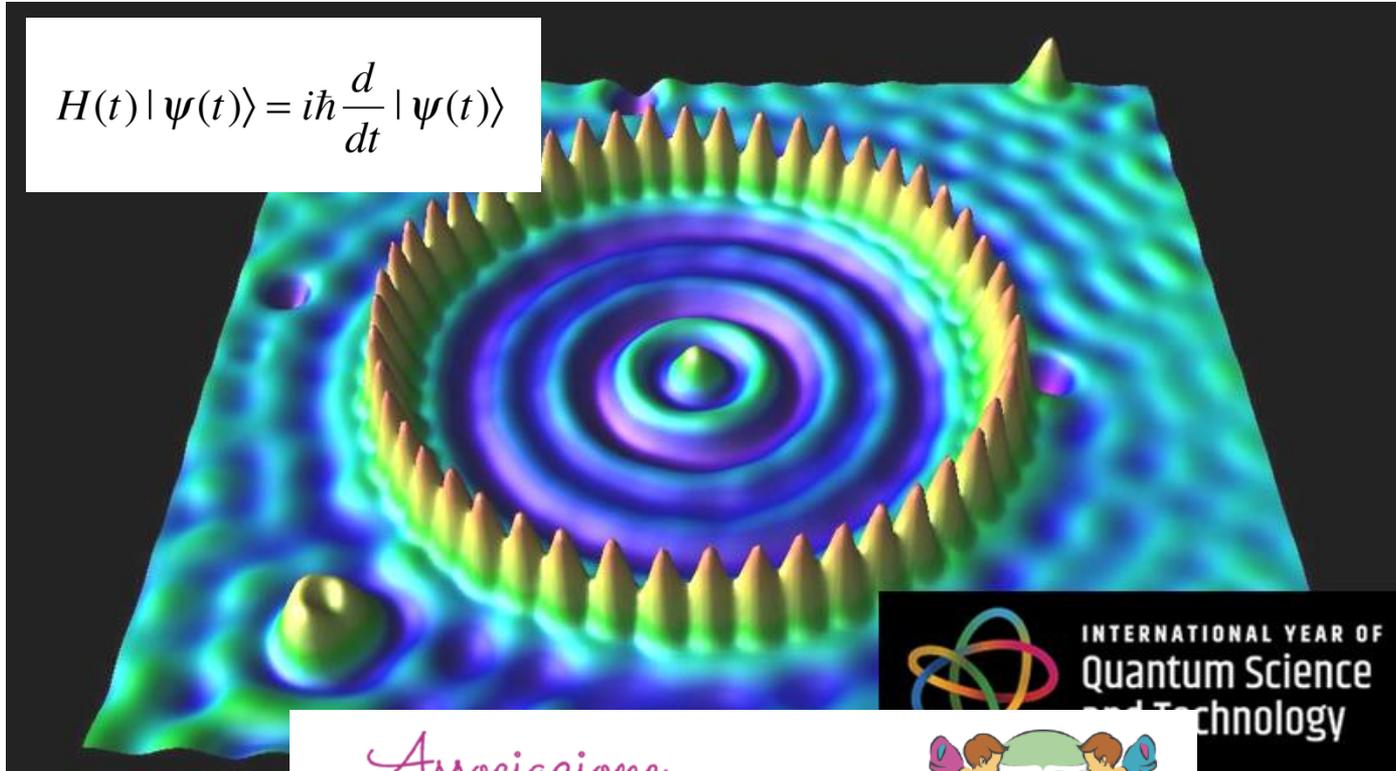


La Meccanica Quantistica

$$H(t)|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$



Associazione
**UNIVERSITA'
DEL TEMPO LIBERO
DI CARAVAGGIO** *aps*



G. Battistoni
INFN Milano

La fisica alla fine del 1800

1. **La Meccanica** di Newton e Lagrange: ritenute di portata universale e assolutamente valide per la descrizione di tutti i corpi estesi (in realtà la portata universale era già stata messa in po' in discussione dai lavori di Fourier sulla propagazione del calore...)
2. **La Termodinamica**: strumento irrinunciabile per lo studio dei “grandi problemi”. Dalla termodinamica e dall'analisi dell'irreversibilità nasce la **Meccanica Statistica**. I successi delle leggi di distribuzione di Boltzmann e Maxwell supportano in modo decisivo l'ipotesi atomica.
3. **Le Equazioni di Maxwell**: sintesi di tutto ciò che si conosce sull'elettromagnetismo.

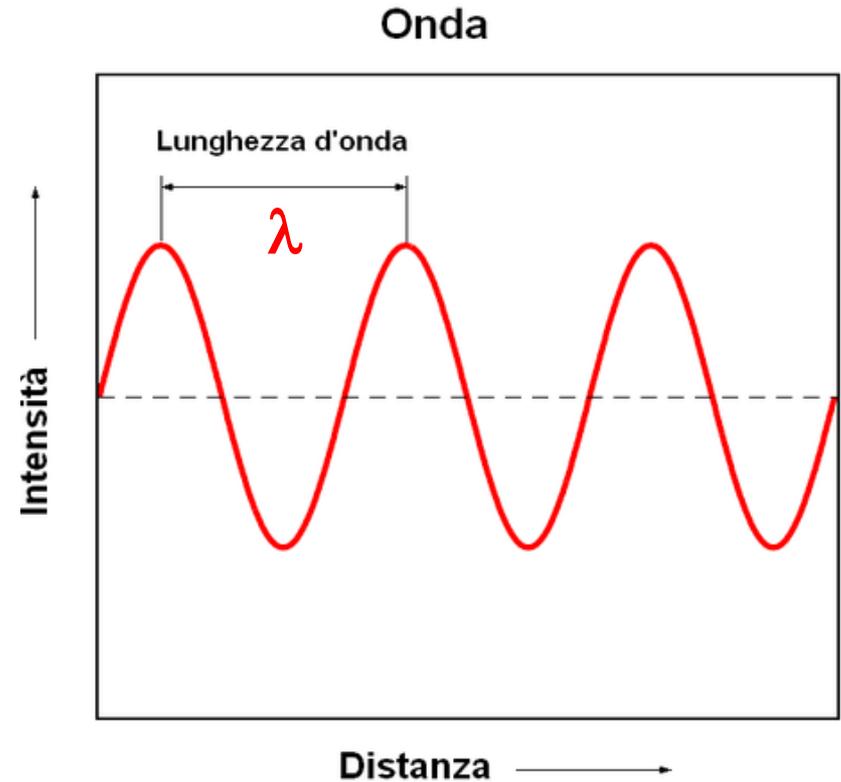
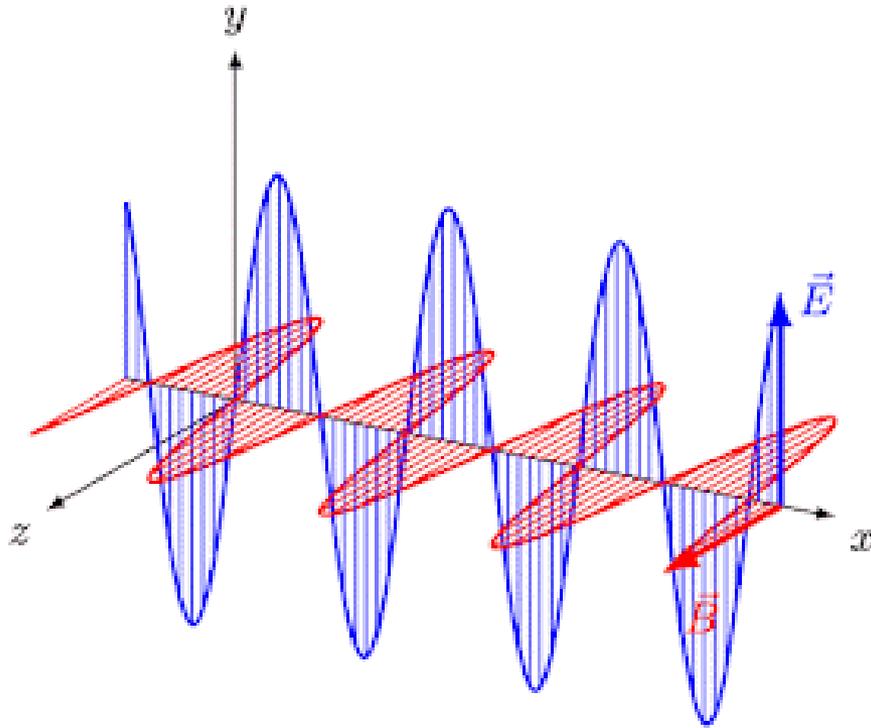
Le equazioni di Maxwell

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$



Da esse scaturisce che la luce è **radiazione elettromagnetica**
Fenomeno ondulatorio a tutti gli effetti

La propagazione della luce e le onde



- velocità di propagazione: **c** (~ 300000 km/s per la luce nel vuoto)
299792.46

- frequenza: **$f = c/\lambda$**

(numero di cicli al secondo che passano per un punto prefissato, spesso indicata anche con il simbolo **v**)

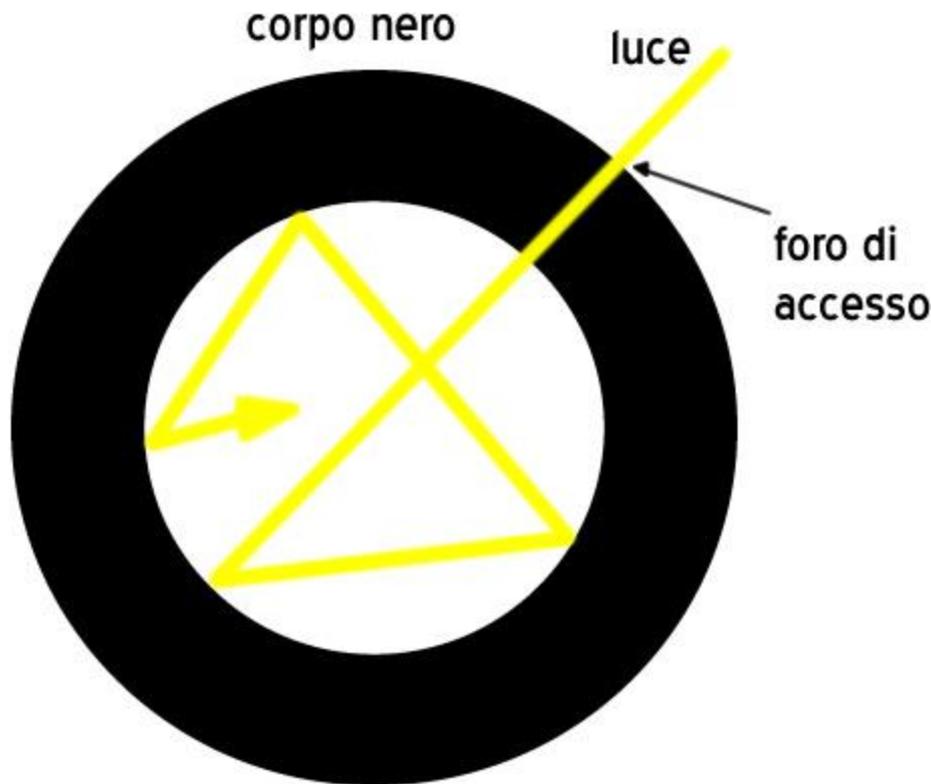
→ Per una data velocità di propagazione, frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali

Il calore e la luce

- Anche il calore si propaga per radiazione. Radiazione termica e luminosa sono lo stesso fenomeno.
- Nel 1859 G.R. Kirchhoff scopre che il potere emissivo (o assorbente di un corpo) dipende soltanto dalla frequenza della radiazione e della sua temperatura, e non dalla sua sostanza (composizione chimica ecc.)

Il “corpo nero”

L'idealizzazione di un corpo di riferimento per l'assorbimento di luce e l'emissione di calore: il più nero del nero...



La radiazione rimane intrappolata

Ma l'energia deve conservarsi!

→ Quindi il corpo nero la restituisce irradiando

La termodinamica applicata all'irraggiamento del corpo nero

La termodinamica applicata a questi fenomeni conduce a leggi quantitative in accordo con le osservazioni sperimentali:

Quantità di energia irradiate per unità di tempo e di superficie


$$W(T) \propto T^4$$

Legge di Stefan-Boltzmann

Massima lunghezza d'onda irradiata

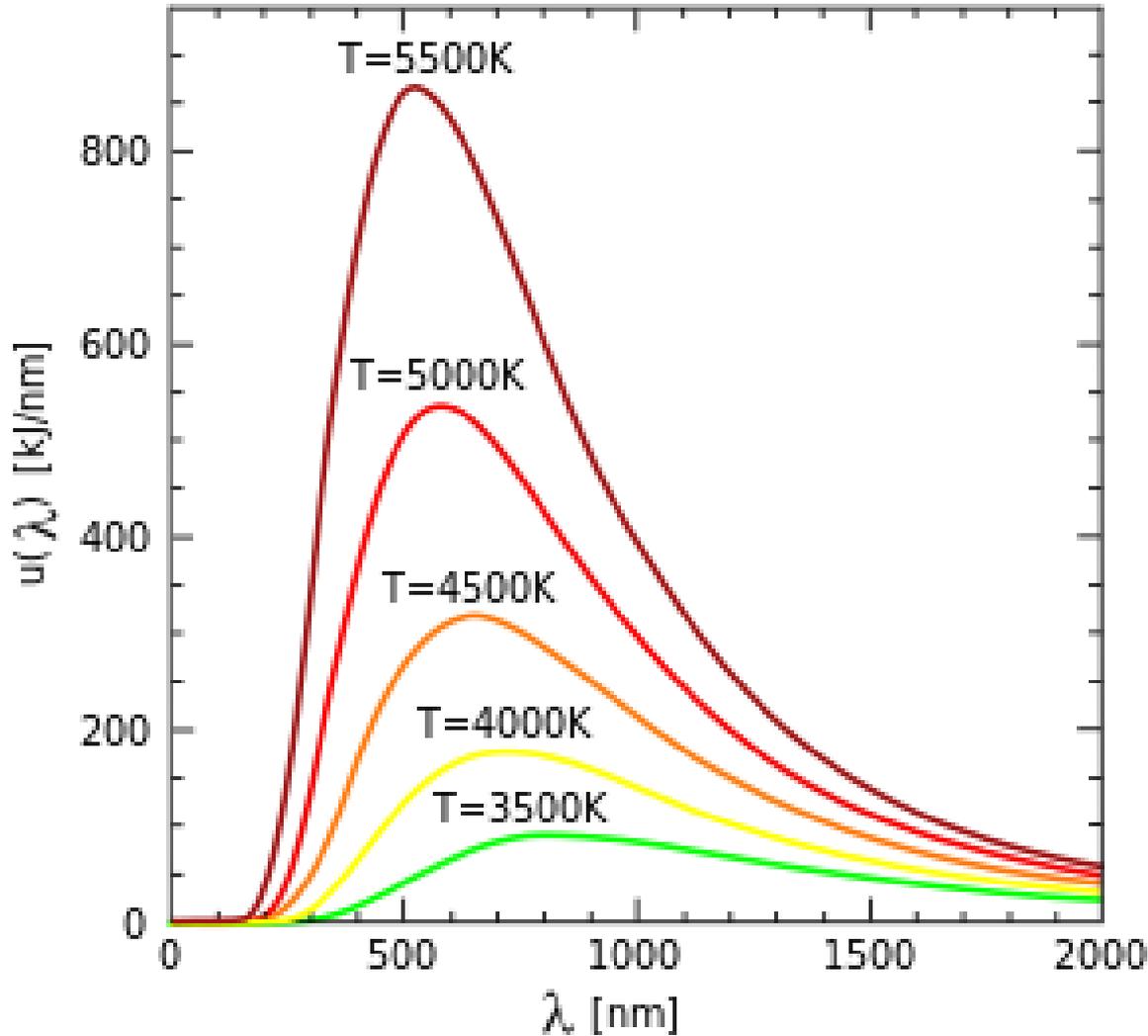

$$\lambda_{\max} T = \text{costante}$$

Legge di Wien
(detta anche legge dello
«spostamento»)



Maggiore è la temperature, minore è la lunghezza d'onda
della radiazione emessa

L'irraggiamento di un corpo nero



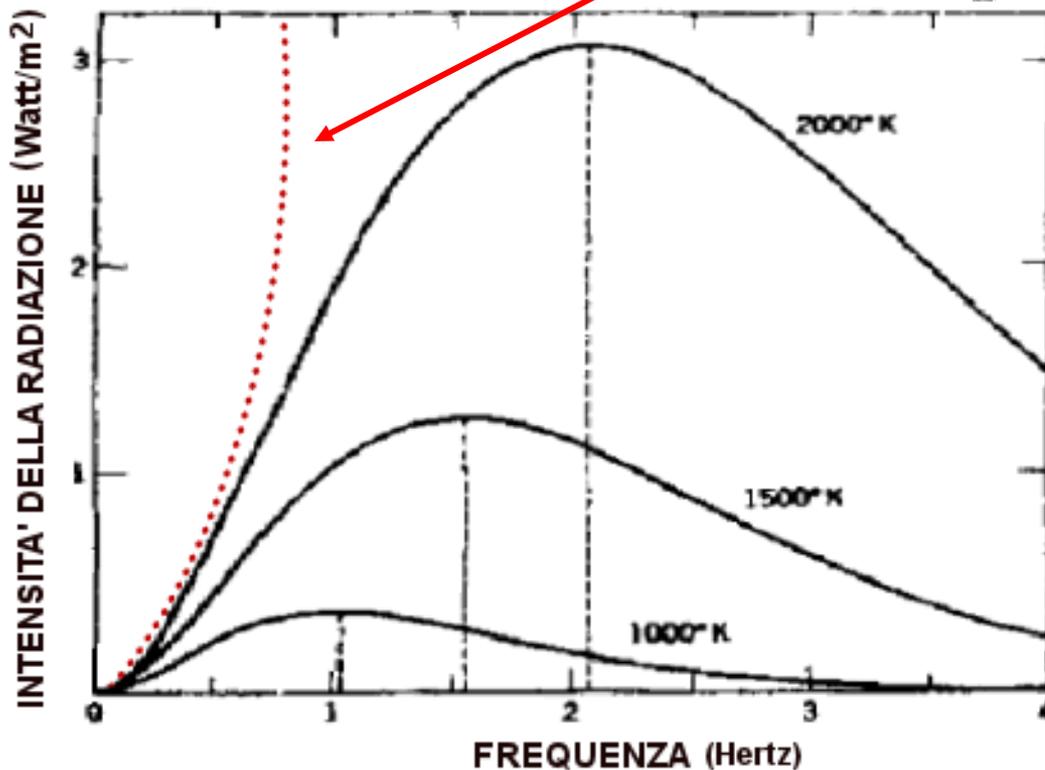
I corpi reali irraggiano con caratteristiche che approssimano più o meno bene, a seconda delle circostanze, quelle del corpo nero.

Il primo fallimento importante della fisica classica: la legge di Rayleigh-Jeans

Il tentativo di ottenere dalla termodinamica classica lo spettro di irraggiamento del corpo nero.

Risultato:

$$R(\nu, T) = \frac{8\pi K_B T}{c^3} \nu^2$$



L'intensità della radiazione emessa cresce con il quadrato della frequenza fino a diventare infinita!!!!

La
«Catastrofe
Ultravioletta»

La soluzione di Max Planck



Il 14 Dicembre 1900 alla riunione della Società di Fisica Tedesca dimostrò come si poteva risolvere il problema: rinunciare alla continuità dell'energia.

L'energia raggiante, come la materia, doveva avere una natura «atomica», cioè poteva essere emessa e assorbita solo in modo discontinuo, a «pacchetti»

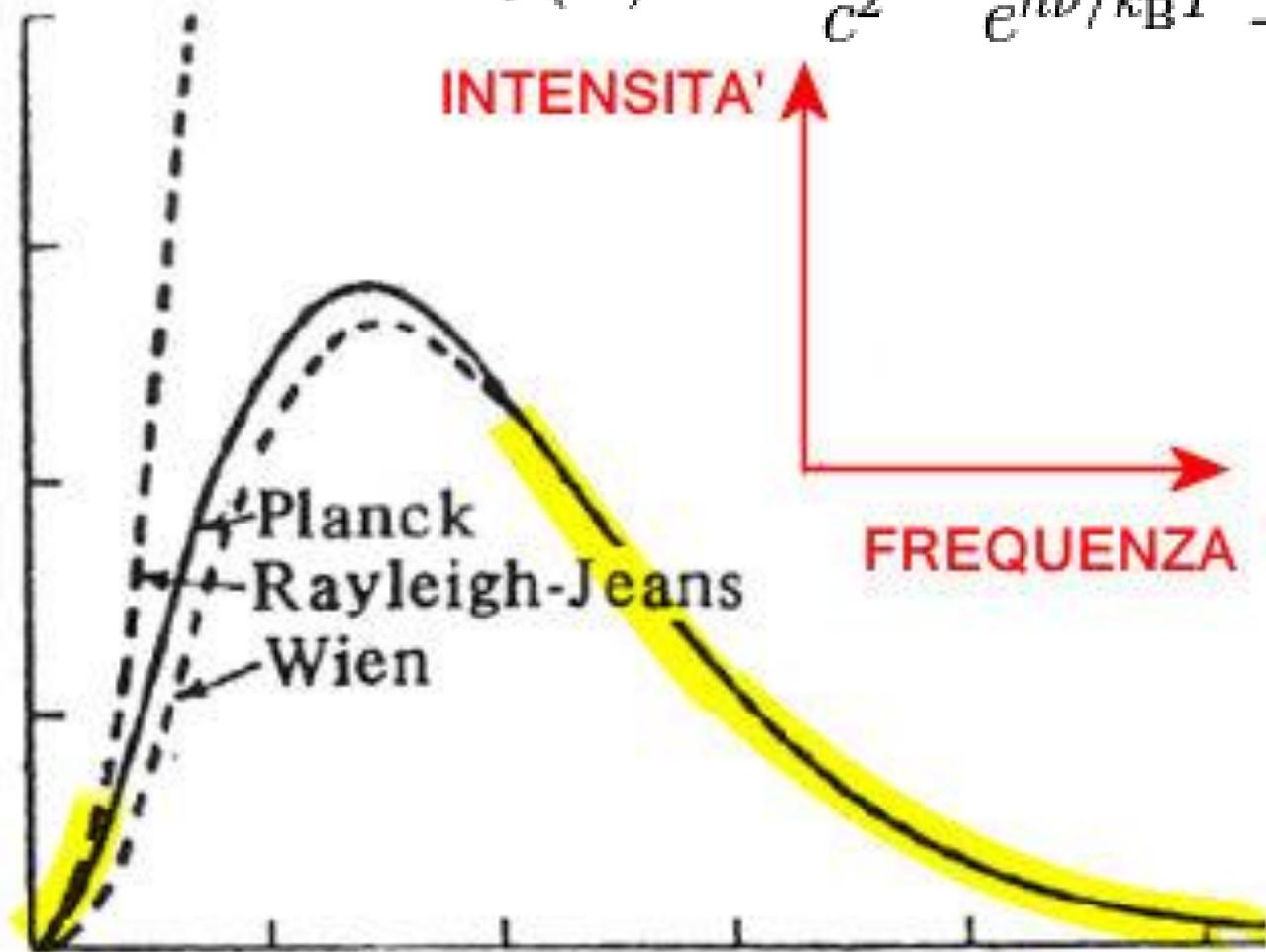
A questi pacchetti Planck diede il nome di *quanta* che in latino significa *quantità*. Nel caso della radiazione e.m. doveva valere il principio che:

$$E = h\nu$$

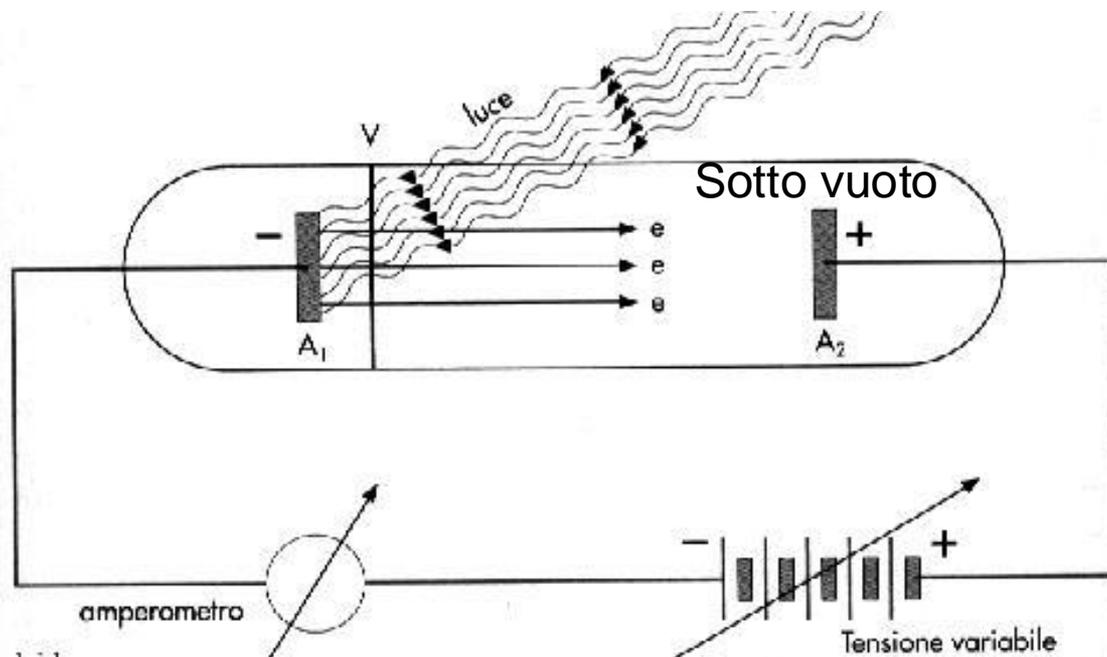
Costante di Planck: $h=6.626 \cdot 10^{-34}$ Js

La formula di Planck funziona!

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$



Un altro fenomeno: l'effetto fotoelettrico



una superficie metallica colpita da radiazione elettromagnetica **emette elettroni**

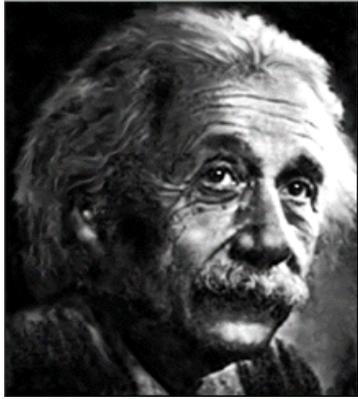
Nuova fenomenologia in contrasto con le previsioni

PREVISIONE TEORICA (DELL'ELETTROMAGNETISMO "CLASSICO")



Per un data frequenza della radiazione incidente, aumentando l'intensità della radiazione, **aumenta l'energia degli elettroni emessi**

La soluzione di Einstein !!! (1905)



Einstein estese l'idea di Planck della quantizzazione dei livelli energetici del corpo nero alla radiazione stessa all'interno della cavità.

Ricavò che doveva valere la relazione $E = h \nu$ che Planck aveva ricavato in modo semi-empirico

Questo permise ad Einstein di concludere e dimostrare che la radiazione incidente trasferisce la propria energia con salti discreti.

1. Una luce più intensa vuol dire un maggior numero di quanti di luce al secondo;
2. ogni quanto di luce, se ha energia sufficiente, estrae dal metallo 1 elettrone;
3. l'elettrone viene estratto con energia $E = h \nu - E_0$ (E_0 è l'energia necessaria a strappare l'elettrone e dipende dal materiale)

Ann. Physik vol 17, p. 132 (1905)

Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.

(Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce)

Ann. Physik vol 17, p. 132 (1905)

Ann. Phys. (Leipzig) 14, Supplement, 164–181 (2005)

ANNALEN DER PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

KURATORIUM:

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE,
W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG

DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSSONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEBEBEN VON

PAUL DRUDE.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.



LEIPZIG, 1905.

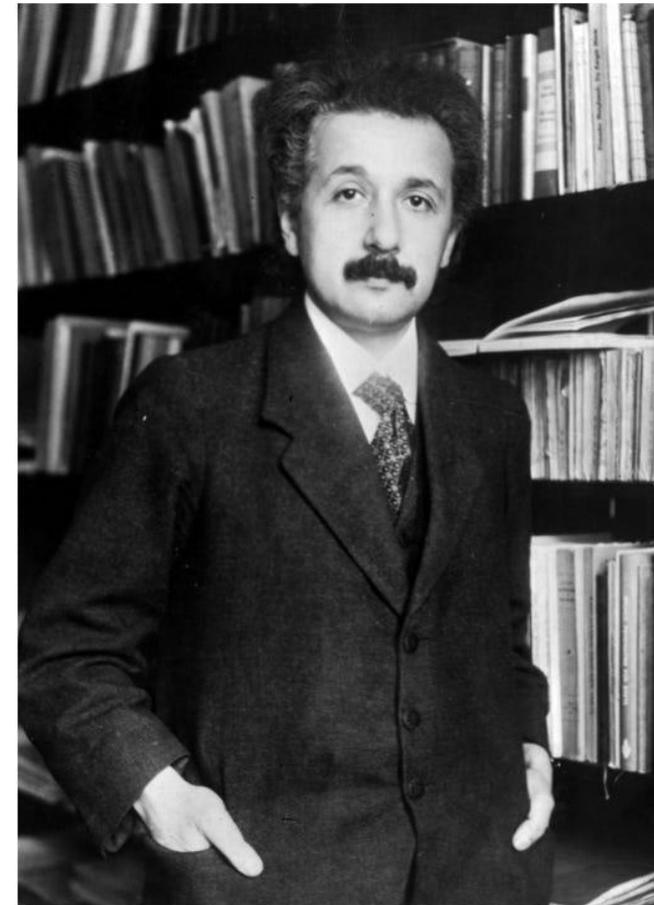
VERLAG VON JOHANN AMBROSIOUS BARTE.

132

6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumsfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder Allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumsfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das



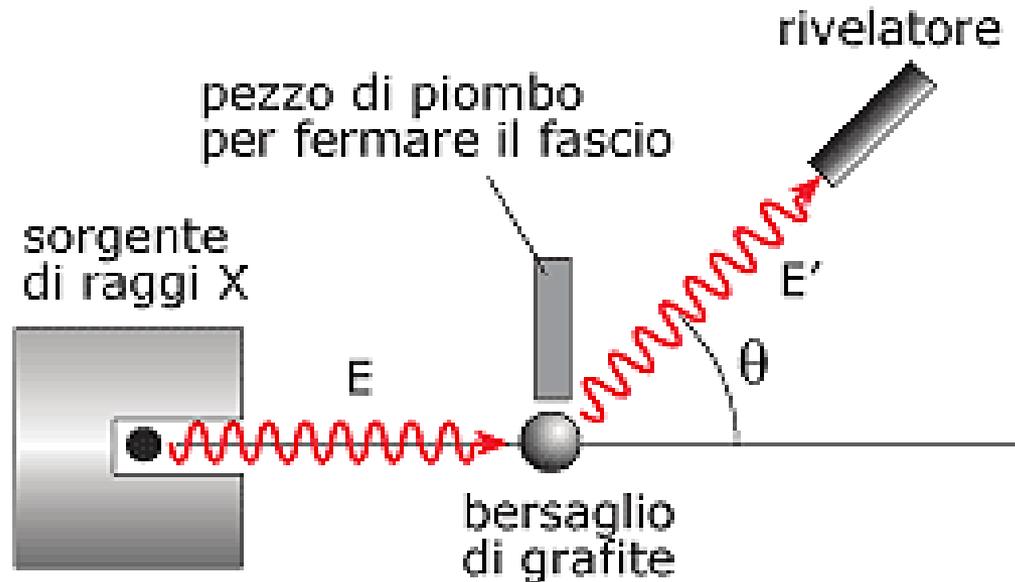
- Ritorno ad una descrizione che, in parte, ha una caratteristica corpuscolare
- Idee che erano molto difficili da accettare per la comunità scientifica di allora
- Anche per Planck i quanti di radiazione non erano una proprietà peculiare delle onde luminose, ma piuttosto delle proprietà degli atomi di materia che potevano emettere o assorbire energia in quantità discrete
- Era turbato perché la sua formula non derivava dalla fisica nota, ma era ricavata introducendo una sorta di trucco ad hoc...
- Einstein invece non considerava il suo ragionamento una pura astrazione matematica, ma una conseguenza della vera natura quantistica della luce.
- In ogni caso era percepita da tutti la mancanza di una vera teoria a cui affidarsi...

Una decisiva prova sperimentale: l' «Effetto Compton»

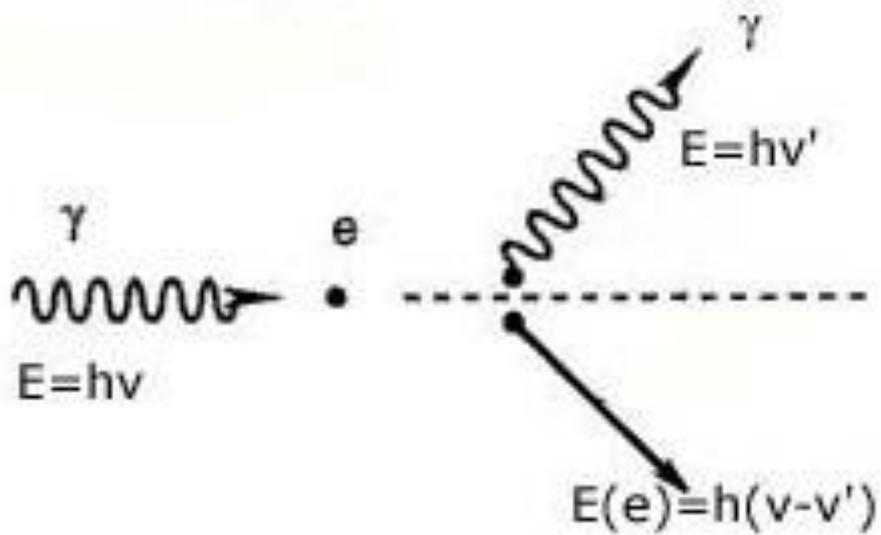


A. Compton

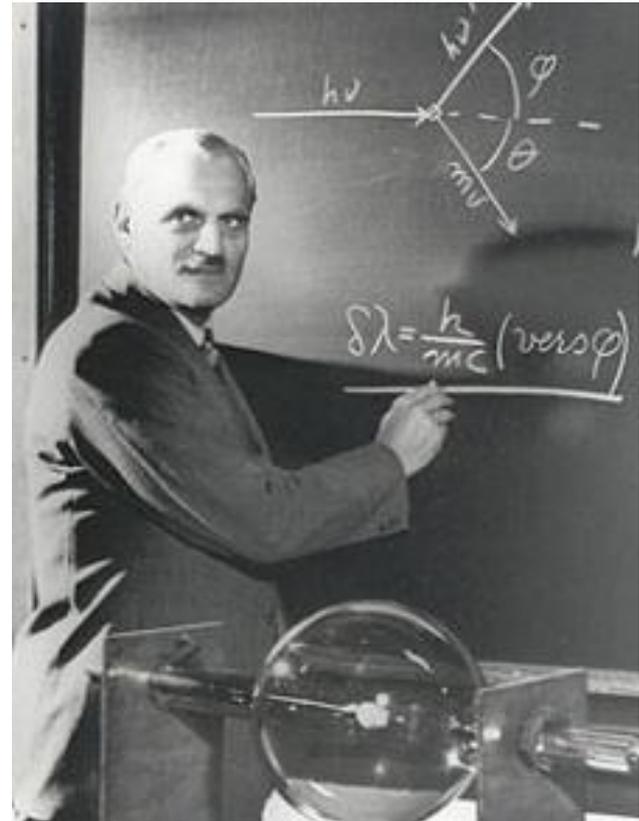
Se il quanto di radiazione ha le caratteristiche di un corpuscolo deve obbedire alle leggi che governano gli urti



1922-1923



Phys. Rev. vol 21, p. 483 (1923)



Premio Nobel 1927

introduzione della parola Fotone

Compare per la prima volta nel titolo di un lavoro scritto nel 1926 dal fisico-chimico di Berkeley G.N. Lewis:

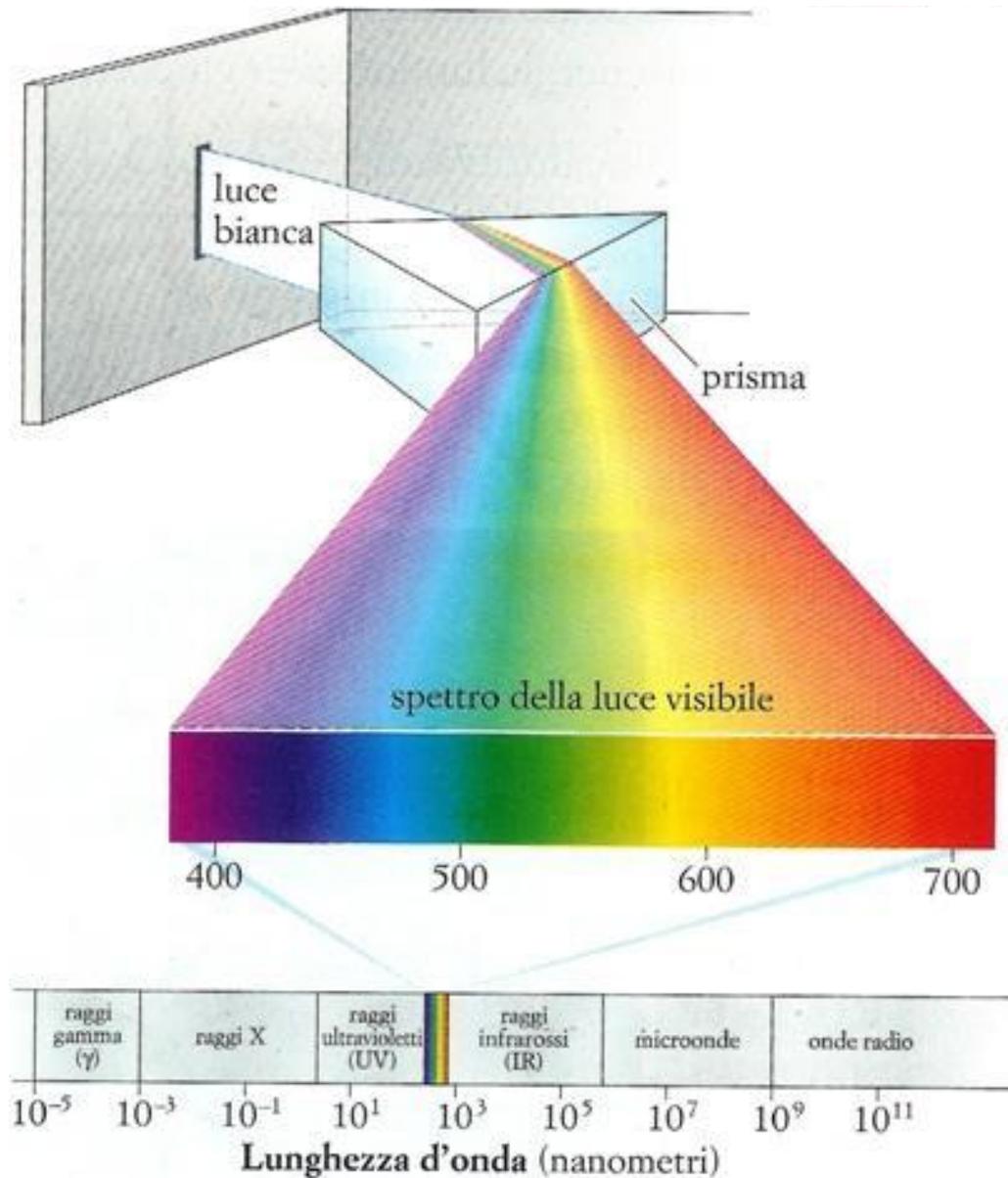
«La conservazione dei fotoni»

il suo scopo era ridicolizzare un'idea ritenuta poco seria usando un nome strano

In meno di un anno questa intenzione venne dimenticata e il termine fotone fu preso seriamente per sempre...

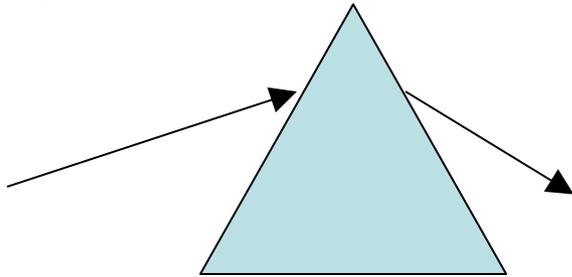
In genere utilizziamo per il fotone il simbolo γ

Cosa è uno «spettro»



Il mistero degli spettri atomici

Gas Caldo

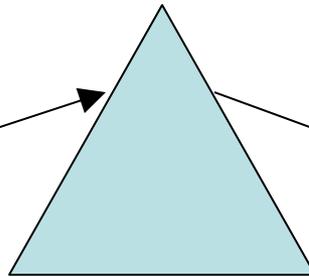
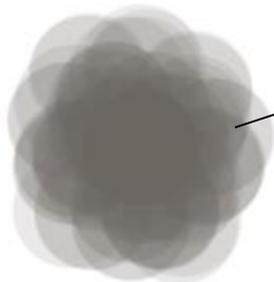


Righe di emissione

SPETTRO DI EMISSIONE



Gas Freddo

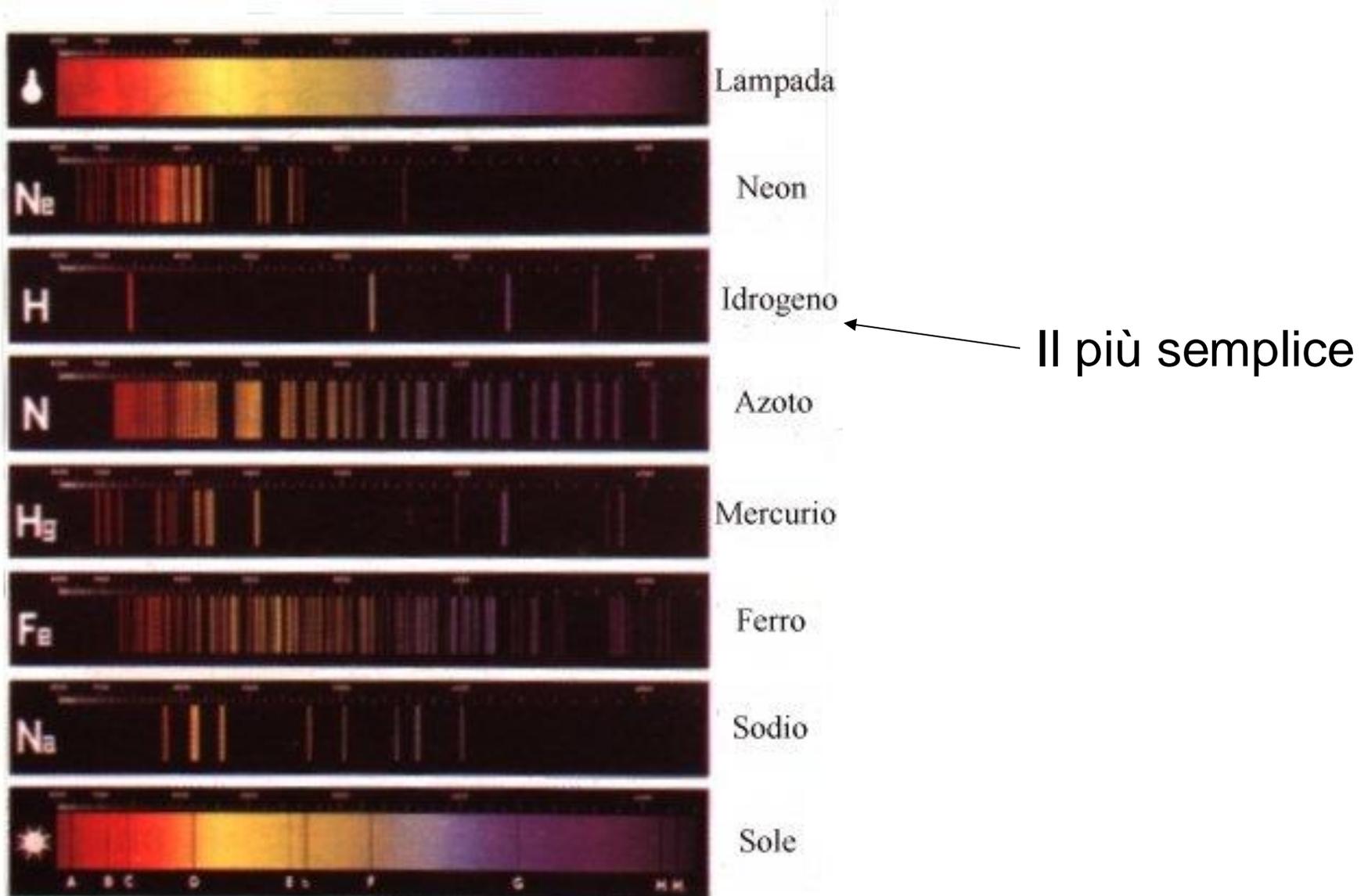


Righe di assorbimento

SPETTRO DI ASSORBIMENTO



Il biglietto da visita dei diversi elementi



La «serie» di Balmer

Nel 1885, un professore di scuola secondaria superiore svizzero (Johann Jacob Balmer) scopre che le frequenze delle righe principali dello spettro dell'idrogeno sono date dalla relazione:

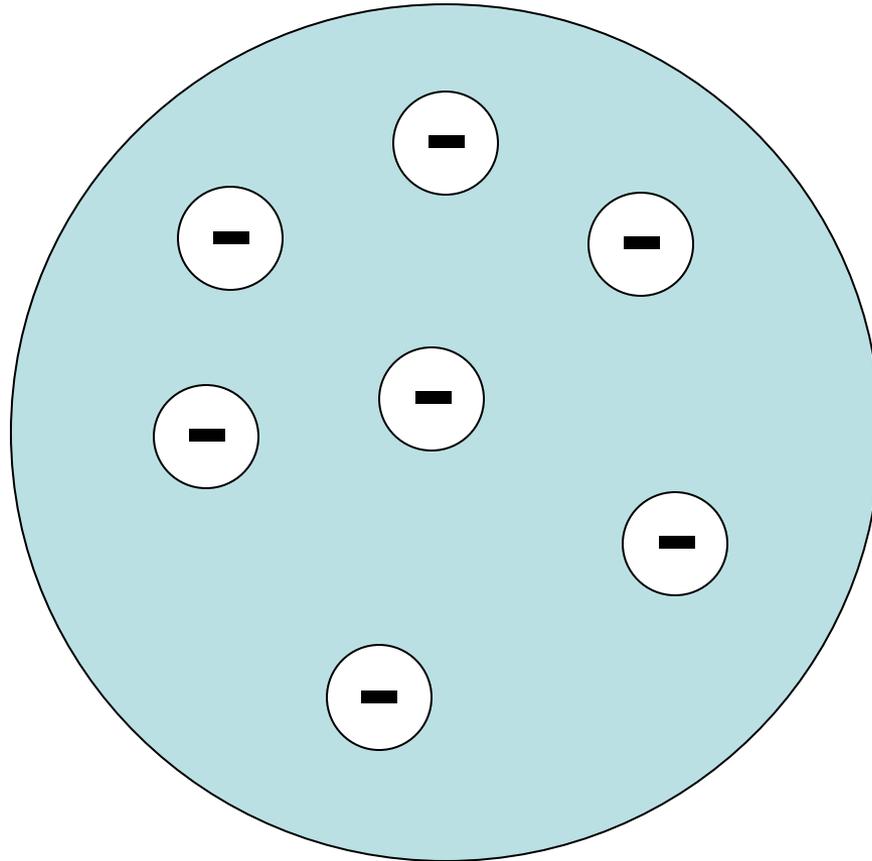
$$\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Costante di Rydberg: $3.298 \cdot 10^{15} \text{ sec}^{-1}$

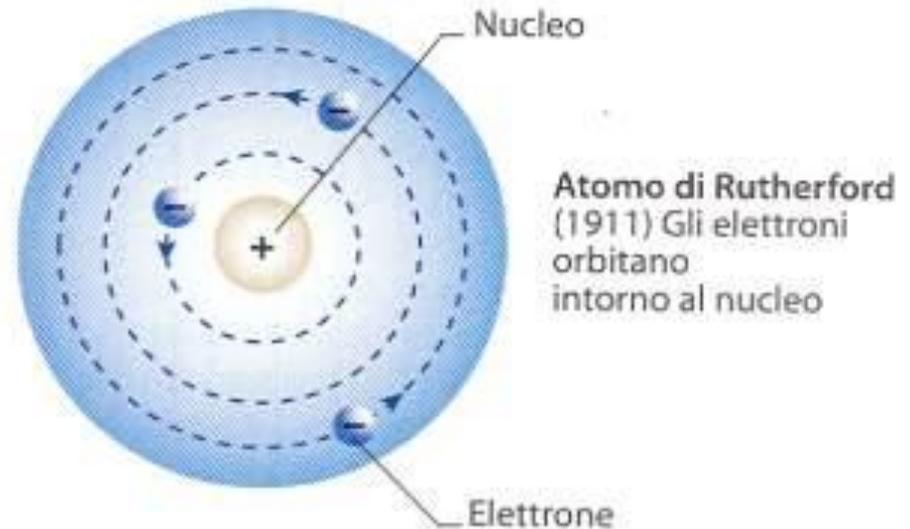
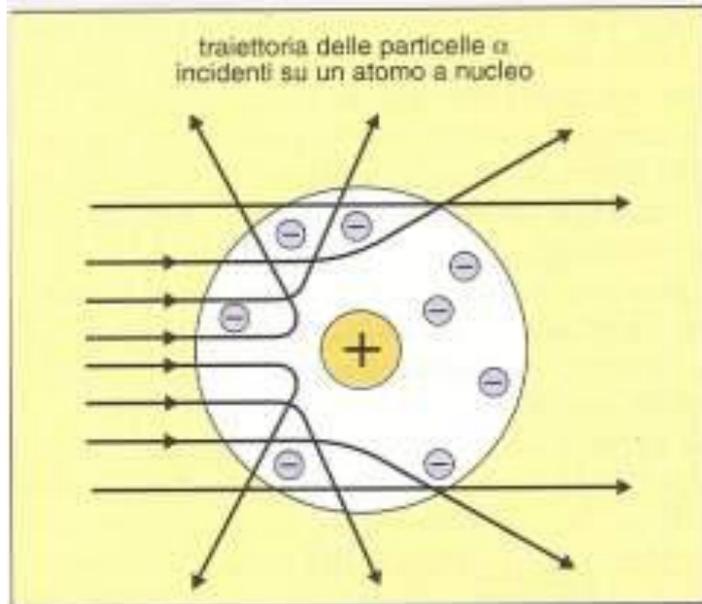
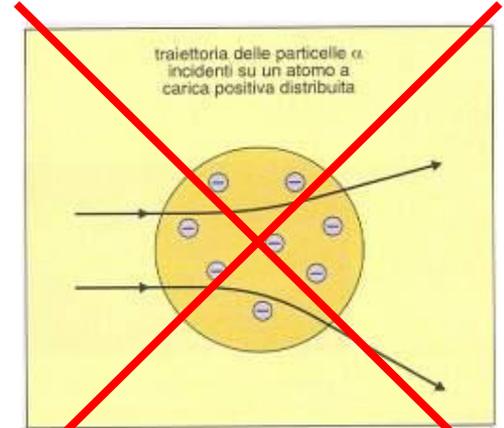
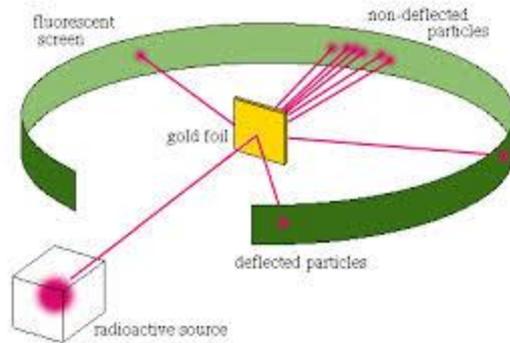
Poi si scoprirono presto altre serie di righe spettrali: Lyman, Paschen, Brackett...



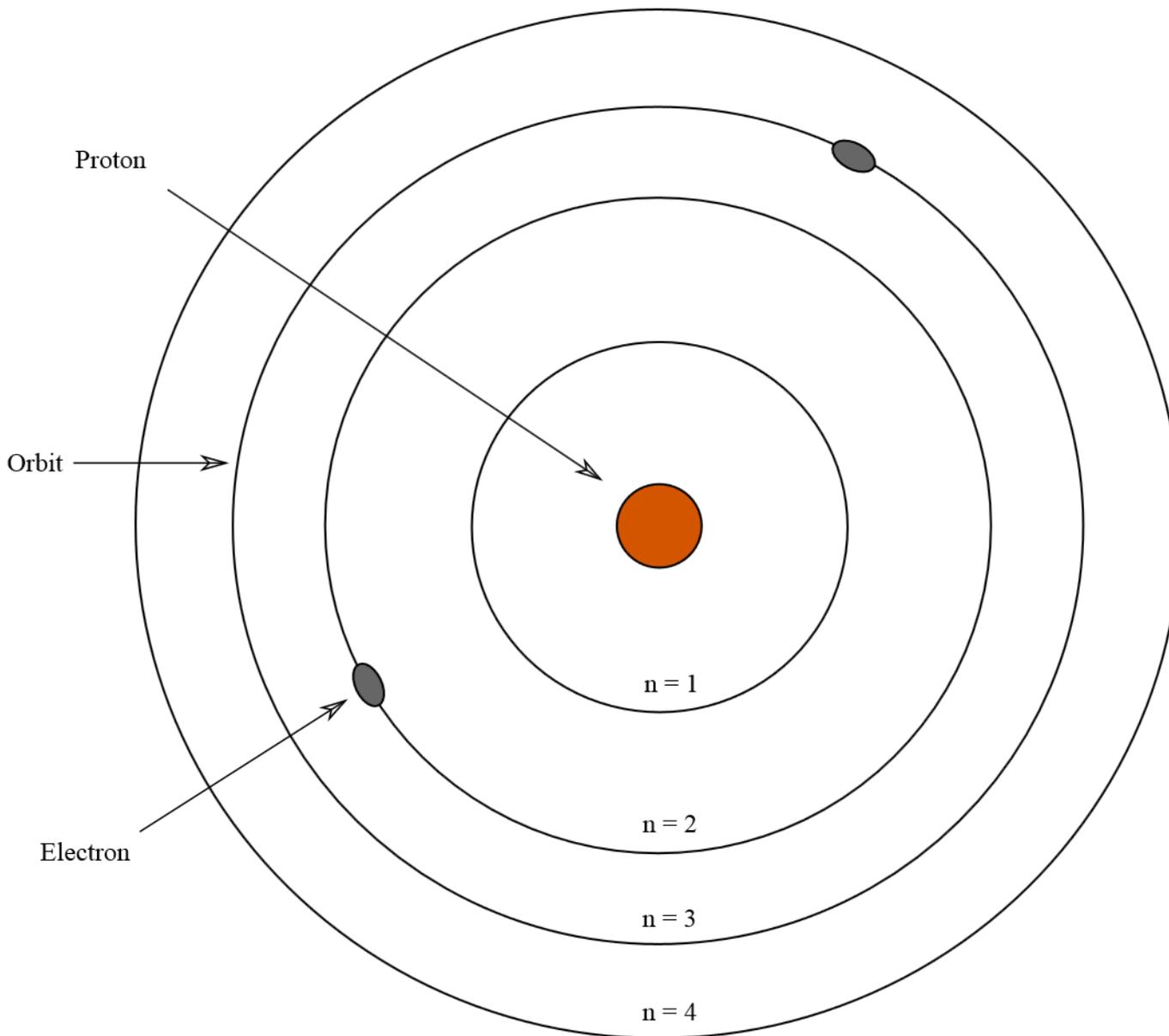
Il modello atomico di Thomson (1898)



L'evoluzione del modello atomico: Rutherford (1911)



Il modello atomico di Bohr (1913)



$n=1$:
elettrone nello
stato
fondamentale

$n=2, 3, 4, \dots$:
elettrone in stati
energeticamente
sempre più
eccitati

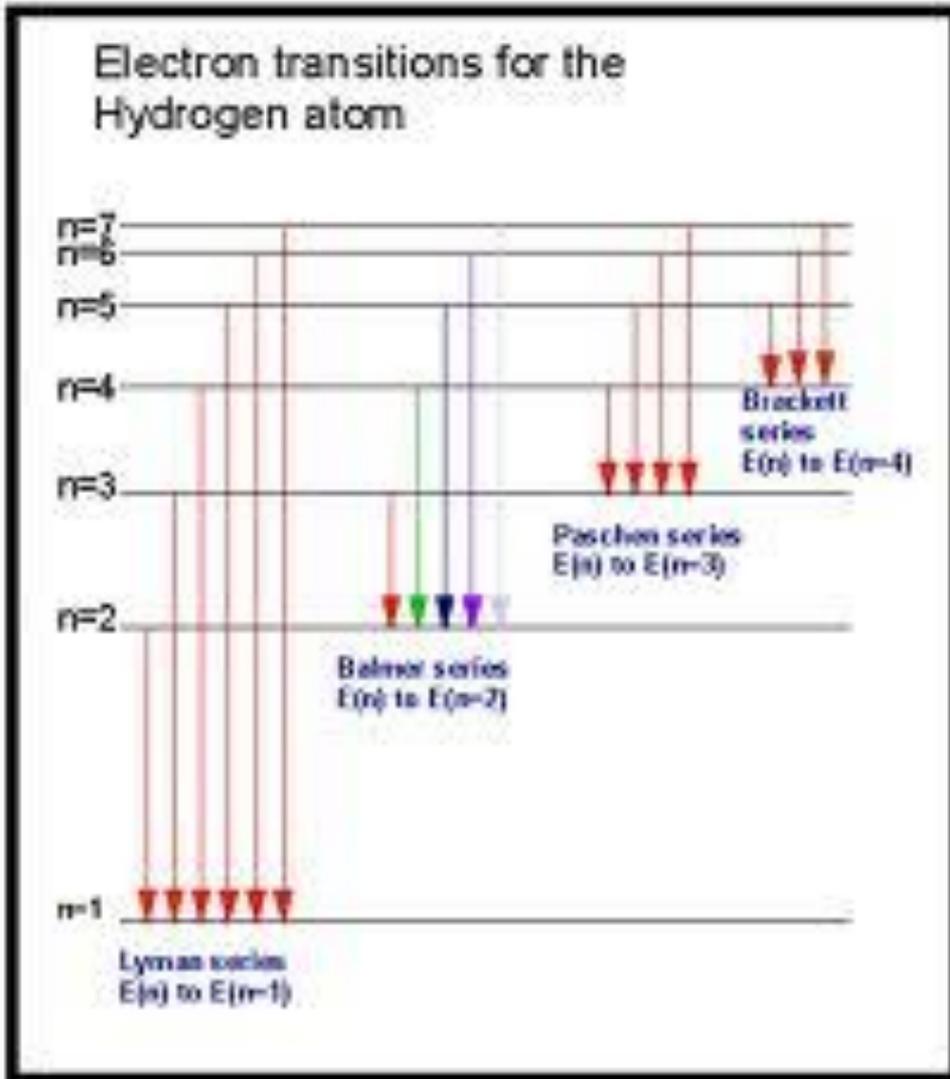
Il modello atomico di Bohr

- Nell'atomo gli elettroni **ruotano** intorno al nucleo su **orbite circolari**. Ognuna di queste orbite ha un raggio ed un valore di energia ben determinato
- **L'energia dell'elettrone nell'atomo è "quantizzata"**. Essa può assumere soltanto certi valori (valori permessi), ma non può assumere i valori intermedi fra quelli permessi
- **Finché un elettrone rimane nella sua orbita, non emette e non assorbe energia**
- Un elettrone può operare una transizione da un livello di energia ad un altro solo assorbendo o emettendo radiazione. La frequenza ν della radiazione è data dalla nota relazione: $h\nu = \Delta E$

Un elettrone può saltare dallo stato n_1 allo stato eccitato $n_2 > n_1$ assorbendo un quanto di radiazione (FOTONE) di energia $E_{12} = E_{n_2} - E_{n_1}$

Un elettrone può scendere dallo stato eccitato n_2 allo stato n_1 , emettendo un fotone della stessa energia E_{12}

La formula generalizzata di Bohr



$$\nu_{n_1, n_2} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Il modello atomico di Bohr

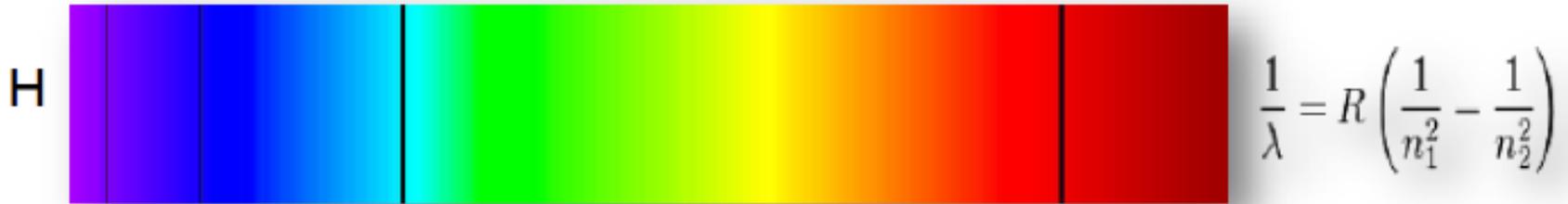
- Nelle orbite di Bohr gli elettroni non irradiano energia (e perché???)

Eppure noi sappiamo che una particella carica libera sottoposta ad accelerazione emette radiazione

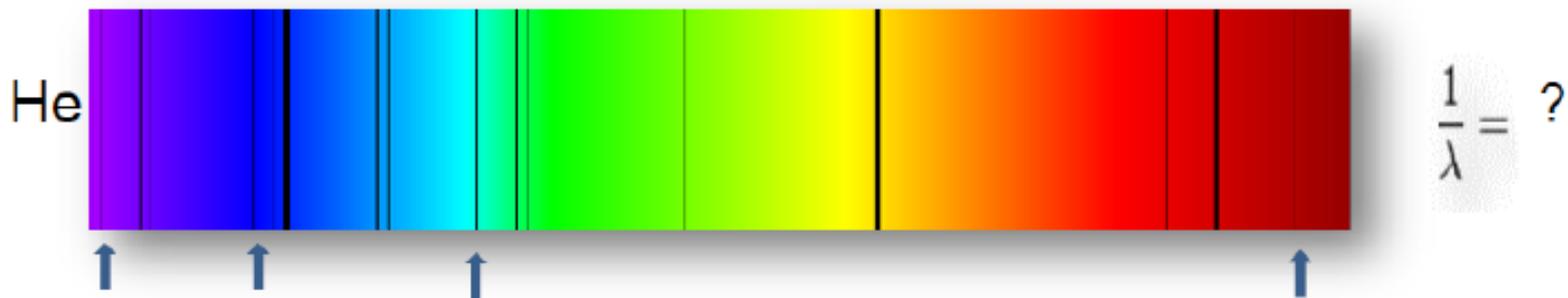
- Ancora una volta un modello semi-empirico, non sostenuto da alcuna teoria completa e coerente

Peccato poi che il modello iniziale di Bohr funzionasse solo per l'atomo di idrogeno e poco altro...

Le righe imprevedute...

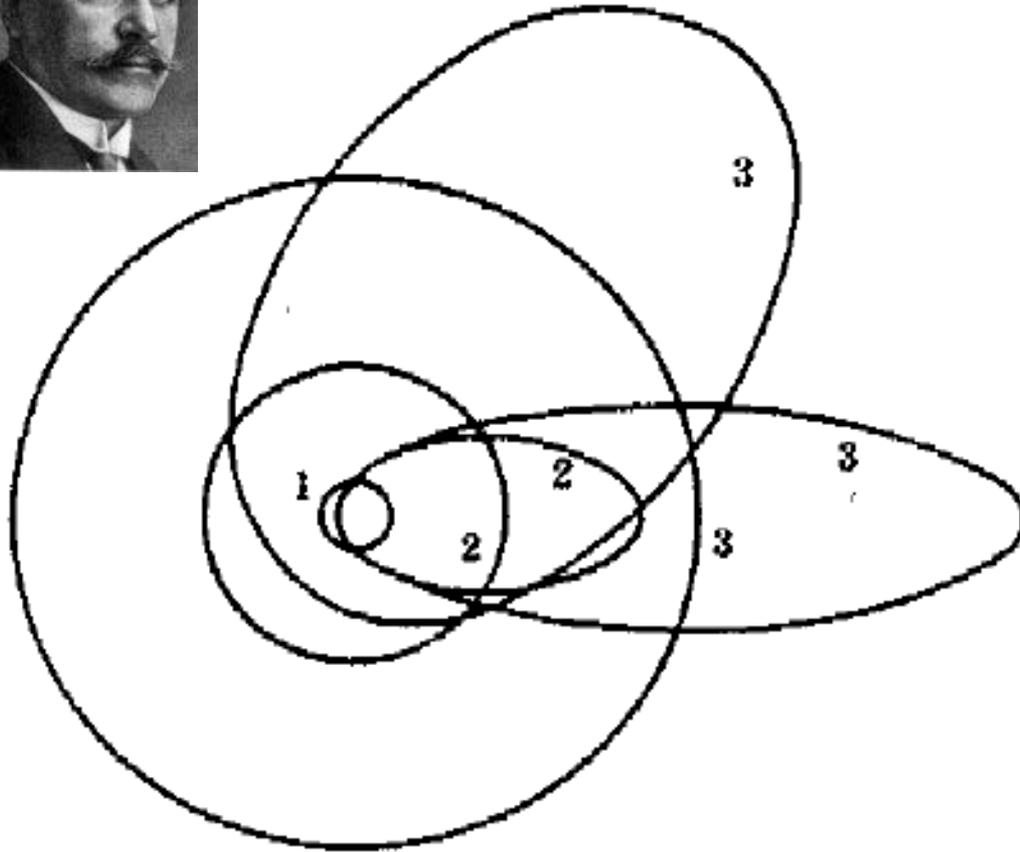


Spettro dell'Elio



Righe non previste

Introduzione delle orbite ellittiche da parte di Arnold Sommerfeld (1916)



Per tener conto delle eccitazioni del momento della quantità di moto a pari livello energetico

Fra le altre cose, il modello di Bohr-Sommerfeld non riesce a spiegare la diversa luminosità delle righe spettrali

Le insufficienze di principio

- Modello bastardo: pur rinunciando alle nozioni classiche del movimento, si era fatto uso ampiamente della meccanica classica
- Bohr aveva «proibito» all'elettrone di irradiare finchè era nella sua orbita, ma non riusciva a sostenere in modo serio questa proibizione
- I fotoni non discendevano da nessuno dei suoi concetti
- Più che mai necessario un salto concettuale!

1924: Un nuovo «break-through»



L. De Broglie su Philosophical Magazine:
possibile esistenza di onde di materia

Onde capaci di propagarsi nel vuoto (non
sono quindi onde meccaniche)
generate anche da oggetti elettricamente
neutri (e quindi non sono onde e.m.)

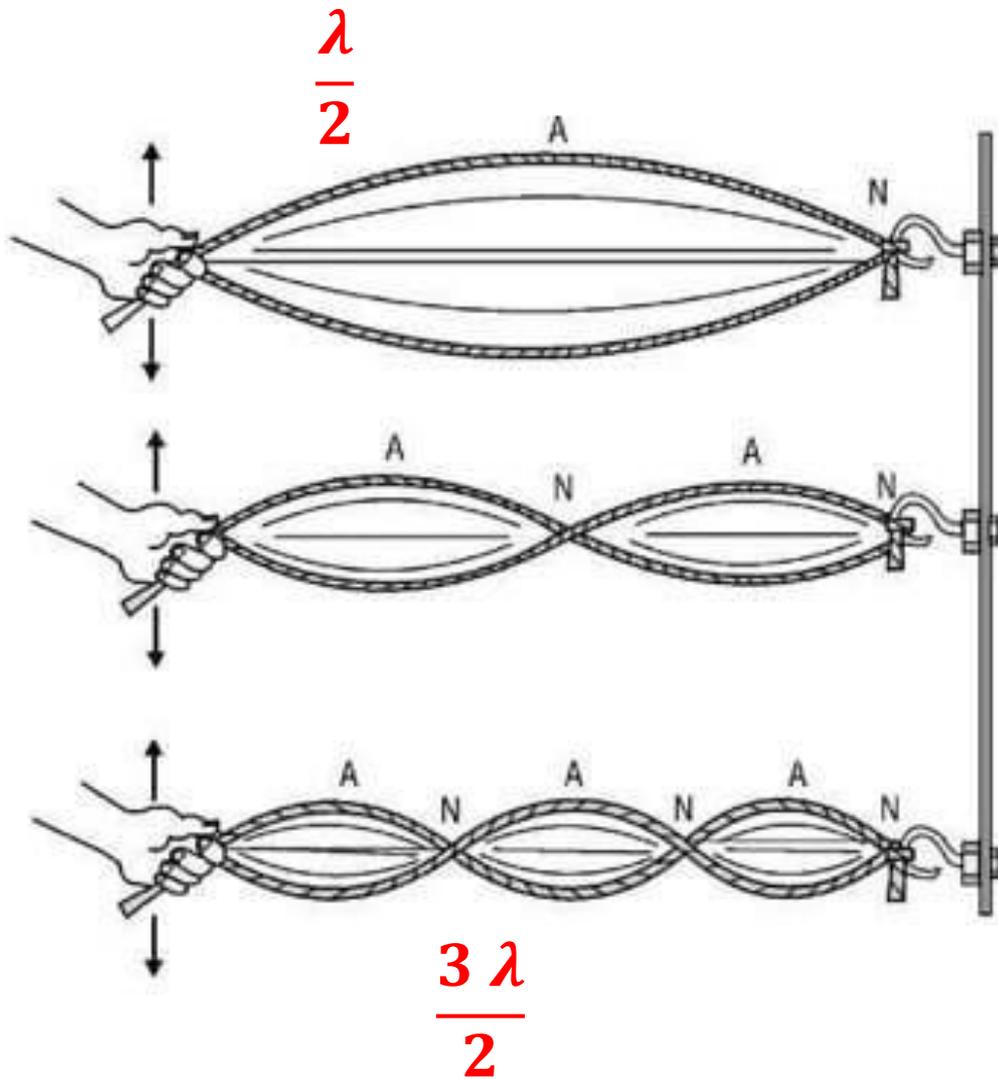
Lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Costante di Planck

Massa x Velocità

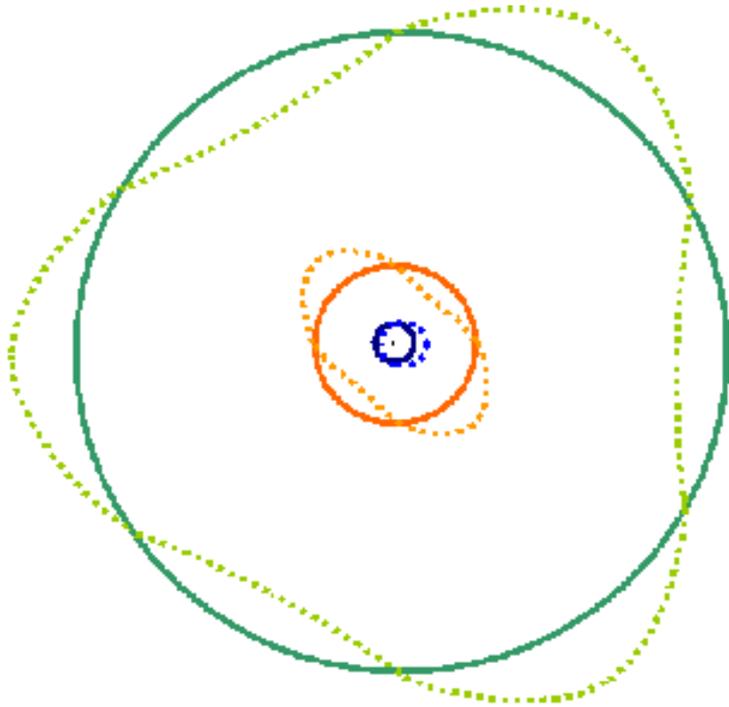
Le onde “stazionarie”



$$\frac{2\lambda}{2}$$

Fra i 2 estremi è possibile collocare un numero intero di mezze lunghezze d'onda

Applicazione al modello atomico



In un'orbita circolare posso sistemare un'onda solo se la circonferenza contiene un numero intero di lunghezze d'onda

$$2\pi r = n\lambda \rightarrow \lambda = \frac{2\pi r}{n}$$

$$\lambda = \frac{2\pi r}{n} = \frac{h}{m v}$$

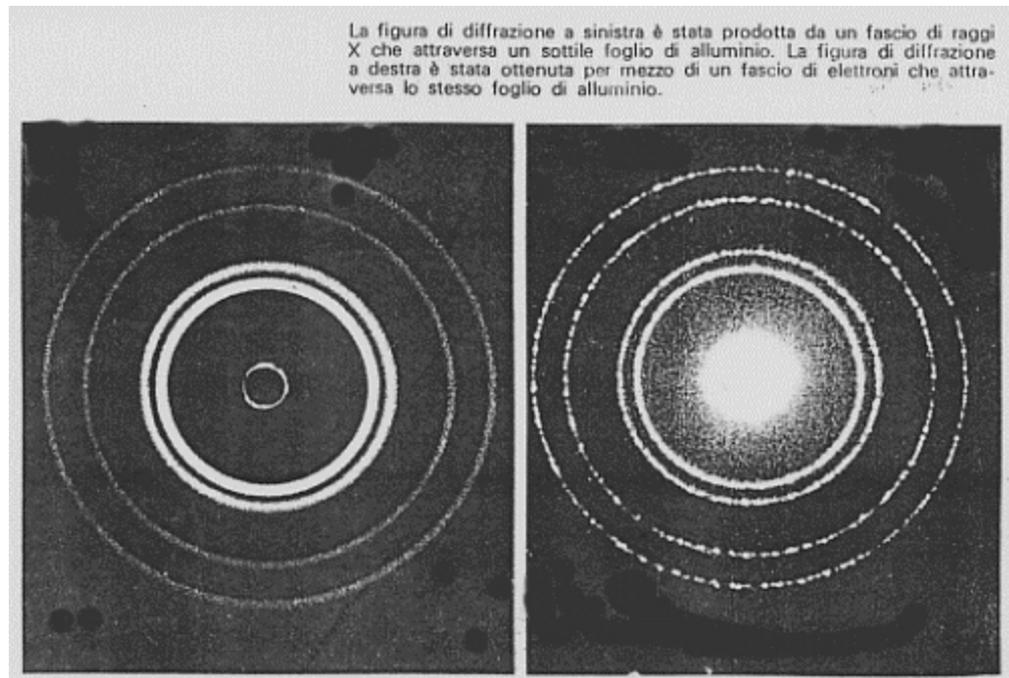
Se l'onda è "stazionaria" non ci sono cambiamenti energetici e quindi non c'è irraggiamento

Le lunghezze d'onda di De Broglie per alcuni corpi

Corpo	Massa (g)	Velocità (m/s)	λ (m)
Elettrone lento	$9 \cdot 10^{-28}$	1.0	$7 \cdot 10^{-4}$
Elettrone veloce	$9 \cdot 10^{-28}$	$5.9 \cdot 10^6$	10^{-10}
Particella "a"	$6.6 \cdot 10^{-24}$	$1.5 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^{-15}$
Palla da baseball	142	25	$2 \cdot 10^{-34}$
Terra	$6 \cdot 10^{27}$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-63}$

Si introduce di fatto la possibilità di un **approccio “duale”**: comportamento al contempo corpuscolare ed ondulatorio sia per particelle materiali (elettroni) che per i fotoni.

Visione presto supportata dagli esperimenti che mostrano la **diffrazione** (fenomeno tipicamente ondulatorio) di raggi X ed elettroni su una struttura cristallina !!!!



Verso una meccanica «ondulatoria»

Per De Broglie queste onde hanno il carattere di «onde pilota» per l'elettrone atomico

Le idee di De Broglie hanno un effetto dirompente, ma anche la sua teoria è debole:

- non spiega come un corpuscolo generi la sua onda pilota
- non spiega l'interazione fra particella e onda
- non spiega come l'onda si muova con il corpuscolo
- non spiega cosa accade nell'interazione con altre particelle e campi

Nel giro di due anni il tutto è risolto indipendentemente, e in parte diversamente, da due giovani:

Erwin Schroedinger

Werner Heisenberg

Heisenberg e la Meccanica delle Matrici



Dal 1924 era «post-doc» con Bohr a Copenhagen

1925: pubblica il lavoro fondamentale

Z. Physik vol 33, p. 361 (1925)

Cerca di costruire un formalismo il più vicino possibile alla meccanica analitica classica

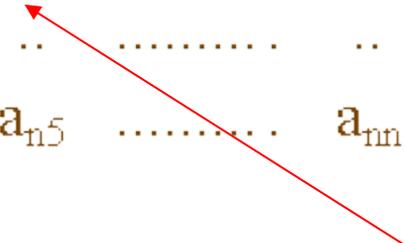
Le coordinate (Q) e le quantità di moto associate (P) diventano «**Matrici**» determinate completamente dall'intensità e dall'energia (frequenza) dei fotoni assorbiti o emessi dagli atomi

In fisica classica:

- *le coordinate Q sono x, y, z*
- *la quantità di moto è il prodotto massa x velocità*

Cosa è una matrice

Strumento dell'algebra lineare

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & \dots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & \dots & a_{4n} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & \dots & a_{5n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$


Le matrici di Heisenberg contengono in genere **numeri complessi**

Nel modello di Heisenberg è possibile risolvere delle equazioni con le matrici che permettono di ottenere le quantità fisiche misurabili, ed in particolare i livelli energetici degli atomi:

“Meccanica delle Matrici”

Un ripassino sui numeri complessi...

Cosa è un numero complesso?

$$z = x + iy$$

dove x e y sono numeri reali e

$$i = \sqrt{-1}$$

unità «immaginaria»

$$z^* = x - iy$$

si chiama «**complesso coniugato**» di z

$$\text{Il prodotto : } z^* z = |z|^2 = (x - iy)(x + iy) = x^2 + y^2$$

si chiama «**modulo quadrato**» di z ed è un numero reale

La base matematica della Nuova Meccanica Quantistica



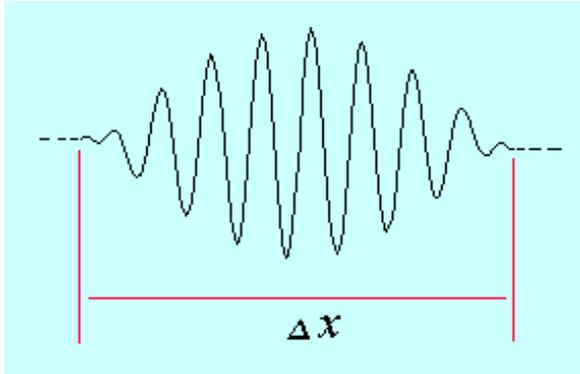
D. Hilbert

Nel 1909 Hilbert aveva introdotto un nuovo tipo di «spazio» estendendolo a infinite dimensioni e ai numeri complessi (lo Spazio di Hilbert)

Lo stato di un sistema quantistico è rappresentabile come un vettore nello Spazio di Hilbert.

In questo spazio lavorano le Matrici della Meccanica Quantistica di Heisenberg

Il principio di indeterminazione



di un oggetto quantistico (che si propaga in maniera assimilabile ad un “pacchetto” di onde) non si può determinare con assoluta precisione contemporaneamente la posizione e la velocità

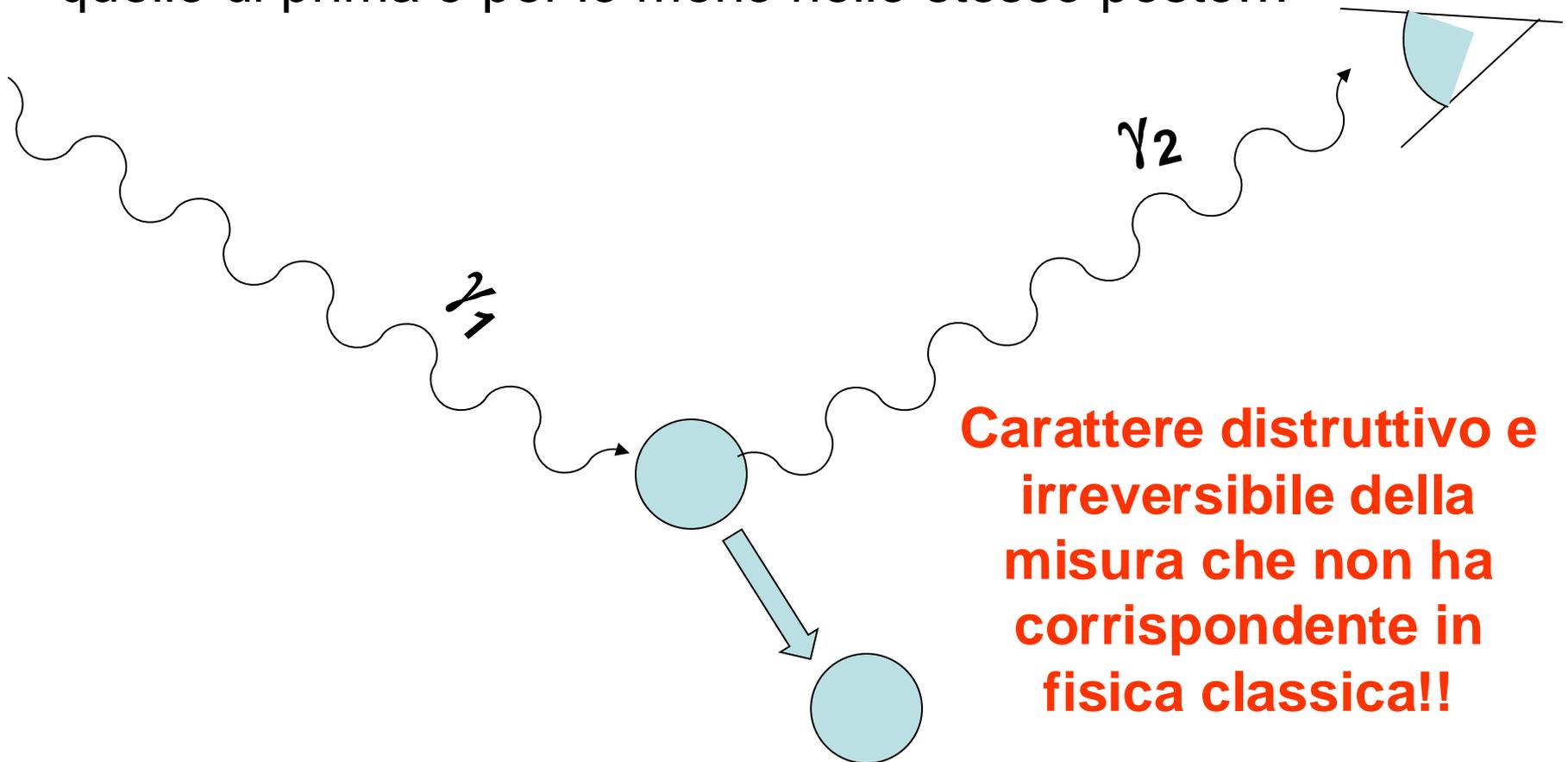
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

E' anche un limite intrinseco alla definizione e alla precisione di una misura

Attenzione!! Non e' una questione tecnica, ma di principio!

Cosa vuol dire misurare

Il mio occhio (strumento di misura) riceve per esempio i fotoni di luce diffusi da un'elettrone, ma i fotoni spostano l'elettrone e gli cambiano la velocità. Non sarà mai più quello di prima o per lo meno nello stesso posto...



Carattere distruttivo e irreversibile della misura che non ha corrispondente in fisica classica!!

La nuova Meccanica Ondulatoria di Schroedinger



Ann. Physik vol 79, p. 361 (1926)

In breve l'idea è la seguente. Il comportamento «quantistico» di una particella è descritto da una «funzione d'onda» che assume valori complessi:

$$\psi(x, t)$$

L'equazione di Schroedinger:

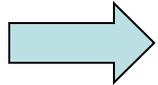
$$i \frac{h}{2\pi} \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} + \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} - V(x) = 0$$

La funzione d'onda di Schroedinger

La funzione Ψ , da sola, **non è un osservabile fisico.**

Assume valori complessi

Lo è invece il suo Modulo Quadrato: $|\psi(x)|^2 = \psi^*(x)\psi(x)$



Rappresenta la probabilità di trovare la particella descritta da $\Psi(x)$ nel'intorno infinitesimo del punto di coordinate x

Max Born

Nel modello di Schroedinger la soluzione dell'equazione d'onda permette di determinare le quantità fisiche misurabili, e ottenere i livelli energetici degli atomi. **Stessi risultati di Heisenberg, ma per altra via**

“Meccanica Ondulatoria”

Profonde implicazioni

Le equazioni della meccanica quantistica non descrivono il moto classico completamente e unicamente determinato a partire da condizioni iniziali

Descrivono l'evoluzione nello spazio e nel tempo di una «**ampiezza di probabilità**».

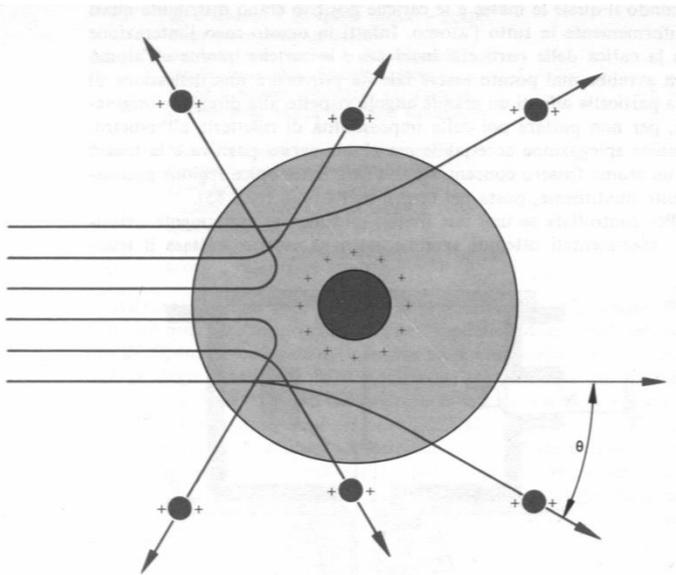
Sparisce il determinismo assoluto

Inoltre: proprio per le caratteristiche delle onde. una particella quantistica non è localizzabile in un punto preciso, ma è distribuita nello spazio

Probabilità a livello fondamentale

La probabilità era presente anche in fisica classica, ma solo come “ignoranza” di alcuni elementi che altrimenti avrebbe permesso il calcolo esatto.

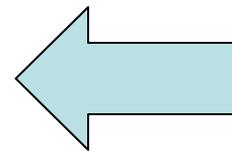
Invece scopriamo che l'indeterminazione è un aspetto intrinseco del mondo atomico e subatomico



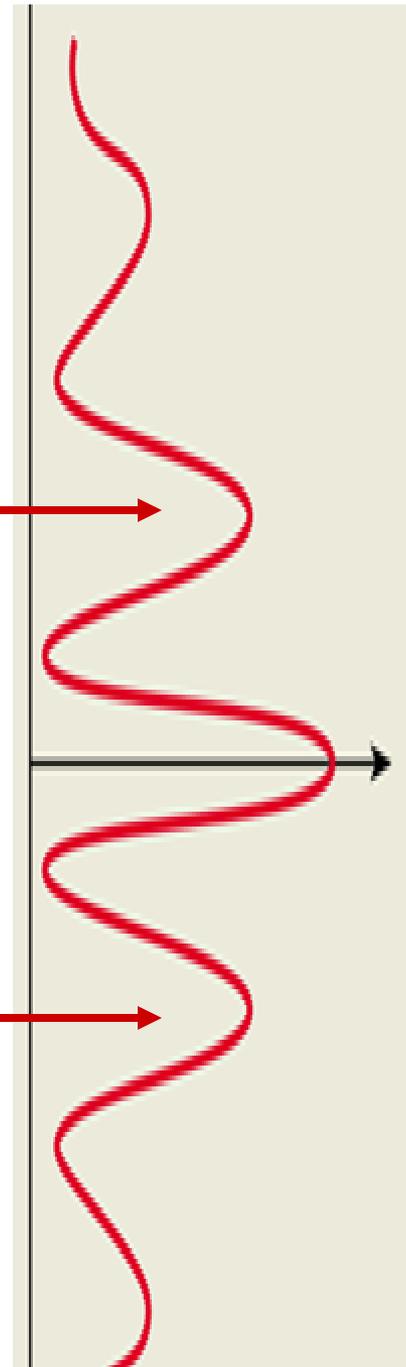
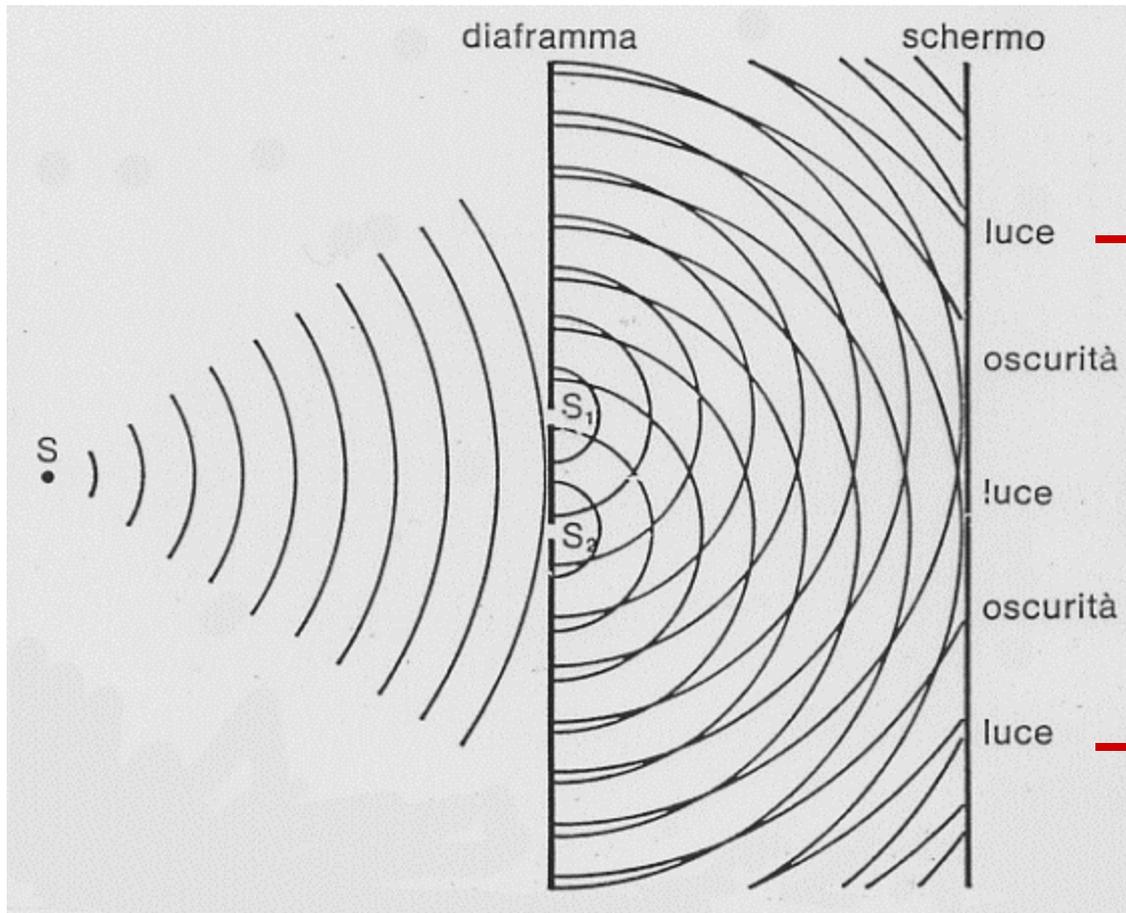
Possiamo calcolare la probabilità che il proiettile venga “diffuso” (deviato) ad un certo angolo, ma non possiamo predire esattamente cosa succede “evento per evento”!

L'interferenza delle onde

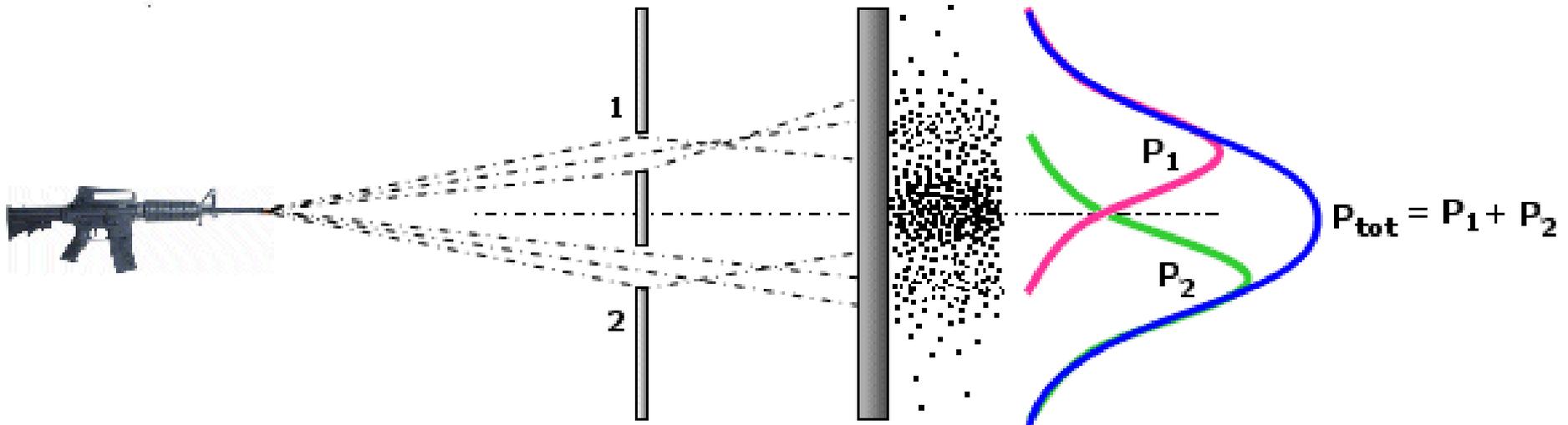
Il caso delle 2 fenditure



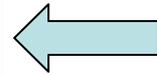
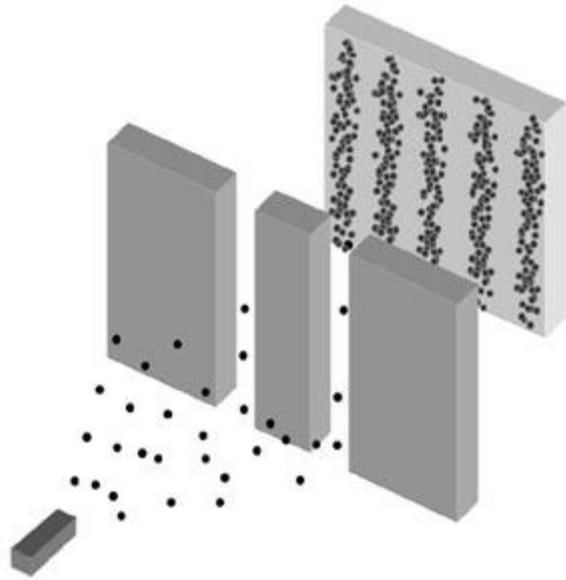
**«pattern»
di interferenza**



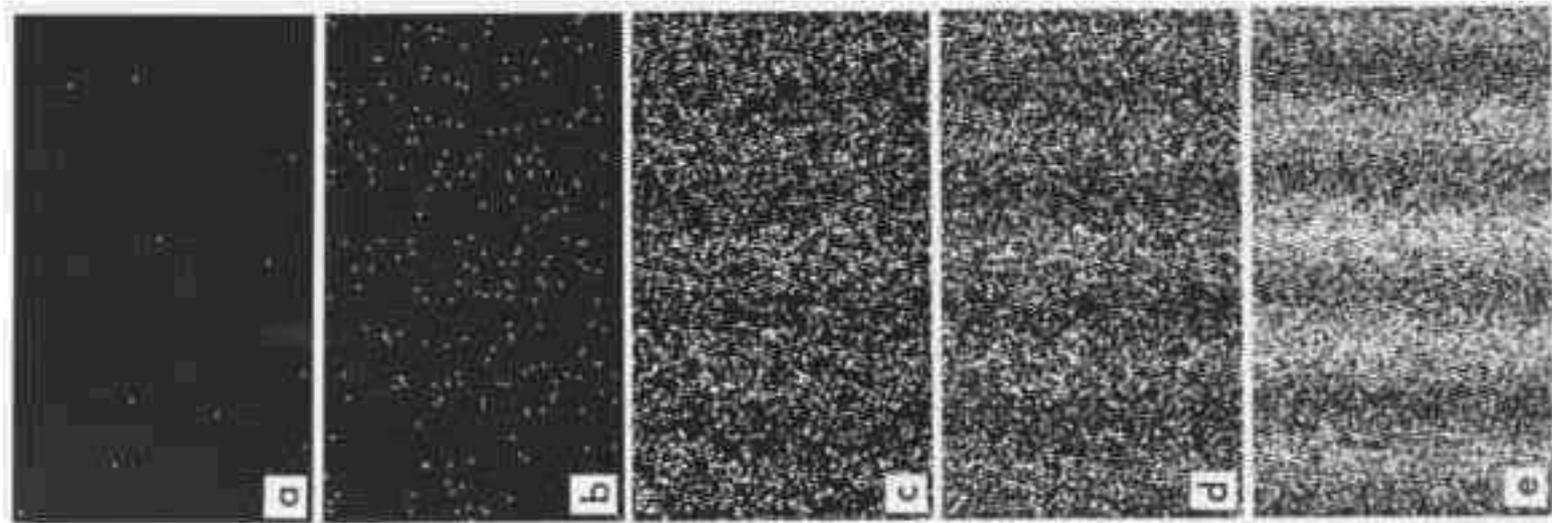
Cosa succede con delle particelle materiali MACROSCOPICHE



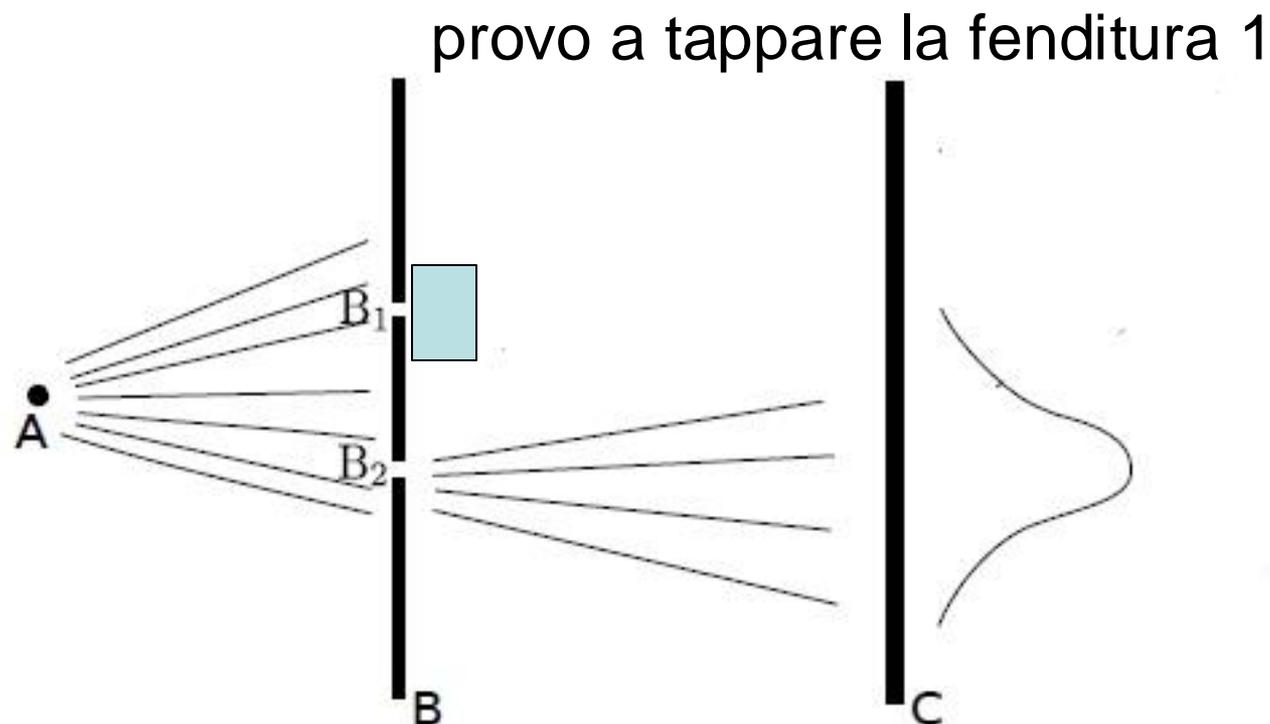
Cosa succede se invece uso come proiettili degli oggetti quantistici (elettroni, fotoni, ...)



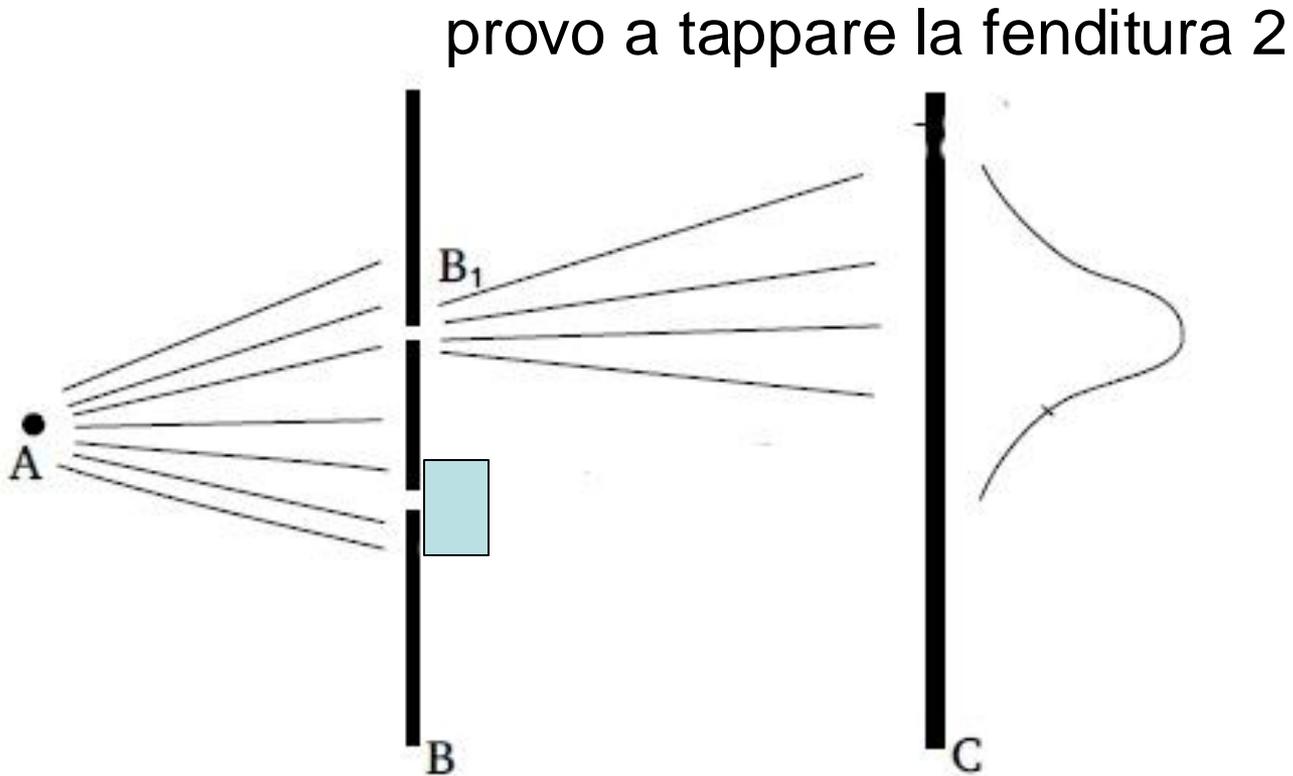
Lastra con emulsione fotografica



Posso capire da quale fenditura è passata la particella quantistica?

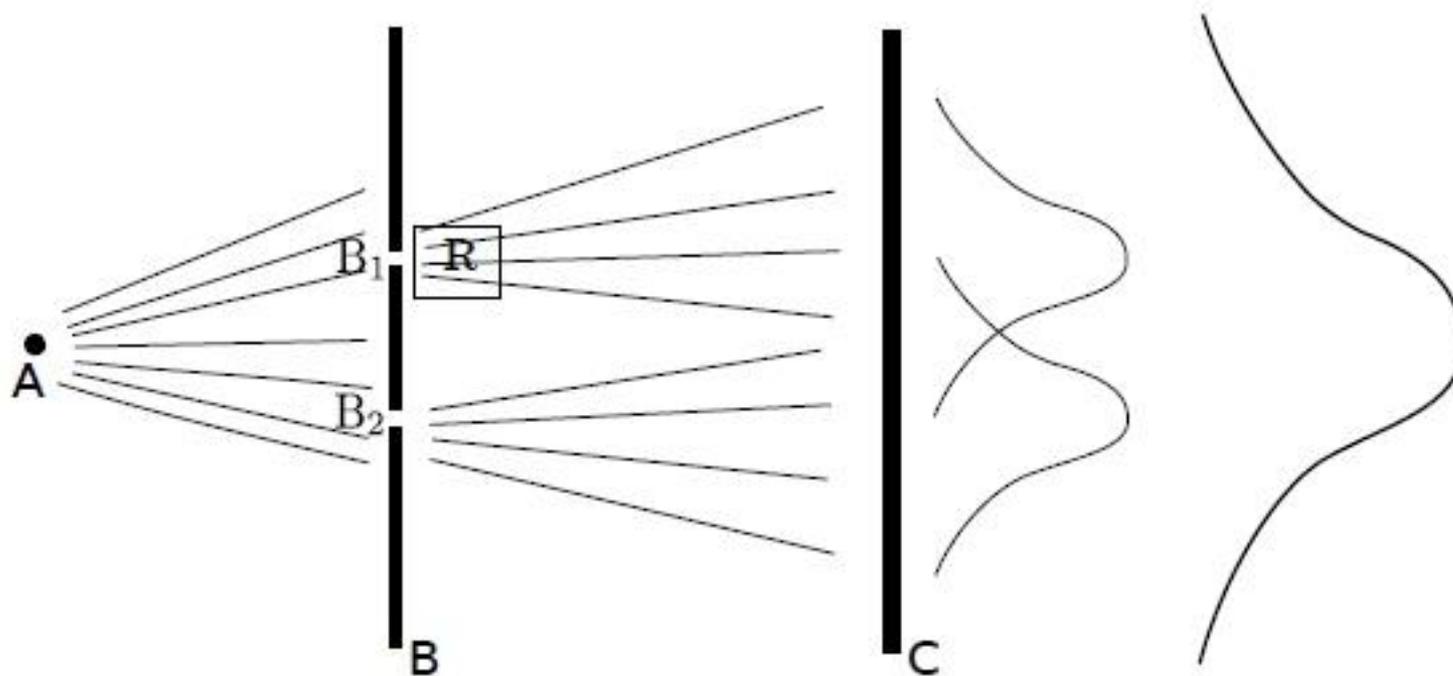


Posso capire da quale fenditura è passata la particella quantistica?



Posso capire da quale fenditura è passata la particella quantistica?

provo a mettere un dispositivo rivelatore per misurare il passaggio della particella....



Ritorno al caso classico: la misura ha distrutto il carattere ondulatorio

Ancora una volta ci scontriamo con il
problema della misura

**IL PROCESSO DI MISURA INTERFERISCE CON IL
SISTEMA QUANTISTICO**

**IL DUALISMO ONDA/PARTICELLA SCOMPARE CON
IL PROCESSO DI MISURA. POSSIAMO
EVIDENZIARE IL CARATTERE CORPUSCOLARE O
QUELLO ONDULATORIO, MA NON ENTRAMBI**

Il successo della Nuova Meccanica Quantistica

Sia la meccanica matriciale di Heisenberg che la meccanica ondulatoria di Schroedinger si dimostrano potentissime ed equivalenti:

Predicono la discretizzazione dei livelli di energia dei sistemi quantistici

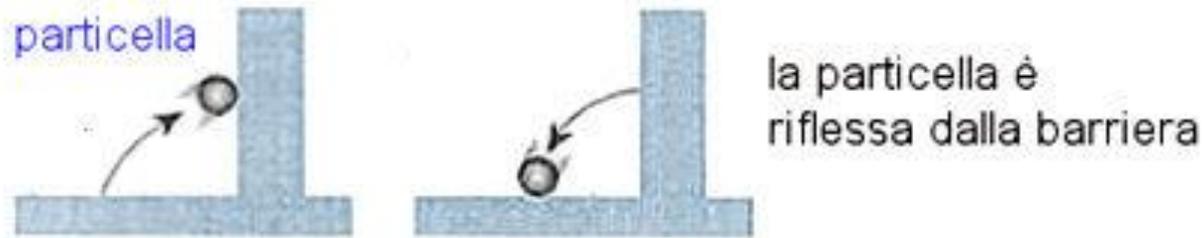
Forniscono un modello funzionante e privo di contraddizioni dell'atomo (atomo d'idrogeno)

Predicono una serie di nuovi fenomeni che negli anni successivi saranno verificati sperimentalmente

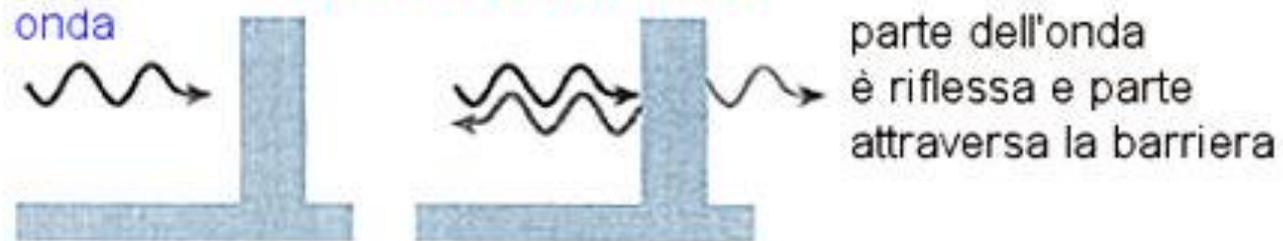
Le equazioni tendono al limite classico quando energie e dimensioni crescono opportunamente (**Principio di Corrispondenza**)

Un esempio di fenomeno nuovo: l'effetto tunnel

FISICA CLASSICA



FISICA QUANTISTICA



Applicazione tecnologica di oggi: il Diodo Tunnel:



La santificazione della Nuova Meccanica Quantistica

La conferenza Solvay di Bruxelles del 1927:
«Électrons et Photons»





Equivalenza degli approcci di Heisenberg e Schroedinger

Nel 1926 i fisici si trovano ad avere due formulazioni indipendenti capaci di spiegare la fenomenologia atomica: danno gli stessi risultati. Perché?

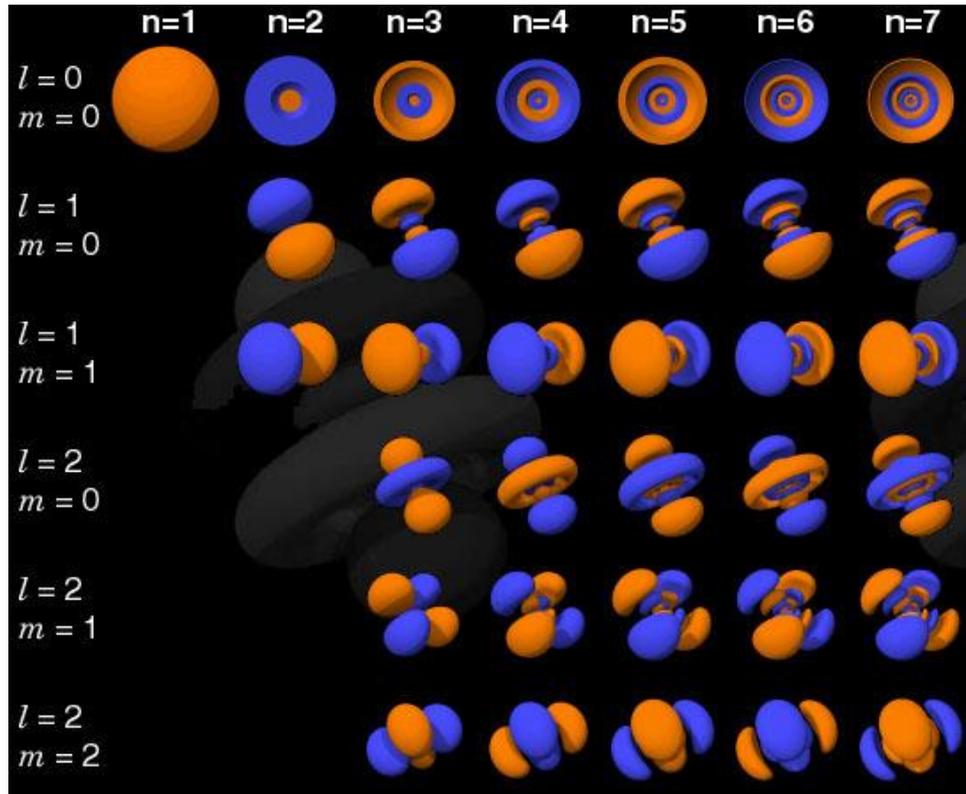
Una prima dimostrazione la fornisce Schroedinger in un altro lavoro del 1926 fa vedere che la sua Meccanica Ondulatoria è contenuta nella Meccanica delle Matrici (ma non dimostra il viceversa!)

Ann. Physik vol 79, p. 734 (1926)

La dimostrazione finale e completa la fornisce J. Von Neumann nel 1932:



Il modello atomico definitivo



dalle funzioni d'onda di
Schroedinger
ricavate per l'atomo di idrogeno

$$|\psi(r, \theta, \varphi)|^2$$

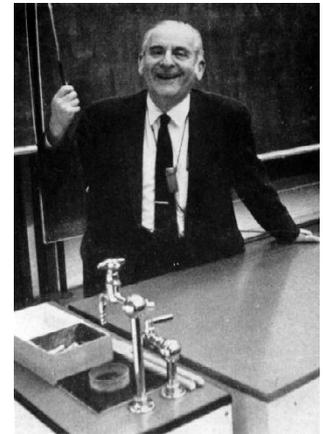
Gli orbitali atomici:

le regioni di spazio dove è
definita la probabilità di trovare
un elettrone a seconda del
livello energetico, momento
della quantità di moto, spin...

Altri sviluppi inattesi

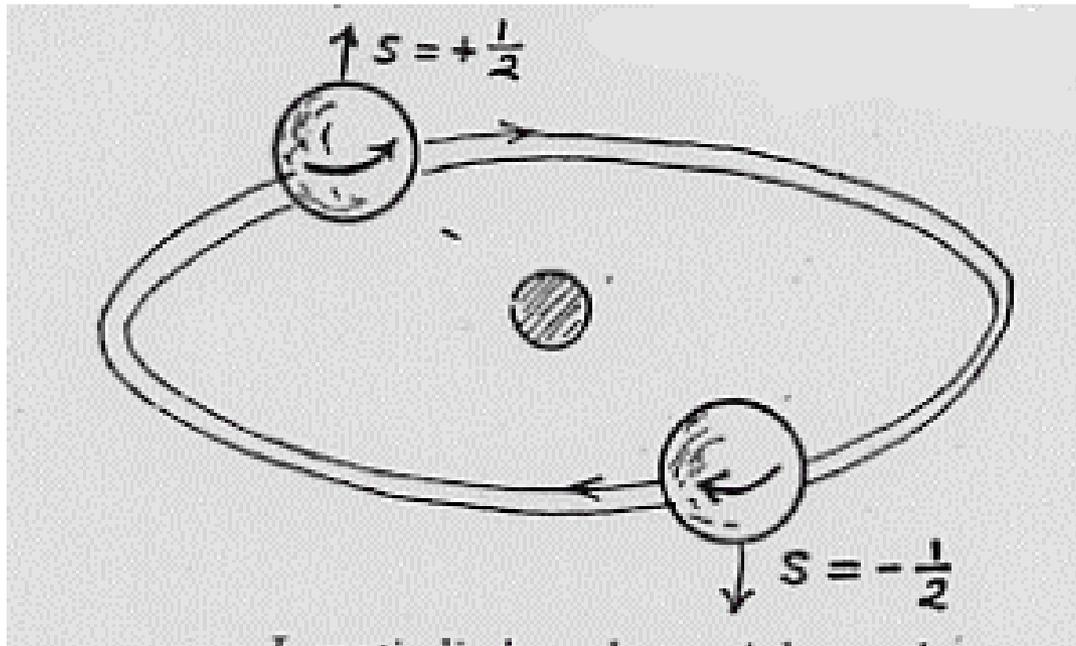
Nel 1925 due fisici olandesi, Ulenbeck e Goudsmith, scoprono che l'elettrone ha proprietà di tipo magnetico, come se ruotasse in modo rapidissimo su se stesso (ma non è proprio così...). E' come se avesse (in termini classici) un «momento della quantità di moto» che risulta essere proporzionale alla costante di Planck. La proprietà viene chiamata **Spin**

$$s = \pm \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2\pi} \right)$$

Lo spin in teoria

Se ne occupa W. Pauli



nalismo
arrivare,
e che
possono
desima
solo se

il «**Principio di Esclusione**» di Pauli

(nel 1924 Fermi arrivò ad un soffio dall'elaborare lo stesso principio...)

La Chimica diventa un capitolo della Fisica *(in linea di principio...)*

Dopo il calcolo degli orbitali e l'introduzione dello spin diventerà poi possibile calcolare i legami atomici, i livelli energetici delle molecole, ecc.

I limiti della M.Q. nel 1926/1927

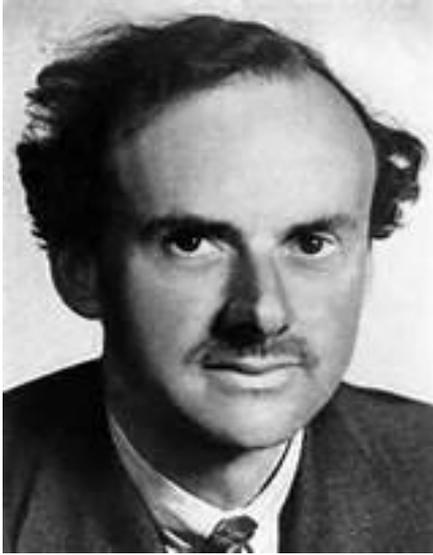
Il formalismo di Schroedinger e Heisemberg non tiene conto del nuovo paradigma: la Relatività ristretta di Einstein

Lo spin non emerge in modo naturale dalla teoria

Manca una trattazione unitaria dell'interazione fra materia e radiazione. *Lo sottolinea per esempio Enrico Fermi, in un suo lavoro del 1926: Nuovo Cimento, vol 3, R47-R49 (1926)*

Il salto successivo (e molti altri ancora) vengono dal lavoro di P.A.M. Dirac

Meccanica Quantistica e Relatività: l'equazione di Dirac (1928)



Riesce a trovare l'analogo relativistico dell'equazione di Schroedinger per particelle di spin $\frac{1}{2}$ (partendo dal lavoro di W.Pauli),

$$i \frac{2\pi c}{h} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} - \alpha_x \frac{\partial \psi}{\partial x} - \alpha_y \frac{\partial \psi}{\partial y} - \alpha_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \beta m c^2 \psi$$

Funzione d'onda a 4 componenti chiamata «Spinore»

matrici 4x4

Nella notazione compatta moderna la scriviamo così:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$$

Le novità

Risolve molti dei problemi prima esposti. Di nuovo Fermi scriverà nel 1932: «*Fino a qualche anno fa era stato impossibile costruire una teoria della radiazione che poteva tenere conto in modo soddisfacente sia dei fenomeni di interferenza che quelli di emissione e assorbimento della luce da parte della materia. [...] Solo nel 1928 Dirac costruì con successo una teoria della radiazione che poteva spiegare in modo unificato entrambi i fenomeni*» *Rev. Mod. Phys.*, vol. 4, p. 87 (1932)

Applicata al modello atomico produce la spiegazione di vari fenomeni nuovi che erano stati osservati sperimentalmente

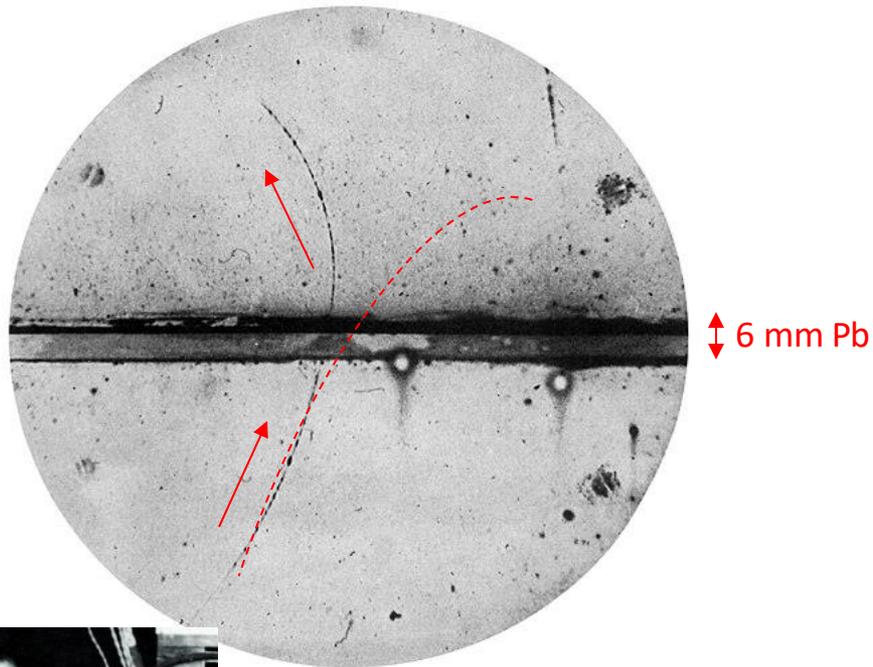
ma....

Ma c'è un problema nuovo

Dall'equazione emergono a sorpresa delle soluzioni inaspettate: **particelle con energia negativa!!!!**

Sono soluzioni assurde: le buttiamo via? Dirac cerca altre spiegazioni...

Una nuova scoperta sperimentale nelle particelle dei raggi cosmici!

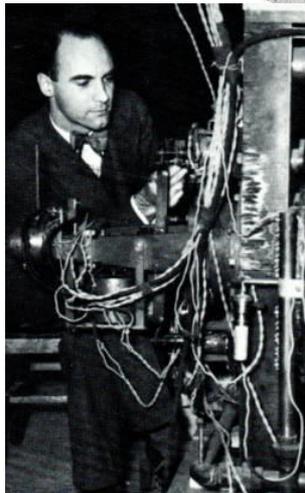


Una particella uguale in tutto e per tutto all'elettrone, ma con la carica elettrica opposta

Si capisce subito che questa corrisponde alle soluzioni dell'equazione di Dirac che apparentemente venivano con energia negativa

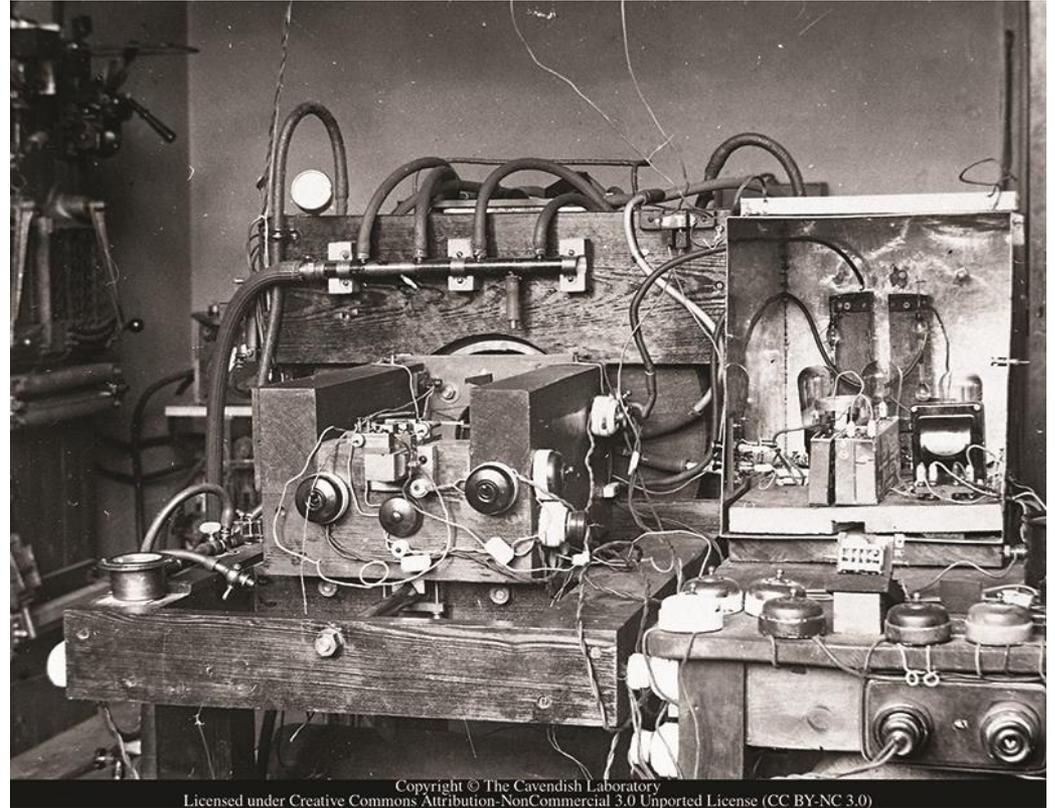
*C. Anderson 1932
(Nobel 1936)*

Le particelle di anti-materia!





Giuseppe (Beppo) Occhialini
Patrick Blackett



Copyright © The Cavendish Laboratory
Licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License (CC BY-NC 3.0)

La coesistenza degli stati quantistici

La funzione d'onda descrive un sistema che può coesistere in più stati diversi.

Per esempio se un sistema ammette i livelli Energetici E_1 ed E_2 è possibile definire uno stato che sia una combinazione dei due. Questo è descritto dalla funzione d'onda

$$\psi = a \varphi(E_1) + b \varphi(E_2) \quad \text{purchè} \quad |a|^2 + |b|^2 = 1$$

I due livelli coesistono, ma all'atto della misura, troveremo il sistema o in E_1 con probabilità $|a|^2$ oppure in E_2 con probabilità $|b|^2$

Nell'atto della misura la funzione d'onda «**collassa**» o sullo stato 1, cioè $\phi(E_1)$, oppure sullo stato 2, cioè $\phi(E_2)$.
Processo irreversibile e immediato, non lineare

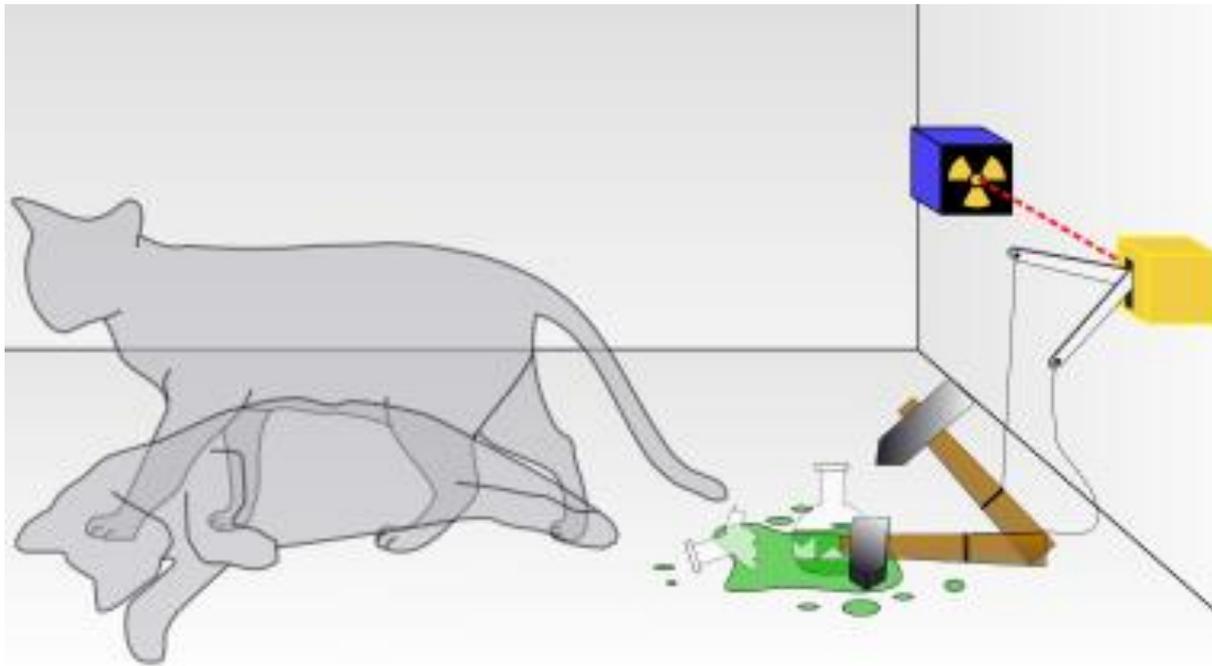
La coesistenza degli stati quantistici



Implicazioni per il mondo macroscopico?

Il famoso paradosso del Gatto di Schroedinger 1

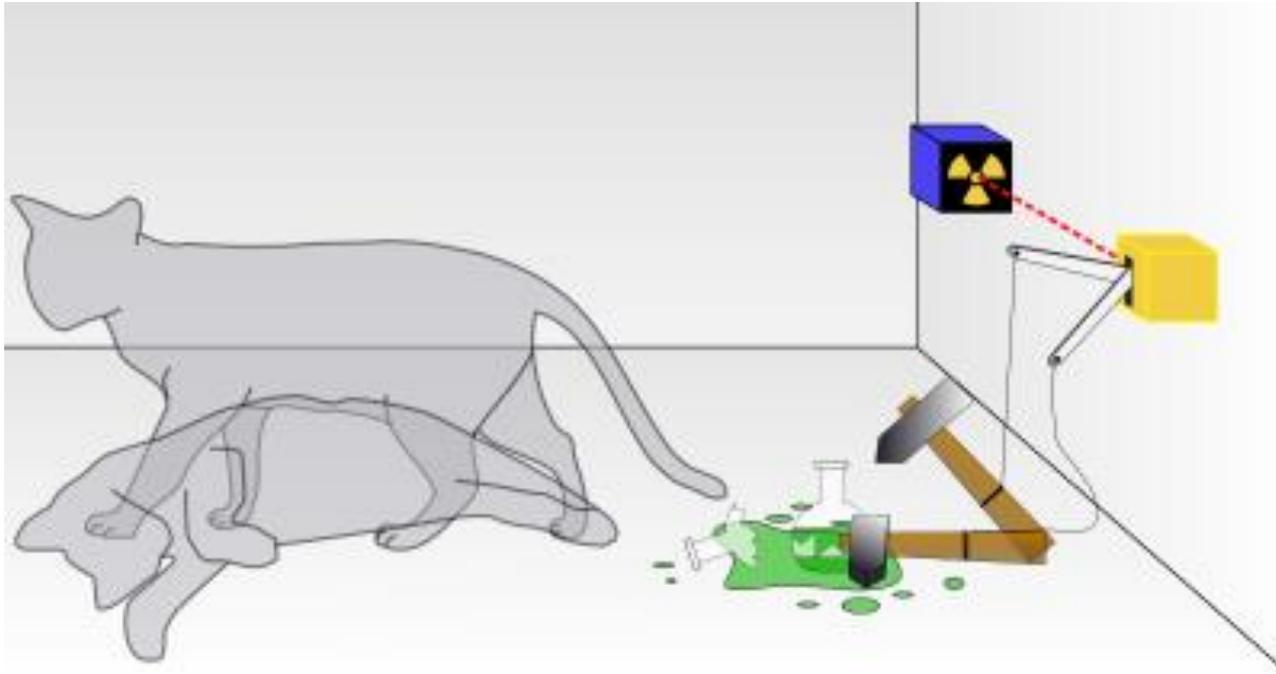
Un gatto viene posto in una scatola chiusa ed isolata visivamente ed acusticamente.



Dentro la scatola vi è una fiala di veleno che può essere rotta da un meccanismo azionato dal decadimento di un isotopo radioattivo.

Il famoso paradosso del Gatto di Schroedinger 2

In meccanica quantistica, dopo un tempo t , l'isotopo è in una sovrapposizione di stati: decaduto e non-decaduto



Possiamo parlare di sovrapposizione di stati Gatto Vivo + Gatto Morto?

Al momento della misura (apro la scatola) faccio collassare la funzione d'onda o su Gatto Vivo o su Gatto Morto
Ovviamente ridicolo nel mondo macroscopico

Il famoso paradosso del Gatto di Schroedinger 3

Oggi questo paradosso è risolto nel quadro di una teoria chiamata «Teoria della Decoerenza»

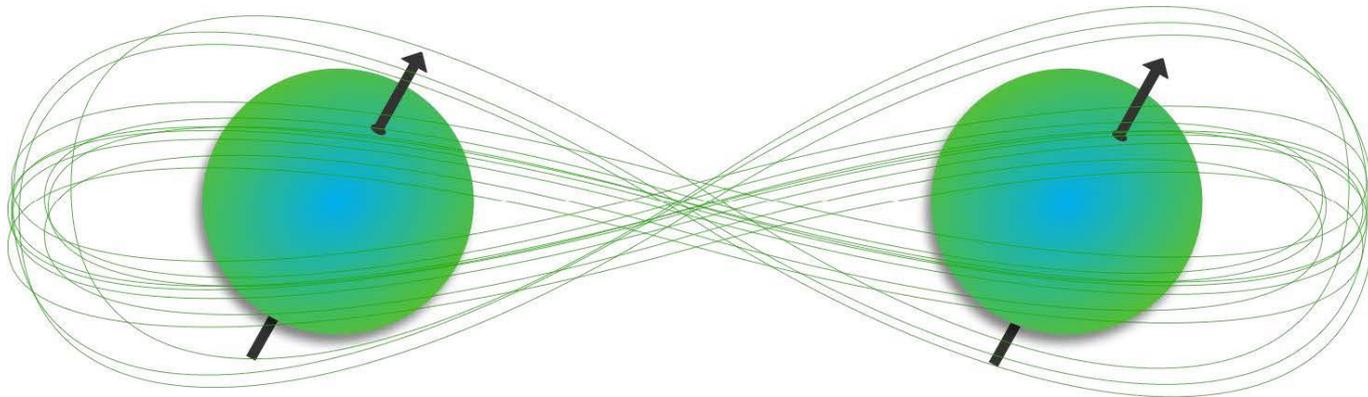
Questa spiega come nell'interazione di un sistema quantistico con il mondo macroscopico gli effetti di interferenza quantistica si diluiscono in modo tale che una miscela di stati quantistici diventa una semplice miscela statistica (il gatto ha la probabilità X di essere vivo e quella Y di essere morto)

Non e' una teoria ancora completa, e **il problema della Misura Quantistica non è completamente risolto**

Il problema dell' "entanglement" quantistico

In Italiano si potrebbe tradurre come "aggrovigliamento"

In meccanica quantistica, due particelle sono in uno stato "entangled" se la misurazione di una particella influenza lo stato dell'altra, anche se classicamente non c'è alcuna interazione diretta.



Il problema dell' "entanglement" quantistico

Esistono processi fisici che generano due particelle dotate di proprietà correlate. Per esempio, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$



I due fotoni prodotti si allontanano in direzioni opposte con uguale energia e spin opposti. **Ogni fotone, quantisticamente, coesiste in 2 stati di «spin» che hanno ciascuno la probabilità del 50%** ma la misura dello spin di uno dei fotoni determina immediatamente lo spin del secondo fotone, anche se sono distanti!

Torniamo forse all'interazione a distanza proibita dalla relatività ristretta? Sembra di no, ma l'interpretazione delle cose non è tuttora completamente condivisa dalla comunità scientifica...

Il problema dell' "entanglement" quantistico

Einstein e collaboratori hanno cercato invano di ottenere una teoria migliore (Meccanica Quantistica con Variabili Nascoste), ma alla fine sono state confutate dai risultati sperimentali...

Teoria ed esperimento corroborano la conclusione che **l'universo ammette l'esistenza di interconnessioni «non-locali»** → **spazio non può più essere concepito come in passato**. Secondo la **Meccanica Quantistica**, la connessione fra 2 particelle «entangled» può permanere anche se le due particelle si trovano agli estremi opposti dell'universo. Dal punto di vista della loro correlazione è come se fossero l'una accanto all'altra: **lo spazio tra loro non conta**.

Implicazioni filosofiche

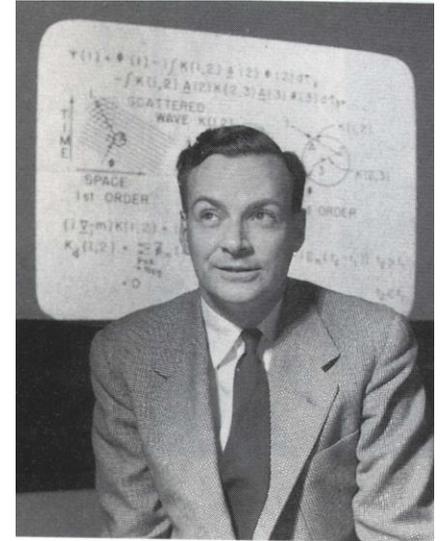
Questo, unitamente all'introduzione di considerazioni basate su probabilità e indeterminazione, ha scosso profondamente tutta la critica epistemologica moderna

Dibattito filosofico intenso, che include anche il rapporto fra osservatore e realtà fisica

I fisici per lo più assumono l'atteggiamento pragmatico riassumibile in uno slogan: **«Zitto e calcola!»**

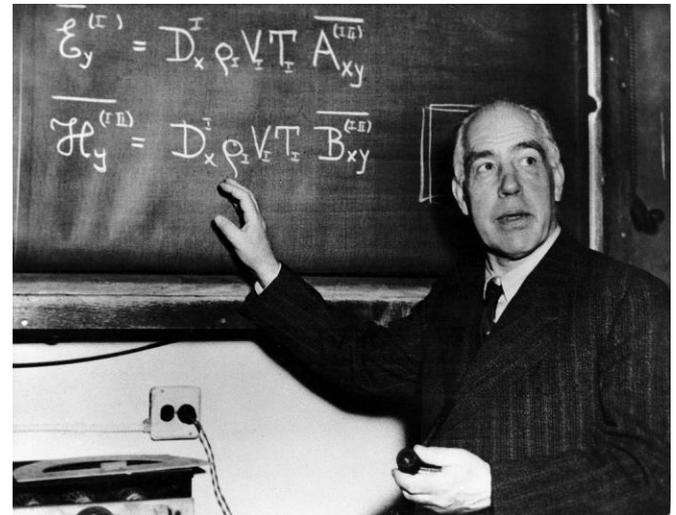
"I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics."

Richard P. Feynman



"Anybody who thinks they understand quantum physics is wrong."

Niels Bohr



Il contributo italiano allo sviluppo della Meccanica Quantistica

Prima della seconda guerra mondiale:

Fermi:

- la meccanica statistica quantistica delle particelle a spin $\frac{1}{2}$
- calcolo delle interazioni e decadimento di alcune particelle

Majorana:

- descrizione alternativa a quella di Dirac

Negli anni 50 e successivi:

- tanti contributi alla «teoria dei campi quantistici» e della sua applicazione
- tanti contributi a due figlie della meccanica quantistica: la **fisica nucleare** e la **fisica delle particelle elementari**

E. Majorana Nuovo Cimento 14 (1937) 171

ETTORE MAJORANA

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE
E DEL POSITRONE

Estratto dal *Nuovo Cimento*, Anno XIV, N. 4

Aprile 1937



NICOLA ZANICHELLI EDITORE

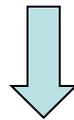
BOLOGNA 1937-XV

Le evoluzioni dopo gli anni '30 e '40

Cosa è una forza a livello quantistico?

Passaggio dalla trattazione di singola particella a quello di molte particelle (e di numero variabile di particelle)

Estensione del concetto classico di Campo alla Meccanica Quantistica: **la Teoria Quantistica dei Campi**



La moderna Fisica delle Particelle Elementari

E c'è un problema ancora aperto:

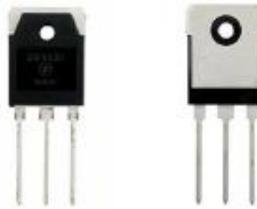
come fare una teoria quantistica della gravitazione?

Fisica Quantistica e Tecnologia

Nonostante tutte queste stranezze contro-intuitive, la meccanica quantistica ha resistito a tutti i tentativi di confutazione, e ha permesso di ottenere un enorme quantità di ricadute, soprattutto nelle discipline che riguardano la **“Struttura della Materia”**



Laser



Transistor



GPS



Touch Screen

Prima rivoluzione
quantistica

=

“siamo in grado di sfruttare la meccanica quantistica per dominare il comportamento di un sistema di molti atomi”

John Bardeen, William Shockley, Walter Brattain Nobel 1956



“...for their researches on semiconductors and their discovery of the **transistor effect**”

➡ Sostituzione delle valvole termoioniche

➡ **Miniaturizzazione!**

Sta iniziando la Seconda Rivoluzione Quantistica

“siamo in grado di sfruttare la meccanica quantistica per dominare il comportamento di un **singolo** oggetto quantistico”

L'esempio più importante è l'utilizzo della coesistenza degli stati quantici per un nuovo salto nella tecnologia dell'informazione: il **Quantum Computing**

dal **bit**  al **qubit**
che può avere i valori 0 o 1 che può avere **contemporaneamente**
i valori 0 e 1

Un registro di 250-qubit, per capirci, sarebbe capace (in teoria!!!) di memorizzare più numeri contemporaneamente di quanti siano gli atomi presenti nell'universo conosciuto

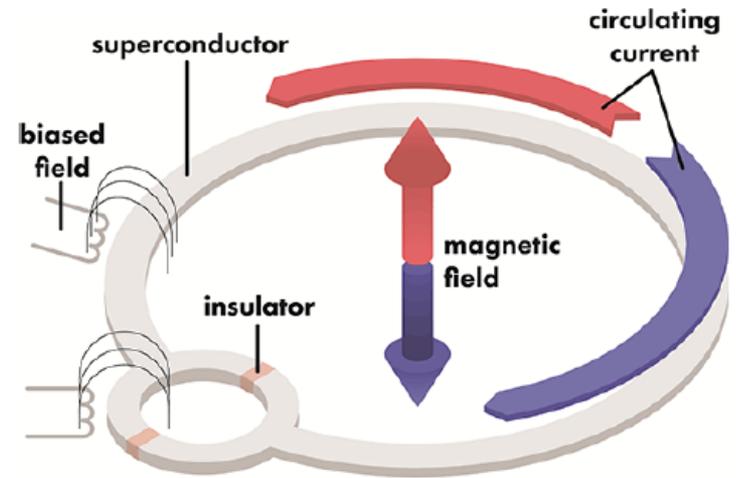
Esempio di come fare un Qubit

I qubit superconduttori sono anelli di materiale superconduttore attraversati da corrente elettrica

Gli stati 0 e 1 sono identificati con il flusso della corrente elettrica

Il materiale con cui sono realizzati, il Niobio, è un materiale superconduttore che, se raffreddato a temperature prossime allo 0 assoluto, diventa in grado di essere attraversato dalla corrente elettrica in entrambe le direzioni contemporaneamente.

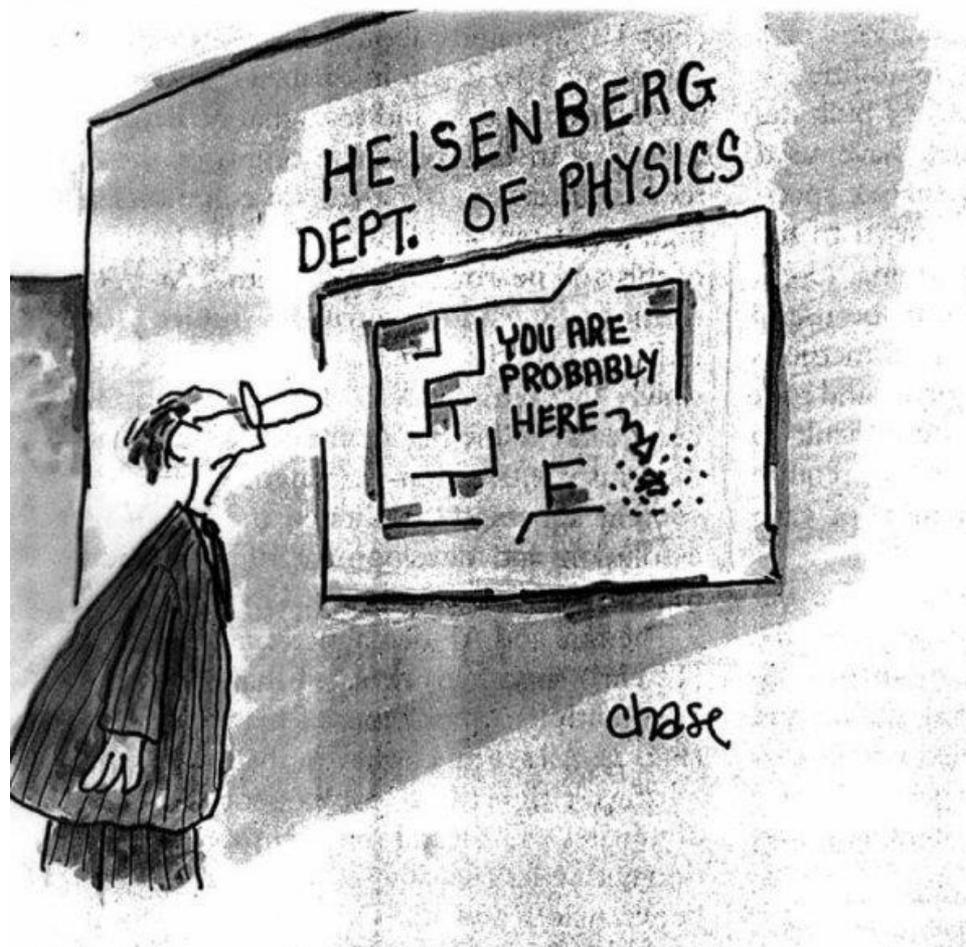
In questo modo, il qubit superconduttore è in grado di riprodurre effetti di sovrapposizione quantistica



IBM Q

D:WAVE
The Quantum Computing Company™

Grazie per
l'attenzione!



Associazione
**UNIVERSITA'
DEL TEMPO LIBERO
DI CARAVAGGIO** *aps*

Piazza Morettini (Centro Sportivo)
Tel 339 7091963
www.utlcaravaggio.org
utlcaravaggio@gmail.com

Per qualsiasi domanda sul tema:
giuseppe.battistoni@mi.infn.it