

AIF, Pavia, 30.10.2013

Fisica quantistica a scuola: Indicazioni ministeriali, risultati di ricerca in didattica della fisica e nuovi orizzonti

Paola Fantini¹, Olivia Levrini²

¹Liceo Scientifico “A. Einstein”, Rimini

²Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna

LE INDICAZIONI NAZIONALI....

Il profilo culturale, educativo e professionale dei Licei

“I percorsi liceali forniscono allo studente gli strumenti culturali e metodologici per una comprensione approfondita della realtà, affinché egli si ponga, con atteggiamento razionale, creativo, progettuale e critico, di fronte alle situazioni, ai fenomeni e ai problemi, ed acquisisca conoscenze, abilità e competenze sia adeguate al proseguimento degli studi di ordine superiore, all’inserimento nella vita sociale e nel mondo del lavoro, sia coerenti con le capacità e le scelte personali”. (art. 2 comma 2 del regolamento recante “Revisione dell’assetto ordinamentale, organizzativo e didattico dei licei...”).

Per raggiungere questi risultati occorre il concorso e la piena valorizzazione di tutti gli aspetti del lavoro scolastico:

- **lo studio delle discipline in una prospettiva sistematica, storica e critica;**
- **la pratica dei metodi di indagine propri dei diversi ambiti disciplinari;**
- **l’esercizio di lettura, analisi, traduzione di testi letterari, filosofici, storici, scientifici, saggistici e di interpretazione di opere d’arte;**
- **l’uso costante del laboratorio per l’insegnamento delle discipline scientifiche;**
- **la pratica dell’argomentazione e del confronto;**
- **la cura di una modalità espositiva scritta ed orale corretta, pertinente, efficace e personale;**
- **l’uso degli strumenti multimediali a supporto dello studio e della ricerca.**

Fisica, ultimo anno

Il percorso didattico comprenderà le conoscenze sviluppate nel XX secolo relative al microcosmo e al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia. L'insegnante dovrà prestare attenzione a utilizzare un formalismo matematico accessibile agli studenti, ponendo sempre in evidenza i concetti fondanti.

[...]

L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo anche a progetti di orientamento.

Dal Workshop Master IDIFO, Udine, 8.9.2006

Risultati di ricerca presentati da Marco
Giliberti,

Dipartimento di Fisica,
Università di Milano

L'istruzione "tradizionale" per argomenti di fisica quantistica è molto simile in tutti i paesi occidentali.

Corpo nero

Effetto fotoelettrico

Effetto Compton

Modello atomico di Thomson

Modello atomico di Rutherford

Modello atomico di Bohr

De Broglie...

**L'elettrone
come una
trottola**

**Modello
atomico di
Sommerfeld**

**Il principio di
indeterminazione
(microscopio di
Heisenberg)**

**Modello
atomico a
orbitali**

Sulla luce...

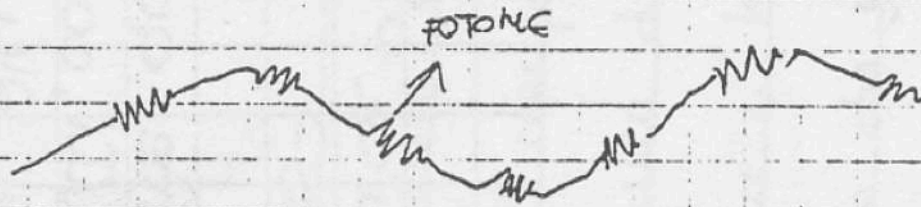
V liceo scientifico dopo 30 ore di lezione

Il fenomeno ondulatorio della luce è stato più volte messo in discussione dai fisici moderni, ad esempio con l'esperimento della doppia fenditura o con quello dell'effetto fotoelettrico; anche l'origine corpuscolare della luce è tuttavia ~~stata~~ messa in discussione (doppia fenditura). La luce quindi potrebbe o comportarsi a volte come un corpuscolo, a volte come un'onda, a seconda delle condizioni chimiche e fisiche, o essere insieme onda e corpuscolo.

Se però dovessi fare una rappresentazione grafica over dei problemi perché è difficile

misurare o esprimere 2 nature diverse con un solo disegno

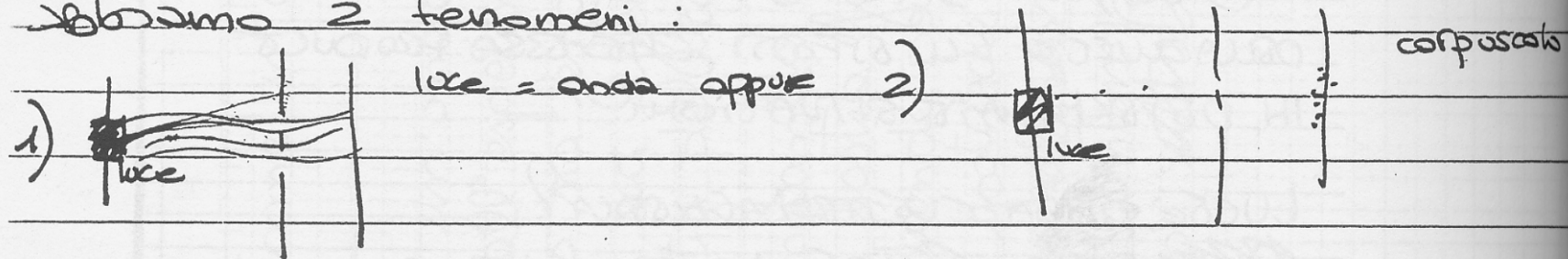
Forse è così



Io penso che sia sbagliato.

• Secondo me la luce si comporta come un'onda ma anche come un corpuscolo, lo si può vedere con la doppia fenditura che mette in crisi la teoria della fisica classica secondo la quale la luce ha natura ondulatoria. Con questo esperimento si dimostra come la luce possa avere anche natura corpuscolare, ipotizzando che sia fatto da particelle e facendo l'esperimento della doppia fenditura. Comunque secondo me a dare essere un modo al quale si possa determinare quale sia realmente la natura della luce, un punto non mi sembra giusto da bobare doppio natura.

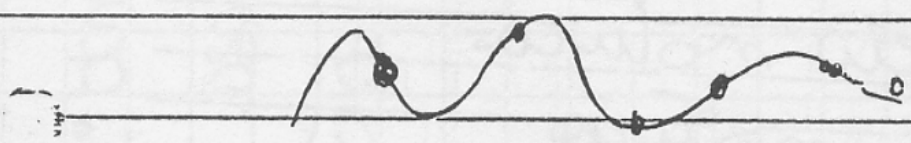
La luce si comporta in determinati casi come un'onda in altri come un corpuscolo, ma è impossibile a mio parere sostenere che la luce sia un'onda o un corpuscolo in assoluto. Come abbiamo visto nelle precedenti lezioni abbiamo 2 fenomeni:



Appunto x questo è impossibile sostenere o l'una o l'altra in quanto nello stesso esperimento abbiamo 2 risultati differenti; e anche se visti in momenti differenti è inammissibile che ci siano 2 fenomeni differenti. allora ne deduco che la luce non sia né un corpuscolo né un'onda ma un qualcosa di altro non ancora scoperto.

Possiamo immaginare la luce come
un oscillatore (in cui abbiamo sia l'onda che
la particella) o come delle onde fatte da
particelle particolari.

La luce non può essere in base a quanto
ho affermato è una ^{insieme di} ~~particelle~~ corpuscoli in
grado di oscillare (è uno di quei casi
e l'insieme di "quanti"
descritti da Einstein).



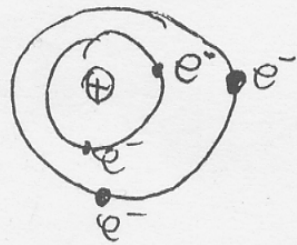
Sull' atomo

V liceo scientifico dopo 30 ore di lezione

L'elettrone è una particella negativa che si trova intorno al nucleo e segue dei percorsi detti orbitali. L'elettrone inoltre può saltare su un altro orbitale di diversa energia.

L'UNIONE DI PIÙ ELETTRONI COSTITUISCE L'ATOMO.
L'ELETTRONE RUOTA INTORNO AL NUCLEO, MA NON NE VIENE ATTRATTO. ~~È ATTRATTO~~

573
L' elettrone e^- è una particella ^{di carica} negativa, che
ha una velocità notevole, a causa della quale
non possiamo individuarne la posizione (coll' e^-)
per cui si parla di orbita, ~~ma~~ che individua
lo spazio in cui è probabile insediarsi.



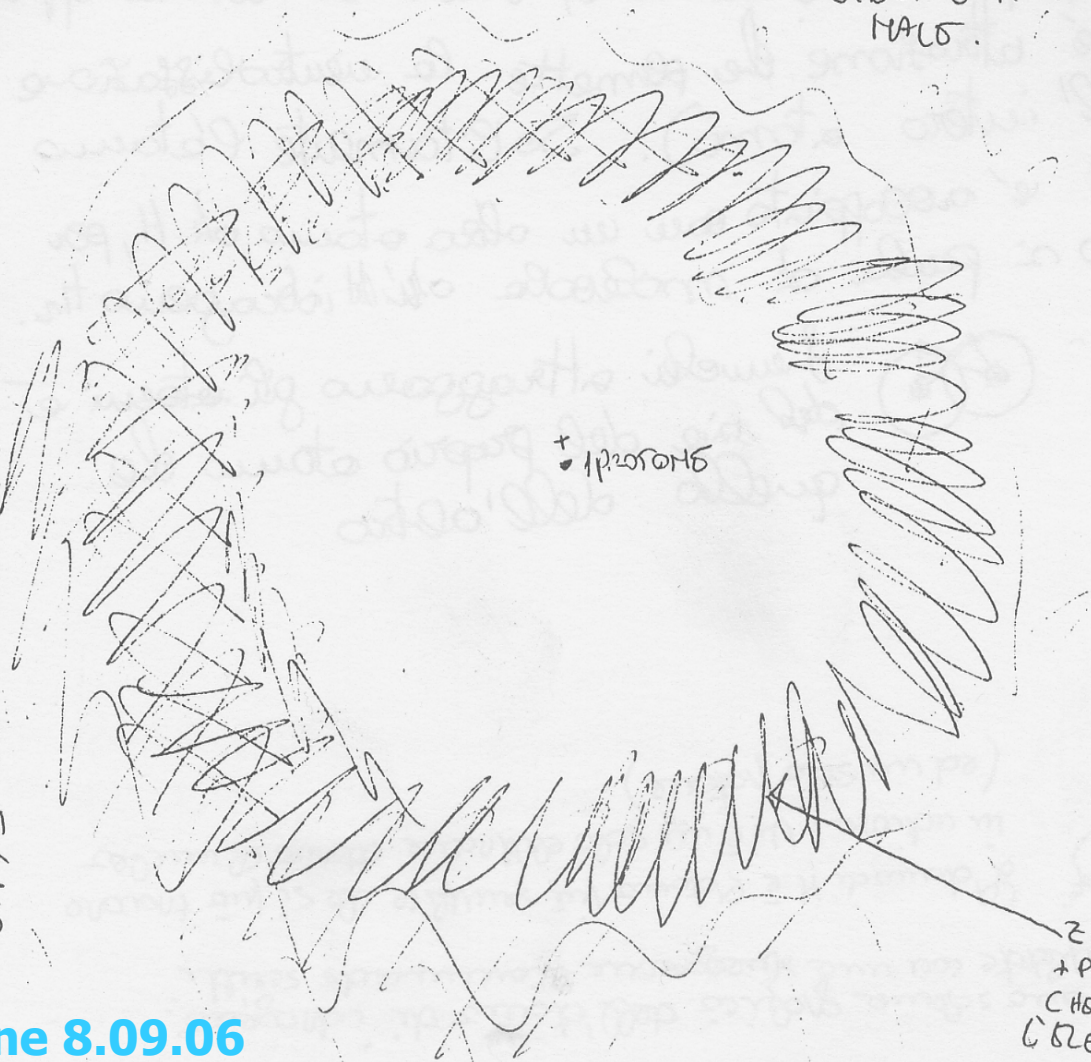
Se si considera lo schema dell'atomo,
si può dire che l' e^-
non occupa sempre la
stessa orbita perché se
opportunamente eccitato
(ad. es. fornendo del calore)
questo salta di orbita

Completa con la spiegazione e con un disegno.

AMMESSO CHE È IMPOSSIBILE RAPPRESENTARE IN 2 o IN 3
DIMENSIONI QUALCOSA CHE NE RICHIEDE DI PIÙ, UN'IDEA
ERRATA CHE MI SIANO FATTO DALL'ATOMO DI IDROGENO PÙ
USARE:

L'IDEA È TRIDIMENSIONALE.

SE POTESSI SEPARARE QUESTO FOLIO
PERCHÉ NON HA SENTO



ZONA CON
+ PROBABILITÀ
CHE VISTA È
L'ELETTRONE

Nello schema della prima domanda ho disegnato
un atomo che però non è detto né che ci
sia né che sia così, di conseguenza l'atomo
potrebbe benissimo cambiare come no.

Forse se fosse così  potrebbe
cambiare introducendo o svincolando se stesso
perché altri particolari analoghi esistono.

Ma questo cambiamento se ci fosse sarebbe
a noi studenti inafferrabile xché anche questo
non è visibile.

Sapere e ben diverso
dal ^{poter} vedere

Sull' elettrone

V liceo scientifico dopo 30 ore di lezione

L'elettrone è un elemento molto piccolo
impossibile da vedere, ma a quanto sembra
esistente. Dicono che faccia parte dell'atomo
e sia di segno negativo.
L'unica cosa che sono riuscito a vedere
fino adesso è la sua traccia grazie alla
camera a nebbia a diffusione, ma
inoltre a poco posso dire una massima
sicurezza, in quanto le tracce intraviste
~~sono~~ sembrano potute essere benissimo
prodotte da altro tipo di elemento: α β γ
o altro non conosciuto da noi.

- L'eutrone è una particella piccolissima che
compone l'atomo. L'eutrone è sempre negativo [e] ha cioè
la carica negativa.
Comunque tutto ciò che ho scritto non è una grossa
ambiguità. Non sono molto sicuro.

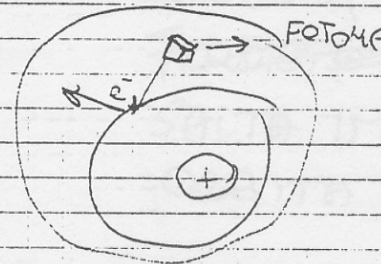
SEMBRA CHE ABBI A UNA CARICA DA NOI CLASSIFICATA
COME NEGATIVA. COSA VUOL DIRE? COME MAI? BOH!
SEMBRA CHE ABBI A UNA MASSA. COSA VUOL DIRE?
COME MAI? BOH!
IN QUANTE DIMENSIONI SI PUÒ DESCRIVERE?
BOH! 3 AL LO SPIN? MAH!
NE HO VISTE LE TRACCE! ERANO DAVVERO DI
UN OUTTREM? BOH!

Sull' interazione luce atomo

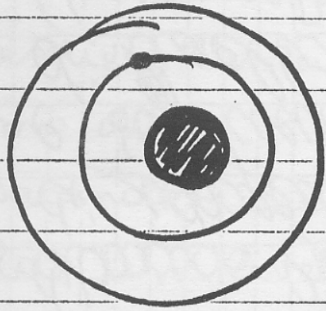
V liceo scientifico dopo 30 ore di lezione

~~La luce~~ non ha interazione ma' emere spiegata grazie all'atomo di Bohr
Supponiamo che un elettrone che e' al primo livello se viene colpito da un fotone di luce che ha una certa $\nu > \nu_0$ salta di livello.

Questo avviene ~~per~~ quando ~~il~~ l'elettrone viene colpito da un fotone.



~~Per~~ ~~oltre~~ l'elettrone, una volta colpito, c'ellera improvvisamente e, uscito dal suo "orbita" emana il + rimbombamento possibile sul livello successivo.



l'elettrone girando sulla sua orbita
~~non~~ non emette luce, fino a
quando non dovrà saltare su di
un'altra orbita; saltando emetterà
luce che risulterà sempre la stessa
a seconda del livello dell'orbita

Se dovesse arrivare un fotone dall'esterno con
energia $>$ dell'elettrone (ma molto maggiore) l'elettrone
riuscirà a saltare con + facilità. Se ~~l'elettrone~~ il
fotone $<$ energia dell'elettrone esso rimarrà
nella sua orbita ~~e non salterà~~ (il fotone sarà insoddisfatto
nella sua mai riuscita e la prossima volta parlerà con
se + energia e dirà: "ELETTRONE SCONFITTO")

Da F. Tarozi*, 2005

“[...] era tutto così chiaro fino a prima che ora sono confuso... ma è possibile che cambino le leggi solo perché faccio un cambio la scala? Forse si deve aspettare che arrivi un altro Newton che faccia rientrare tutto in un'unica legge, come per la gravità” (M.)

“Secondo me qui bisogna che gli scienziati si diano una mossa, perché non hanno ancora scoperto tutto. Per ora hanno creato solo una grande confusione, manca qualcosa, questa è l'unica spiegazione, che ancora dobbiamo scoprire per riuscire a spiegare quello che succede” (T.)

*Tesi di laurea in Fisica, Dipartimento di Fisica, Università di Bologna (Relatore O. Levrini - Co-relatori: N. Grimellini Tomasini, P. Fantini, ottobre 2005).

Dalla letteratura internazionale

“Students, in their effort to reconcile the features of the analogue structure (classical physics) with those of the target (quantum mechanics), tend to assimilate the newly considered quantum mechanical concepts into categories and modes of thinking that are deeply rooted in classical physics worldview” (Hadzidaki 2006).

...

- Giliberti & Marioni 1997;
- Mashaldi 1996;
- Ireson 1999;
- Seifert & Fischler 1999;
- Kalkanis, Hadzidaki & Stavrou 2003.

Diagnosi

“bicchiere mezzo pieno”

Guai se gli studenti non reagissero così!!

*Il problema didattico:
come trasformare lo status di tali “difficoltà”, da
disagi cognitivi a profondi e problematici temi di
tipo epistemologico sui quali si è a lungo
dibattuto e che rappresentano, nella loro
essenza, pietre miliari del pensiero del XX
secolo.*

La “meccanica quantistica”, quale immagine?

- 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 assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà;
- Questa teoria spiega la realtà “microscopica” ma la spiega “a modo suo”...

“a modo suo”

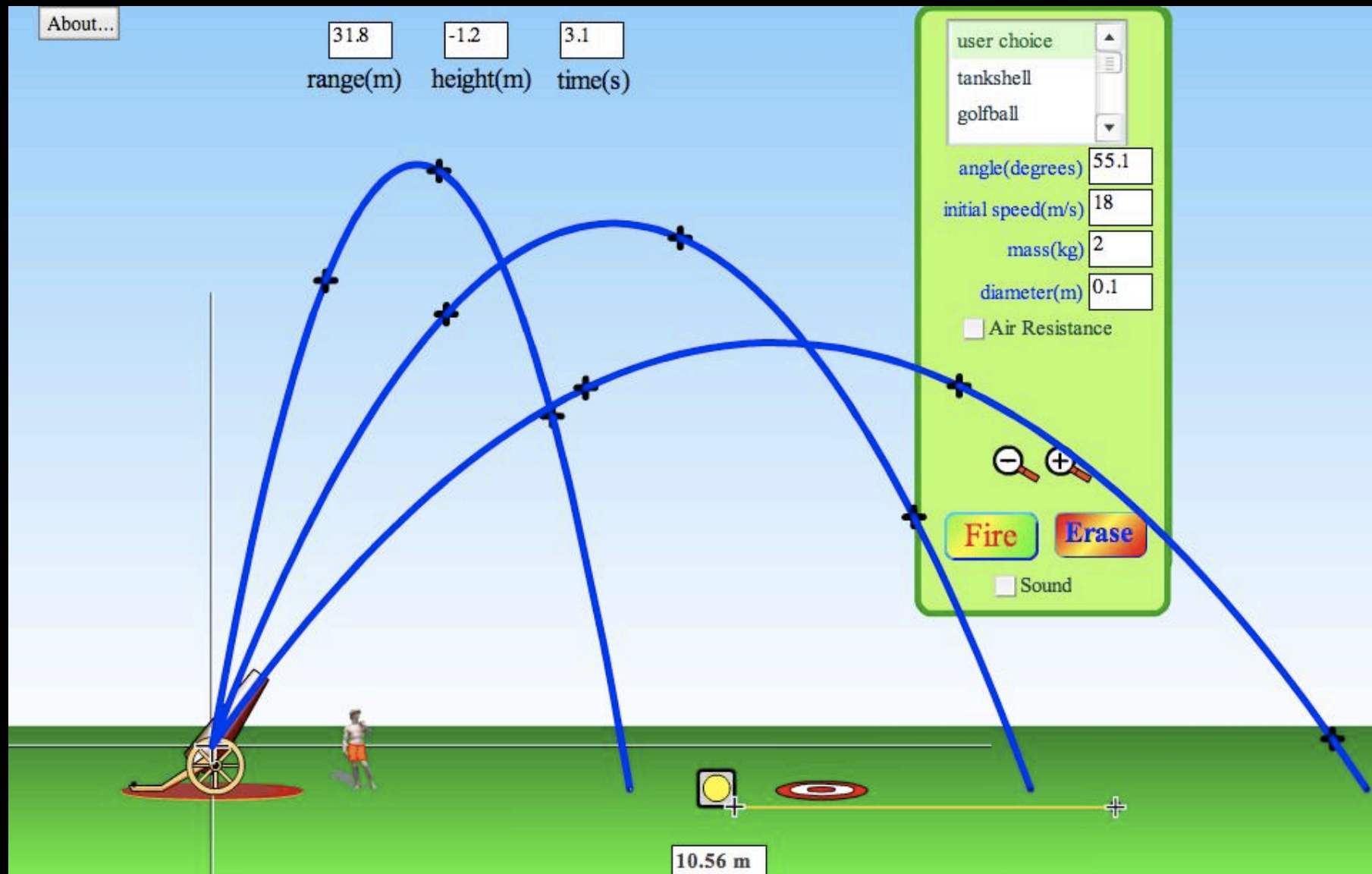
la teoria funziona perfettamente: ha permesso di fare previsioni precisissime

ma

Impone di avere “nuovi occhi” per interpretare ciò che accade, anche perché assorbe dentro di sé 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);**
- il principio di non-contraddizione (un oggetto o è una cosa o un’altra);**
- la rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo.**

Determinismo



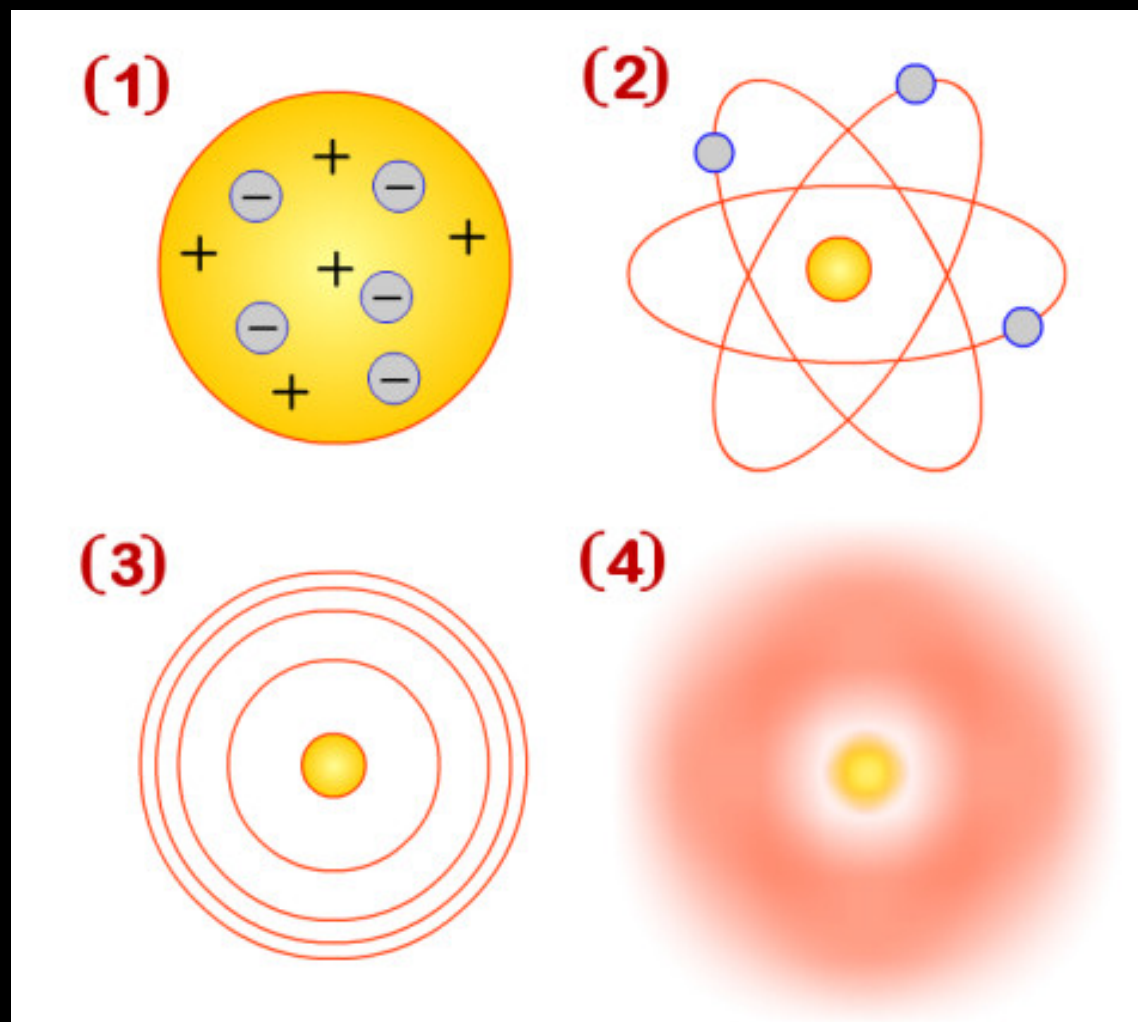
Principio di non contraddizione

"A è anche non-A" è falsa

o mitologica...



Rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo



Nell'incontro di oggi:

Entrare nel merito dei concetti di indeterminazione e complementarità (previsti dalle indicazioni) e, su quelli, ragionare per:

- fare le pulci ai libri di testo;
- offrire spunti e materiali di riflessione per dare concretezza agli obiettivi più generali delle indicazioni;
- mostrare alcuni esempi di dibattiti storici per dare un'idea di come la storia e l'epistemologia possano creare una "cornice di senso" funzionale alla comprensione dei concetti di base e della MQ come teoria*;
- sollevare problemi e suggerire materiali...

Presentare linee generali e risultati di sperimentazioni in classi V di Liceo Scientifico.

INDETERMINAZIONE E
COMPLEMENTARITA',

ovvero

come la visione del mondo non possa, *poi*, più
essere la stessa

Il principio di indeterminazione

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

“h tagliato”= $1,054 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Apparentemente...

“[...] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000, ripubblicato luglio 2013)

Come mostrarne la portata culturale dirompente?

Possibile strategia: costruzione di una narrazione (che include una contestualizzazione storica)

...elementi curiosi...

Werner Heisenberg (1901, 1976)



Marzo 1927: "Sul contenuto intuitivo* (*anschaulichen*) della cinematica e della meccanica quantistiche"

UNIVERSITÄTSS INSTITUT
FÜR
THEORETISCHE PHYSIK.

III

(kanonisch konjugierte
 kann die Koordinate q auf derartig eine mit
 einer Genauigkeit angegeben werden, die durch den
 mittleren Fehler $\Delta q \approx \frac{h}{2\pi p}$ gegeben ist. Durch dieses ist
 bestimmt, dass mit dies nach einer Jordan und
 so fassen. Es sei (q, p) eine beliebige Ort-
 impulsbedingung für q für einen gewissen Parameterwert α ,
 dann dass (q, p) mit im Bereich $q_0 - \Delta q < q < q_0 + \Delta q$
 von Null verschieden ist, dann mit $\Delta q = \frac{h}{2\pi p}$
 $\frac{h}{2\pi p} = ik$) $(p, q) = \int (q, p) e^{\frac{i}{\hbar} (p_0 q - q_0 p)} dq$ (Es ist $(p, q) = e^{\frac{i}{\hbar} (p_0 q - q_0 p)}$)
 mit Δp verschieden, wie man von dieser Gl. ablesen
 kann $\frac{(p - p_0)^2}{\hbar}$ von einer höheren Größenordnung als
 1 ist. d. h. $p_0 = \frac{h}{\Delta q}$, (p, q) wird mit zwischen
 $p_0 - \Delta p < p < p_0 + \Delta p$ verschieden.

- intuibile qualitativamente

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 essere compatibile con la massima accuratezza che si può ottenere in una misura?

Il Formalismo di Dirac e Jordan

La meccanica matriciale, costruita per fondare il formalismo solo su quantità osservabili in laboratorio (frequenze e intensità della radiazione spettroscopica emessa) e per dar conto delle **discontinuità** note fin dal '900, è re-interpretata in termini operativi per rendere **intuitiva** la proprietà di non commutazione delle variabili coniugate p e q .

“Il formalismo della meccanica quantistica di Dirac e Jordan, su cui si fondava la derivazione delle relazioni di indeterminazione, poteva essere considerato **completo e finito**”. (Cassidy)

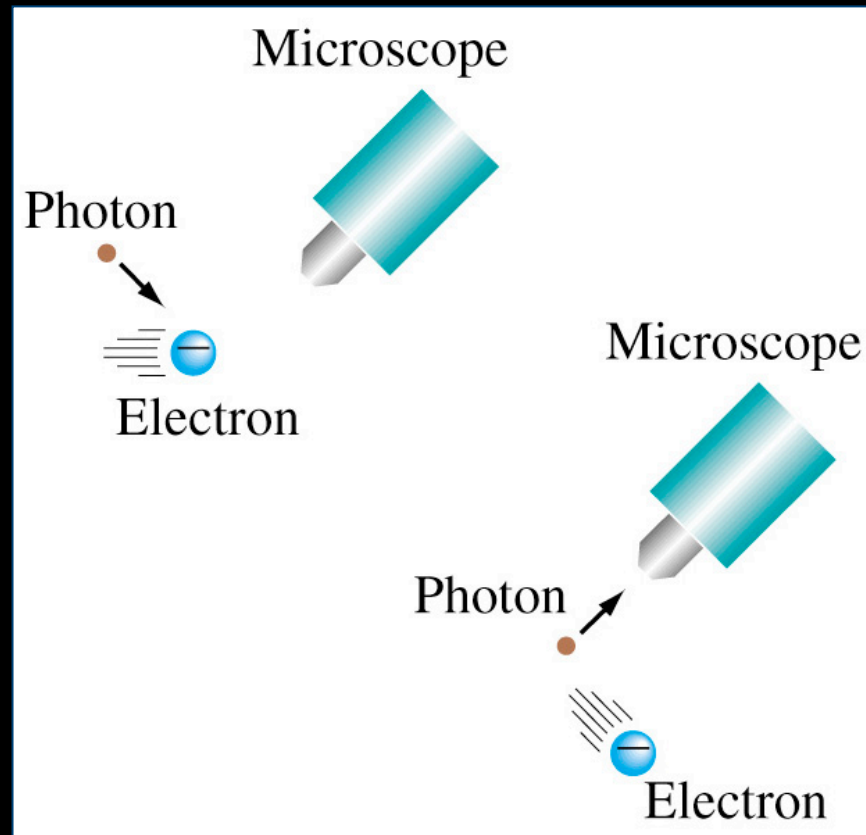
Approccio operazionista

“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”.

Esperimento mentale: microscopio a raggi γ

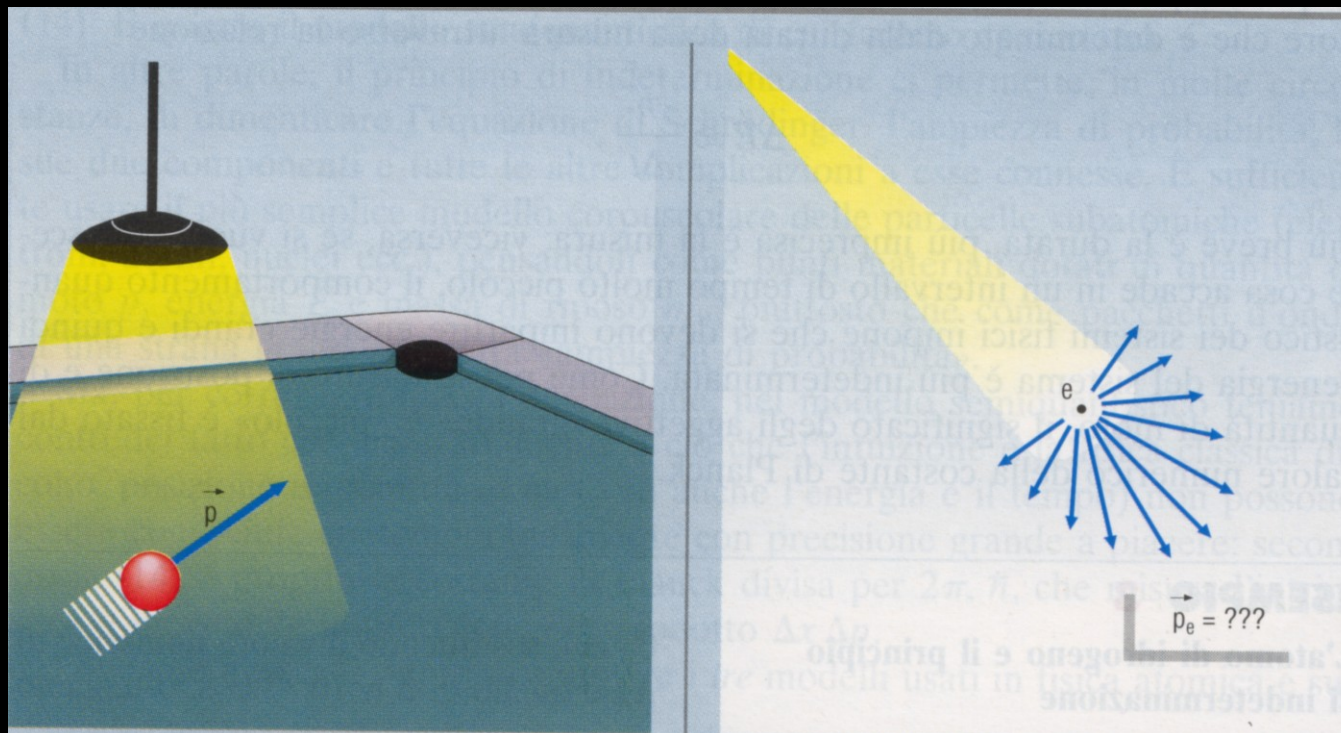
Microscopio ad altissima risoluzione che utilizza, per “illuminare” l’oggetto, radiazione di lunghezza d’onda molto piccola

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)

“... 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

Dall'esperimento ideale di Heisenberg ...

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

Niels Bohr
(1889, 1962)



L'obiezione di Bohr

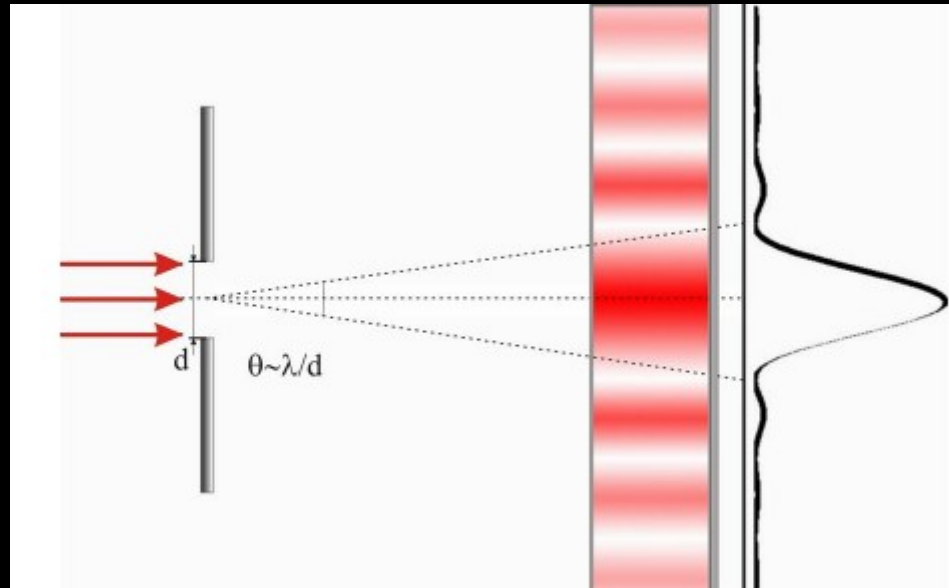
Occorre considerare anche

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

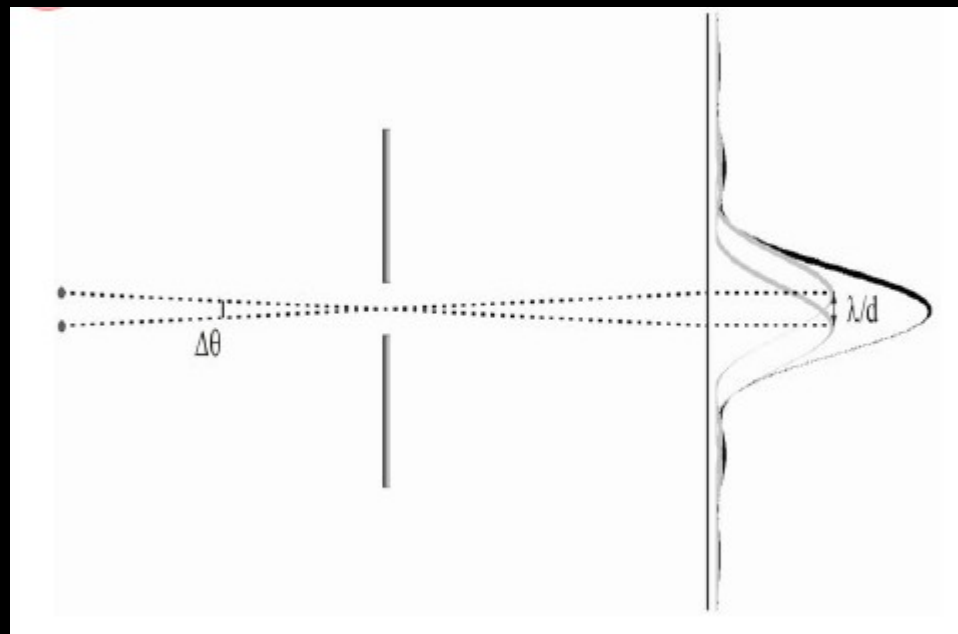
Infatti...

L'obiezione di Bohr

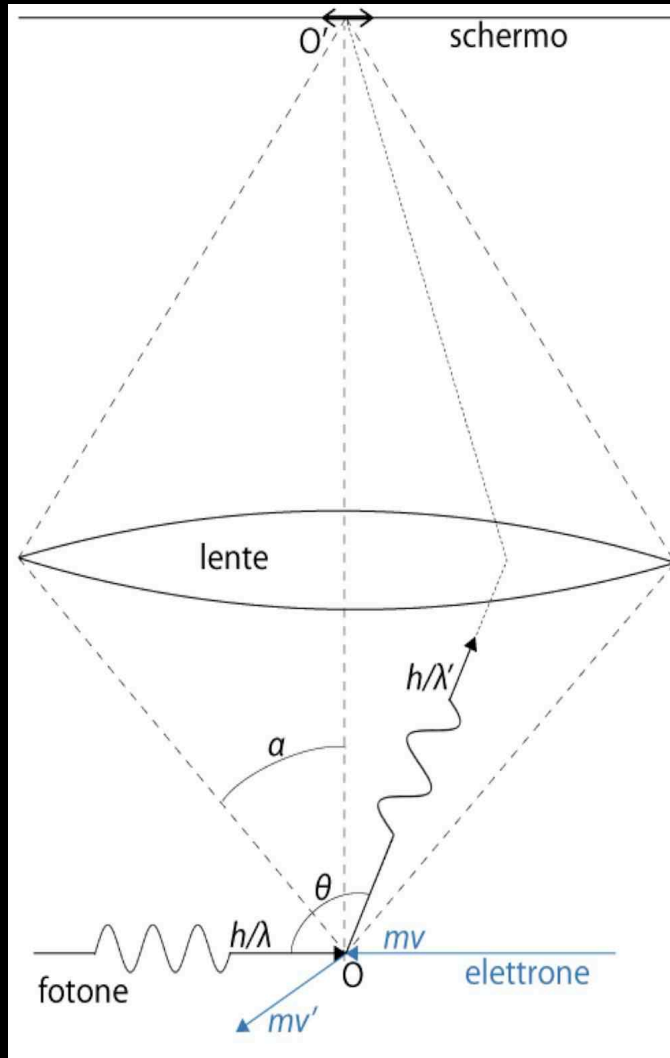
Quando un fascio di luce monocromatica passa attraverso una fenditura di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, il fascio si allarga per in fenomeno di diffrazione



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 “a la” Bohr



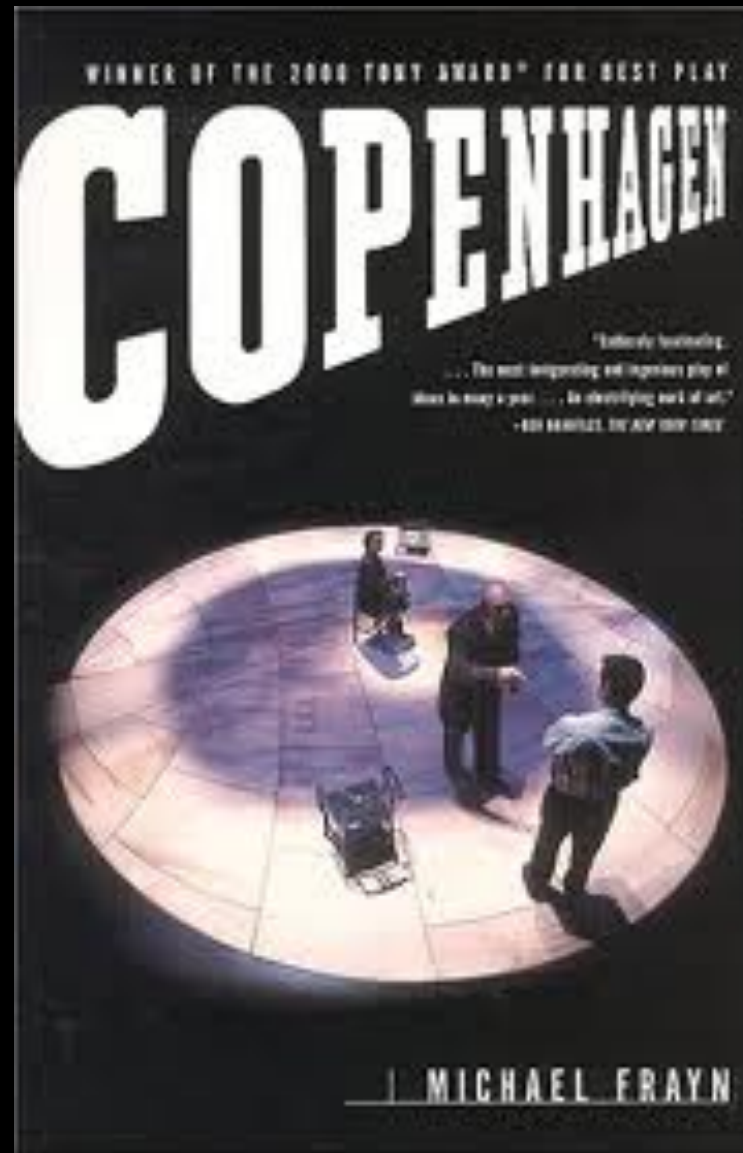
(figura di G. Lulli)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}$$

Incerteza sulla posizione
dell'eletttrone (potere risolutivo)

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

Incerteza sulla quantità di moto
dell'eletttrone (dal solo effetto
Compton sarebbe ricavabile con
precisione arbitraria)



Il dilemma degli scienziati “davanti a decisioni che comportano enormi responsabilità politiche e umane, che vanno ben al di là della semplice impresa della conoscenza” (M. Cattaneo)

C'è un errore fondamentale



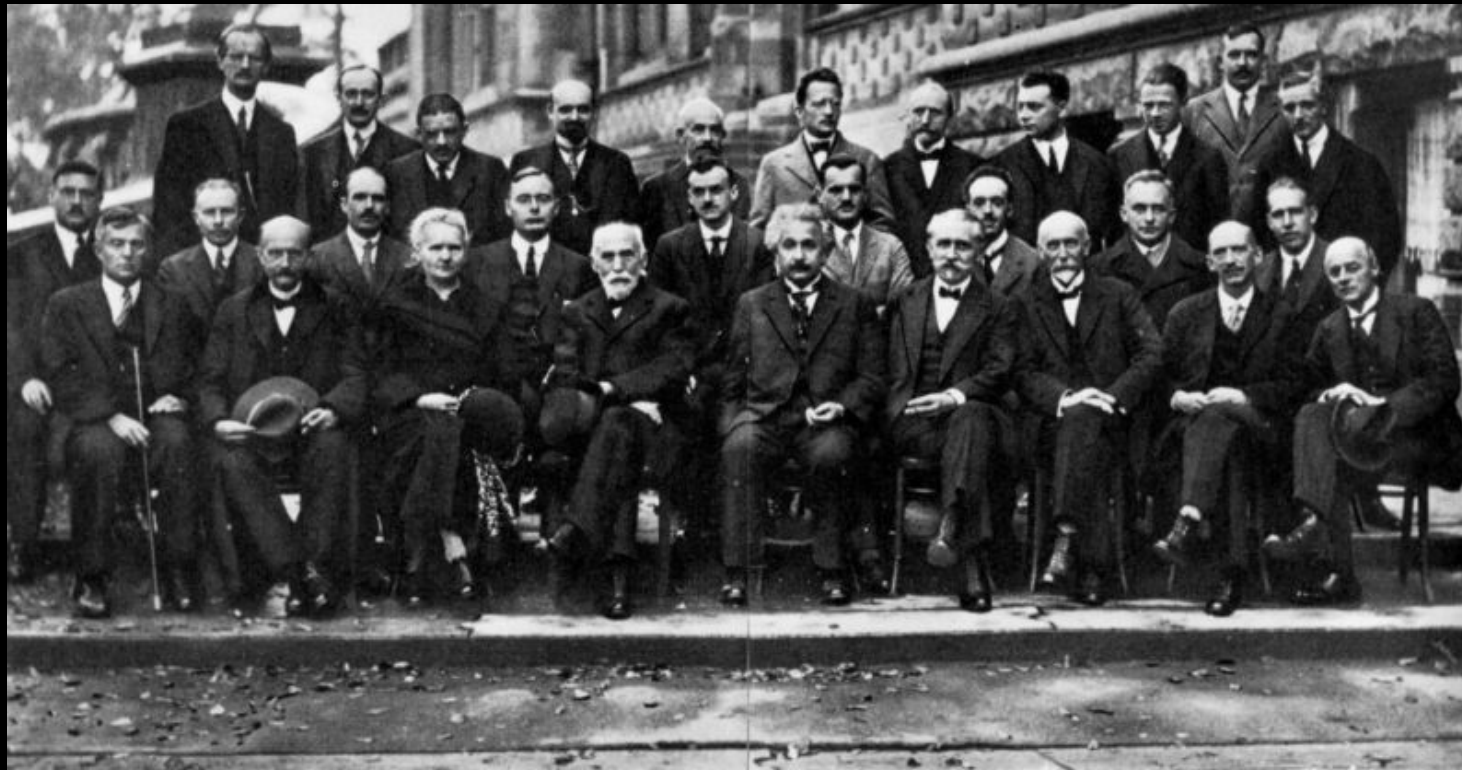
"Copenhagen", 1998, M. Frayn



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 γ “interagisce come un corpuscolo e si propaga come un’onda”) (Primo significato);
- l’apparato di misura svolge un ruolo “attivo” nel processo di misura.

V Congresso Solvay (Bruxelles, 24-29 ottobre 1927): Elettroni e fotoni



Photographie Benjamin Couprie

28, Avenue Louise, Bruxelles

A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	W. PAULI	W. HEISENBERG	R. H. FOWLER	L. BRILLOUIN
	P. EHRENFEST			E. VERSCHAFFELT				
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON	O. W. RICHARDSON

“Tutti gli invitati sapevano che il congresso era destinato ad affrontare il problema più urgente del momento, di carattere più filosofico che fisico: il significato della meccanica quantistica. *Che cosa rivelava la nuova fisica in merito alla natura della realtà?*”

(Kumar, Quantum, 2008)

5 relazioni

- 24 mattina:** **Bragg**, sull'intensità della riflessione dei raggi X e su come i raggi X potessero portare ad una migliore comprensione della struttura dei cristalli;
- 24 pomeriggio:** **Compton** sulle discrepanze tra esperimento e teoria elettromagnetica della radiazione (aveva ricevuto il Nobel su questo poche settimane prima);
- 25 mattina:** ricevimento alla Libera Università di Bruxelles.
- 25 pomeriggio:** **de Broglie** sulla dinamica dei quanti, in cui viene proposta la "teoria dell'onda pilota", sottoposta a diversi attacchi (Einstein in silenzio).
- 26 mattina:** **Born-Heisenberg**, relazione congiunta che iniziò così: "La meccanica quantistica si basa sull'intuizione che la differenza essenziale tra fisica atomica e fisica classica è la presenza di discontinuità". Sul significato della costante di Planck: "la misura universale dell'indeterminazione che entra nelle leggi di natura tramite il dualismo di onde e particelle". Terminarono con: "Riteniamo che la meccanica quantistica sia una teoria chiusa, i cui presupposti fisici e matematici non sono più suscettibili di alcuna modificazione".
- 26 pomeriggio:** **Schrodinger** sulla meccanica ondulatoria, in cui veniva messo in discussione il concetto di salto quantico e proponeva di interpretare le onde in meccanica quantistica come distribuzione della carica e della massa.

“I lavori ripresero il 28 pomeriggio: prima sessione della discussione generale, introdotta da Lorentz con l'intento di far concentrare l'attenzione sulle questioni della causalità, del determinismo e della probabilità: **“Non si potrebbe mantenere il determinismo facendone un articolo di fede? E' indispensabile elevare l'indeterminismo a principio?”**. Poi Lorentz invitò Bohr a intervenire. Bohr illustrò la sua convinzione che il dualismo onda-particella fosse una caratteristica intrinseca della natura, spiegabile soltanto nel quadro della complementarità, e che la complementarità stesse alla base del principio di indeterminazione che portava alla luce i limiti di applicabilità dei concetti classici.”

(Kumar, Quantum, 2008)

Più tardi Bohr avrebbe espresso così la sua posizione: “Non vi è un mondo quantistico. Vi è solo una descrizione astratta in termini di fisica quantistica. E’ sbagliato pensare che il compito della fisica sia scoprire come è la natura. La fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura... Da cosa dipendiamo noi umani? Dipendiamo dalle nostre parole. Il nostro compito è comunicare esperienze e idee ad altri. Siamo sospesi nel linguaggio”.

(da Pais, Ritratti di scienziati geniali, 2012)

Suspended IN LANGUAGE

Niels Bohr's life,
discoveries, and the
century he shaped

Jim Ottaviani

AND

Leland Purvis



WITH

Jay Hosler

Roger Langridge

Steve Leialoha

Linda Medley

Jeff Parker

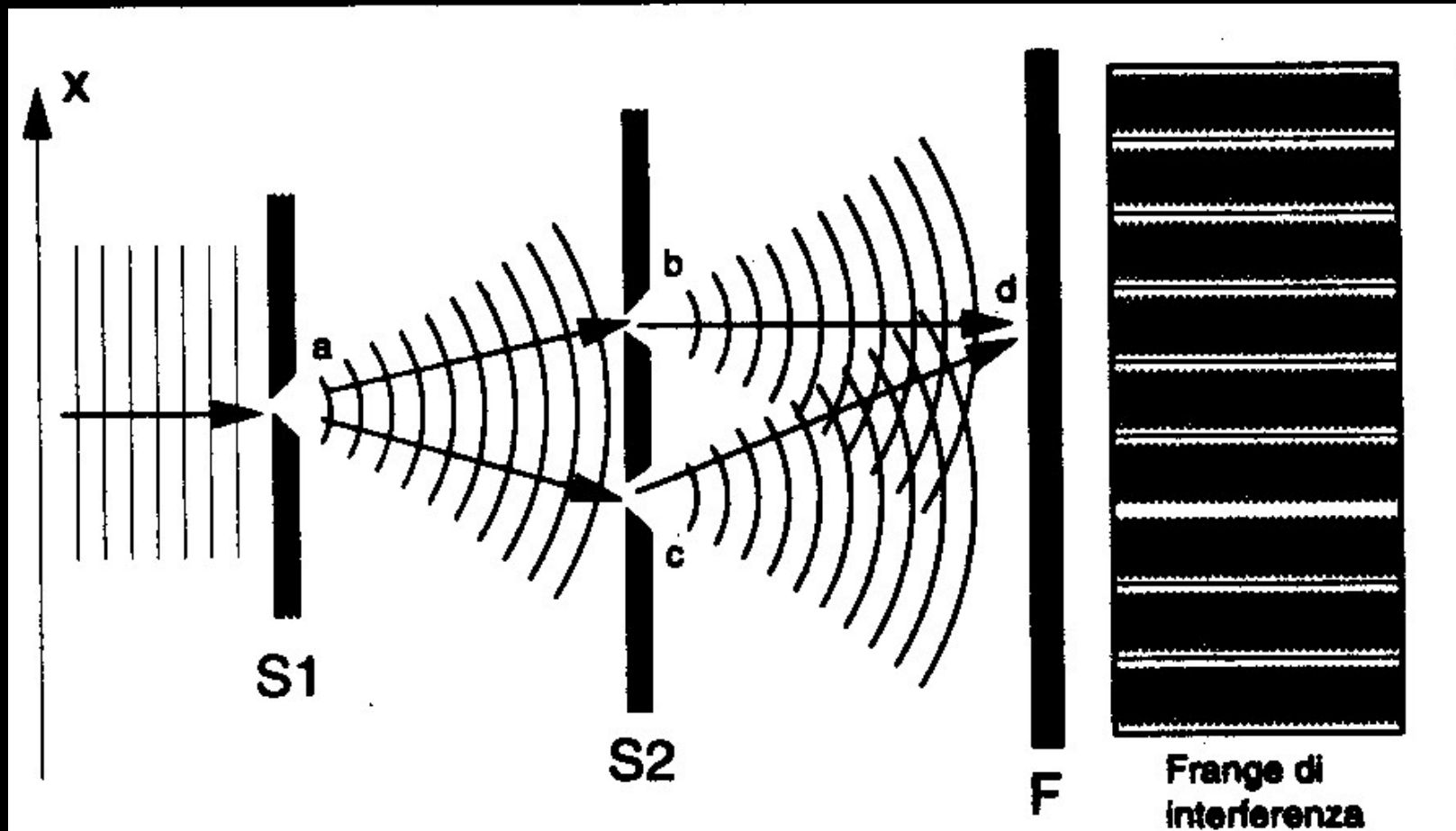
Dopo l'intervento di Bohr e altri tre che seguirono, Einstein chiese la parola:

“Pur essendo consapevole di non aver sufficientemente approfondito l'essenza della meccanica quantistica, voglio nondimeno presentare qui qualche osservazione”.

Einstein sapeva che spettava a lui l'onere di mostrare l'incoerenza, l'inconsistenza della interpretazione di Copenaghen, vanificando alla radice le pretese che fosse una teoria chiusa e completa. Ovvero: **l'ipotesi di chiusura porta a inconsistenze.**

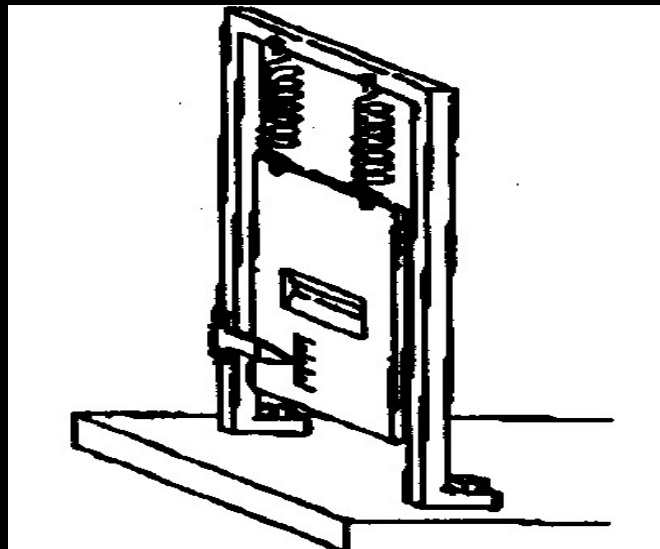
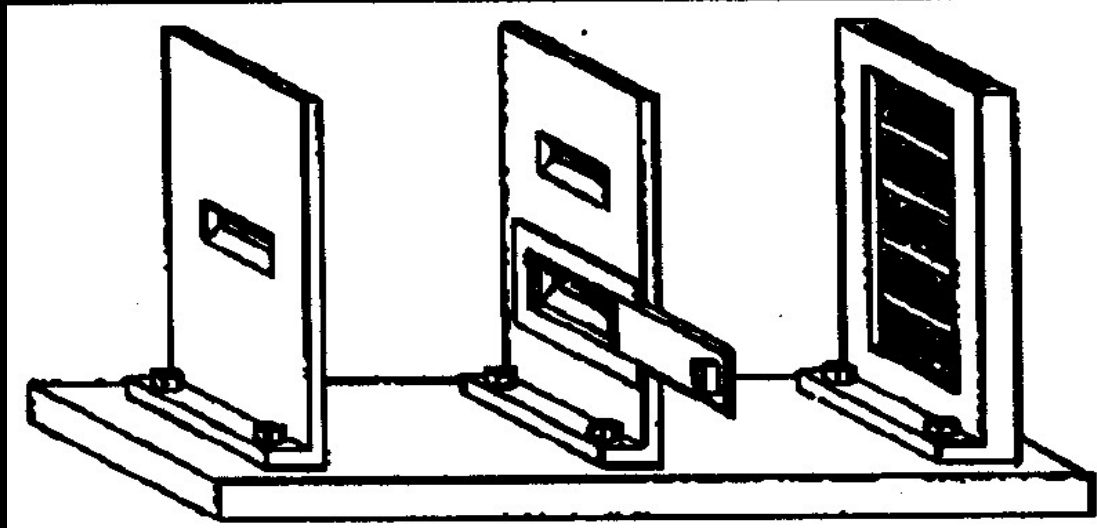
...Propose un esperimento mentale

L'ESPERIMENTO MENTALE DI INTERFERENZA DI SINGOLA PARTICELLA



...E traiettoria E figura di interferenza...

Risposta di Bohr.... E la sua “vittoria”: la MQ diventa teoria



Dall'esperimento mentale di Einstein e dall'obiezione di Bohr.... altri significati della complementarità

Secondo significato del principio di complementarità:

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.

avvio dei cosiddetti esperimenti “which way”

Terzo significato: complementarità come fenomeni (esperimenti) reciprocamente escludentesi

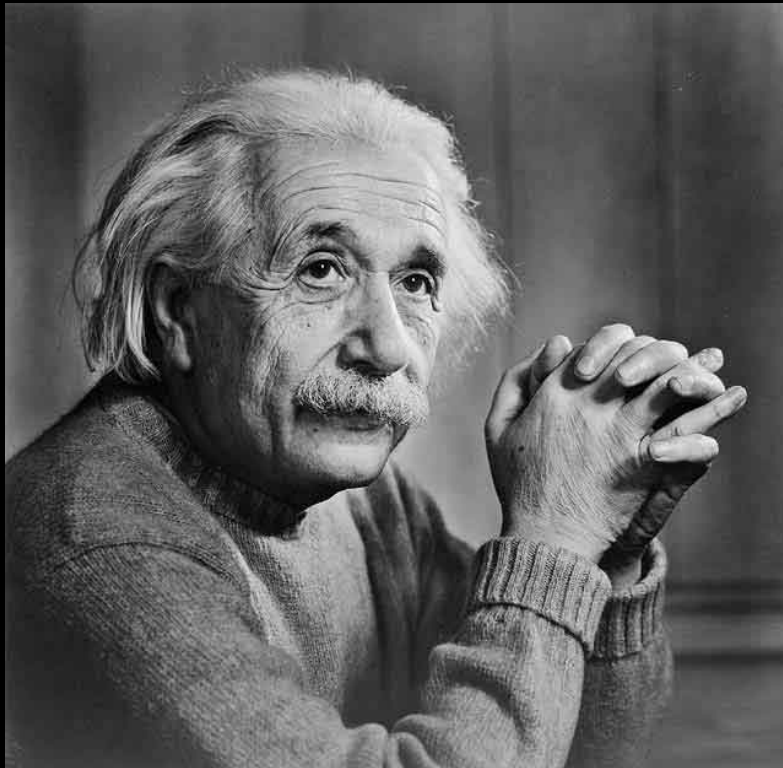
“Vediamo qui un tipico esempio del fatto che i fenomeni complementari si manifestano in esperimenti congegnati in modo tale da escludersi l'un l'altro, e ci troviamo di fronte all'impossibilità di effettuare, nell'analisi degli effetti quantistici, una separazione netta fra un comportamento indipendente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

(Bohr, 1927)

La posizione di Einstein

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

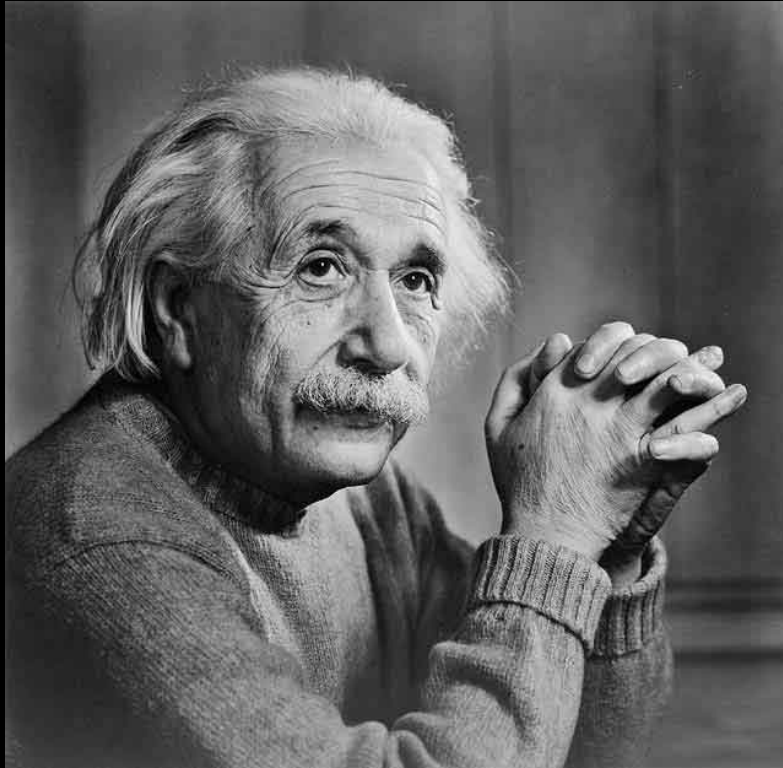
...alla ricerca di argomenti per mostrare che la teoria
non dice l'ultima parola sui meccanismi profondi che
regolano l'universo (non è completa).



Albert Einstein

“Credo ancora nella possibilità di un modello di realtà – cioè una teoria – che rappresenti le cose di per sé, e non solamente la probabilità che esse accadano.

La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso sono convinto che Dio non gioca a dadi con il mondo.”



Albert Einstein

Alcuni fisici, tra cui ci sono anch'io, non possono credere che si debba abbandonare, ora e per sempre, l'idea che la realtà sia direttamente rappresentabile nello spazio e nel tempo; o che si debba accettare l'idea che gli eventi in natura siano analoghi a giochi del caso. Probabilmente mai prima d'ora una teoria era in grado di fornirci una chiave per interpretare e calcolare un gruppo così eterogeneo di fenomeni come la teoria quantistica. Nonostante questo, io credo che questa teoria ci induca in errore, perché, secondo me, è una rappresentazione incompleta delle cose reali.[...] L'incompletezza della rappresentazione porta necessariamente alla natura statistica (incompleta) delle leggi.

Oggi:

1. la meccanica quantistica è teoria;
2. l'interpretazione "a disturbo" del PI non più accettabile. Si accetta che alla base dell'indeterminazione ci sia la complementarità;
3. 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)

Le varie forme della complementarità

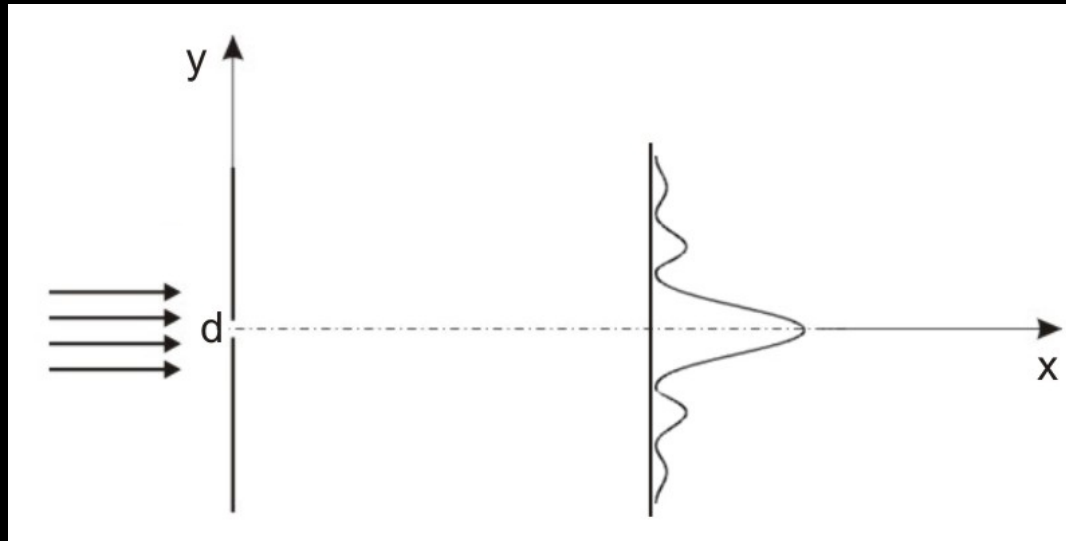
Diverse accezioni del dualismo onda-
corpuscolo

Esperimenti complementari

Proprietà complementari
(variabili coniugate)

La complementarità tra variabili coniugate y e p_y

Diffrazione da singola fenditura



Le relazioni di indeterminazione come conseguenza formale della complementarità tra grandezze

Robertson, 1929, *The uncertainty principle*, Phys. Rev., 34,
163-164

$$(\Delta A)^2 (\Delta B)^2 - \frac{1}{4} \langle i[A, B]^2 \rangle \geq 0$$

per x e p , per cui $[x, p] = i\hbar$,

$$(\Delta x)^2 (\Delta p)^2 \geq \frac{\hbar^2}{4}$$

La misura di osservabili non-compatibili

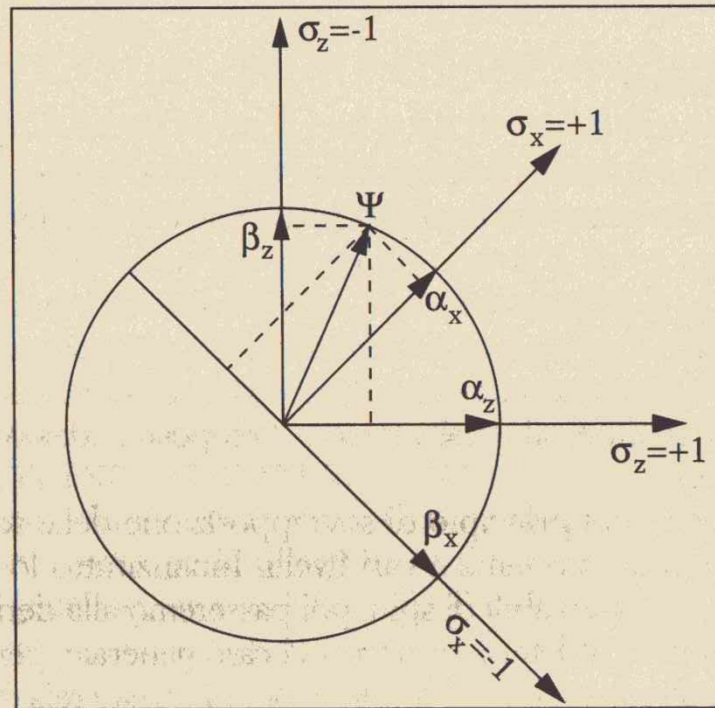


fig. 3.2 Autostati delle osservabili non commutanti di spin σ_x e σ_z e componenti del vettore di stato sugli stessi.

La complementarità in un celebre esperimento: L'interferenza di elettroni singoli

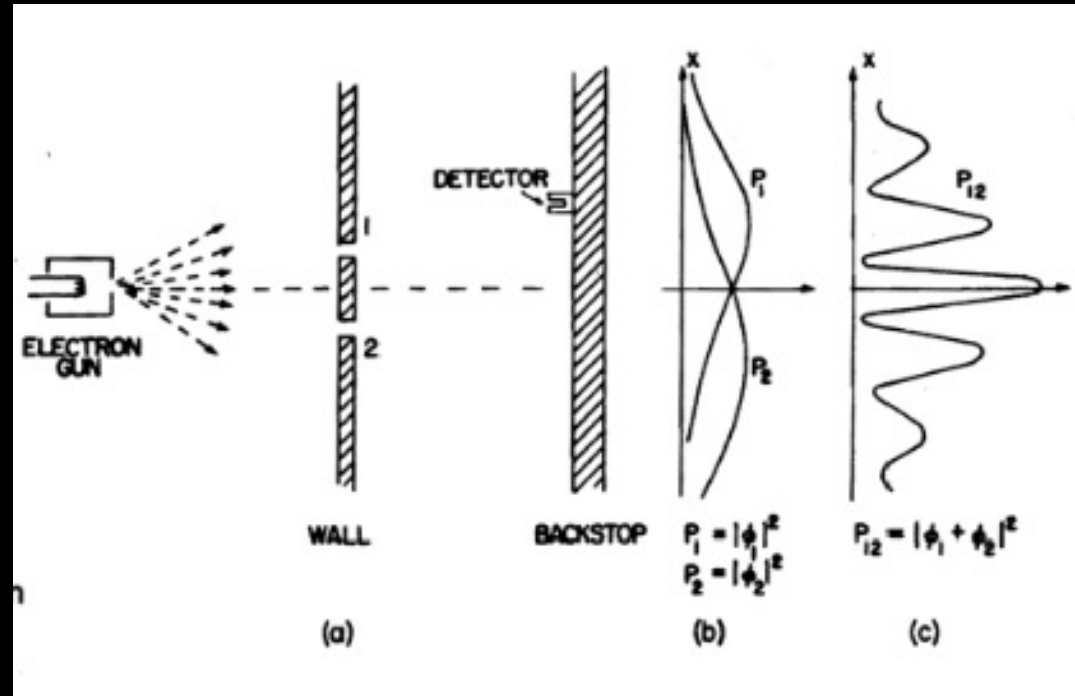




Richard Feynman
(1918-1988)

***“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.”***

Un esperimento impossibile da realizzare (1963)...



Vi avvertiamo subito di non cercare di montare questo esperimento (come invece avreste potuto fare con i due che abbiamo già descritti). Questo esperimento non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio sta nel fatto che, per rivelare gli effetti che ci interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa. Noi stiamo quindi compiendo un "esperimento concettuale" e lo abbiamo scelto così perchè è facile ragionarci su. Noi sappiamo quali sono i risultati che *si otterrebbero*, perchè *sono stati fatti* molti esperimenti, in cui la scala e le proporzioni erano state scelte in modo da mettere in luce gli effetti che ora descriveremo.

L' esperimento di Merli-Missiroli-Pozzi (1974-76): Il più bell' esperimento della fisica di tutti i tempi (*Physics World*, 2002)

Top 10 beautiful experiments

The list below shows the top 10 most frequently mentioned experiments by readers of *Physics World*.

- 1** Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons
- 2** Galileo's experiment on falling bodies (1600s)
- 3** Millikan's oil-drop experiment (1910s)
- 4** Newton's decomposition of sunlight with a prism (1665–1666)
- 5** Young's light-interference experiment (1801)



l'esperimento più bello della fisica

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>



BOOKMARK

March 10, 2011



di che si tratta

spiegazione

storia

bellezza

backstage

pensare



Benvenuti nel sito "L'esperimento più bello della fisica".

Esso vi guiderà alla scoperta di un esperimento di fisica che, nel 2002 è stato definito il più bello di tutti i tempi da un sondaggio della rivista *Scientific American*. Nato negli anni '20 del secolo scorso come esperimento "mentale" per illustrare un effetto sorprendente della fisica quantistica (l'apparente "doppio" comportamento onda-particella dell'elettrone) venne per molto tempo ritenuto impossibile a farsi a causa di difficoltà tecniche. Nel 1976 un gruppo di ricercatori italiani (Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi) superando

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>

Interferenza di elettroni singoli: l'esperimento "più bello" della fisica

Nel 2002 un sondaggio della rivista *Physics World* identificò l'esperimento di interferenza di elettroni singoli come il più bello nella storia della fisica. Proposto da Einstein nel 1927 come esperimento "mentale" per illustrare un effetto sorprendente della fisica quantistica (il duplice comportamento onda-particella degli elettroni e della luce) esso fu per molto tempo ritenuto impossibile a farsi a causa di difficoltà tecniche. Dopo una serie di progressi a cui contribuirono vari gruppi di ricerca, nel 1976 tre fisici italiani (**Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi**) riuscirono a superare le ultime difficoltà che esistevano e, utilizzando un microscopio elettronico opportunamente modificato, realizzarono l'esperimento di interferenza con elettroni singoli, pubblicandone il primo resoconto sull'*American Journal of Physics*. Sempre nel 1976 su questo esperimento fu realizzato un film didattico-divulgativo: "Interferenza di elettroni", che ebbe immediato successo, vincendo il primo premio al Festival Internazionale del Cinema Scientifico tenutosi a Bruxelles nel 1976.

A 35 anni dalla sua realizzazione il film "Interferenza di elettroni" è oggi riproposto in versione rimasterizzata (a cura della **Cineteca di Bologna**). Lo accompagna un documentario originale che, attraverso le testimonianze dirette dei protagonisti, narra la vicenda di questo esperimento, evidenziando i vari fattori (storici, umani, tecnici) che portarono alla sua realizzazione.

Questo progetto è dedicato al ricordo di Pier Giorgio Merli, uno dei tre ricercatori che realizzarono l'esperimento, prematuramente scomparso nel 2008.

Contenuti

"Interferenza di elettroni" (1976) edizione rimasterizzata nel 2010, durata 14', formato PAL 4:3 720x576, versioni in lingua italiana e inglese

"L'esperimento più bello" (2011) durata 25', formato PAL 16:9 1280x720, lingua italiana.

"La passione, il metodo, l'esempio. Vittorio Morandi ricorda Pier Giorgio Merli" (2011) durata 4', formato PAL 16:9 1280x720, lingua italiana.


Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca

Progetto realizzato con contributo
del Ministero dell'Università e della
Ricerca - Legge 6/2000 per la
diffusione della Cultura Scientifica



Realizzazione: Clivis - Bologna

grafico design e design (all) 2011

interferenza di elettroni - l'esperimento più bello

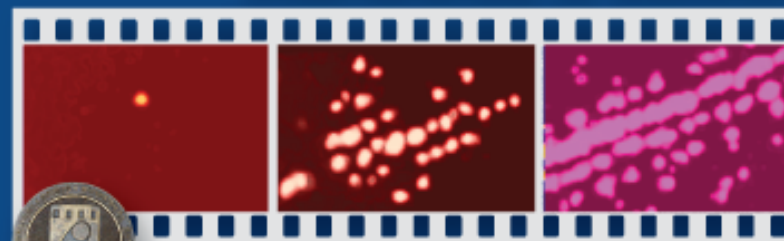


Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi
(IMM) Sede di Bologna



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI FISICA

interferenza di elettroni



Medaglia d'Oro al Festival Internazionale del Cinema Scientifico - Bruxelles 1976

Edizione rimasterizzata del film "Interferenza di
elettroni" (1976) di Pier Giorgio Merli, Gian Franco
Missiroli, Lucio Morettini, Dario Nobili e Giulio Pozzi.
Contiene il documentario: "L'esperimento più
bello", realizzato a cura di Diego L. Gonzalez,
Olivia Levrini, Giorgio Lulli, Dario Zanasi.
Regia: Dario Zanasi, Diego L. Gonzalez.

Coordinamento del progetto: Giorgio Lulli



copia omaggio vietata la vendita

DALLE SPERIMENTAZIONI...

IL PERCORSO IN BREVE

FILO CONDUTTORE:

Una riformulazione progressiva della domanda:

***Come cambia il concetto di oggetto nel passaggio
dalla fisica classica alla fisica quantistica?***

Introduzione storica: la crisi della visione classica del mondo e la necessità di ripensare all'oggetto

Obiettivo: presentare/discutere situazioni problematiche nelle quali i modelli classici di oggetto presentano i loro limiti (es. effetto fotoelettrico, effetto Compton) o nelle quali i diversi schemi esplicativi si scontrano in problemi di confine (Tarsitani, PRIN F21, 2007).

Se le uniche categorie di pensiero disponibili sono quelle classiche, la domanda portante non può che essere formulata così: *Che cosa NON è l'oggetto quantistico?*

Prima parte: Analisi di importanti dibattiti “storici”

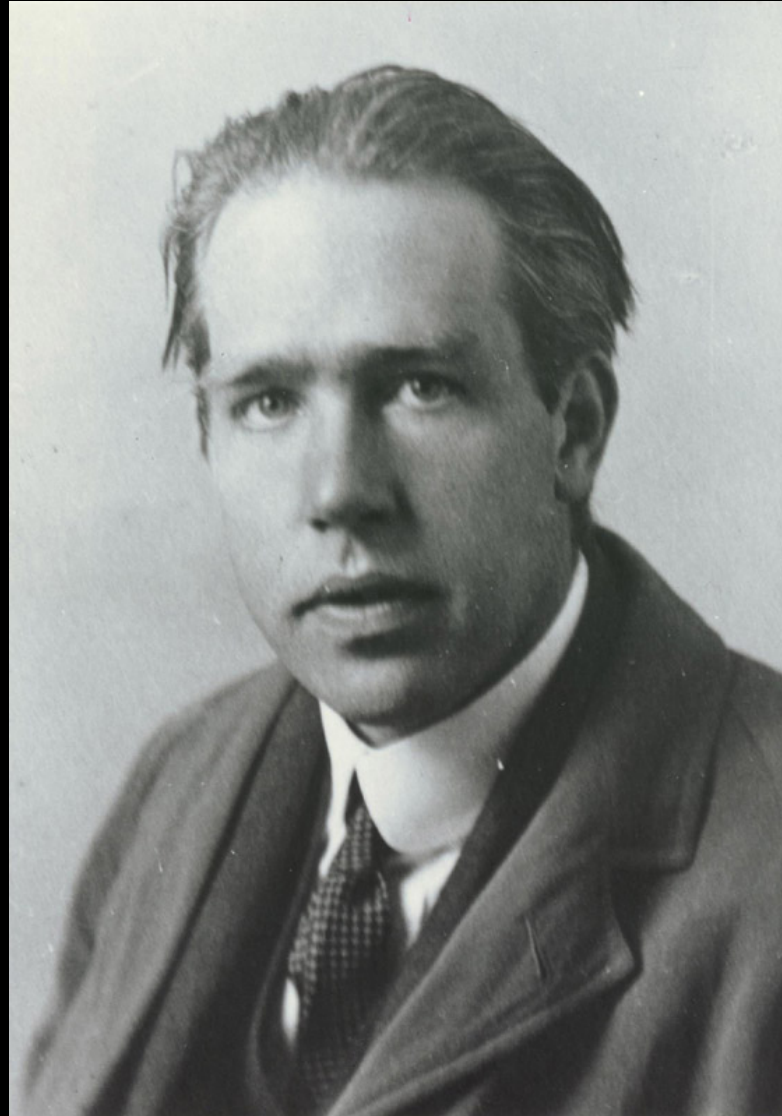
Obiettivo: mostrare quanto drammatico è stato rinunciare all'immagine classica del mondo e quante posizioni si possono trovare tra i fisici stessi che hanno dovuto affrontare i conflitti aperti dalla meccanica quantistica:

- lo “scontro” tra **Heisenberg e Bohr** sull'interpretazione dell'indeterminazione;
- il dibattito tra **Bohr e Einstein** sul determinismo e sulla relazione tra conoscenza e realtà;
- il “dibattito” tra **Heisenberg e Schrödinger** sulla visualizzazione dell'oggetto quantistico.

Che cosa ne è dell'oggetto microscopico?

“abbiamo perso la nostra innocenza
ingenuamente realista”

(Schrödinger, 1935)



Niels Bohr
(1885-1962)

“[...] questa cosiddetta relazione di indeterminazione è importantissima, come dimostrò Heisenberg, per l'interpretazione dei paradossi che risultano dai tentativi di analizzare gli effetti quantistici riferendosi a immagini fisiche consuete.

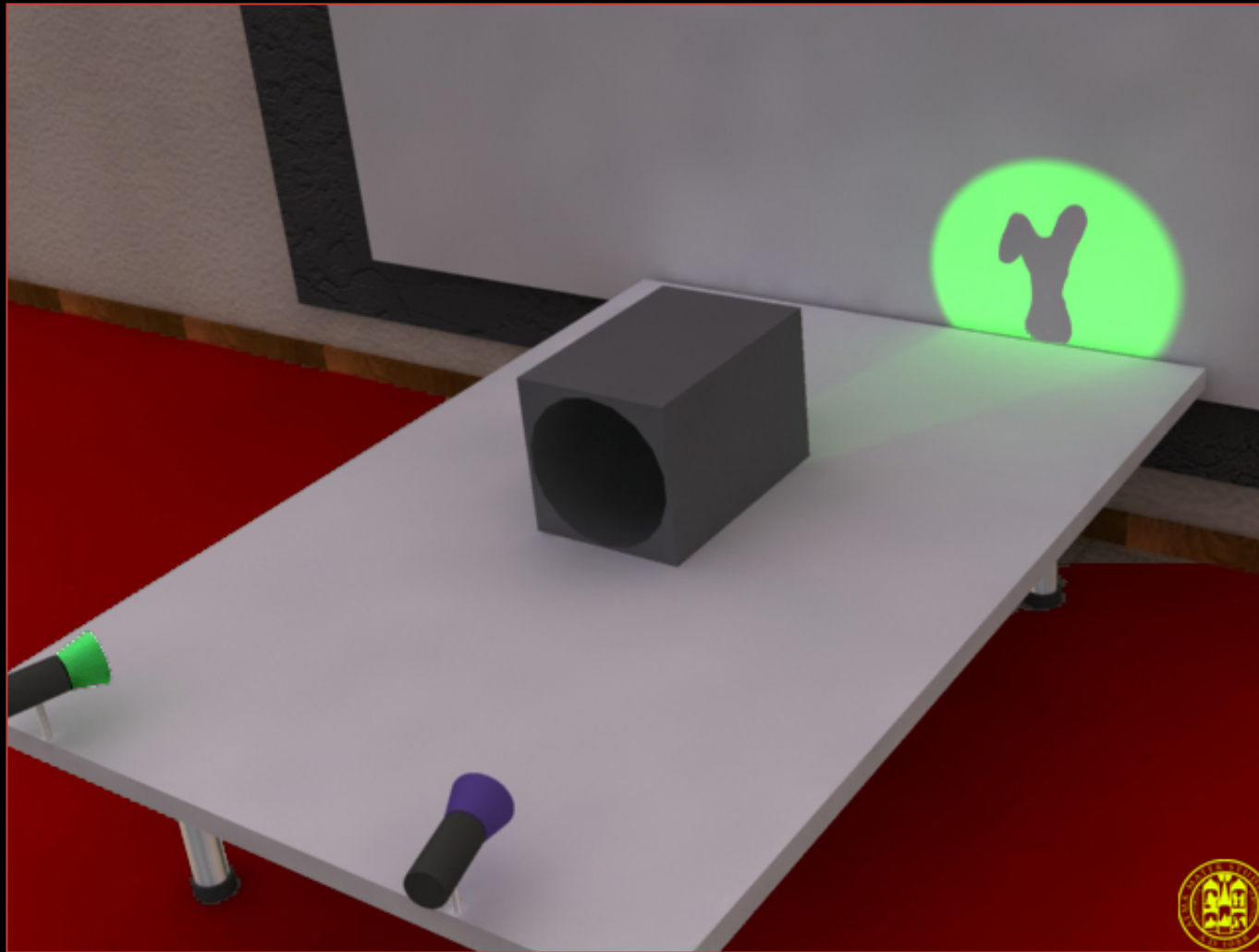
[...] è essenziale rendersi conto che, per quanto i fenomeni possano trascendere le possibilità esplicative della fisica classica, **l'esposizione d'ogni esperimento va fatta in termini classici**. Ciò significa semplicemente che, con la parola “esperimento”, ci riferiamo a una situazione in cui possiamo dirci l'un l'altro ciò che abbiamo fatto e ciò che abbiamo imparato, e che perciò la descrizione di un dispositivo sperimentale e dei risultati dell'osservazione va fatta in termini non ambigui, con l'opportuna applicazione della terminologia della fisica classica.

[...] **i dati ottenuti in condizioni sperimentali diverse non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari, nel senso che solo la totalità dei fenomeni esaurisce la possibilità d'informazione sugli oggetti.**

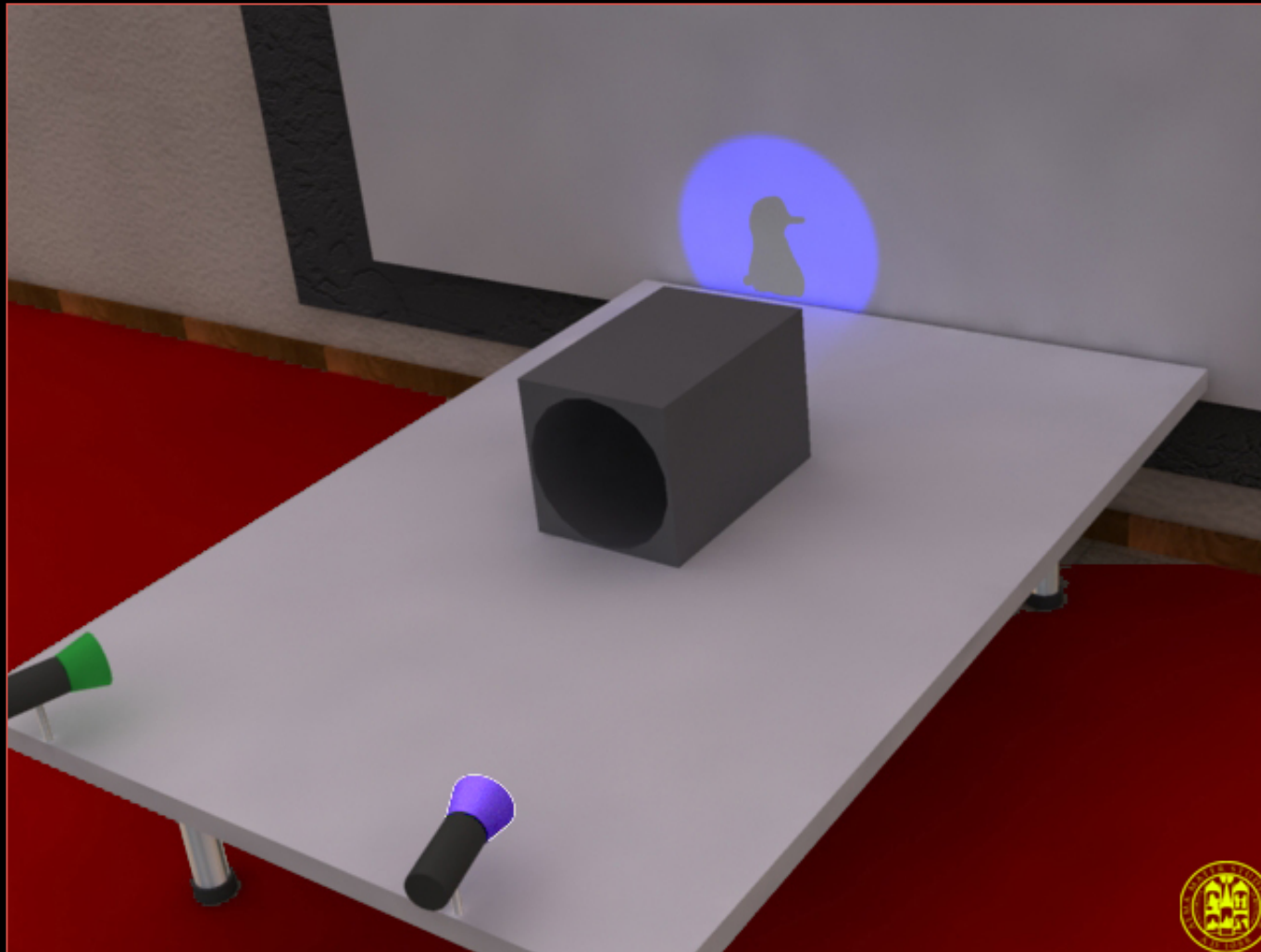
Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica **un elemento essenziale di ambiguità**, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.”

(Bohr, Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp.113-114)

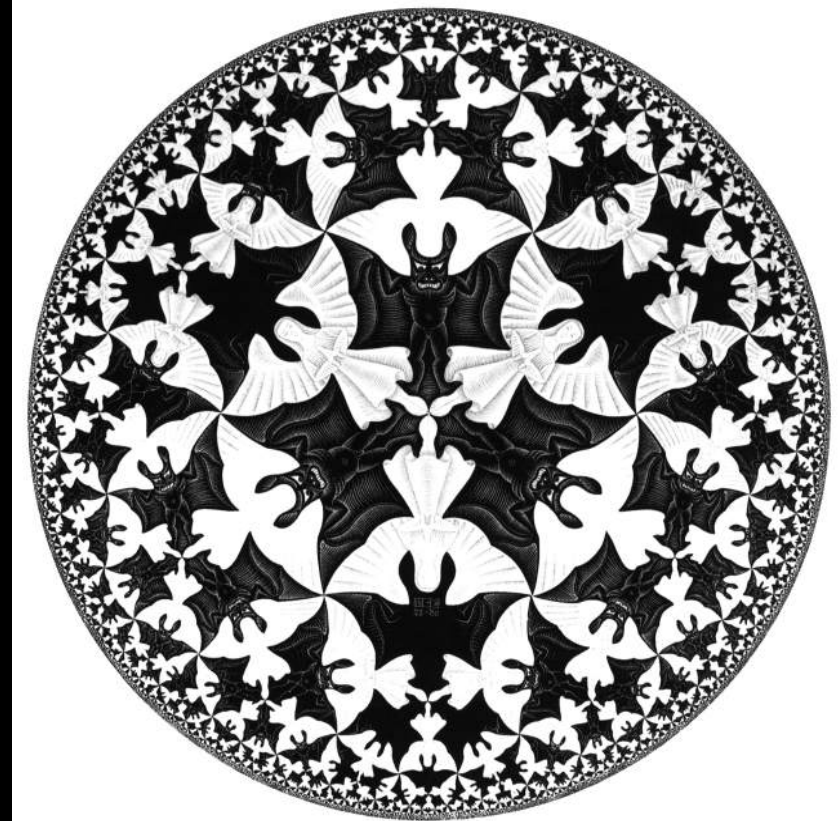
L'oggetto quantistico...



L'oggetto quantistico...



ambiguità





Contraria sunt complementa.



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

“La complementarità... c'è questo concetto – la complementarità – che Niels Bohr e i suoi discepoli diffondono e di cui tutti fanno uso. Devo confessare che non lo comprendo. **Per me si tratta d'un'evasione.** Non d'un'evasione volontaria. Infatti si finisce per ammettere il fatto che abbiamo due teorie, due immagini della materia che non si accordano, di modo che qualche volta dobbiamo far uso dell'una, qualche volta dell'altra. Una volta, settanta o più anni fa, quando si verificava un tale fatto, si concludeva che la ricerca non era ancora finita, perché si riteneva assolutamente impossibile far uso di due concetti differenti a proposito d'un fenomeno o della costituzione d'un corpo. Si è inventata ora la parola "complementarità", e ciò mi sembra voler giustificare quest'uso di due concetti differenti, come se non fosse necessario trovare finalmente un concetto unico, un'immagine completa che si possa comprendere. La parola "complementarità" mi fa sempre pensare alla frase di Goethe: "Perché proprio dove mancano i concetti, si presenta al momento giusto una parola."



Werner Heisenberg
(1901-1976)

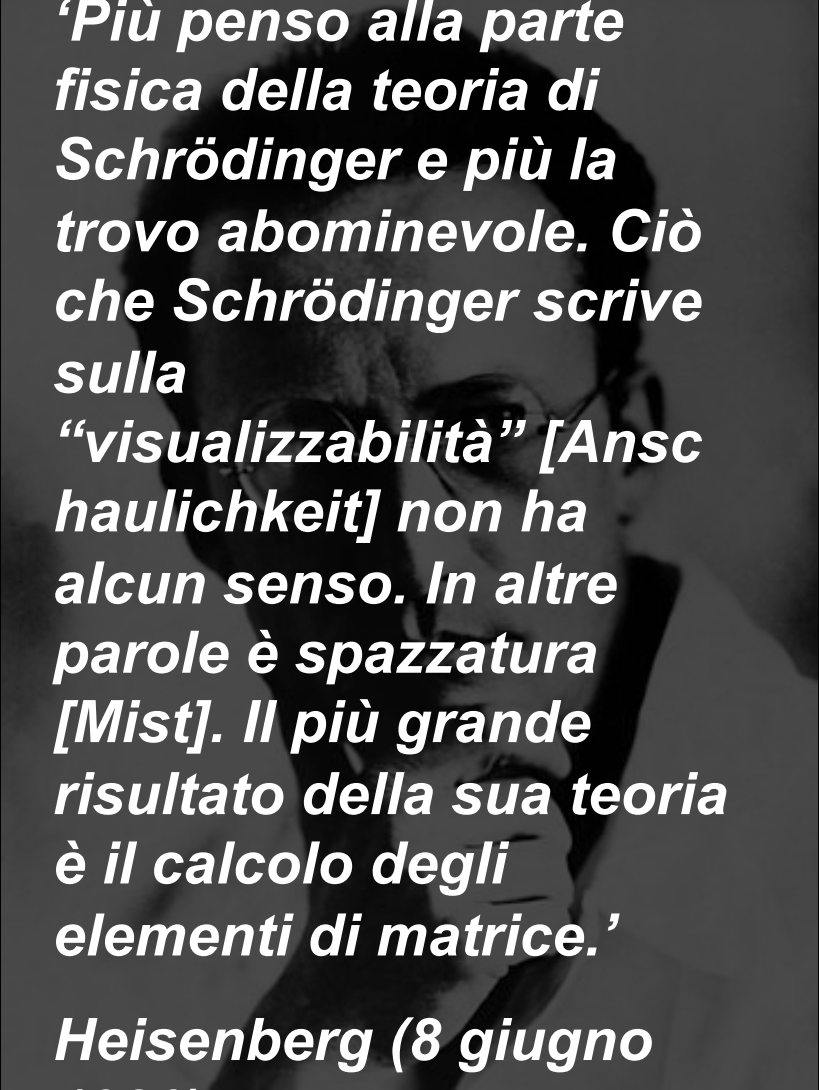
L'oggetto come forma matematica

“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall'esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l'immagine ondulatoria e quella corpuscolare.”

(W. Heisenberg)

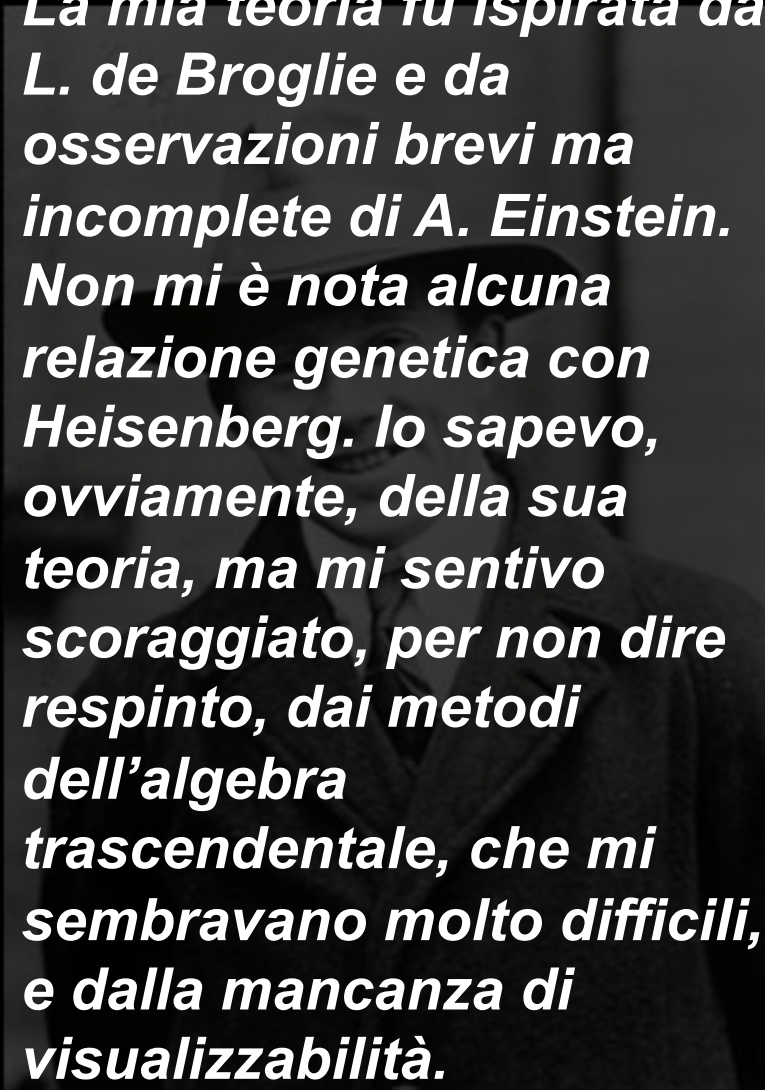


(1933, stazione di Stoccolma)



‘Più penso alla parte fisica della teoria di Schrödinger e più la trovo abominevole. Ciò che Schrödinger scrive sulla “visualizzabilità” [Anschaulichkeit] non ha alcun senso. In altre parole è spazzatura [Mist]. Il più grande risultato della sua teoria è il calcolo degli elementi di matrice.’

Heisenberg (8 giugno 1926).



La mia teoria fu ispirata da L. de Broglie e da osservazioni brevi ma incomplete di A. Einstein. Non mi è nota alcuna relazione genetica con Heisenberg. Io sapevo, ovviamente, della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto, dai metodi dell'algebra trascendentale, che mi sembravano molto difficili, e dalla mancanza di visualizzabilità.

Schrödinger (primavera 1926)



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. Ogniqualevolta 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”)

Nota: Il problema della visualizzazione

Le immagini, così come le buone metafore, funzionano per colmare il gap tra:

- *il ricco mondo dell'esperienza e*
- *la ricostruzione fisica di tale mondo.*

Il gap è colmabile, in linea di principio, quando la ricostruzione matematica del mondo fornisce una “proiezione coerente” del mondo stesso in uno spazio euclideo (spazio formale in un certo senso “isomorfo” allo spazio di cui facciamo esperienza).

Nella fisica moderna, la descrizione matematica **proietta il mondo reale in spazi altamente astratti**: lo spazio di Hilbert.

**Il dualismo onda-particella come un caso esemplare per
introdurre:**

**Il problema della visualizzazione nella Meccanica
Quantistica**

**(Invece di fornire una nuova sintesi, queste immagini
familiari restituiscono un'immagine contraddittoria del
comportamento fenomenologico del mondo quantistico)**

**La necessità di riferirsi a spazi astratti
come a nuovi scenari sintetici nei quali le proprietà dei
sistemi fisici possono essere sistemate e integrate l'un
l'altra in modo coerente.**

Il percorso sulla visualizzazione:

- **Valorizzare, come risorsa, il disagio creato dalla tendenza a far ricorso a immagini classiche che portano gli studenti a percepire il mondo quantistico come confuso;**
- **Trasformare ciò che è vissuto come “confuso” in quella tensione intellettuale che permette di cambiare “discorso” ed entrare nel formalismo della fisica moderna, visto come un modo possibile per nuove e più potenti sintesi.**

Seconda parte: la costruzione di un formalismo minimale

Analisi storico-epistemologica



Analisi fenomenologica di situazioni sperimentali

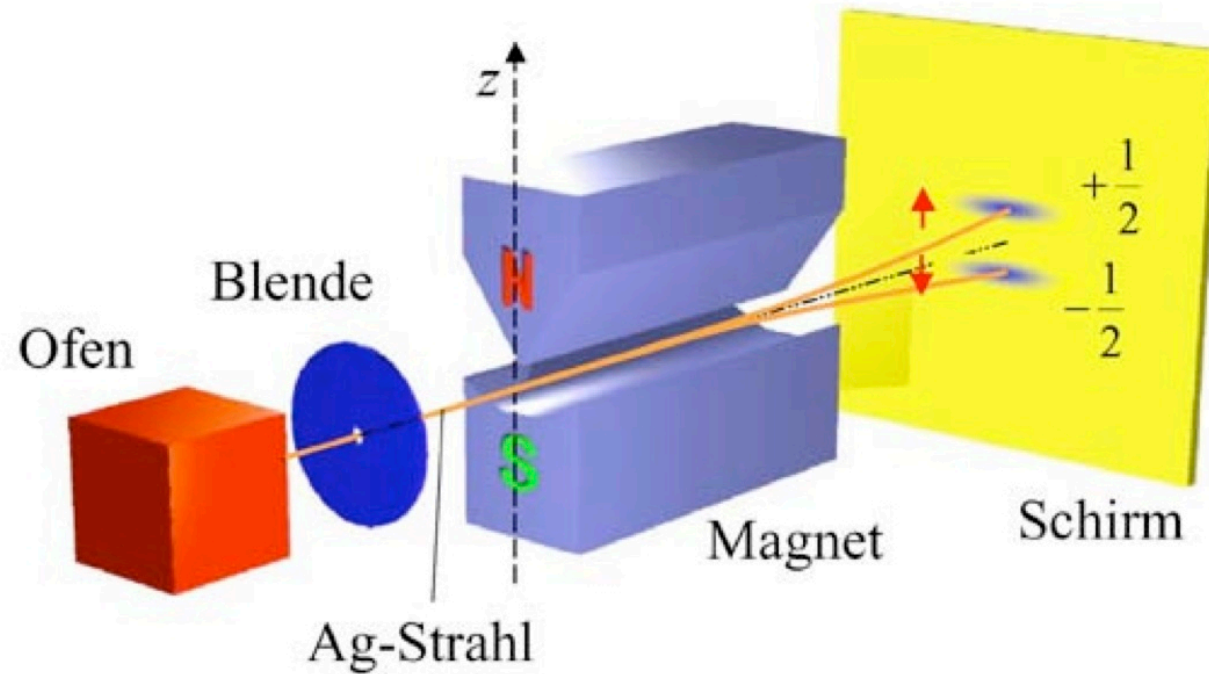


Formalizzazione (matrici di Pauli)

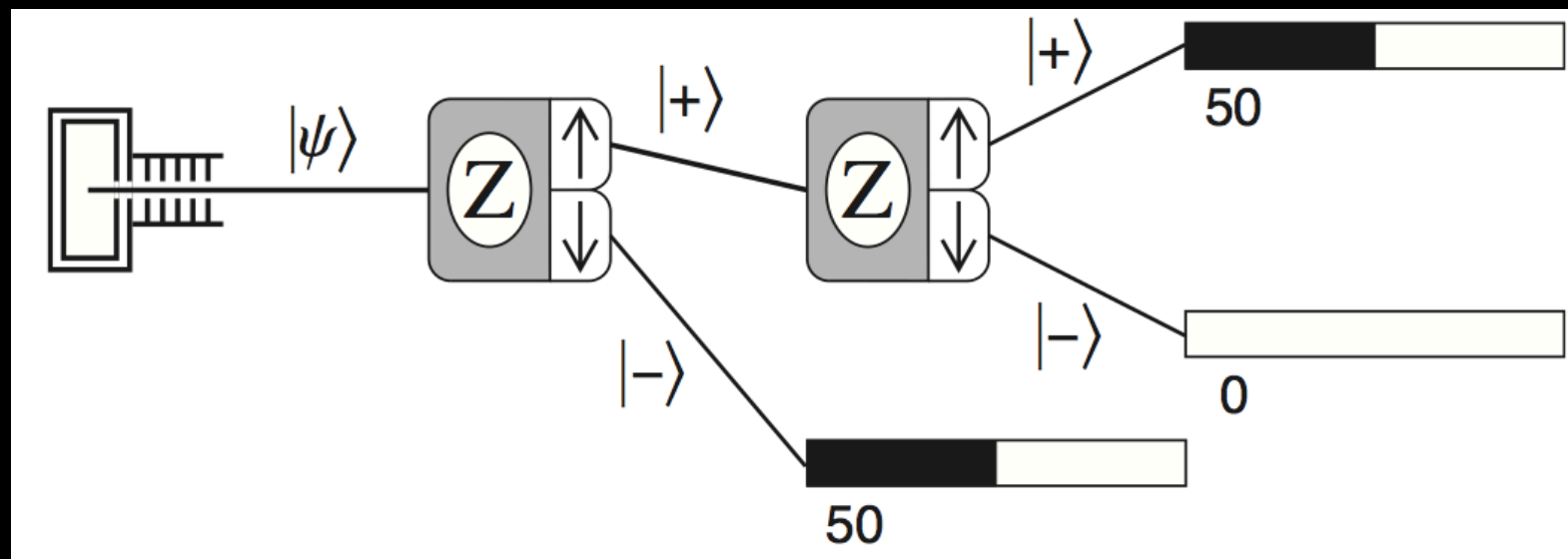
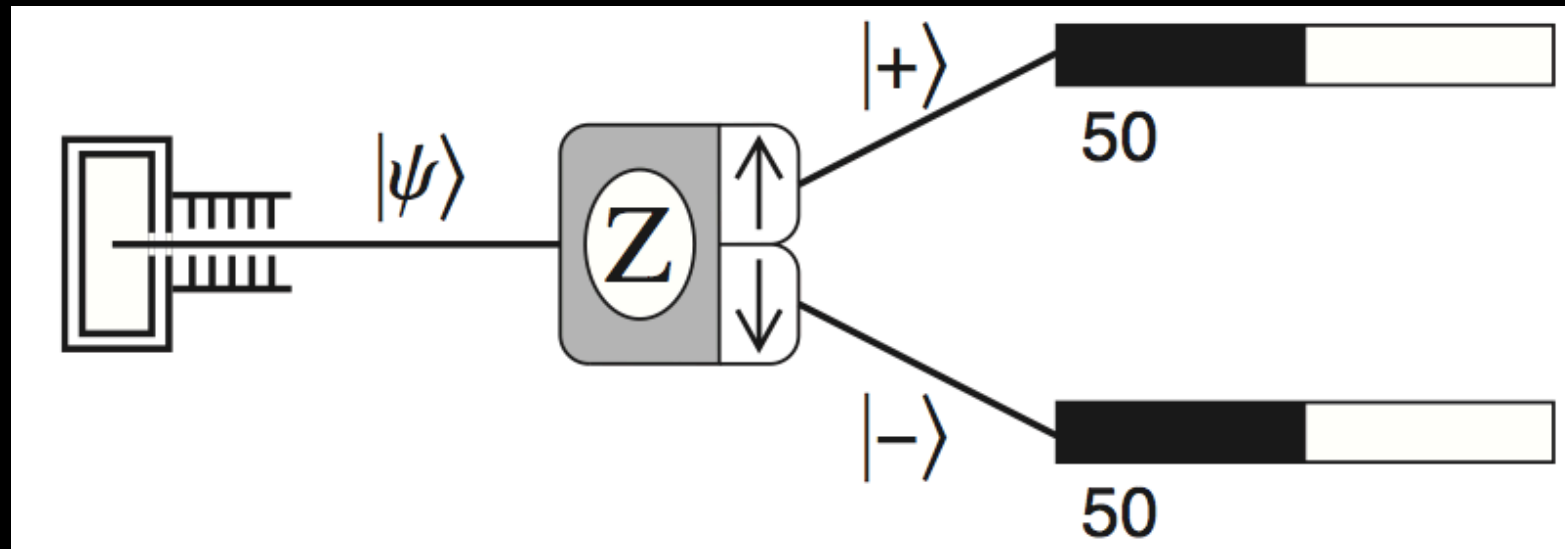
(i concetti di *stato quantistico*, *preparazione di uno stato*, *operatore*, *autostato*, *autovalore*, *principio di sovrapposizione*, *complementarità*, *processo di misura*, *entanglement*)

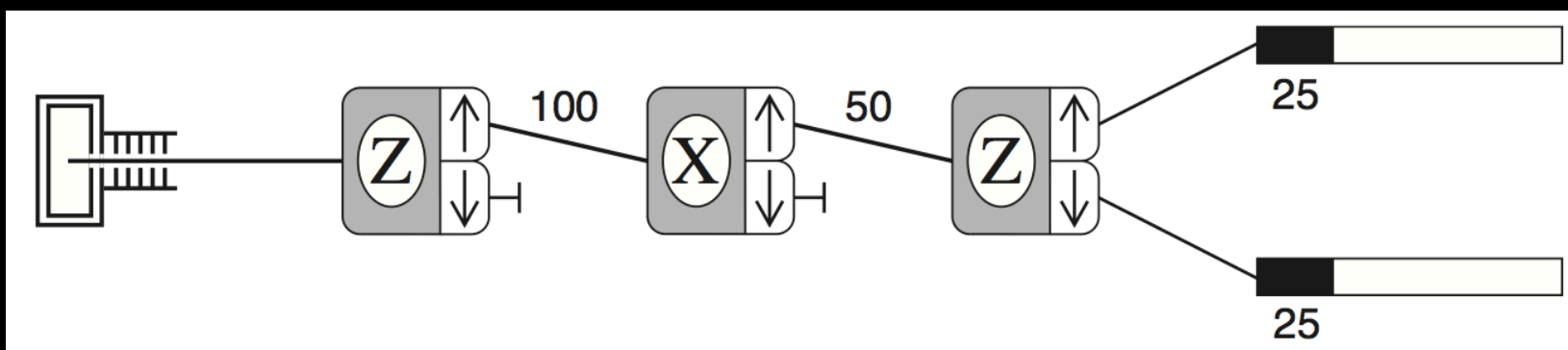
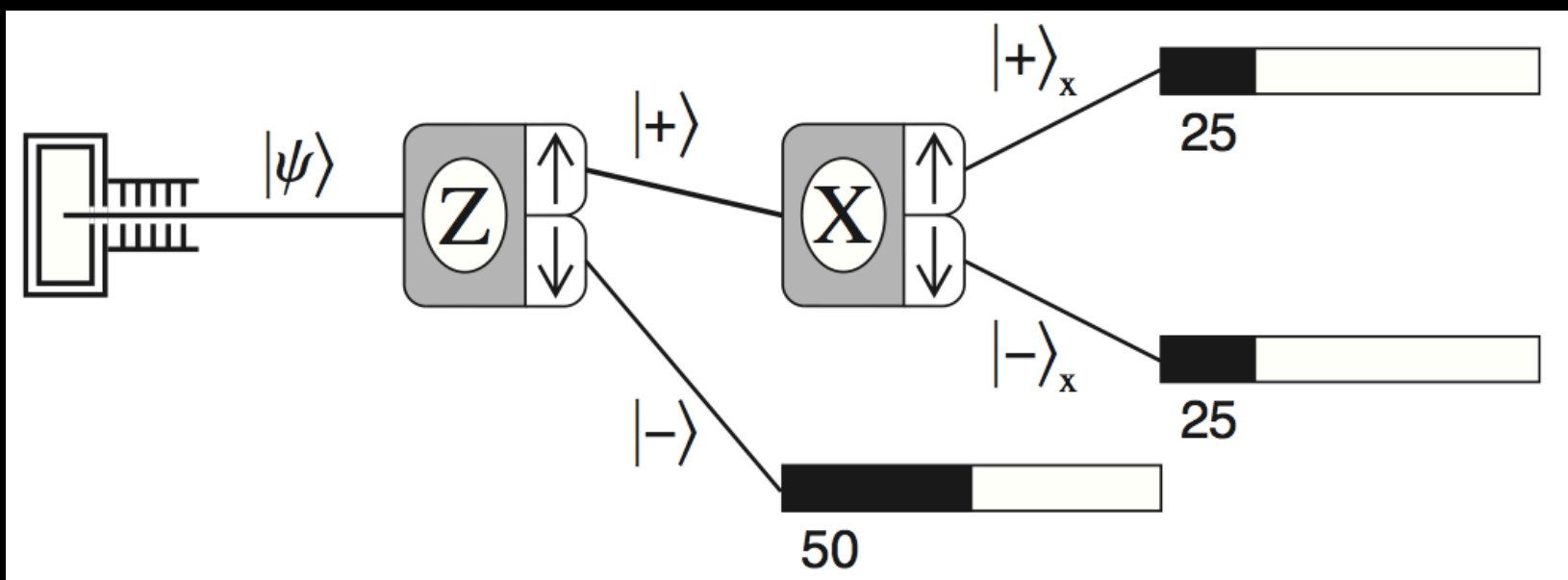
**La struttura formale come un modo sintetico e
“semplice” di gestione della complessità della
conoscenza**

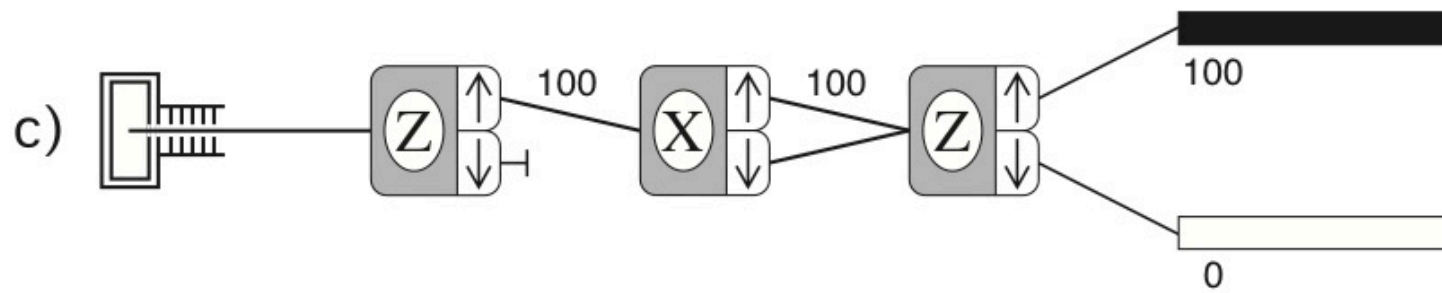
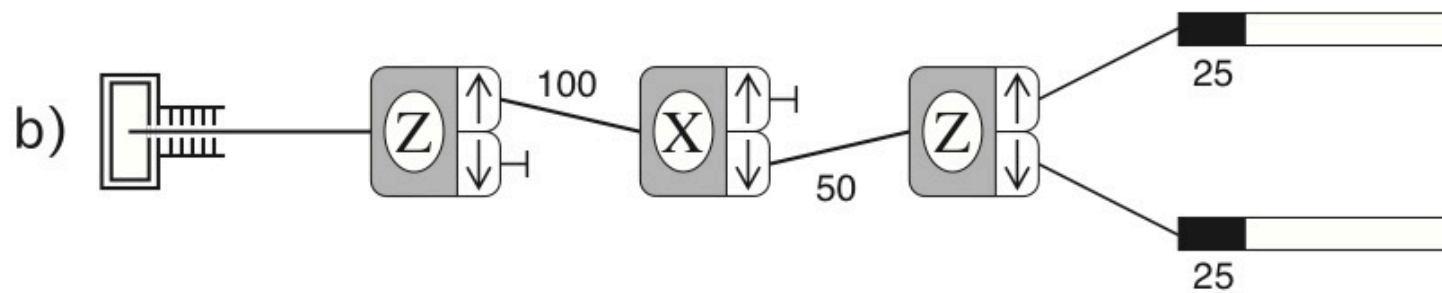
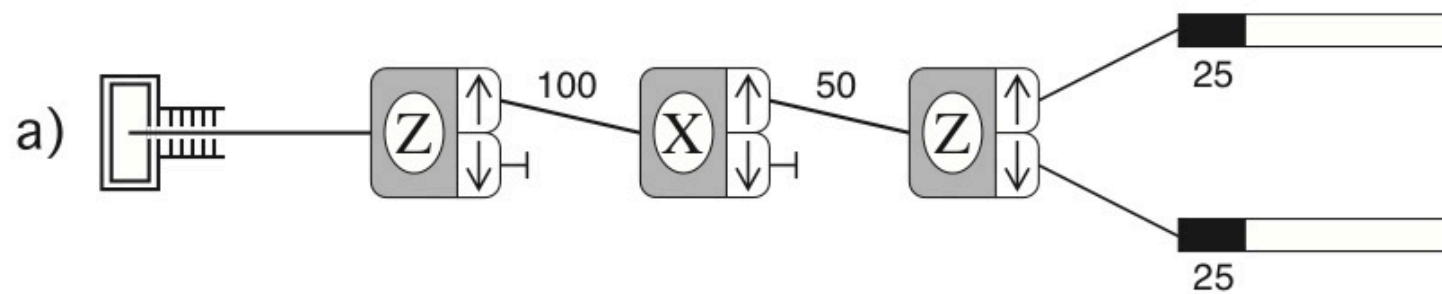
Verso il formalismo*: L'apparato di Stern e Gerlach



$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} (\vec{\mu} \cdot \vec{B}) \approx \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$







Alla ricerca di un formalismo minimale

- **Introduzione “assiomatica” degli enti matematici e della loro associazione a enti fisici (seguendo i testi di Dirac e Ghirardi).**
- **Ancoraggio all'esempio specifico: rappresentazione matriciale dello spin utilizzando le matrici di Pauli (matrici 2×2).**

La costruzione dello schema matematico, ovvero l'individuazione degli enti matematici a cui associare le seguenti entità fisiche che caratterizzano la descrizione quantistica:

- Sistema fisico;**
- Stato di un sistema;**
- Variabile dinamica (o osservabile).**

L'associazione a proprietà formali di: indeterminazione, complementarità, probabilità non-epistemica, operazione di misura, risultato di una misura.

Analisi formale dell' esperimento di Stern e Gerlach

Modulo del momento di spin:

con $s = \frac{1}{2}$

Ciascuna delle componenti S_x , S_y , S_z , può assumere solo valori $-\frac{1}{2} \hbar$ e $+\frac{1}{2} \hbar$.

Per semplicità:

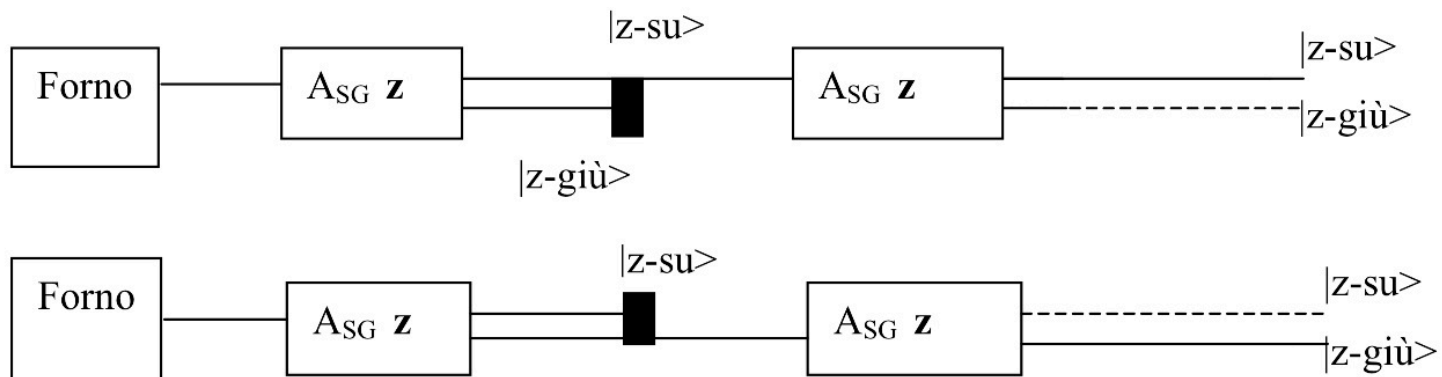
$$\mathbf{S}_x = [\frac{1}{2} \hbar] \sigma_x$$

$$\mathbf{S}_y = [\frac{1}{2} \hbar] \sigma_y$$

$$\mathbf{S}_z = [\frac{1}{2} \hbar] \sigma_z$$

$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$|z-su\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad |z-giù\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad |stato\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

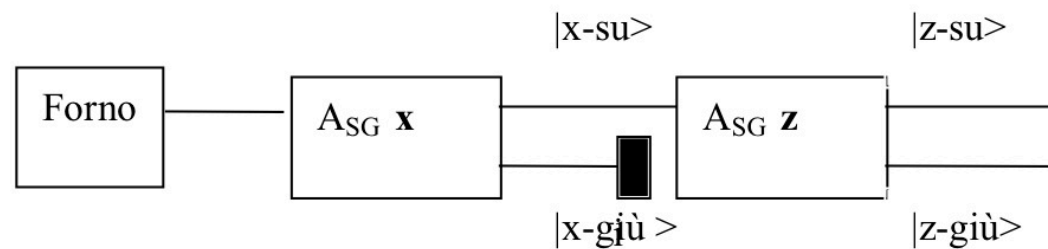


$$A\mathbf{x}=\lambda\mathbf{x}$$

$$|stato1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad |stato2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|stato1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |z-su\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |z-giù\rangle \quad |stato2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |z-su\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |z-giù\rangle$$

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$



$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$|z - su\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad |z - giù\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad |stato\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|stato1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad |stato2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|stato1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |z - su\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |z - giù\rangle \quad |stato2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |z - su\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |z - giù\rangle$$

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|x-su\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad |x-giù\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix};$$

$$|stato\rangle = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = a \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + b \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$|z-su\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = a \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + b \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad a=b=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$|z-su\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |x-su\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |x-giù\rangle$$

$$|z-giù\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} |x-su\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |x-giù\rangle$$

A.S. 2005-2006:

“Il problema non è stato capire ma accettare i risultati della teoria” (Michele)

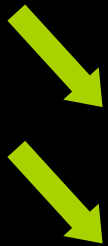
Il contesto

- “classe VG” (19 studenti, 10 ragazzi e 9 ragazze)
- “classe VH” (20 studenti, 11 ragazzi e 9 ragazze)

Durata del lavoro: circa 25 ore (in ciascuna classe)

Le sorgenti dei dati

- **Questionario iniziale sui “modelli classici” di oggetto;**
- **Compiti in classe svolti in itinere (problemi qualitativi e quantitativi) su concetti affrontati rispettivamente nella prima e nella seconda parte del percorso;**
- **Discussioni video-registrate (alla fine del percorso)**
- **Questionario finale relativo alle “reazioni” degli studenti sull’intero lavoro svolto.**



Obiettivi dello studio

Interpretare due evidenze:

1. Spostamento delle difficoltà d' apprendimento dall' intelligibilità alla accettabilità della fisica quantistica (in entrambe le classi)

“il problema non è stato capire ma accettare i risultati della teoria” (Michele)

“Ho trovato questo percorso molto stimolante ed interessante (veramente!); facile SOLO dal punto di vista tecnico (calcoli, esercizi), poiché per la parte teorica richiede molta riflessione e, io credo, personale interpretazione.” (Francesco)

Quali problemi hanno incontrato gli studenti nell' accettare la fisica quantistica?

Obiettivi dello studio (continua..)

- 2. Diversi ruoli attribuiti al formalismo dalle due classi:**
 - FONDAMENTALE per tutti gli studenti della VG;**
 - non particolarmente UTILE per la maggior parte degli studenti della VH.**

Alcuni risultati

L' emergere di un tema dominante in ogni classe (probabilmente a causa degli interessi degli studenti leader) :

- *Linguaggio e pensiero* (classe VG)**
- *Conoscenza e realtà* (classe VH)**

Linguaggio e pensiero (classe VG)

Tutti gli studenti della VG concordano sul fatto che:

- il formalismo quantistico è la chiave per “*entrare in un nuovo meccanismo*” (Stefano)
- entrare nel meccanismo della fisica quantistica implica un radicale cambiamento di prospettiva:

“la parte riguardante il formalismo, seppur complicata, è stata utile per [...] sancire un forte distacco dalla visione classica della realtà” (Giacomo)

Il formalismo rafforza l'idea che, nella fisica quantistica, la *visualizzazione* è impossibile

Le figure sono roba da bambini, non per scienziati... e la matematica è sufficiente per descrivere il mondo microscopico



E' impossibile parlare di qualcosa senza cercare di rappresentare ciò di cui stiamo parlando



Il problema dell' accettabilità:

Il bisogno cognitivo di un criterio plausibile per muoversi dal linguaggio quantistico ai modi di pensare ordinari e classici:

“con la relatività era diverso[...] con la relatività tu hai quella linea di separazione, perché sai che ad un certo punto, se tu nella formulina...[...] se tu applichi le velocità nostre nella formule ritrovi le nostre formule” (Silvia).

Senza tale criterio, il formalismo quantistico rischia di diventare nient' altro che un “*meccanismo*”, una “*mentalità*” (Silvia).

Conoscenza e realtà (classe VH)

La maggior parte della classe concorda che:

- il formalismo quantistico sia un importante sostegno emotivo, intelligibile, ma chiaro solo internamente

“La parte del formalismo mi ha aiutato umanamente, perché è sempre confortante contare su equazioni, calcoli e leggi matematiche; tuttavia, nonostante questa sua coerenza interna, la parte matematica non ha contribuito a formare la mia idea di oggetto quantistico più di quanto non l'avesse fatto la parte della fisica: evidentemente perché il piano della teoria matematica è troppo astratto, dal mio punto di vista, per poter essere calato nelle realtà fisiche, per quanto possano essere intangibili. Beninteso: non si è trattato di una complicazione, perché il formalismo è stato facile da memorizzare e capire, ma, come dico, chiaro solo al suo interno.” . (Simone R.)

Il problema dell' accettabilità:

“Il punto che mi è risultato più duro da comprendere è stato l'abbandono del determinismo classico: in effetti, più che di una vera e propria difficoltà, dovrei parlare di una inettitudine. La fisica del determinismo era una scienza esatta, almeno a livello teorico; la Meccanica Quantistica, invece, è sconvolgente, perché ci mette di fronte al problema della conoscenza, ci fa chiedere se quello che osserviamo è realmente quello che è.” (Simone R.)

Perché “reale” dovrebbe essere sinonimo di “conosciuto in tutti i dettagli”, “conosciuto con certezza”?

“Fino a che questi interrogativi non affiorano tutto procede per il meglio, ma quando vengono a galla e dobbiamo rispondere che non sappiamo dire o prevedere ciò che vogliamo osservare, l'impatto emotivo è molto forte.” (Simone R.)

Il realismo non si perde. Occorre soltanto ridefinirlo in termini di probabilità (e non di certezza)



La matematica è un' astrazione. La si associa alla certezza soltanto per abitudine.



Il mondo microscopico è più reale...



***“Noi siamo una composizione di oggetti
microscopici...”***

**Una descrizione del mondo basata sul determinismo
è meno reale di una descrizione basata su una
probabilità non-epistemica.**

***“Secondo me, un determinismo a la Laplace crea
mondi fantascientifici... Ho capito questo guardando
Minority Report.” (Michele)***

Tre posizioni dominanti circa l' accettabilità della MQ e tre diversi ruoli attribuiti al formalismo:

- **il formalismo è necessario e sufficiente per accettare i risultati di una teoria che funziona (sia logicamente sia sperimentalmente).**
- **un “formalismo che funziona” è una condizione necessaria ma non sufficiente per “avere la sensazione” di aver capito. La comprensione richiede di interpretare il “meccanismo formale” anche costruendo relazioni significative con il linguaggio ordinario e la descrizione classica.**
- **il formalismo è necessario ma non sufficiente per l' accettazione di una teoria. L' accettabilità richiede anche una analisi delle implicazioni filosofiche della teoria sulla conoscenza in generale.**

Per (non) concludere

- **La comprensione è un processo complesso e “multidimensionale” che passa attraverso l’utilizzo di una pluralità di linguaggi e di tipologie di argomentazione (formale, sperimentale, epistemologica..); Quale bilancio è opportuno tra le diverse dimensioni di un percorso?**
- **La motivazione degli studenti: e quando il loro coinvolgimento e la loro curiosità diventano troppo impegnativi?**