

- Incontro 1:** Introduzione all'esperimento di interferenza di elettroni singoli (Olivia Levrini, Giorgio Lulli)
- Incontri 2-3:** Esperimenti sul comportamento delle onde alla superficie di un liquido (parte 1 e parte 2) (Barbara Pecori) **[16 - 18 marzo, ore 15-18, Lab DF]**
- Incontro 4:** Esperimenti sul comportamento ondulatorio della luce (Barbara Pecori) **[23 marzo, ore 15-18, Lab DF]**
- Incontro 5:** Esperimenti sul comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico (Giorgio Matteucci) **[25 marzo, ore 15-18, Lab DF]**
- Incontro 6:** La storia dell'esperimento più bello (Olivia Levrini, Giorgio Lulli) **[28 marzo, ore 16-18, Aula A]**

28.03.2011

Indeterminazione, complementarità e altro in meccanica quantistica

Olivia Levrini



“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l’unico mistero. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi delle peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.”

Richard Feynman
(1918-1988)

La meccanica quantistica

- teoria formulata negli anni 30 (intorno al 1927), grazie al contributo di molti fisici, Planck, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac e altri... e anche grazie allo “speciale” contributo dato da Einstein (e le sue critiche acute);
- oggi è accettata: esistono un formalismo ed assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà;
- questo formalismo spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”...

“a modo suo”

la teoria funziona perfettamente: il suo formalismo ha permesso di fare previsioni precisissime

ma

assorbe dentro di sé (eleva a principi) l'idea che si debba rinunciare ad alcune categorie su cui si basava la spiegazione dei fenomeni della fisica classica:

- il principio di causalità (il determinismo);
- la rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo;
- il principio di non-contraddizione (un oggetto o è una cosa o un'altra).

Il principio di indeterminazione

Werner Heisenberg (1901, 1976)



Marzo 1927: "Sul contenuto osservabile della cinematica e della meccanica quantistiche"

UNIVERSITETETS INSTITUT
FOR
TEORETISK FYSIK.

N. BOHR
M. S. ROSENBLUTH

III

(kanonisch konjugierte
Koordinaten q und p)
 kann die Koordinate q auf einer Linie q_0 mit
 einer Genauigkeit angegeben werden, die durch den
 mittleren Fehler $\Delta q \approx \frac{h}{2\pi p}$ gegeben ist. Entsprechend ist
 die Koordinate p mit einer Genauigkeit $\Delta p \approx \frac{h}{2\pi q}$
 zu messen. Es sei (q, p) eine beliebige Zustands-
 anzahl für q für einen gewissen Parameterwert q_0 ,
 dann ist (q, p) mit im Bereich $q_0 - \Delta q < q < q_0 + \Delta q$
 von Null verschieden, denn wir haben $(q, p) = e^{\frac{i}{h}(p q - p_0 q_0)}$
 mit Null verschieden, wie man von dieser Gl. ablesen
 kann. $(p - p_0) \approx \frac{h}{q}$ von einer höheren Ordnung als
 1 ist. D. h. $p_0 = \frac{h}{q_0}$, (q, p) wird mit einer
 Genauigkeit $\Delta p \approx \frac{h}{q}$ von Null verschieden.

1. Può il formalismo matematico tener conto che posizione e velocità di una particella sono determinabili, *simultaneamente*, solo con una precisione limitata?
2. Se la precisione limitata è ammessa dalla teoria, può questa essere compatibile con la massima accuratezza che si può ottenere in una misura?

Approccio operazionista

“Se si vuole chiarire il significato della locuzione ‘posizione di un oggetto’, per esempio di un elettrone, occorre descrivere un esperimento mediante il quale la ‘posizione dell’elettrone’ possa essere misurata: altrimenti tale locuzione non ha alcun significato”.

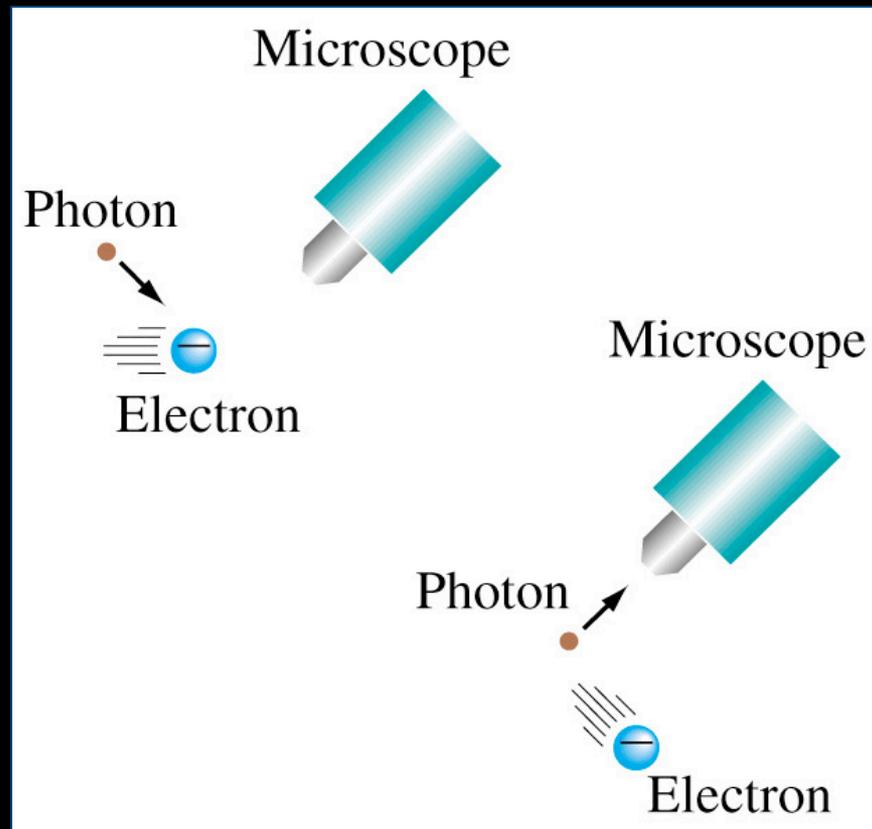
“Questo concetto [di “simultaneo”] non esiste per il fisico, finché non gli sia possibile scoprire se esso sia o non sia soddisfatto in un caso reale. Ci è necessaria, quindi, una definizione di simultaneità capace di fornirci i mezzi con i quali, nel caso concreto, si possa decidere mediante l’esperienza se entrambi i segnali luminosi avvengono simultaneamente. Finché questa condizione non è soddisfatta, io mi lascio ingannare, come fisico (e lo stesso vale anche se non sono un fisico), se ritengo di poter attribuire un significato alla nozione di simultaneità.”

Einstein, 1916, *Relatività: esposizione divulgativa e scritti classici su Spazio Geometria Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino (ed. 1994).

Esperimento mentale: microscopio a raggi γ

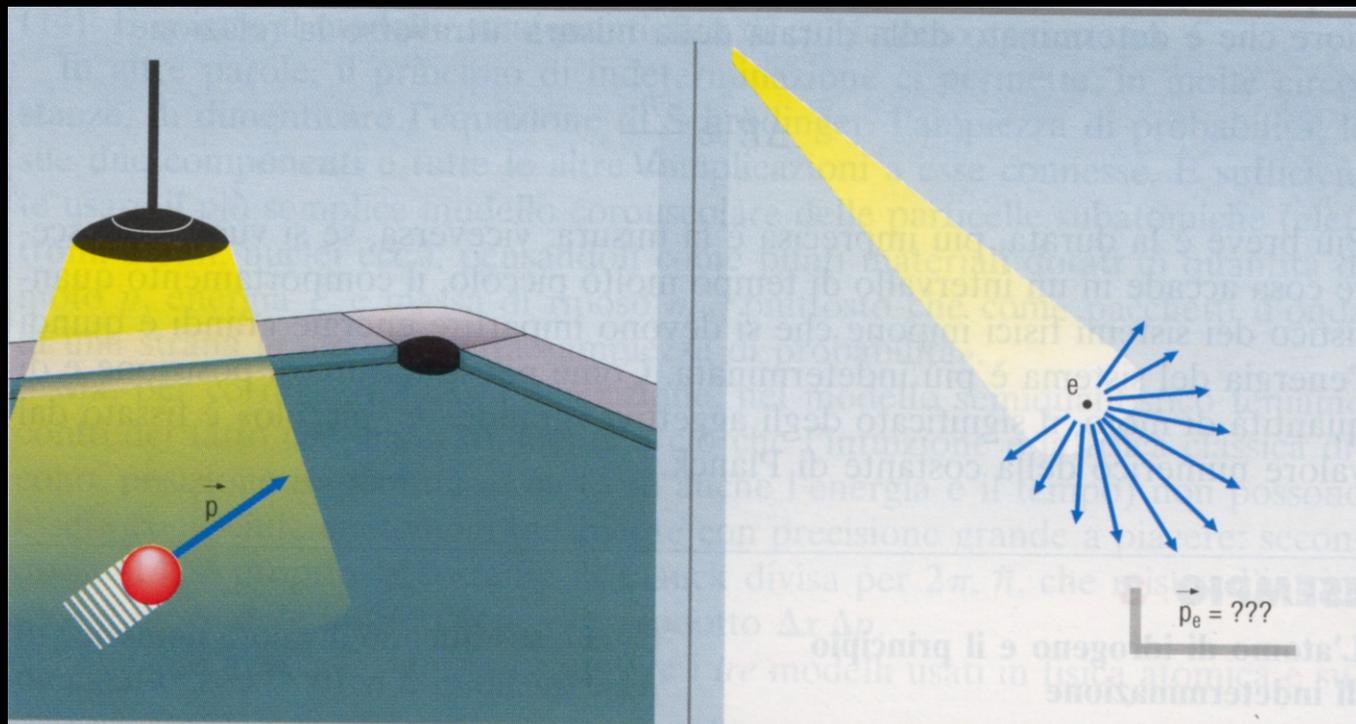
Microscopio ad altissima risoluzione che utilizza, per “illuminare” l’oggetto, radiazione di lunghezza d’onda molto piccola

L'interpretazione "a disturbo" di Heisenberg



Dal libro di testo “U.Amaldi”

Per “vedere” una particella dobbiamo fare in modo che essa diffonda la “luce” che incide su di essa in maniera che una parte della “luce” diffusa giunga ai nostri occhi o agli strumenti di rivelazione. Per fare ciò è necessario che la lunghezza d’onda della luce utilizzata sia al più delle dimensioni dell’oggetto che si vuole “vedere”.



[...] ma i fotoni che compongono un fascio di luce di piccola lunghezza d'onda [...] sono molto energetici e interagiscono con le particelle materiali producendo l'effetto Compton.

In definitiva la particella che noi riusciamo a vedere, perché urtata da un fotone che poi è giunto fino al nostro rivelatore, ha subito un urto che l'ha accelerata in modo casuale. Dopo la misura possiamo quindi sapere qual è la sua posizione, ma nello stesso tempo abbiamo perduto ogni possibilità di determinare con precisione la quantità di moto.

E' interessante notare che si vuole diminuire l'indeterminazione Δx sulla posizione, utilizzando luce di lunghezza d'onda minore, aumenta l'energia dei fotoni incidenti e, di conseguenza aumenta l'indeterminazione sulla quantità di moto della particella.

(U. Amaldi)

“Al momento della determinazione della posizione dell’elettrone, quando il quanto di luce è diffuso, cambia la quantità di moto ***in modo discontinuo***. Questo cambiamento è tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d’onda della luce cioè quanto maggiore è la precisione nel determinare la posizione. Quindi, nel momento in cui si sta determinando la posizione dell’elettrone la quantità di moto può essere conosciuta solo entro un valore che corrisponde al ***cambiamento discontinuo***; allora, ***più esattamente si determina la posizione, tanto più imprecisa sarà, nello stesso istante, la determinazione della velocità e viceversa***”

(Heisenberg, 1927)

Dall'esperimento ideale di Heisenberg ...

- Indeterminazione come “disturbo” o “perturbazione”
- L'esperimento è interpretato considerando la natura corpuscolare e discreta del mondo microscopico

“... in certo senso cessa di essere valida la legge di causalità”

“Nella formulazione rigorosa della legge causale - **se conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro** - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa.

Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.

[...] le leggi e le predizioni della meccanica quantistica ‘sono in generale solo di tipo statistico’. Non si può mai predire esattamente il risultato di una singola misura di un qualsiasi processo atomico, ma si può predire solo la probabilità di un risultato in un intervallo di possibilità.”

Heisenberg, 1927

Niels Bohr
(1889, 1962)



L'obiezione di Bohr

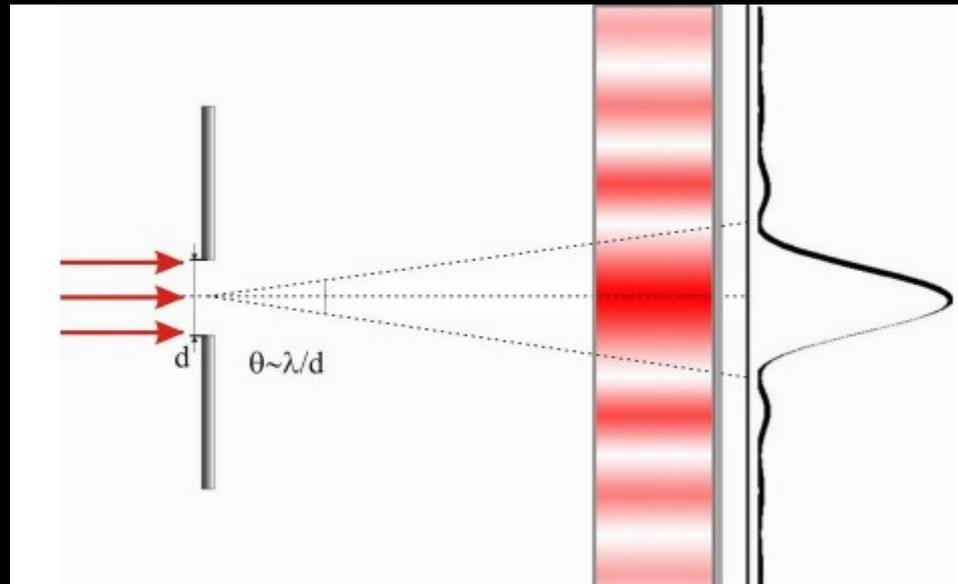
Occorre considerare anche

- la ***natura ondulatoria*** del raggio diffuso
- il ruolo dello ***strumento di misura***

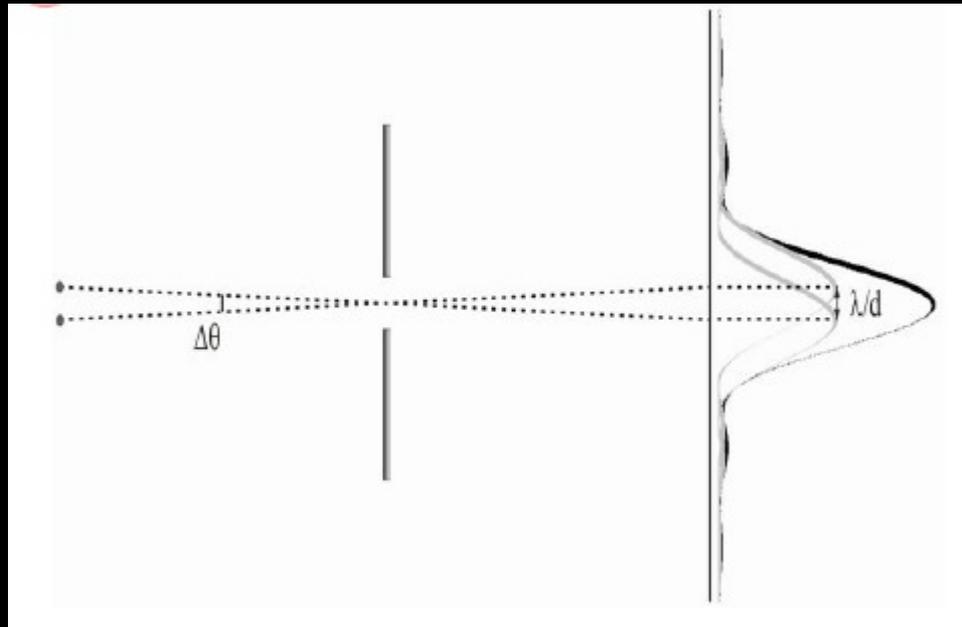
L'impossibilità di misurare simultaneamente posizione e velocità ***non dipende soltanto*** dal rinculo dell'elettrone per l'urto con il fotone gamma, ***ma anche*** dalla diffrazione della radiazione gamma nell'apertura dell'obiettivo del microscopio

L'obiezione di Bohr

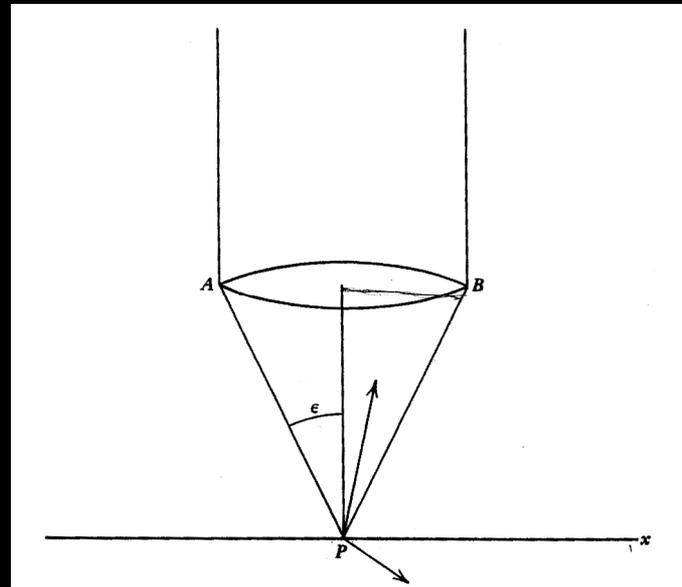
Quando un fascio di luce monocromatica passa attraverso una fenditura di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, il fascio si allarga per in fenomeno di diffrazione



Potere risolutivo di un microscopio: due sorgenti sono risolte quando le loro figure di diffrazione sono chiaramente separate l'una dall'altra, ovvero (**criterio di Rayleigh**) quando il massimo centrale di una figura di diffrazione coincide con il primo minimo dell'altra.



Il microscopio di Heisenberg



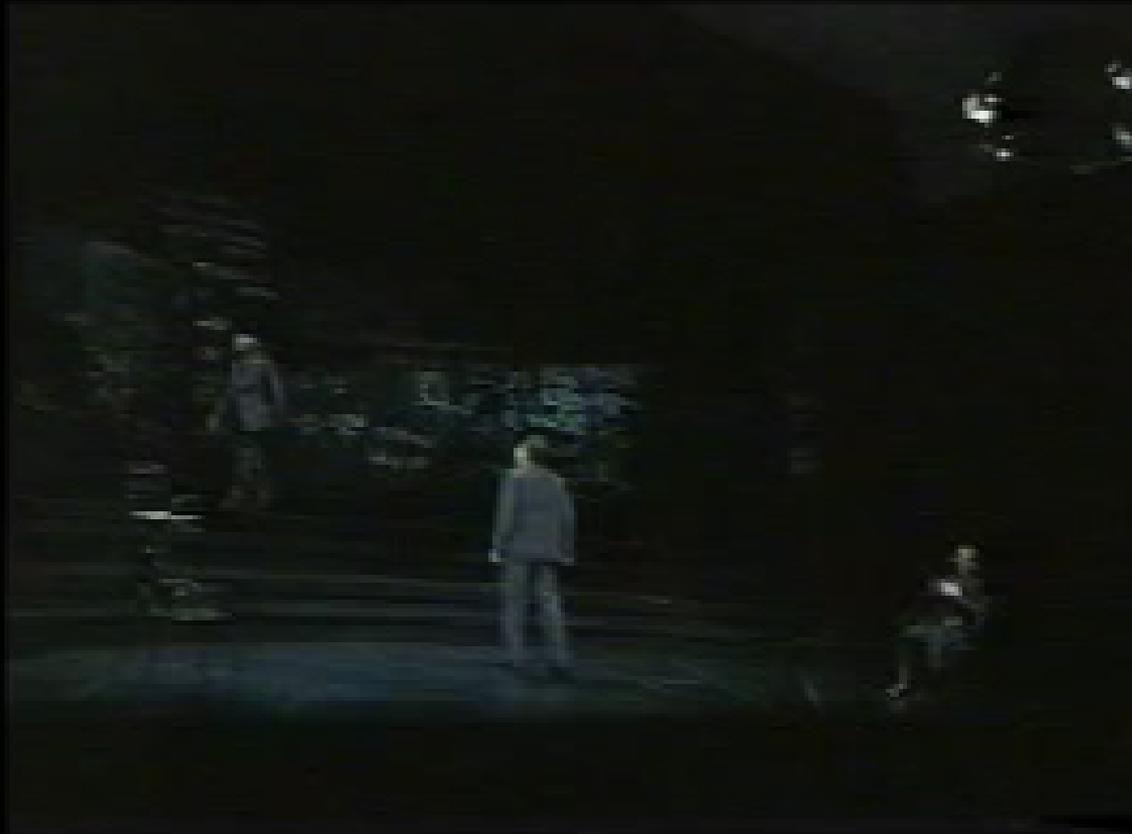
$$\Delta p_x = \frac{2h \sin \epsilon}{\lambda}$$

Incertezza sulla quantità di moto dell'elettrone
(effetto Compton)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$$

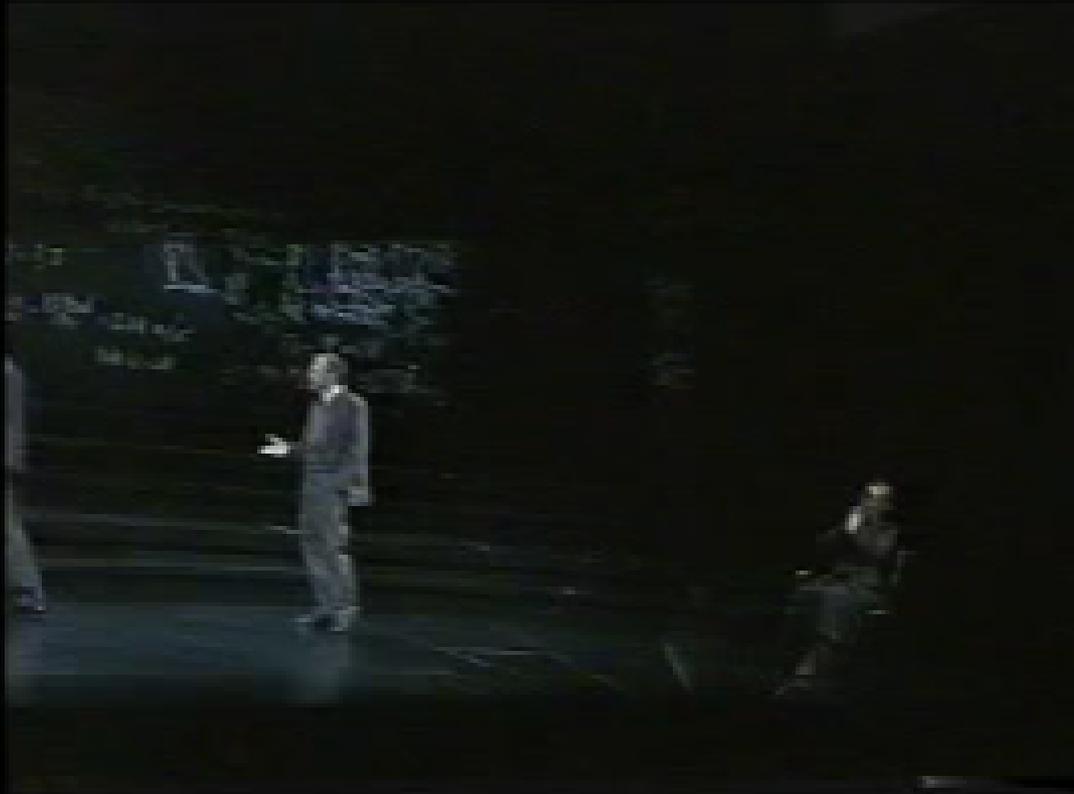
Incertezza sulla posizione dell'elettrone (potere
risolutivo)

C'è un errore fondamentale



“Copenhagen”, 1998, M. Frayn

Copenaghen è un atomo...



“Copenhagen”, 1998, M. Frayn



Bohr:

Mio caro Heisenberg, non è un comportamento corretto mandare in stampa una bozza prima di averne discusso insieme! Non è così che lavoriamo!

Heisenberg:

No, il nostro modo di lavorare è che tu ti accanisci contro di me dalla mattina alla sera! Il nostro modo di lavorare è che tu mi fai diventar matto!

Bohr:

Sì, perché l'articolo contiene un ***errore fondamentale***.

Margrethe:

Ci risiamo.

Heisenberg:

No, però gli dimostro la verità più strana sull'universo che ci sia mai capitato d'incontrare dall'epoca della relatività - cioè che uno non può conoscere nulla della collocazione di una particella, o di checchessia - neppure di Bohr adesso, mentre va avanti e indietro per la stanza come un matto - perché non possiamo osservarla senza introdurre un qualche nuovo elemento nella situazione: una molecola di vapore acqueo che possa colpire, o un frammento di luce - elementi che posseggono una loro energia e che quindi producono un effetto su quello che colpiscono. Un piccolo effetto, d'accordo, nel caso di Bohr.

Bohr:

Sì, se sai definire dove mi trovo con la stessa approssimazione applicabile alle particelle, puoi anche calcolare la mia velocità - fino a quale cifra... ?

Heisenberg:

Qualcosa come un miliardesimo di miliardesimo di chilometro al secondo. Rimane la questione teorica, comunque, che nel mondo non esistono situazioni assolutamente determinate, il che, fra le altre cose, demolisce il concetto di causalità, l'intero fondamento della scienza perché se non sai come stanno le cose oggi, non puoi certo sapere come saranno domani. Io sto smontando l'universo oggettivo intorno a te e tutto quello che sai dire è che c'è un errore di formulazione!

Bohr:

È così!

Heisenberg:

Ascolta, nel mio articolo, quello che stiamo cercando di individuare non è un elettrone libero che vaga all'interno di una camera a nebbia, ma un elettrone a casa sua, che si muove all'interno di un atomo...

Bohr:

E l'indeterminazione non si manifesta, come sostieni tu, attraverso un rinculo indeterminato quando viene colpito da un fotone in arrivo...

Heisenberg:

Parole semplici, parole semplici!

Bohr:

Queste sono parole semplici.

Bohr:

Le parole della meccanica classica

Heisenberg:

Sta a sentire! Copenaghen è un atomo. Margrethe è il suo nucleo. Più o meno, la scala? Diecimila a uno?

Bohr:

Sì, sì.

Heisenberg:

Ora, Bohr è un elettrone. Va errando per la città da qualche parte, nel buio, non si sa dove. È qui, è là, dovunque e nessun luogo. Su a Faelied Park, giù a Carisberg. Davanti al Municipio, fuori vicino al porto. Io sono un fotone. Un quanto di luce. Vengo spedito nel buio a cercare Bohr. E ci riesco, perché riesco a entrare in collisione con lui... Ma che cosa è successo? Guardate - lui è stato rallentato, è stato deviato! Non fa più esattamente quello che faceva così convulsamente quando l'ho incrociato!

Bohr:

Ma, Heisenberg, Heisenberg! Anche tu sei stato deviato! Se la gente potesse vedere quello che è successo a tè, al loro frammento di luce, allora capirebbero quello che deve essere successo a me!

Il problema è sapere che cosa è successo a te! Perché per capire come ti vede la gente, dobbiamo trattarti non solo come una particella, ma come un'onda. Io devo usare non solo la tua meccanica delle particelle, devo usare la funzione d'onda di Schrodinger.

Heisenberg:

Lo so, l'ho detto in un poscritto al mio articolo.

Bohr:

Tutti ricordano l'articolo, nessuno ricorda il poscritto. Ma la questione è fondamentale. Le particelle sono oggetti, completi nella loro essenza. Le onde sono perturbazioni di qualcos'altro.

Heisenberg:

Lo so. La complementarità. È nel poscritto.

Bohr:

O sono una cosa, o sono l'altra. Non possono essere l'una e l'altra. E noi dobbiamo scegliere un modo di vederle o l'altro. Ma facendolo, ci precludiamo la possibilità di sapere tutto sul loro comportamento.

M. Frayn, 1998, "Copenhagen"

Dal dibattito Heisenberg-Bohr

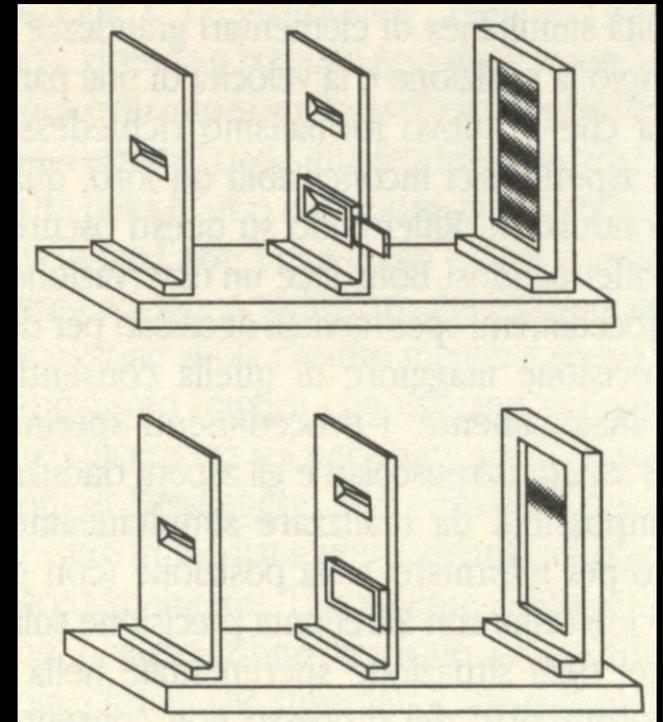
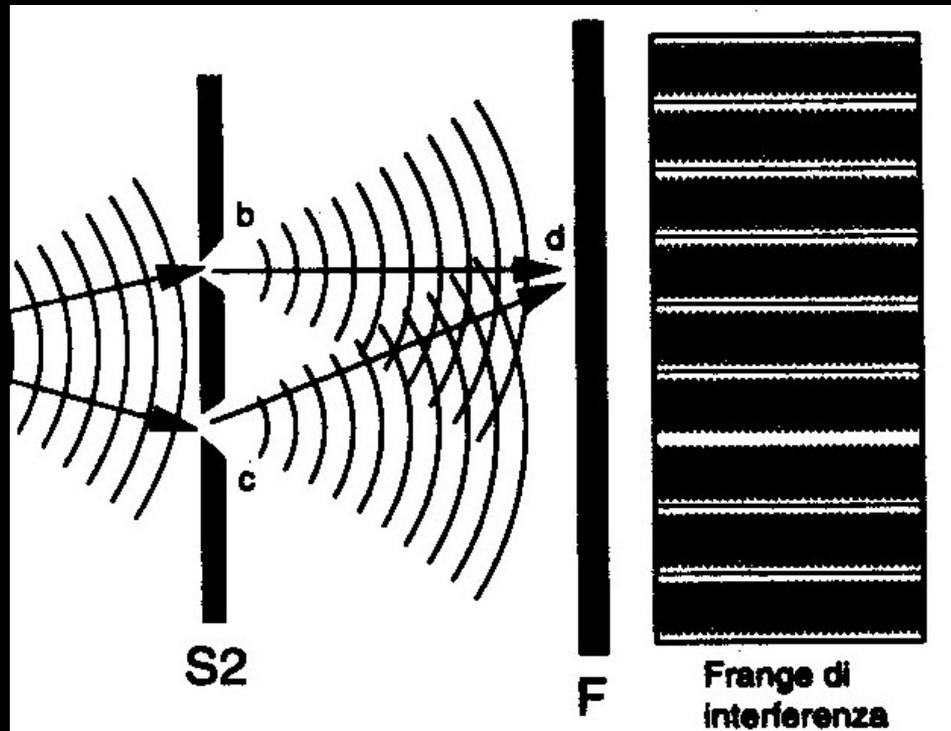
- cade il principio di causalità, così come il concetto di traiettoria;
- la “complementarità” *spiega* il principio di indeterminazione;
- “complementarità” come dualismo onda-corpuscolo (il raggio  “si propaga come un’onda e interagisce come un corpuscolo”) (Primo significato);
- l’apparato di misura svolge un ruolo “attivo” nel processo di misura.

Dal Congresso di Solvay, 1927:

Il dialogo Bohr-Einstein

L'esperimento dell'interferenza da due fenditure come esperimento mentale:
nuovi significati della complementarità

Origine dell'esperimento: Einstein voleva dimostrare l'assurdità della complementarità



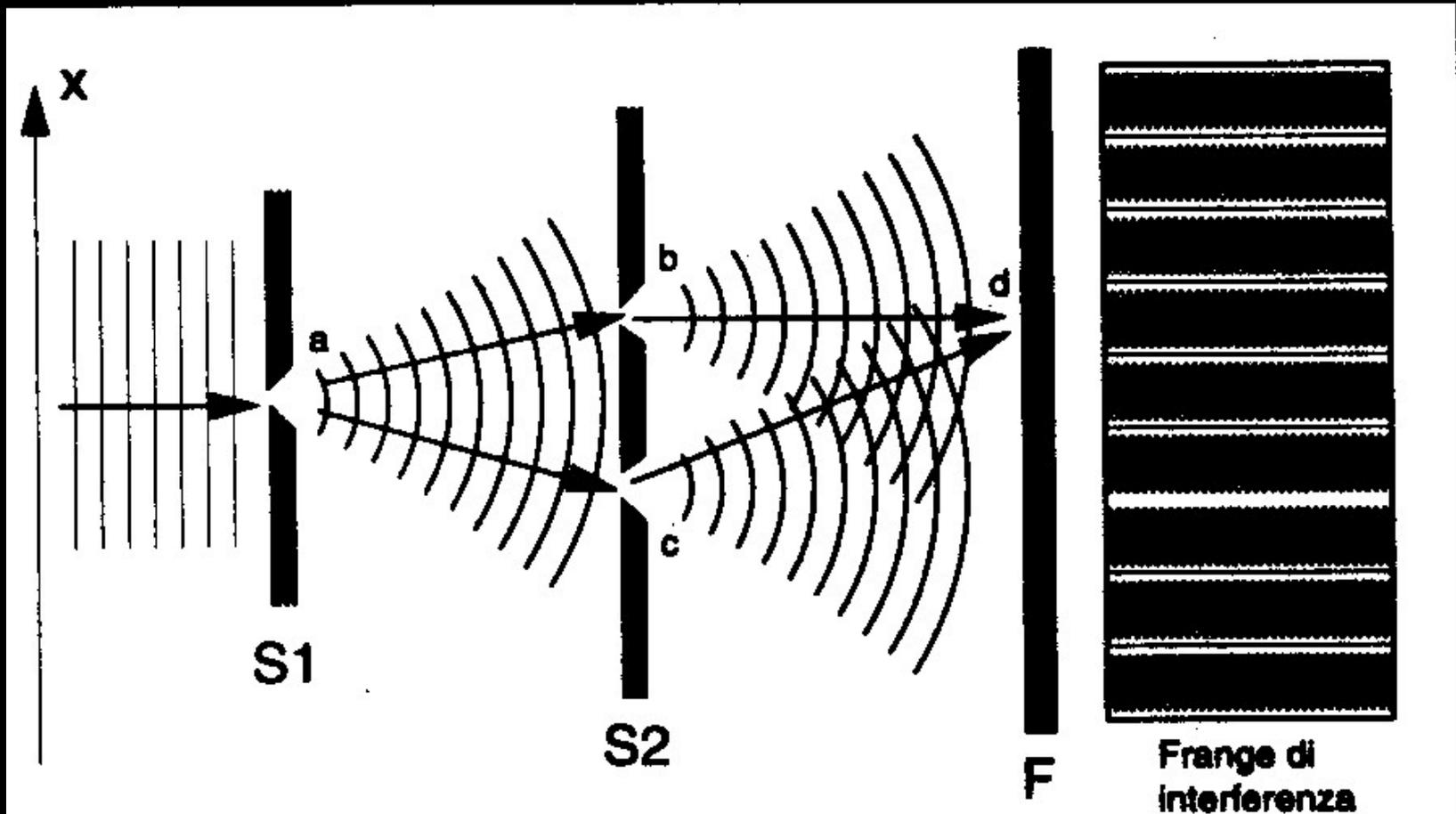
Secondo significato di complementarità riconducibile al dualismo onda-corpuscolo:

Non è possibile ottenere contestualmente l'informazione sul cammino percorso dal fascio (pensiamolo di ELETTRONI) e una figura d'interferenza: si tratta di “aspetti complementari”, riconducibili al dualismo onda-corpuscolo, qualora si associ:

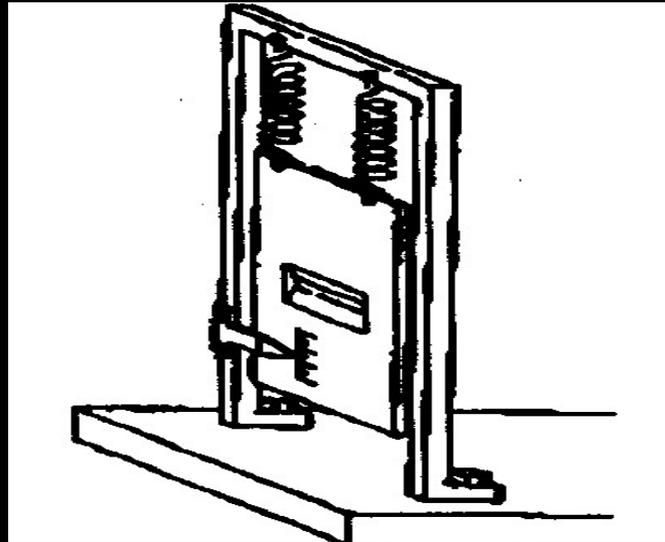
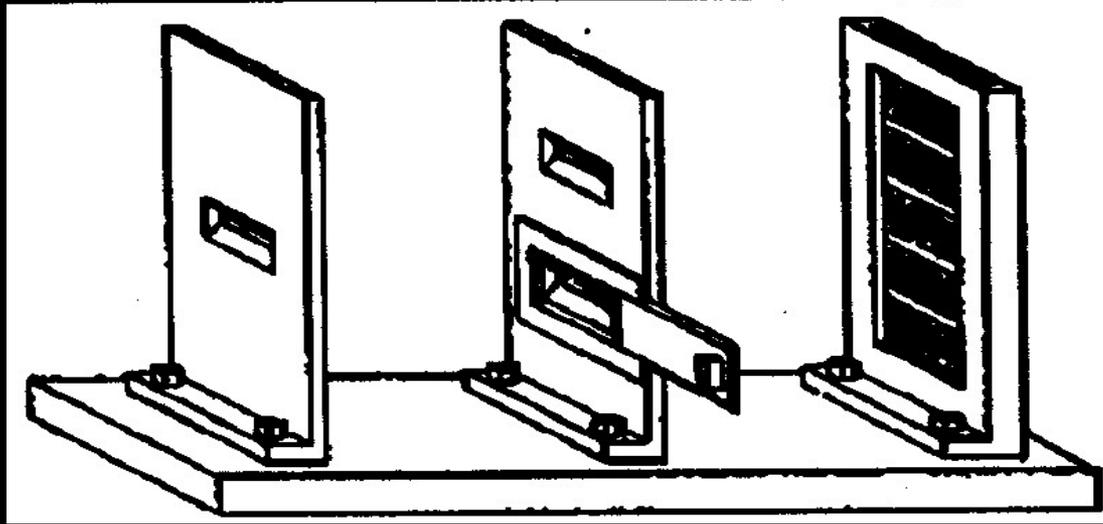
- il formarsi di una figura d'interferenza alla natura ondulatoria del fascio;
- l'informazione del cammino percorso alla natura corpuscolare del fascio.

Presupposto agli esperimenti “which-way” (Giorgio)

Esperimento mentale di Einstein



Risposta di Bohr....



Complementarità come fenomeni (esperimenti) reciprocamente escludentesi (Terzo significato)

“Vediamo qui un tipico esempio del fatto che i fenomeni complementari si manifestano in esperimenti congegnati in modo tale da escludersi l’un l’altro, e ci troviamo di fronte all’impossibilità di effettuare, nell’analisi degli effetti quantistici, una separazione netta fra un comportamento indipendente degli oggetti atomici e la loro interazione con gli strumenti misuratori che servono a definire le condizioni in cui avvengono i fenomeni.”

(Bohr, 1927)

Alcune considerazioni:

Nell'obiezione di Bohr ad Einstein:

- la complementarità sembra basarsi sul PI: problema quale dei due principi è “più fondamentale”?
- Il problema della demarcazione tra micro e macro: quanto è lecito applicare il PI allo schermo?

Sul dualismo onda-corpuscolo

- i molteplici significati del termine “onda” e del termine “corpuscolo” e il rischio della ridondanza semantica: come fare?

La meccanica quantistica diventa teoria (interpretazione di Copenaghen) e Einstein...

dalla ricerca di argomenti per mostrare
l'inconsistenza della teoria...

...passa alla ricerca di argomenti per mostrare che la
teoria non dice l'ultima parola sui meccanismi
profondi che regolano l'universo (non è completa).

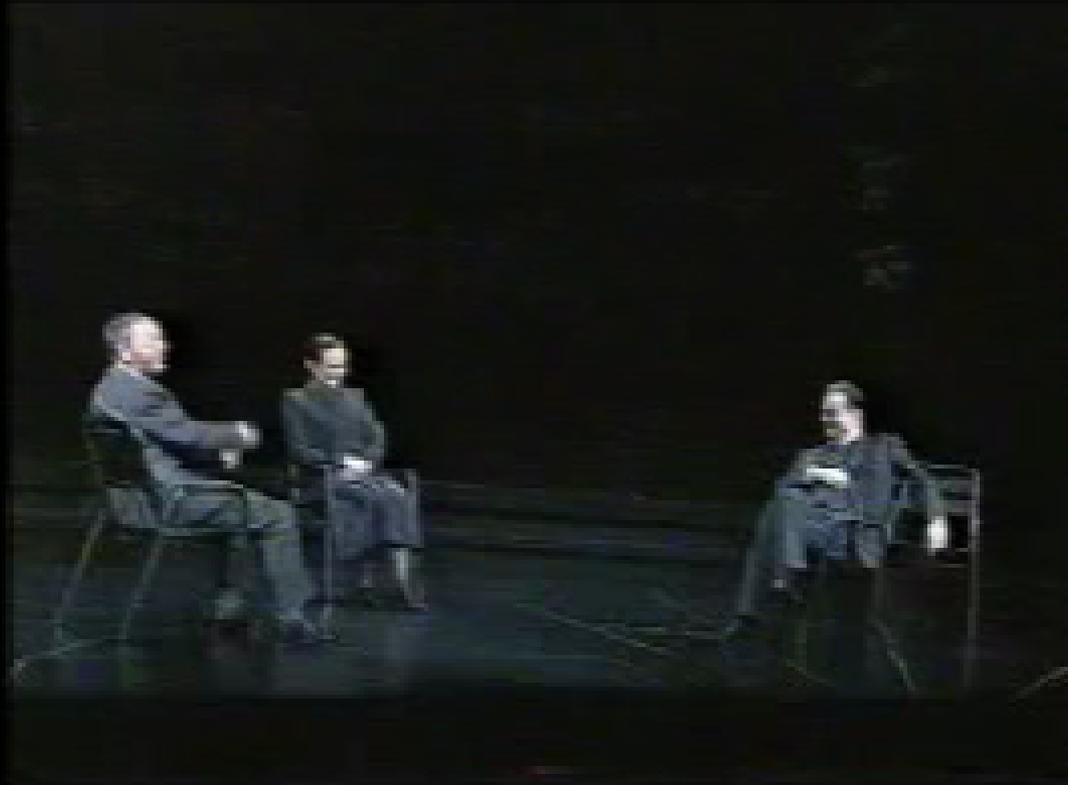
Oggi:

1. L'interpretazione "a disturbo" del PI non più accettabile: "Esperimenti "which way" senza disturbi meccanici" (Giorgio)
2. La descrizione fornita dalla MQ (basata sul principio di indeterminazione e su quello di complementarità) è completa (Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, 2001)

Sottolineature culturali....

- Un dibattito “fisico” diventa anche conflitto “accademico” e conflitto “personale” tra allievo e maestro: l’efficientismo e l’ambizione di Heisenberg a confronto con la profondità di Bohr e la sua esigenza di interpretare le nuove conoscenze
- Due maestri si confrontano: esiste un principio di autorità in fisica?

Non correre, non correre...



M. Frayn, 1998, "Copenhagen"

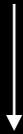
Fisica e visioni del mondo (e della fisica)

ovvero

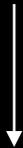
**come lo stesso fatto (principio di indeterminazione)
può diventare argomento a sostegno di tesi anche
tra di loro MOLTO diverse**

Werner Heisenberg

Il mondo microscopico è corpuscolare e discreto



Crisi del principio di causalità



Il linguaggio “migliore” della meccanica quantistica è quello delle matrici





Erwin Schrödinger

“Parlare di elettroni e protoni come di punti materiali e negare tuttavia che essi abbiano traiettorie determinate, è una cosa che sembra quanto mai contraddittoria, una pazzia.”

(1931, “L’indeterminismo in fisica”)



Nel micromondo non esistono più le “cosiddette particelle”



Il linguaggio “migliore” della meccanica quantistica è quello ondulatorio (anche se equivalente a quello delle matrici)

Niels Bohr

Il mondo microscopico presenta
aspetti complementari

Esso non è conoscibile nella sua
essenza con i nostri strumenti di
pensiero “classici”



Siamo costretti ad utilizzare anche per la meccanica
quantistica l'unico linguaggio che ci è possibile: quello
della fisica classica



Wolfgang Pauli

“Salviamo i fenomeni”... (?)



“Non ci si dovrebbe scervellare per capire se qualcosa di cui non si sa nulla esista davvero, più di quanto non lo si faccia per risolvere l’antico mistero di quanti angeli possano sedere sulla punta di uno spillo.”

(W. Pauli, citato in M. Born e A. Einstein,
Scienza e vita. Lettere 1916-1955, Einaudi, 1973)



Albert Einstein

Il mondo microscopico non è spiegato o spiegabile da questa stravagante teoria

Il linguaggio con cui accedere al mondo microscopico non può essere quello della meccanica quantistica

“Ciò che non mi soddisfa in questa teoria, in linea di principio, è il suo atteggiamento verso ciò che sembra essere lo scopo programmatico della fisica stessa: la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si suppone possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica. Ogniquale volta il fisico moderno dalle simpatie positivistiche ode una simile formulazione, la sua reazione è un sorriso di compatimento. Egli dice fra sé: “ecco qui la formulazione pura e semplice di un pregiudizio metafisico, vuoto di contenuto, e, peggio ancora, di un pregiudizio la cui confutazione costituisce il maggior risultato epistemologico ottenuto dai fisici nell’ultimo quarto di secolo. ☹...
☹ Pazienza!”

(A. Einstein, 1949, “Autobiografia scientifica”)

In sintesi

L'esperimento più bello impone di ripensare in modo critico ad alcune peculiarità della fisica classica:

- il concetto di traiettoria, basato su un particolare principio di causalità (*il determinismo classico*);
- il modello classico (così come il formalismo classico) di oggetto, basato su un principio di *non contraddizione*;
- la modellizzazione classica dell'oggetto, basata sulla possibilità di "proiettare" le costruzioni simboliche in uno "stesso spazio" (isomorfo a quello ordinario) (permettendo la *visualizzabilità*);
- l'assunzione della *separabilità* tra le misure relative alle proprietà degli oggetti e l'apparato di misura;
- il significato di alcuni termini riferiti a modelli fondamentali della fisica classica.