

Crisi della fisica classica e fisica moderna

Guicciardini, Introzzi, *Fisica quantistica*

W. Heisenberg, *Fisica e Filosofia*

W. Heisenberg, *Fisica e oltre*

A.I. Miller, *L'equazione dell'anima*

D. Lindley, *Gli atomi di Boltzmann*

E. Schroedinger, *L'immagine del mondo*

H. Reichenbach, *Esistono gli atomi?*

(in *La nascita della filosofia scientifica*)

D. Donato, *I fisici della Grande Vienna*

M. Kumar, *Quantum*

fisica “classica”

Conservaz. energia

Meccanica classica
MATERIA

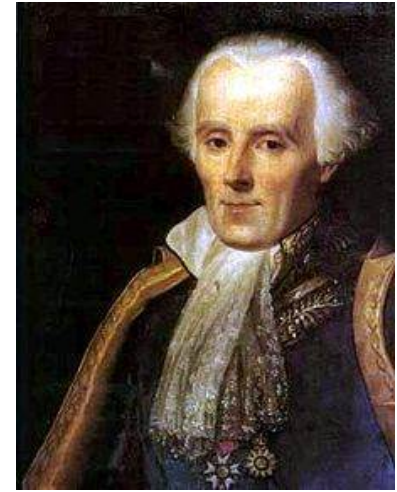
(Galileo, Huygens, **Newton**, Euler,
Lagrange, Laplace...)

Elettromagnetismo classico
RADIAZIONE

(Gilbert, Franklin, Faraday, Ampere,
Maxwell, Hertz...)

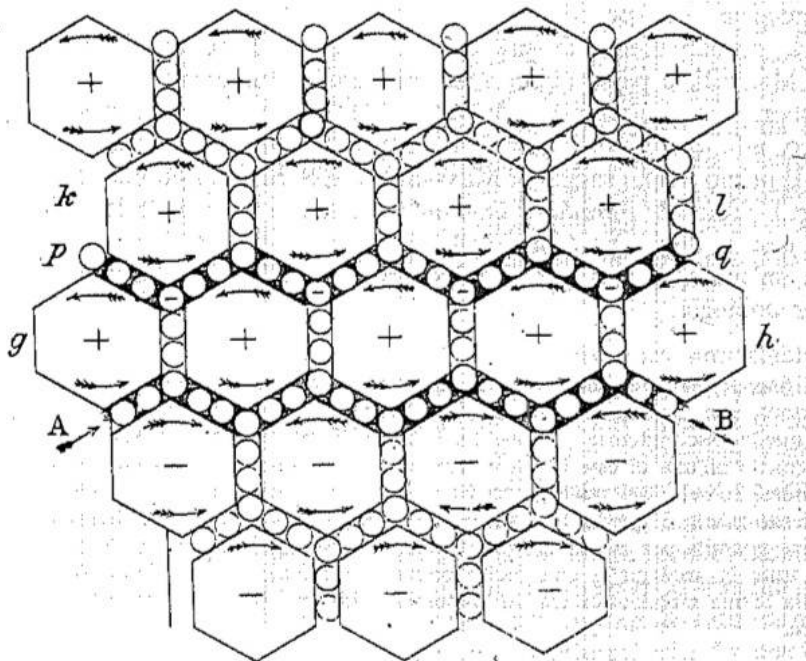
determinismo e meccanicismo

“Gli eventi attuali hanno un legame con quelli che li precedono, il quale è fondato sul principio evidente che **una cosa non può cominciare ad essere, senza una causa che la produca**. Questo assioma, noto col nome di di ragion sufficiente, si applica anche a quelle azioni considerate come indifferenti.[...] Noi dobbiamo dunque **considerare lo stato presente dell'universo come l'effetto del suo stato anteriore e come la causa del suo stato futuro**. Una Intelligenza che, in un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse così elevata da sottomettere questi dati all'analisi, racchiuderebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi.”



P. S. Laplace

“determinismo ontologico”



“the parts of this medium are capable of being set in motion by electric currents and magnets; that this motion is communicated from one part of the medium to another by forces arising from the connections of those parts”

(J. C. Maxwell, 1864)

discorsi di Lord Kelvin

1892

“La fisica si è **definitivamente** costituita entro i suoi **concetti fondamentali**; tutto quel che si può ancora aggiungere è la **determinazione precisa di qualche cifra decimale in più**. In effetti ci sono due piccoli problemi: quello del risultato negativo dell'esperienza di Michelson e quello del corpo nero; ma questi saranno **rapidamente risolti** e non altereranno per niente la nostra confidenza.”

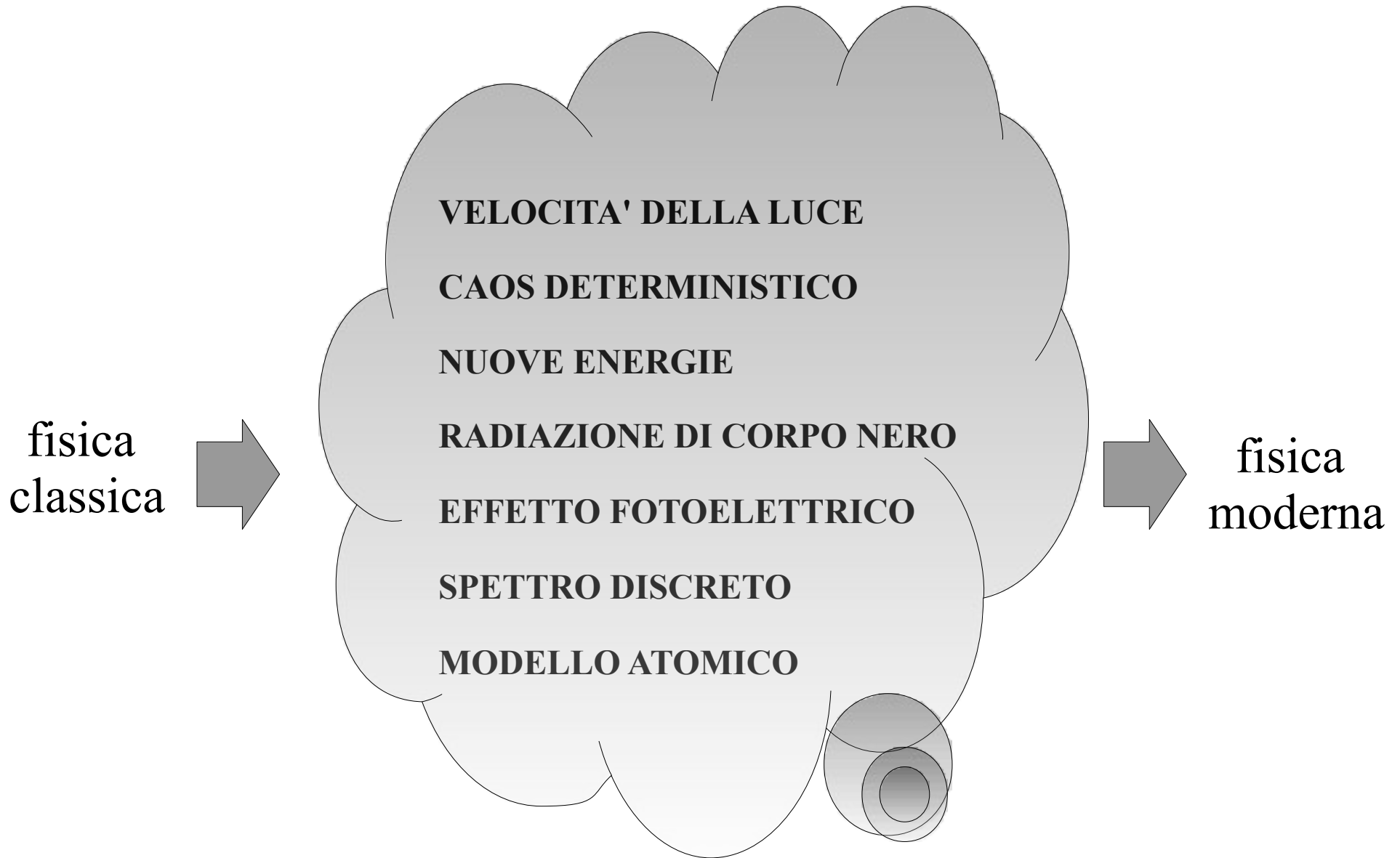
1900

Lezione intitolata *Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*. Le **due nubi oscure** a cui allude sono le insoddisfacenti spiegazioni che la fisica di quel periodo poteva dare per due fenomeni: l'esperimento di Michelson-Morley e la radiazione di corpo nero.



W. Thomson

elementi della crisi



Kuhn, “anomalie del paradigma” → da “scienza normale” a “rivoluzione scientifica”

un problema epistemologico: l'esistenza degli atomi

- *"Abituati come siamo al giorno d'oggi all'idea di spiegare ogni sorta di fenomeni osservabili o comunque rilevabili **in termini di entità remote e invisibili** – quark e fotoni, campi elettromagnetici, spazio curvo e simili-, tendiamo a dimenticare che gli scienziati di due secoli fa erano sempre propensi a **non discostarsi da ciò che potevano vedere e misurare direttamente** [...] Certo, era possibile immaginare atomi piccolissimi che urtavano contro la testa di un pistone e collettivamente assommavano una forza sufficiente a farlo retrocedere, ma **che vantaggio c'era** a immaginare una cosa simile?" (Lindley)*
- *"come spiegazione questa sembrava andare nella direzione sbagliata, **descrivendo qualcosa di immediato e tangibile in termini di "atomi" che erano destinati a rimanere per sempre celati all'occhio umano**" (Lindley)*
- *"Essa [la teoria atomica] poteva spiegare una cosa mediante un'altra, ma non ancora in modo abbastanza generale da rendere la fisica nel suo insieme in un qualsiasi senso più semplice" (Lindley)*

un secondo problema epistemologico: l'inconciliabilità meccanica/termodinamica

*"Il secondo principio della termodinamica, nell'enunciato di Clausius, era in antitesi con i tradizionali concetti meccanici. La meccanica aveva considerato sempre i processi meccanici come reversibili, mentre il secondo principio della termodinamica li riteneva irreversibili. La teoria cinetica mutò l'antitesi in **antinomia**: se il calore si riduce a moto delle molecole singole individue, retto da leggi dinamiche reversibili, **come è possibile conciliare la reversibilità dei processi singoli con l'irreversibilità della massa?**"*

(Gliozzi)

un terzo problema epistemologico:

da calcolo esatto (determinismo) a calcolo approssimato, statistico

→ è sufficiente una fisica probabilistica?


“Energetisti”: Ernst Mach, Zermelo, Ostwald

- leggi della **termodinamica** sono **assolute** e inviolabili
- Zermelo: **atomi inaccettabili**, portano alla violazione del II principio (lo dice Maxwell!) → attaccare piuttosto la visione meccanicistica del mondo!
- Su atomi: Mach: "il mondo consiste soltanto nelle nostre sensazioni"
- "Lo scopo della scienza, secondo Mach, era di stabilire relazioni logiche e razionali tra **fatti e fenomeni suscettibili di osservazione diretta**; quanto più si invocava l'esistenza di entità la cui realtà non era immediatamente evidente, tanto più si era fuori strada. **Fare della teoria, nella concezione di Mach, era nel migliore dei casi un male necessario.** Nell'atomismo e nella teoria cinetica Mach trovò un bersaglio naturale. Quest'ultima richiedeva di **credere a oggetti mai visti e con ogni probabilità invisibili**, e nondimeno si riteneva che i suoi risultati, i quali si limitavano a confermare ciò che le leggi della termodinamica già dicevano, conferissero credibilità alle ipotesi su cui essa si basava." (Lindley)
- se la teoria cinetica (hp. atomica) va presa come approssimata, che vantaggio dà? Essa non costituirebbe più una riduzione della termodinamica alla dinamica.

Le posizioni epistemologiche Boltzmann vs. Mach

(almeno) due tagli interpretativi (parziali e con eccezioni):


Realismo vs. Strumentalismo



Ricerca è ricerca della struttura
vera del mondo

Ricerca è necessariamente
condizionata, obiettivo sono solo
risultati **pratici**

Riduzionismo vs. Pluralismo



Modellizzare con **principi
primi** coerenti e universali

Introdurre tutti gli enti di cui c'è
bisogno (purché **osservabili**) per
costruire teorie “economiche”

Le posizioni epistemologiche - Mach



contro la meccanica

La supremazia della meccanica è un errore metodologico:

“Non esistono fenomeni puramente meccanici. Quando delle masse si comunicano accelerazioni reciproche, in apparenza vi è solo un fenomeno di moto, ma in realtà a questo moto sono legate variazioni termiche, magnetiche ed elettriche che, nella misura in cui si producono, modificano quel fenomeno [...] Volendo parlare con precisione, ogni fenomeno appartiene a tutti i domini della fisica, che sono distinti l'uno dall'altro per ragioni convenzionali [...] La concezione secondo cui **la meccanica è il fondamento** di tutte le altre parti della fisica, e perciò tutti i fenomeni fisici debbano essere spiegati meccanicamente, **è per noi un pregiudizio**. La conoscenza più antica in ordine di tempo non deve necessariamente restare il fondamento dell'intelligibilità di ciò che è scoperto più tardi [...] Forse i fenomeni sono tutti di uguale profondità.”



**contro l'ipostatizzazione
dei concetti**

Le teorie sono solo degli “arnesi” nella cassetta degli attrezzi del fisico:

“agli strumenti di pensiero elaborati dalla fisica, ai concetti di massa, forza, atomo, che non hanno altra funzione che quella di richiamare esperienze economicamente ordinate, viene attribuita dalla maggior parte degli scienziati una realtà extramentale. Essi pensano che forze e masse siano l'oggetto essenziale della ricerca, dalla cui conoscenza ogni altra possa derivare. Si comportano come colui che, avendo esperienza del mondo solo attraverso il teatro, scoprisse dietro le quinte le attrezzature meccaniche, e ne traesse la conclusione che il mondo reale consiste in un palcoscenico e tutto è conosciuto una volta che questo lo sia. Insomma **non dobbiamo considerare come fondamenti del mondo reale gli strumenti intellettuali** che ci servono alla rappresentazione del mondo sulla scena del pensiero”

(E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*)

I fisici realisti “fingunt simul creduntque”
(Tacito, “si inventano favole e poi ci credono”)

→ ruolo della ricerca in storia della fisica

Le posizioni epistemologiche - Boltzmann

Anche la fisica di **Mach**, **contrariamente al richiamo di attenersi ai “fatti”, utilizza modelli!** con l'aggravante che li moltiplica, senza riuscire a unificarli in una interpretazione coerente del mondo:

“Ora la fenomenologia cerca di combinare tutti questi atomismi particolari, senza una precedente semplificazione degli stessi per rappresentare i fatti reali, cioè per adattare a essi tutte le idee contenute in questi atomismi; ma poiché essa possiede un'infinità di concetti, che sono tratti da un piccolo settore di fenomeni e si combinano poco gli uni con gli altri, e un'infinità di equazioni differenziali, ognuna delle quali, nonostante le molteplici analogie, è caratterizzata da diverse particolarità, bisogna **aspettarsi a priori che la raffigurazione si sviluppi in modo piuttosto complicato**”

“[l'atomismo fornisce invece un'] **immagine perfettamente appropriata di tutti i fenomeni** meccanici, e trattandosi di un ambito chiuso e isolato, sembra improbabile che si possano scoprire fenomeni non inclusi nel suo modello”

“L'esercizio di pensare in termini meccanicistici è di grandissima utilità [...] **onnipotenza della meccanica** [anche per la forma mentis – ricetta educativa]”

“Spiegare” significa necessariamente fare teoria, e fare teoria vuol dire “ridurre a principi primi”:

“Non ci abbandoneremo neanche all'**illusione di potercela cavare senza alcuna astrazione** [...] L'esigenza, sovente espressa, per cui la scienza non dovrebbe mai andare oltre l'esperienza, dovrebbe, a mio parere, essere formulata così: non si deve mai andare troppo oltre l'esperienza, ma si dovrebbero introdurre solo quelle astrazioni che essa permette di verificare in breve tempo”

(L. Boltzmann, *Sull'indispensabilità dell'atomismo nella scienza*, in *Modelli matematici, fisica e filosofia*)

Albert Einstein, 1905

- *Predizione della distanza media percorsa nel moto browniano, utilizzando la distrib. di Maxwell-Boltzmann*
- *il più citato degli articoli dell'annus mirabilis*
- *congettura altamente rischiosa - Popper*



Jean Perrin, 1908

- *Misura la distanza percorsa nel moto browniano*
- *Corroborata la congettura einsteiniana*
- *premio Nobel 1926*



“Negli anni successivi alla morte di Boltzmann la fisica mutò radicalmente. **Gli ultimi echi del dibattito sulla realtà degli atomi si dissolsero rapidamente.** Wilhelm Ostwald, l'amico e avversario di lunga data di Boltzmann, era scienziato troppo valente e uomo troppo onesto per rimanere aggrappato alle proprie concezioni antiatomistiche ancora per molto. Fin dal 1908 [...] dichiarò apertamente di essersi convinto dell'esistenza degli atomi.”

(Lindley)

→ l'atomo viene accettato ma...

“Questo nuovo successo rinforzò la visione statistica emergente della natura, ma lasciò aperta la domanda **se le leggi fondamentali della natura siano irreversibili al livello atomico.** Questa domanda è ancora oggi un tema di vivace interesse tra i fisici” (Holton)

J. J. Thomson, 1896

Predecessori:

Crookes – propagaz. rettilinea dei raggi catodici

Lenard – penetrabilità della materia

Perrin – sono carichi → particelle, non onde

- *Scopre la particella – elettrone (il figlio scoprirà l'onda - elettrone)*
- *Primo modello dell'atomo: il "panettone" con l'uvetta*

→ Indip. dal materiale di cui è fatto, il catodo emette fasci di particelle di carica negativa e di massa $1/2000$ dell'atomo (chimico) H

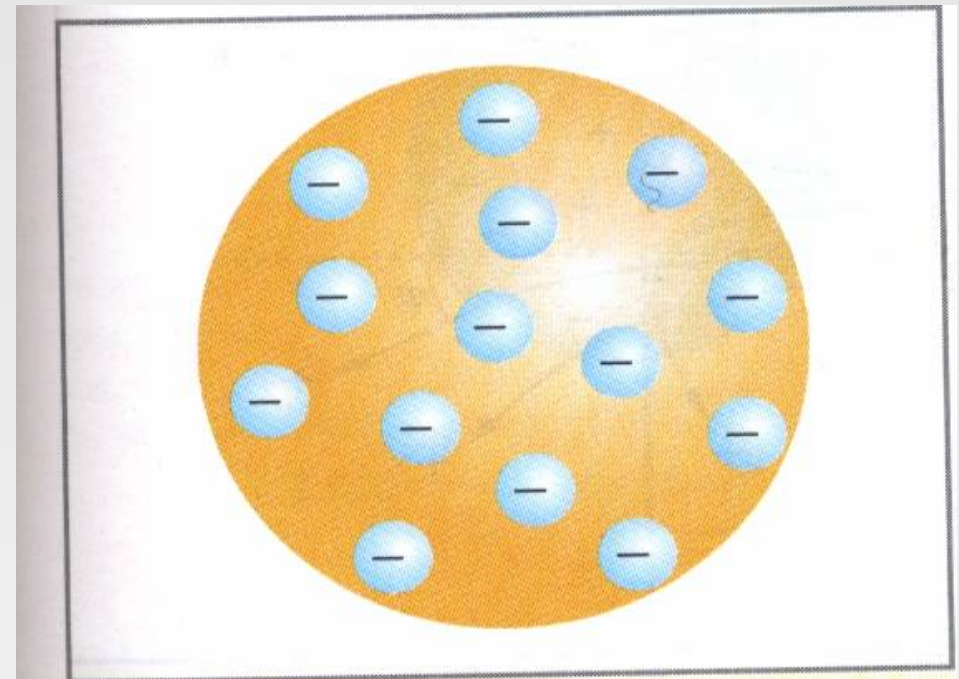
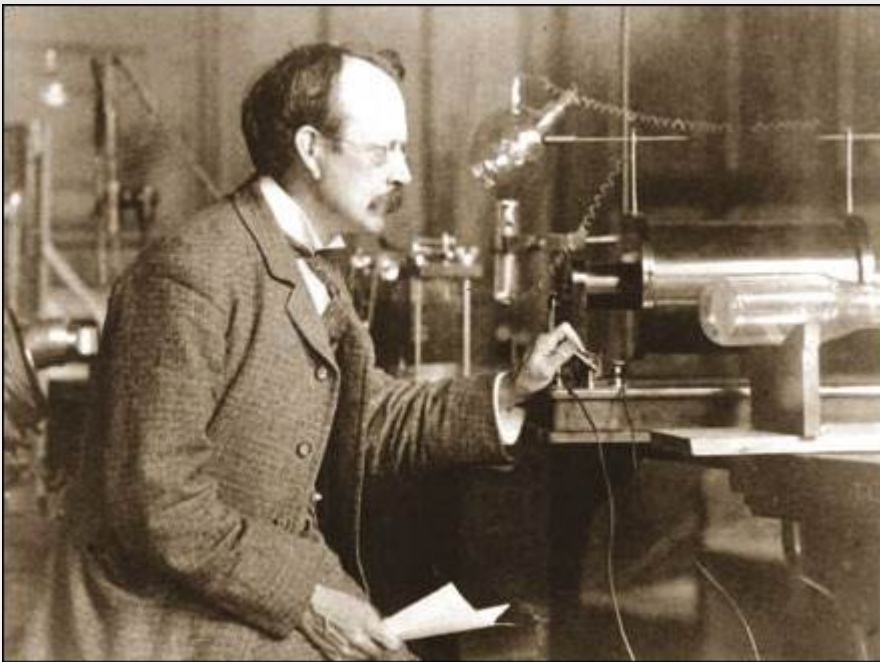


Figura 16 – Il modello di Thomson: gli elettroni caricati negativamente sono immersi in una massa fluida caricata positivamente, in modo da rendere l'atomo elettricamente neutro.

Ernest Rutherford, 1909

“Un giorno Geiger venne a domandarmi: “Non crede lei che il giovane Marsden, al quale sto insegnando i metodi radioattivi, dovrebbe cominciare una piccola ricerca?” Ci avevo pensato anch'io, così risposi: “Perché non fargli provare a scoprire se qualche particella α può essere deviata di un grande angolo?” Posso dirvi in confidenza che io non credevo che questo fosse possibile, dato che sapevamo che la particella α era una particella pesante molto veloce, e si poteva dimostrare che **se la diffusione era dovuta all'effetto complessivo di numerose piccole deviazioni, la probabilità che una particella α venisse deviata all'indietro era piccolissima**”

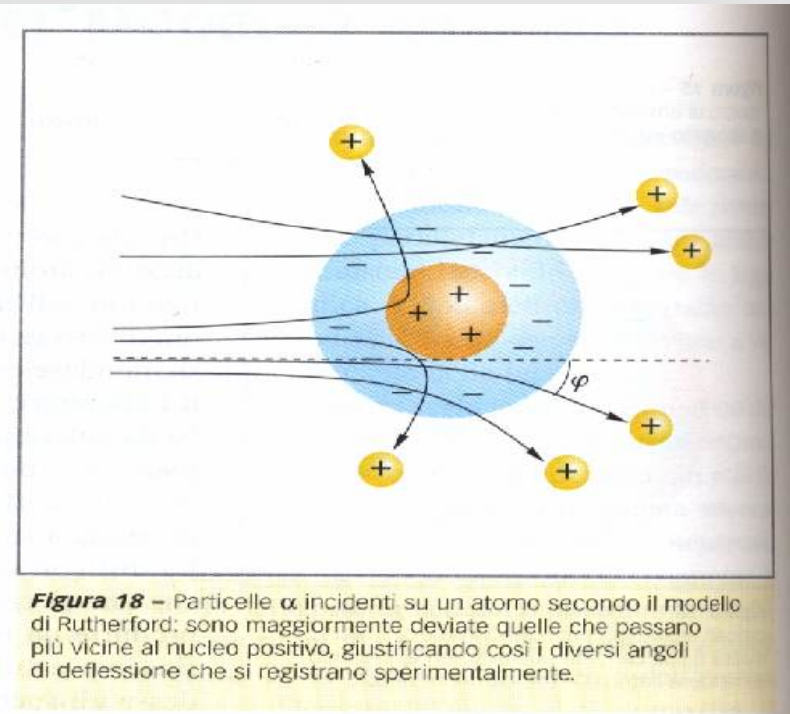
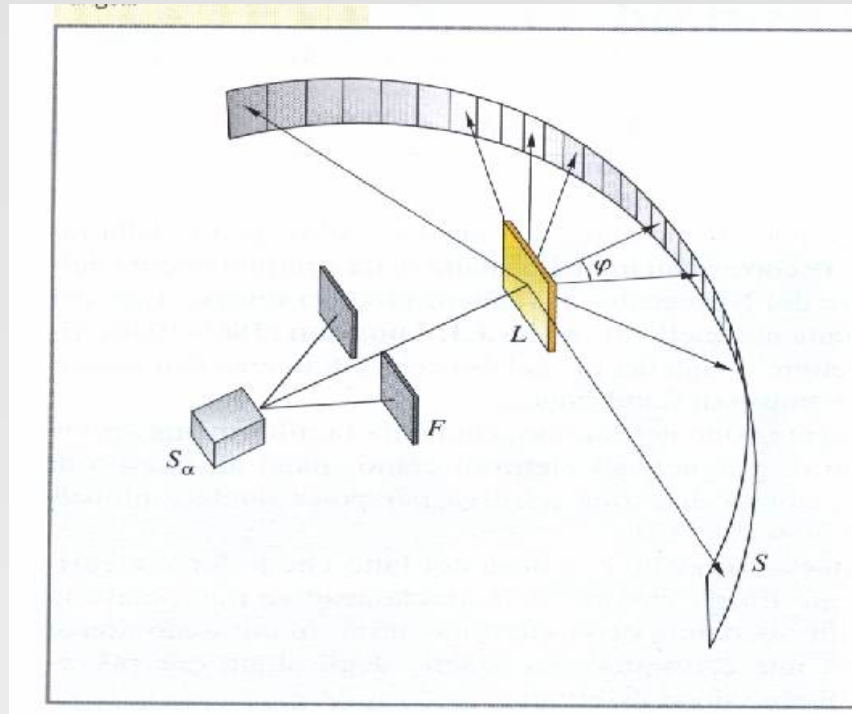
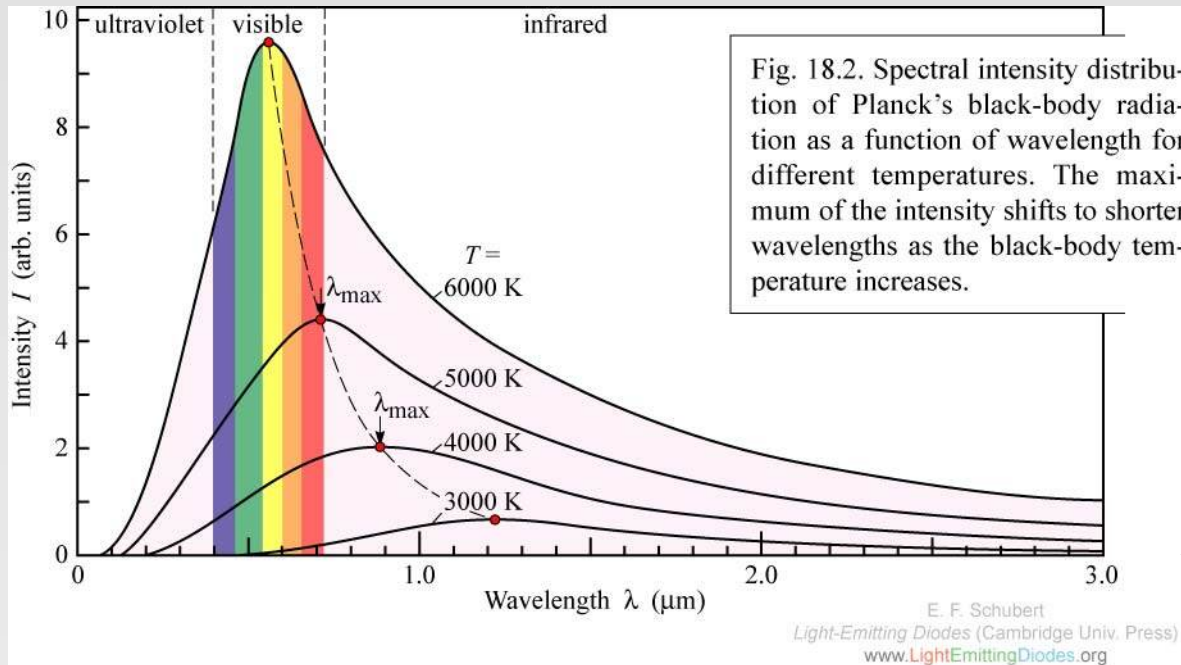


Figura 18 – Particelle α incidenti su un atomo secondo il modello di Rutherford: sono maggiormente deviate quelle che passano più vicine al nucleo positivo, giustificando così i diversi angoli di deflessione che si registrano sperimentalmente.

- *Esperimento con Geiger e l'allievo Marsden*
- *"It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost **as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.**"*
(Rutherford)
- *"Una scoperta scientifica rimosse l'ostacolo maggiore: la suddivisione dell'atomo. Il crollo del modello atomico fu equivalente, nel mio spirito, al crollo del mondo intero. Improvvisamente le mura più solide caddero. Non mi sarei sorpreso se una pietra mi fosse apparsa nell'aria davanti ai miei occhi e fosse diventata invisibile" (Kandinsky)*

Problema del “corpo nero”



(oss.: *pbm molto particolare...*)

Teoria classica
(oscillatori armonici + continuità):
“catastrofe ultravioletta”
(energia emessa **infinita**)

Popper, “falsificazione”

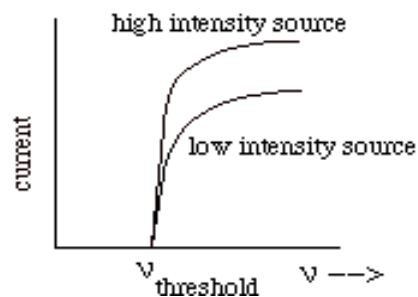
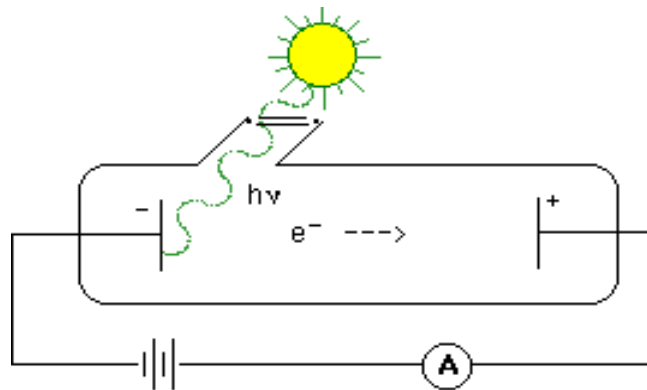
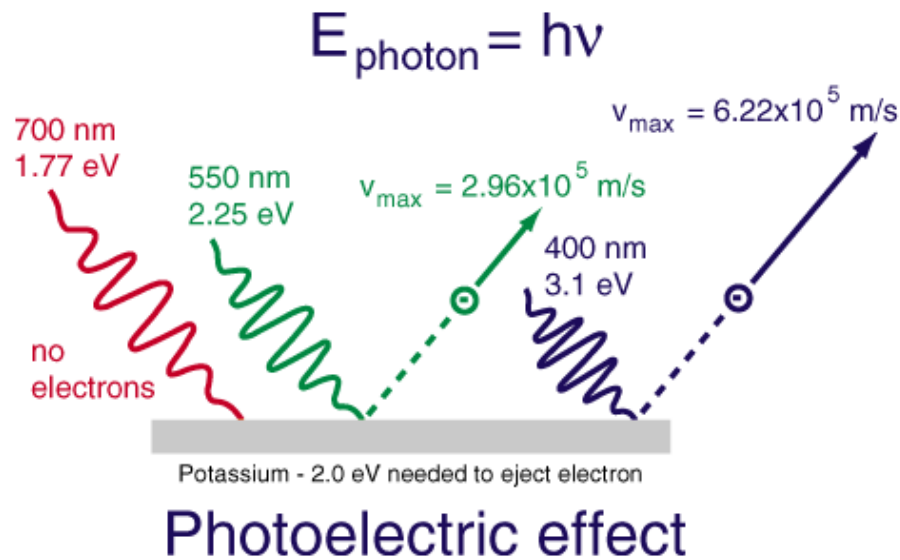
Esperimento
(energia emessa **finita**)

Planck: ipotesi dei quanti di radiazione (1900)

gli oscillatori della cavità sono in stati discreti; l'energia del corpo nero è quantizzata perché è emessa da un oggetto la cui energia è quantizzata – in ogni altra situazione l'energia deve essere considerata continua

$$E=h\nu$$

Effetto fotoelettrico



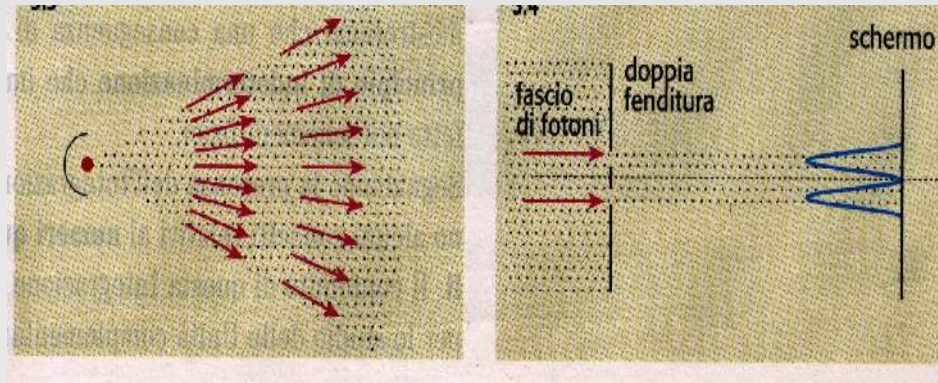
Einstein (1905)

la quantizzazione dell'energia è ipotesi generalizzabile a ogni situazione fisica

“Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce si espande partendo da un punto, l'energia non si distribuisce su volumi sempre più grandi, bensì rimane costituita da un numero finito di quanti di energia localizzati nello spazio che si muovono senza suddividersi, e che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente”

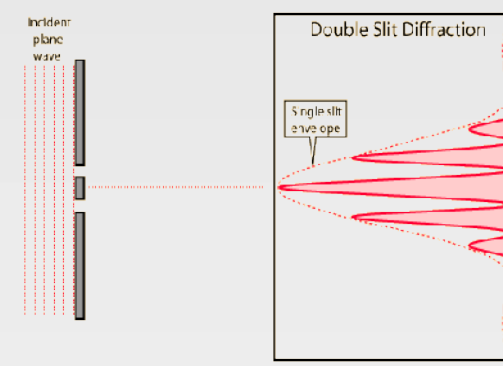
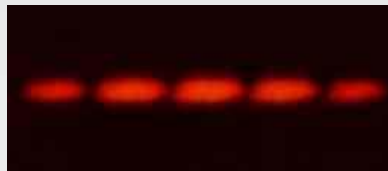
esperimento delle due fenditure

→ ora che la luce è quantizzata, **come si può ancora avere interferenza e diffrazione, fenomeni tipicamente ondulatori?**



← In teoria un fascio di particelle (“fotoni” o “quantì di luce”) dovrebbe diffrangere così...

...ma in pratica dà invece una serie di frange di interferenza:

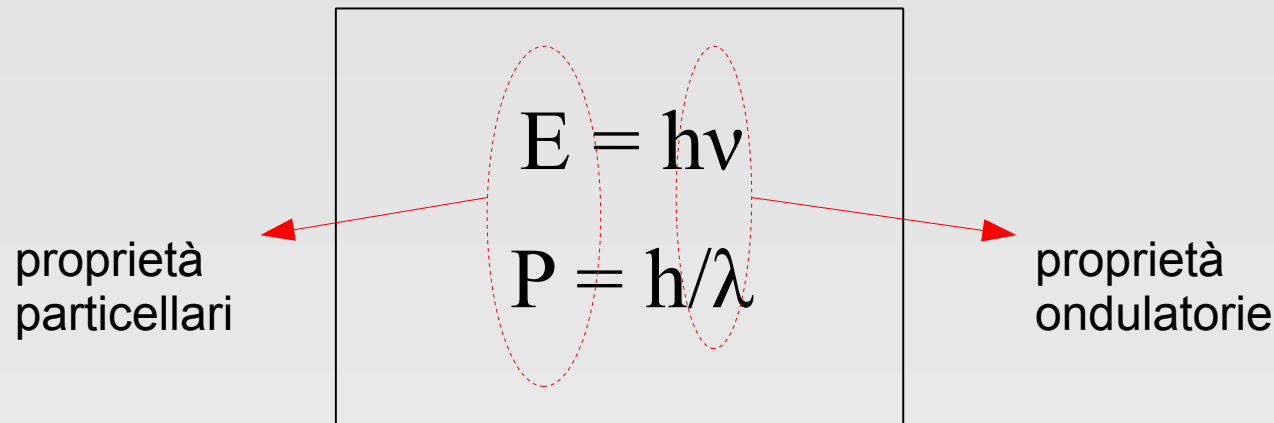


L'esperienza mostra interferenza anche quando l'intensità è molto bassa, interferenza di singolo fotone !

→ il modello corpuscolare (fotone) non è utilizzabile in questo caso!

L. Laudan: pbm *empirico* ok, ma si apre un nuovo pbm *concettuale*

→ relazioni tra onda e particella



“**dualismo/dualità** della luce”: essa può essere interpretata tanto come onda quanto come particella

diffrazione

corpo nero, eff. fotoelettrico

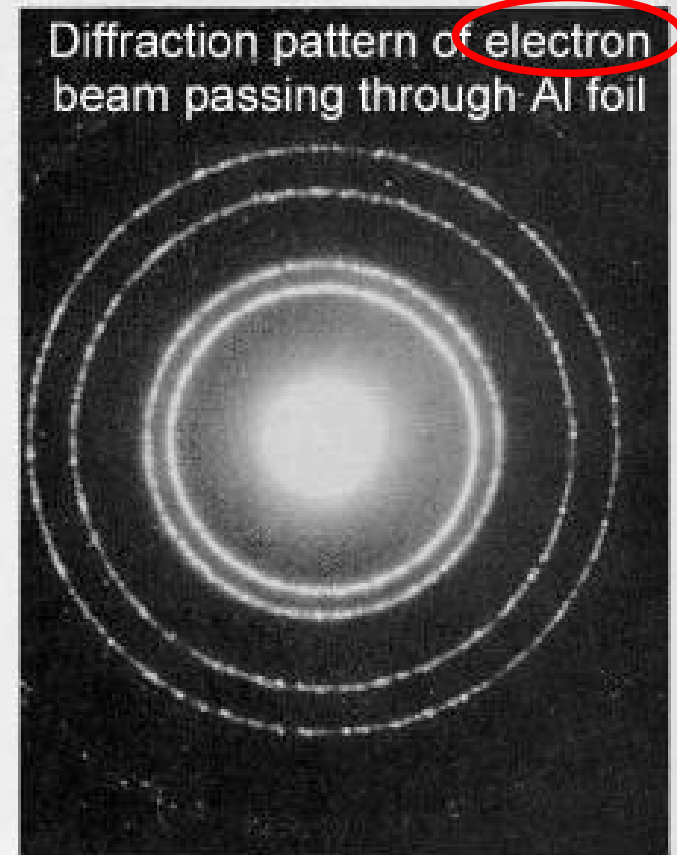
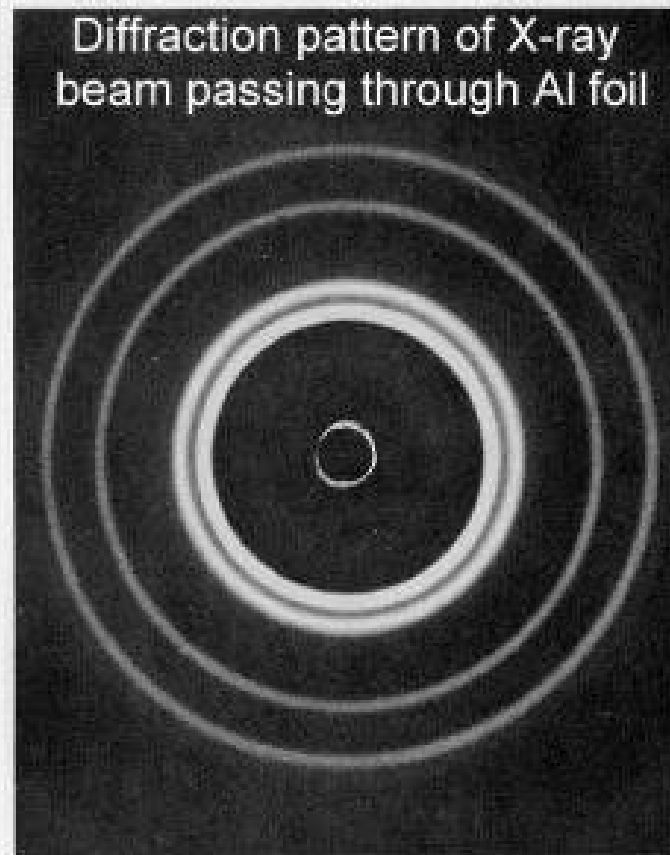
→ punto di arrivo degli “slittamenti di programma di ricerca” (Lakatos) in ottica:
da “corpuscolare”, a “ondulatorio”, a “corpuscolare e ondulatorio”?



per Louis de Broglie (1924) vale anche l'inverso:

particella $E, p \rightarrow$ onda ν, λ

Davisson-Germer e
G.P. Thomson (1927):



Importanti ricadute sulla teoria dell'atomo di Bohr (1913)

Elettrone → gli è associata un'onda



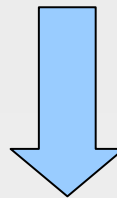
deve essere un'onda stazionaria attorno al nucleo,
ovvero, per l'orbita di raggio r :

$$2\pi r = n\lambda \quad (\text{circonf.} \leftrightarrow \text{multiplo della lung. d'onda})$$

$$= nh/p$$

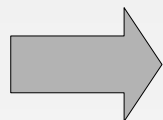
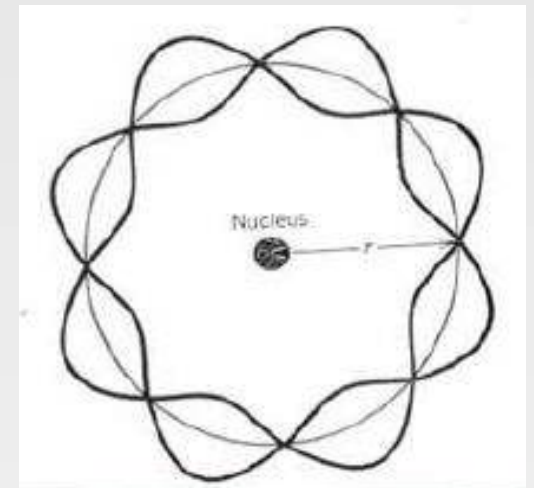
$$\rightarrow pr = nh/2\pi$$

pr è il momento angolare (mvr)



l'ipotesi ad hoc di Bohr (quantizzazione del momento angolare) è ora una conseguenza di principio più generale

atomo “classico” (Rutherford)
ma senza irraggiamento
(*ipotesi ad hoc*)



Quale equazione per quest'onda?

1925 **Meccanica delle matrici**

Heisenberg, Jordan, Born
("Scuola di Copenhagen")

Operazionista
Matem. "astratta"

Discontinuità dei processi fisici,
elettrone - particella, ma senza
proprietà spazio-temporali definite

1926 **Meccanica ondulatoria**

Schrödinger

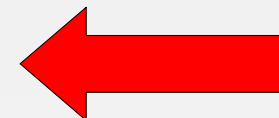
Visualizzabile
Matem. "tradizionale"

Continuità dei processi fisici,
elettrone - onda con
proprietà classiche

equivalenza matematica tra meccanica delle matrici e meccanica ondulatoria
Schrödinger 1926



1927 meccanica di
Schrödinger
ma interpretazione di
Copenhagen





Un dialogo tra Heisenberg e Einstein a proposito delle motivazioni alla base della **meccanica delle matrici**

“Non siamo in grado di osservare le orbite degli elettroni”, credo di aver risposto.

“Osserviamo invece la radiazione emessa dall'atomo, in base alla quale deduciamo le frequenze e le ampiezze degli elettroni . [...] giacché **una buona teoria deve fondarsi su grandezze direttamente osservabili**, ho ritenuto più corretto limitarmi ad esse e basarmi sull'ipotesi, poi verificata, che rappresentino le orbite degli elettroni.” (N.B.: *rappresentare* e non *spiegare*)

“Ma dice sul serio?” ribatté Einstein incredulo. “Dunque, secondo lei, una teoria deve basarsi esclusivamente su grandezze osservabili?”

N.B.: il positivismo rinnega il
“Beautiful Invisible” (Vignale)

“Ma... così ha fatto anche lei con la teoria della relatività”, dissi con una certa sorpresa. “Lei stesso ha affermato che non ha senso parlare di tempo assoluto proprio perché il tempo assoluto non è osservabile; lei stesso ha detto che solo il tempo indicato dall'orologio, misurato in un sistema sia in moto sia in quiete, ha valore per la determinazione del tempo.”

“Può essere che abbia detto una cosa del genere”, ammise Einstein. “Ma, comunque sia, non ha senso. Forse potrei esprimermi in modo meno reciso dicendo che i dati osservativi hanno un certo valore euristico; ma in linea di principio è **sbagliatissimo tentare di fondare una teoria esclusivamente su grandezze osservabili**.

Anzi, in realtà avviene esattamente il contrario: è la teoria che decide cosa dobbiamo osservare. Lei si renderà certo conto che il processo d'osservazione è cosa estremamente complessa.” (W.H., *op.cit.*)

Mach

Popper

meccanica ondulatoria - Schrödinger

$$\psi(\mathbf{r}, t)$$

- introduce l'hp di de Broglie nell'equazione delle onde classica (d'Alembert)
- risp. l' equazione d'onda classica: la soluzione ha una diversa forma e assume valori **complessi**.
- uso di strumenti matematici **tradizionali** (equazione alle derivate parziali)
- Ψ si evolve con **continuità** (non ci sono i salti) e in maniera **deterministica**
i livelli energetici sono i modi di vibrazione, il passaggio da un livello all'altro avviene con continuità: “**il cambiamento da un modo di vibrazione all'altro può avvenire in modo continuo nello spazio e nel tempo**, e può durare per un lasso di tempo pari alla durata empirica del processo di emissione”
- accolta con entusiasmo da de Broglie, e da Einstein: dà visualizzazione della microfisica
- S. mira ad una descrizione del **reale** fisico

1926, la mediazione di Born – l'interpretazione statistica di Ψ

“La forma matriciale della meccanica quantistica, fondata da Heisenberg e sviluppata da lui insieme con Jordan e l'autore di questa comunicazione, parte dall'idea che un'esatta rappresentazione dei processi nello spazio e nel tempo non sia affatto possibile e si accontenta di stabilire relazioni fra grandezze osservabili che solo al limite classico possono essere interpretate come proprietà di moti. Schrödinger, d'altra parte, sembra ascrivere alle onde, che secondo l'analogia di de Broglie egli considera come portatrici dei processi atomici, una realtà della stessa specie posseduta dalle onde di luce; egli cerca di “costruire pacchetti di onde che hanno dimensioni relativamente piccole in tutte le direzioni” e che ovviamente devono rappresentare direttamente il corpuscolo in moto. Nessuna di queste due concezioni mi sembra soddisfacente. Vorrei cercare qui di dare una terza interpretazione e dimostrarne l'utilità nei processi d'urto.” (M. Born)

$|\Psi(r)|^2$ dà la probabilità di trovare la particella in r in una misura.

→ Ψ evolve deterministicamente, ma **non è un oggetto reale (ontologia), è solo strumento** (epistemologia)

$|\Psi(r)|^2$ non è densità di carica, ma densità di probabilità.

“il moto delle particelle segue leggi di probabilità, ma la probabilità stessa evolve in accordo con la legge causale”

Scuola di **C**openhagen

N. Bohr

W. Heisenberg

W. Pauli

J. Von Neumann

Acausalità ontologica

MQ è completa

Limiti del linguaggio/comprendibilità

Fisica è invenzione

Strumentalismo

Scuola di **B**erlino

M. Planck

A. Einstein

L. De Broglie

E. Schrödinger

Acausalità gnoseologica

MQ è incompleta

Variabili nascoste

Fisica è scoperta

Realismo

→ **1927 Conferenza Solvay, Bruxelles**
(poco prima: conferenza a Como, ma senza
Einstein (obiettore politico))

Si sfidano sull'interpretazione
della MQ





- Influenze: - padre fisiologo che reagendo *"contro il materialismo meccanicistico dell'inizio del secolo si batté vigorosamente a favore del punto di vista teleologico nello studio della fisiologia"* (Rosenfeld) - Kierkegaard (esistenzialista) – William James (pragmatista)
- CAUSALITA': la teoria quantistica deve contenere *"...una **rinuncia alla coordinazione causale** nello spazio e nel tempo dei processi atomici"*

*"La interazione finita tra oggetto e strumenti di misura condizionata dall'esistenza stessa del quanto d'azione implica, a causa dell'impossibilità di controllare la reazione dell'oggetto sugli strumenti di misura, la **necessità di una rinuncia definitiva all'ideale classico della causalità ed una revisione radicale del nostro atteggiamento verso il problema della realtà fisica**"*

- COMPRENSIBILITA':

*"...un'inevitabile **rinuncia** alla descrizione spazio-temporale nell'interpretazione delle osservazioni"*

"E' sbagliato pensare che lo scopo della fisica sia di scoprire come è fatta la natura. La fisica riguarda quello che noi possiamo dire circa la natura."

- Spazio-tempo-energia-impulso-causalità-onda-corpuscolo:

sono solo dei **pregiudizi classici, concetti utili ma non veri.**

- REALTA': è parola da evitare! Egli favorisce *"l'uso della parola 'fenomeno' esclusivamente per riferirsi alle **osservazioni** ottenute sotto circostanze specificate, inclusa una descrizione dell'intero apparato sperimentale."*



N. Bohr

Il principio di complementarità (N. Bohr, 1927 ca.)



→ onde/corpuscoli: non in contraddizione, ma **complementari**,
entrambi **necessari** per descrizione completa, ma **si escludono** a vicenda.

→ Qualunque sistema quantistico possiede almeno **una coppia di proprietà necessarie a descrivere il sistema, che non possono essere conosciute simultaneamente**. Sono **mutuamente esclusive**, nel senso che l'osservazione di una proprietà preclude l'osservazione dell'altra

*“Il quanto d'azione ci costringe ad adottare un nuovo modo di descrizione designato come complementare, nel senso che **ogni applicazione di concetti classici preclude l'uso simultaneo di altri concetti classici** che in una diversa connessione sono ugualmente **necessari** per la spiegazione del fenomeno”* (Bohr)

“Nur die Fülle führt zur Klarheit - Und im Abgrund liegt die Wahrheit” (F. Schiller)

(solo la completezza porta alla chiarezza e la verità abita nell'abisso)



- CAUSALITA' :

"... una differenza fondamentale nel nostro modo di concepire la natura..."

*"Nel nostro atteggiamento scientifico siamo agli antipodi. Tu credi nel **Dio che gioca a dadi**, ed io in leggi rigorose, in un mondo di qualcosa che esiste oggettivamente e che cerco di afferrare in modo fortemente speculativo" (Einstein a Born)*

- COMPRENSIBILITA' – pessimista!

*"Siamo alla fine del nostro viaggio nella profondità della materia. Abbiamo cercato terreni fermi e non ne abbiamo trovati. **Più profondamente penetriamo, più irrequieto diventa l'universo e più vago e più nebbioso.**"*



M. Born

- REALTA':

"Alla luce della teoria quantistica queste particelle elementari non sono reali nello stesso senso degli oggetti della vita quotidiana, alberi o pietre, ma appaiono come astrazioni derivate dal materiale reale delle osservazioni."

*"l'atomo non è per sua natura una formazione materiale nello spazio e nel tempo, ma in un certo modo **solo un simbolo**, adottando il quale le leggi naturali assumono una forma particolarmente semplice."*

*"...tutti gli oppositori dell'interpretazione di Copenaghen concordano in un punto. Sarebbe desiderabile, **secondo loro, ritornare al concetto di realtà** della fisica classica o, per usare un termine filosofico generale, all'ontologia del materialismo. Essi preferirebbero ritornare all'idea di un mondo reale oggettivo le cui particelle minime esistono oggettivamente nello stesso senso in cui esistono pietre e alberi, indipendentemente dal fatto che noi le osserviamo o no."*

- COMPRENSIBILITA':

"Quasi ogni progresso nella scienza è stato pagato con un sacrificio, per quasi ogni nuova realizzazione intellettuale si è dovuto rinunciare a posizioni e concezioni precedenti. Perciò, in un certo modo, l'aumento della conoscenza e dell'intuizione diminuisce continuamente la pretesa dello scienziato di 'comprendere' la natura."



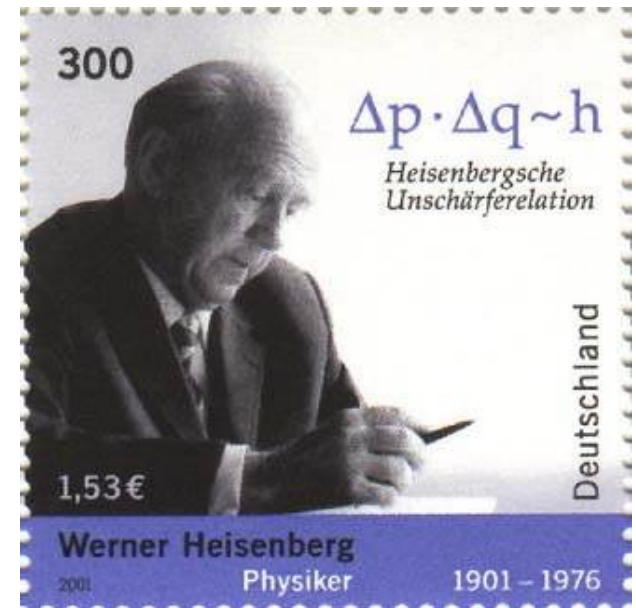
W. Heisenberg

- CAUSALITA':

"In conclusione si potrebbe trattare quantitativamente la catena di cause ed effetti solo allora che si considerasse come parte del sistema l'universo intero; ma allora la fisica sparirebbe e rimarrebbe soltanto uno schema matematico. La suddivisione del mondo in sistema osservatore e sistema osservato impedisce così la netta formulazione della legge causale."

- **COMPREENSIBILITA'**: si oppone al principio di complementarità, ma per ragioni opposte a quelle di Einstein etc. : occorre evitare qualsiasi riferimento ad una realtà obiettiva.

*La complementarità porta ad un linguaggio utile a descrivere il mondo atomico "ma non è un linguaggio preciso in cui potrebbero adoperarsi i normali modelli logici; è un linguaggio che produce delle **raffigurazioni nella nostra mente** ma insieme ad esse la nozione che quelle raffigurazioni **hanno solo una vaga connessione con la realtà**."*



W. Heisenberg

- **COMPREENSIBILITA':**

"Spero di essere riuscito a dare un'idea della forza di sintesi dell'idea di complementarità, che attraverso limitazioni di principio del campo di applicabilità di rappresentazioni opposte, garantisce la 'libertà da contraddizioni' del sistema pensiero che ne fa uso".

- **CAUSALITA':**

*"...esistenza di **probabilità primarie** nelle leggi della natura, che non si possono ricondurre tramite l'ausilio di opportune ipotesi a leggi deterministiche, come invece, per esempio, si può fare con le probabilità termodinamiche della fisica classica. Questo sviluppo rivoluzionario è **considerato definitivo** dalla grande maggioranza dei fisici teorici moderni, primi fra tutti Born, Heisenberg e Bohr, ai quali mi unisco anch'io."*

- **REALTA':**

*"...la concezione di oggetto materiale, o in generale fisico, come **un oggetto la cui costituzione e natura è indipendente dal modo con cui esso viene osservato**. Abbiamo visto che la fisica moderna, costretta dai fatti, ha dovuto rinunciare a questa **astrazione**, che risulta troppo ristretta."*



W. Pauli



M. Planck

- CAUSALITA':

*"...il disagio è notevolmente cresciuto quando, come abbiamo visto, si è introdotto il concetto di probabilità nell'interpretazione delle equazioni della meccanica quantistica, giacché in tale modo si ha l'aria di **volere abbandonare l'esigenza di una rigida causalità** a favore di un certo indeterminismo. Ci sono infatti dei fisici eminenti che, cedendo alle circostanze, **tendono a sacrificare il principio della rigida causalità nell'immagine fisica del mondo**. Se questo passo dovesse risultare necessario, la meta a cui devono tendere le ricerche fisiche verrebbe spostata alquanto più indietro, e ciò sarebbe **un gravissimo inconveniente**."*

*"Indubbiamente **la legge causale non è né dimostrabile né confutabile** per via logica, non è quindi né vera né falsa: ma è un principio euristico, una guida, **la guida più preziosa** che noi possediamo se vogliamo orientarci nel groviglio degli eventi e conoscere la direzione in cui deve procedere la ricerca scientifica [...] Come la legge causale afferra subito la fresca anima del bambino e gli pone in bocca l'instancabile domanda 'perché', così essa accompagna lo scienziato per tutta la vita e gli pone incessantemente nuovi problemi."*



M. Planck

- CONOSCIBILITA':

*"La fisica formerebbe un'eccezione fra tutte le scienze se anche in essa non si confermasse la legge che **i risultati più preziosi e di maggiore portata sono ottenibili soltanto se ci si propone la meta**, irraggiungibile in linea di principio, di pervenire alla conoscenza del **mondo reale**."*

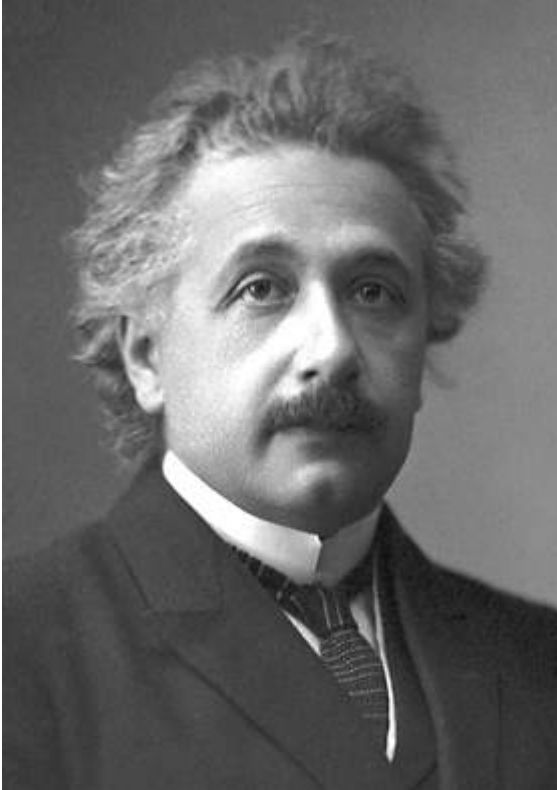
- REALTA' OGGETTIVA: " [...] ci costringono ad ammettere, dietro il mondo sensibile, un **mondo reale che esiste di per sé indipendentemente dall'uomo**, un mondo che non possiamo percepire direttamente ma esclusivamente attraverso il mondo dei sensi..."

"Il fondamento e la condizione preliminare di ogni scienza veramente fertile è l'ipotesi metafisica, certo non giustificabile per via puramente logica, ma che la logica non potrà mai nemmeno controbattere, dell'esistenza di un mondo esterno completamente indipendente da noi, per quanto noi non possiamo averne conoscenza diretta che attraverso i nostri sensi."



P. Ehrenfest

*"Negli ultimi anni questa situazione è stata aggravata dagli sviluppi stranamente turbolenti della fisica teorica. **Imparare ed insegnare cose che non si possono interamente accettare nel fondo del proprio cuore** è sempre una faccenda difficile, doppiamente difficile per una **mente di onestà fanatica**, una mente per la quale la chiarezza significa tutto... Non so quanti lettori di queste righe saranno capaci di comprendere pienamente questa tragedia. E tuttavia è stato questo che ha generato la sua fuga dalla vita."* (Einstein)



A. Einstein

- **COMPREENSIBILITA':**

*"...ho l'impressione di avere fedelmente proseguito sulla via che Einstein ci aveva indicato nei suoi giorni migliori, mentre egli stesso si era fermato ad un certo punto. Questo punto è **l'idea che il mondo esterno, come esso è realmente, venga fedelmente ed esattamente descritto dalla scienza.** Vista sotto questa angolatura la teoria della materia odierna è davvero un pasticcio di assurdità, ed Einstein dal suo punto di vista aveva del tutto ragione a rifiutarla o, al massimo, ad accettarla solo come provvisoria." (Born)*

*"Riconosco che nell'impostazione statistica – di cui tu per primo hai chiaramente affermato la necessità nel quadro del formalismo esistente- vi è un notevole contenuto di verità. Ma non posso credere seriamente in essa, perché la teoria che ne deriva è incompatibile col principio che **la fisica debba essere la rappresentazione di una realtà nel tempo e nello spazio, senza fantomatici effetti a distanza**"*

- **REALTA' OGGETTIVA:**

*"C'è qualcosa come lo '**stato reale**' di un sistema fisico, che **esiste oggettivamente, indipendentemente da ogni osservazione o misura**, e che può in linea di principio essere descritto usando i metodi di espressione della fisica."*

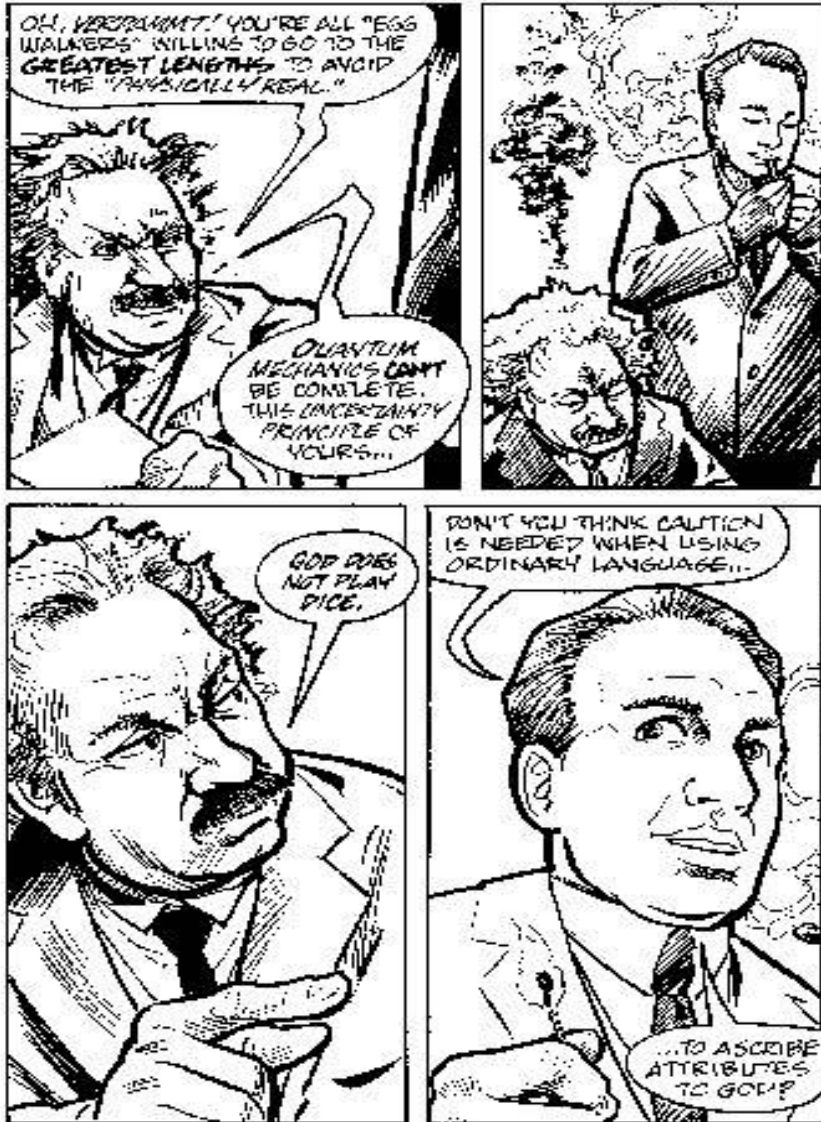
B

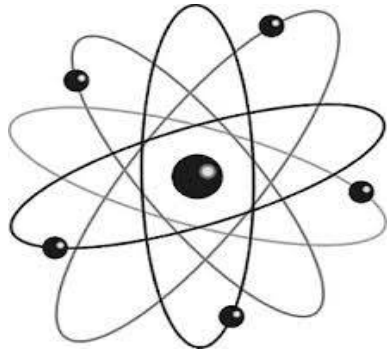
- CAUSALITA':

*"Nemmeno il grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che **alla base di tutto vi sia la causalità**, anche se so bene che i colleghi più giovani considerano quest'atteggiamento come un effetto di sclerosi. Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto."*

*"Le idee di Bohr sulla radiazione mi interessano molto, ma **non vorrei lasciarmi indurre ad abbandonare la causalità rigorosa senza avere prima lottato in modo assai diverso da come si è fatto finora.**"*

"Gott spielt mit der Welt nicht Würfel"





Realismo locale **oggettività e separabilità**



*"Se ci si chiede, indipendentemente dalla MQ, che cosa sia caratteristico del mondo delle idee della fisica, si è prima di tutto colpiti dal punto seguente: i concetti della fisica si collegano a un **mondo esterno reale**, cioè vengono stabilite idee relative a cose come i corpi, i campi, ecc., che esigono una 'esistenza reale' che sia **indipendente dal soggetto** e dalle sue percezioni... E' inoltre caratteristico di questi oggetti fisici che vengono pensati come disposti in un **continuo spazio-temporale**. Un aspetto essenziale di questa disposizione delle cose in fisica è che a un certo momento esse possono affermare la loro **esistenza indipendente** l'una dalle altre, purché questi oggetti siano situati in parti diverse dello spazio. Se non si fa questo tipo di ipotesi circa l'indipendente esistenza degli oggetti che sono lontani l'uno dall'altro nello spazio... il pensiero fisico nel senso familiare diventa impossibile... La seguente idea caratterizza l'indipendenza relativa di oggetti lontani nello spazio (A e B): un'influenza esterna su A non ha influenza diretta su B; ... **Se questo assioma dovesse essere abolito... la formulazione di leggi che possano essere controllate empiricamente nel senso accettato diventerebbe impossibile.**" (Einstein)*



E. Schroedinger

- Onde REALI dal comportamento COMPRENSIBILE e CAUSALE.
- strenuo difensore della COMPRENSIBILITA':

"[sostengo] l'ipotesi che il dispiegarsi della Natura può essere capito...[questo] è il punto di vista antispiritistico, antisuperstizioso, antimagico."

*"Una scuola di pensiero largamente accettata afferma che una **immagine oggettiva della realtà**, in qualunque significato tradizionale del termine, non può affatto esistere. Solo gli ottimisti tra di noi (ed io mi considero uno di loro) considerano questa opinione una stravaganza filosofica nata dalla disperazione di fronte ad una grave crisi."*

*La MQ non può essere corretta, poiché nata dalla tendenza "ad abbandonare la **connessione della descrizione** (di ciò che è osservabile) con un'ipotesi definita circa la struttura reale dell'universo."*

- CAUSALITA' – posizione più sfumata, ma nel suo lavoro la adotta: onde elettroniche che obbediscono a leggi deterministiche.

- SEPARABILITA':

*"[...] l'abbattimento della barriera tra osservatore e cose osservate", che molti considerano una rivoluzione di pensiero ancor più decisiva; ma io **non vi vedo che un aspetto provvisorio**, che è stato molto esagerato e che è privo di significato profondo"*



L. de Broglie

*"Un altro pericolo che minaccia ininterrottamente la fisica teorica e che rischia spesso di introdurre delle oscurità o degli errori è l'uso di parole il cui significato può essere inteso in modi diversi. Citerò come esempio la parola "incertezza" così usata in fisica quantistica dal giorno in cui Heisenberg enunciò le sue famose "relazioni di incertezza". Cosa significa esattamente l'affermazione che la posizione di una particella in un'onda che riempie una regione estesa di spazio è incerta? Significa che **la particella ha in ogni istante una posizione in questa regione di spazio, ma che noi ignoriamo questa posizione e forse anche che ci è impossibile determinarla?** Oppure significa che la posizione della particella in tutta l'estensione di questa regione è **realmente indeterminata**, e che essa vi è in qualche modo 'onnipresente'? Tutte le riflessioni che ho compiuto su questo problema negli ultimi anni mi hanno portato a pensare che **la prima interpretazione è molto chiara e del tutto naturale**, mentre è ben difficile dare alla seconda un significato veramente soddisfacente. **Da parte mia penso che una grandezza fisica ha sempre in realtà un valore ben determinato.** Il fatto che il valore di una grandezza sia ignoto (o persino che siamo nell'impossibilità pratica di determinarlo) non implica in alcun modo che questo valore sia indeterminato."*



L. de Broglie

- **COMPENSIBILITA':**

"L'essenziale, quando si studia un fenomeno fisico, è di rappresentarsi la realtà fisica che esso traduce, nel quadro dello spazio e del tempo, e di cercare di comprenderla."

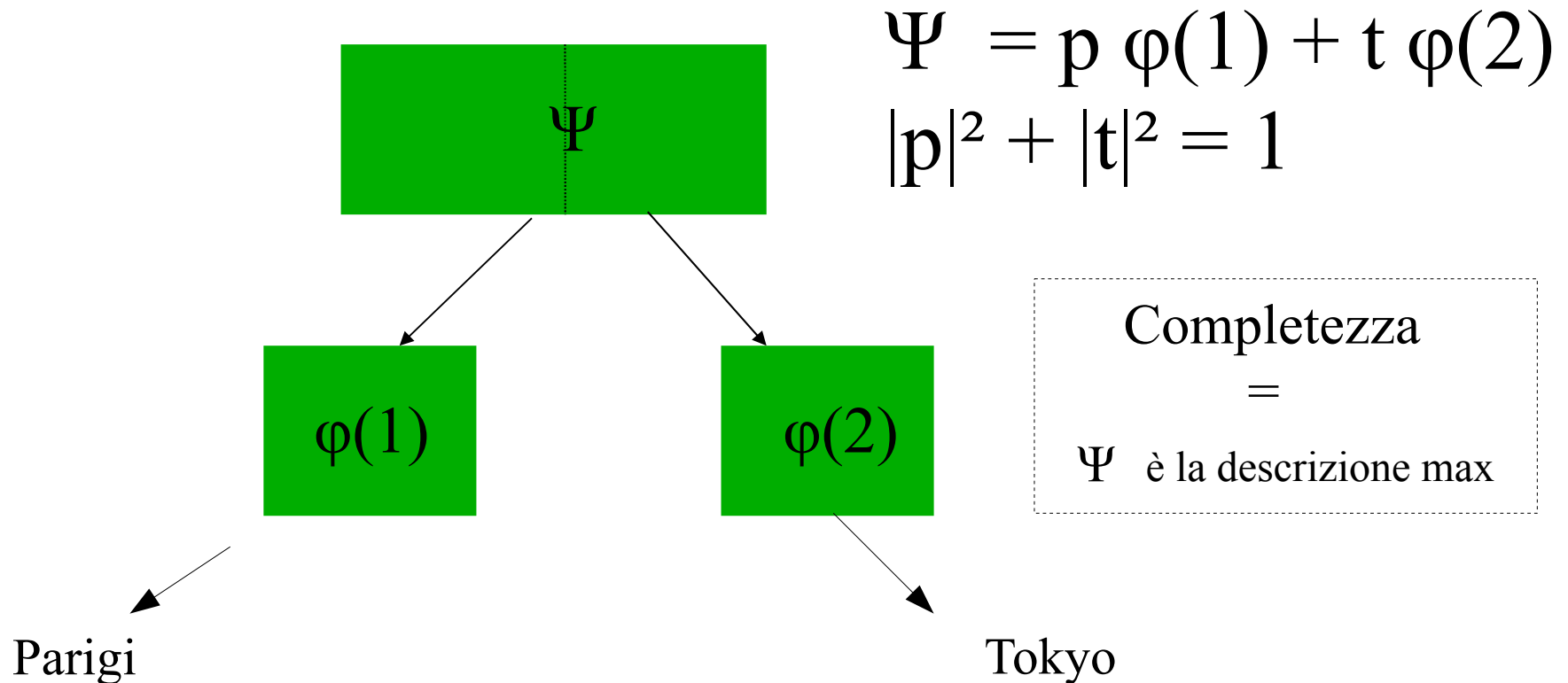
"Avendo una concezione molto 'realista' della natura del mondo fisico e poco portata a considerazioni puramente astratte, volevo rappresentarmi l'unione dell'onde e delle particelle in maniera concreta, la particella essendo un piccolo oggetto localizzato incorporato nella struttura di un'onda in propagazione"

- **CAUSALITA':**

"Senza arrivare ad affermare in modo assoluto che il determinismo è universale, penso che la ricerca della causalità che collega i fenomeni fisici successivi è sempre stata ed ancora rimane la guida più sicura nella ricerca scientifica."

paradossi della completezza

- Completezza della MQ significa che nella realtà materiale non esista nulla che non sia già contenuto nel formalismo dell'attuale teoria.
- Es.: conoscenza completa di un elettrone è la sua Ψ
- **Le due scatole di de Broglie:**



- **Completezza** → rifiuto di affermazioni realistiche del tipo "*l'elettrone si trova in realtà o a Parigi o a Tokyo*" (implica una localizzazione spaziale che non è data, che manca, in Ψ)
- misura a Parigi → certezza a Tokyo.

se si mantiene la completezza bisogna ammettere una delle due alternative:

- la misura di Parigi distrugge "mezzo elettrone" a Tokyo, cioè **c'è azione a distanza e si accetta l'idea che la natura non osservata sia diversa da quella osservata**
 - si rifiuta di parlare di un elettrone non osservato come di qualcosa che esiste nello spazio e nel tempo
- per **de Broglie**: l'elettrone è già a Parigi, solo che la MQ è incompleta, cioè la MQ non fornisce il massimo dell'informazione.

Gatto di Schrödinger (1935)

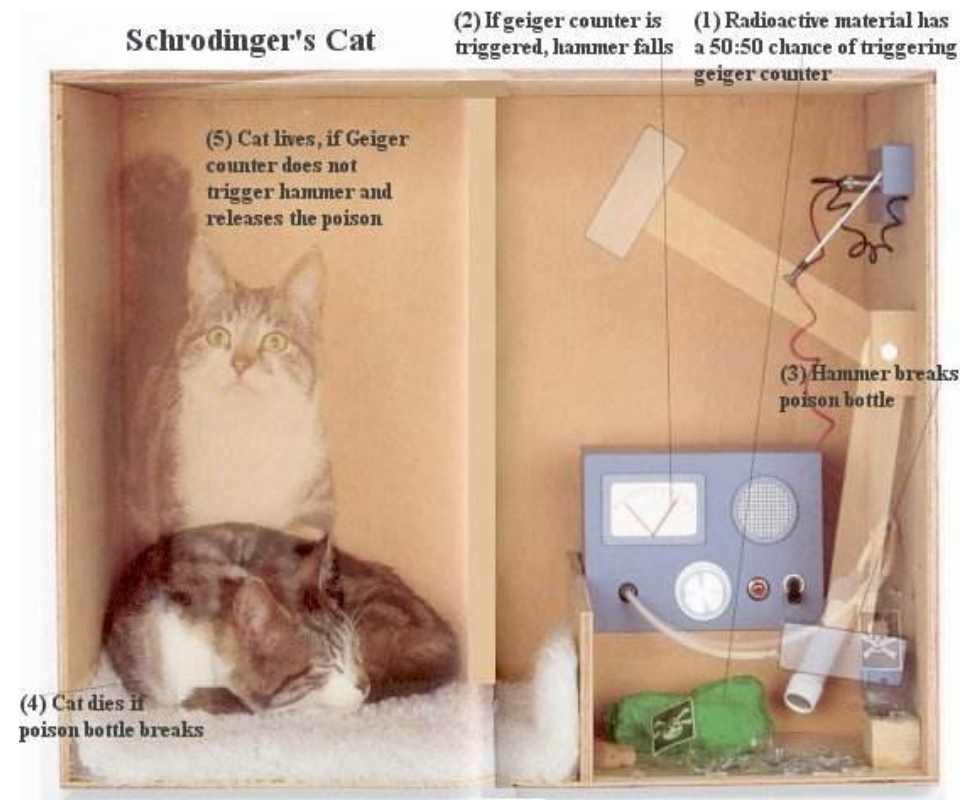
Altro paradosso della completezza:

la realtà che i nostri sensi di misura ci fanno percepire (fatta di gatti o vivi o morti) è profondamente diversa dalla realtà non osservata, in cui gatti in parte vivi e in parte morti possono sussistere.

Ulteriore complicazione:

l'"amico di Wigner" (nella scatola, protetto, osserva il gatto)

→ si ammette l'incompletezza della MQ solo rispetto al "mondo spirituale", della coscienza umana.



Teorema di von Neumann - Disuguaglianza di Bell

Von Neumann: teorema dell' "impossibilità di completare la MQ" (1932)



(non esistono misure senza dispersione → impossibile introdurre la causalità)

[postulati restrittivi, molto tecnico, però grande autorevolezza]

Kuhn...

Il **realismo locale** – filosofia – contiene delle predizioni empiriche:

$$-2 \leq B \leq 2 \quad (1965)$$

[B funzione di correlazione tra grandezze dicotomiche]

→ il risultato però : per sistemi quantistici, B viola la disuguaglianza

→ o vale il **realismo locale** (variabili nascoste, ma anche **fisica classica...**)

o vale la **meccanica quantistica (secondo Copenhagen)**



la Fisica è nata come costola dello "sperimentabile" dalla Filosofia...

→ ...vi ritorna con la Meccanica Quantistica

*"All'interrogativo 'che cos'è la materia?' non si può rispondere con semplici esperimenti fisici, ma occorre procedere a un'analisi filosofica della fisica: esso è condizionato dal quesito '**che cos'è la conoscenza?**' La filosofia che diede vita all'atomismo venne sostituita nel diciannovesimo secolo dall'analisi sperimentale, finché questa non raggiunge una **complessità tale da rendere nuovamente necessario il ricorso all'indagine filosofica.**"*

(Reichenbach)

*"I buoni libri che conosco non si preoccupano molto della precisione fisica. Ciò è chiaro già dal loro vocabolario. **Ecco alcune parole che, benché legittime e necessarie per l'applicazione, non hanno spazio in una formulazione che abbia qualche pretesa di precisione fisica: sistema, apparato, ambiente, microscopico, macroscopico, reversibile, irreversibile, osservabile, informazione, misurazione.** In questa lista di cattive parole da buoni libri, la peggiore di tutte è misurazione"*

(Bell)