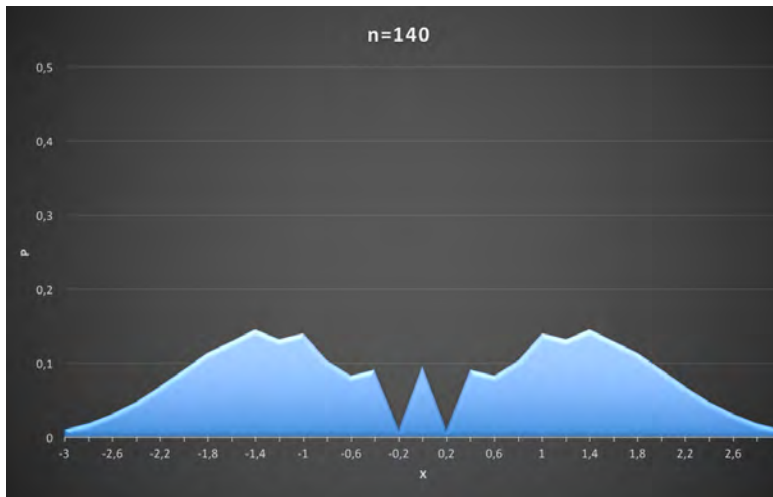
Particella libera



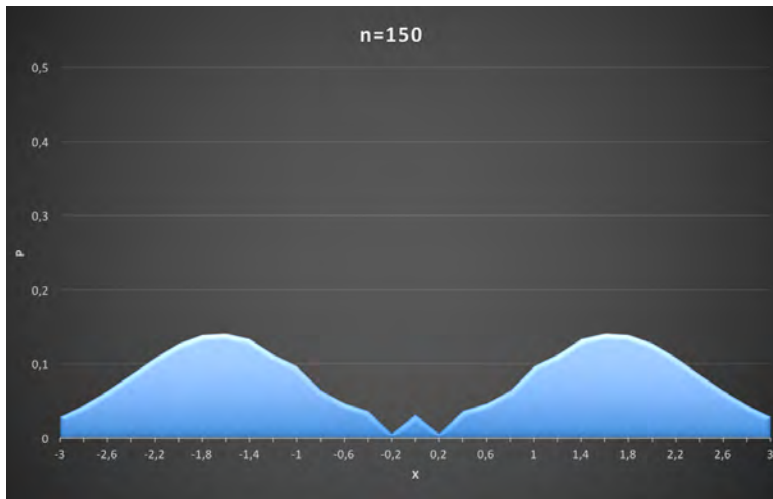
Particella libera



Particella libera



Particella libera



Particella libera

