



# Quantum

una introduzione alla Fisica Quantistica

presentata da giulio nardon

5 novembre 2025

# Il parere di un esperto...



... penso di poter affermare con sicurezza che **nessuno capisce la meccanica quantistica.**

Richard Feynman, 1965



# La Fisica classica: ma cos'è?

È uno strumento di **conoscenza** e **previsione** molto potente che, fino all'inizio del XX secolo, ha avuto l'ambizione e la pretesa di saper descrivere il mondo che ci circonda attraverso leggi matematiche DETERMINISTICHE.

Le sue previsioni possono essere indefinitamente rese più precise riducendo via via gli errori di misura sperimentali sui dati di partenza.

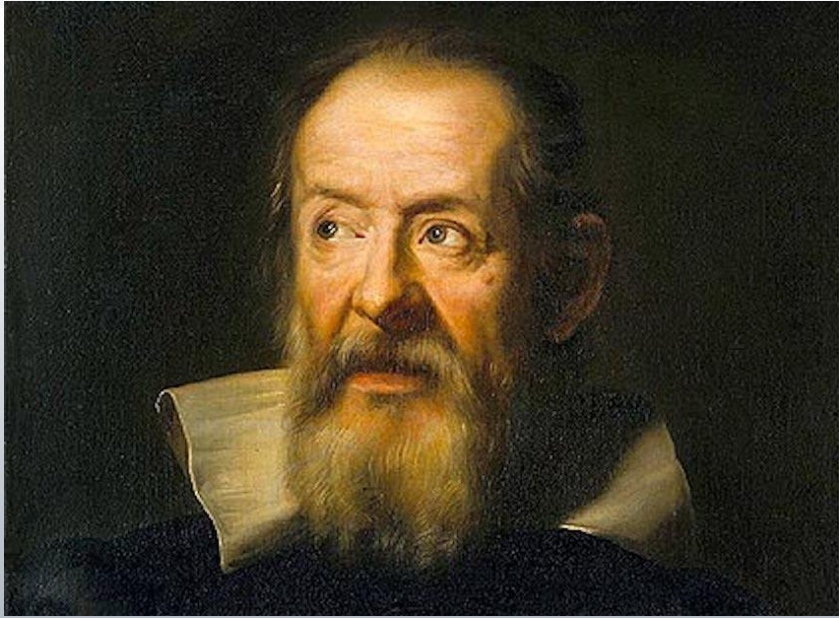
Es.: 
$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{V}t$$

Meglio misuro  $\mathbf{S}_0$  e  $\mathbf{V}$  e più correttamente calcolerò la posizione futura  $\mathbf{S}$  ad un istante  $t$ .

**Errore piccolo ↔ migliore conoscenza**



# La Fisica classica

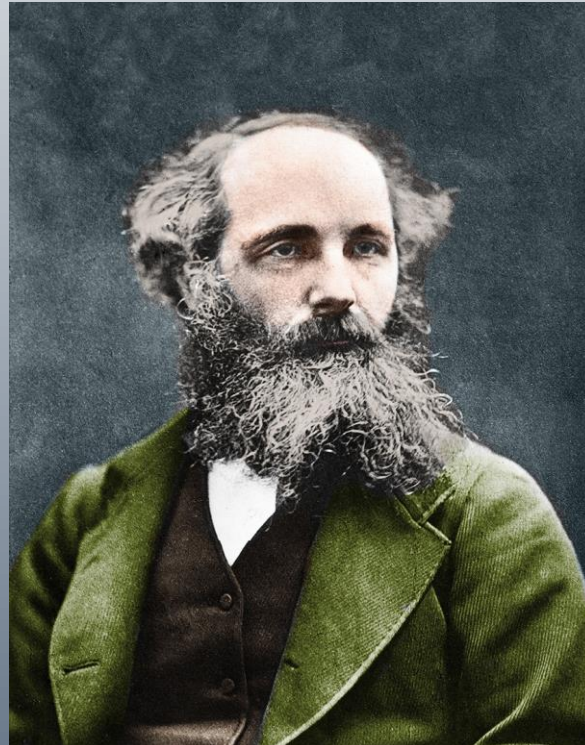


Galileo Galilei  
(1564 – 1642)



Sir Isaac Newton  
(1643 – 1727)

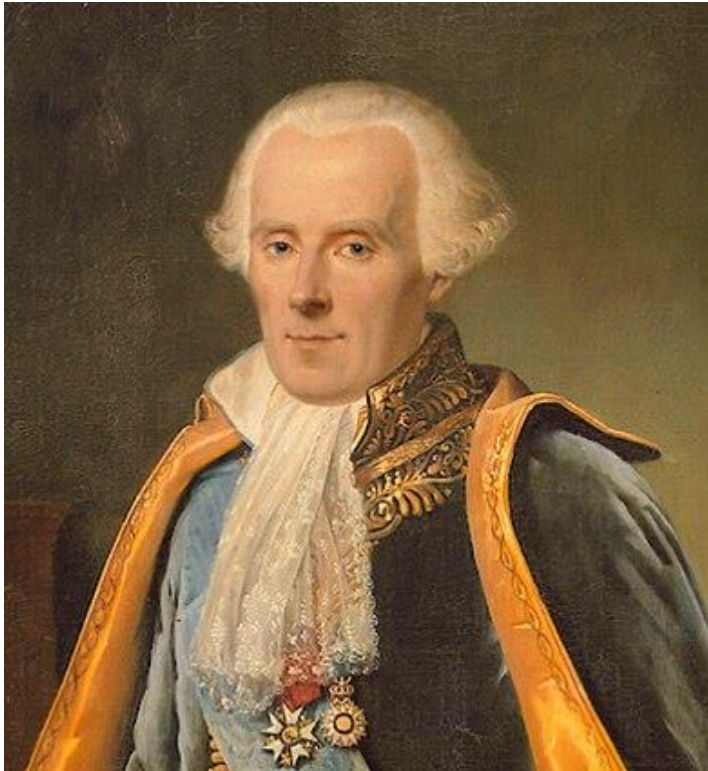
James Clerk Maxwell  
(1831 – 1879)





# Pierre Simon, marchese de Laplace

(1749 – 1827)



«Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come **l'effetto del suo passato** e **la causa del suo futuro**. Un intelletto che ad un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto nulla sarebbe incerto ed il futuro proprio come il passato sarebbe evidente davanti ai suoi occhi»



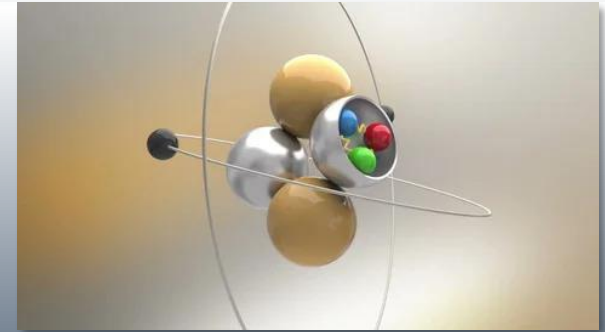
# La Fisica classica: le componenti della realtà



## 1. Particelle

La materia è fatta di ATOMI.

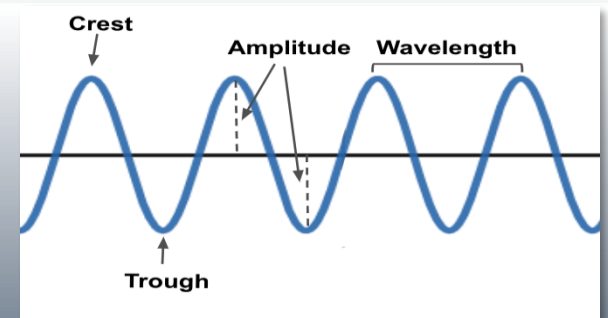
Le particelle sono localizzate  
(occupano un volume piccolissimo e la loro posizione è perfettamente definita).



## 2. Onde

La luce è fatta di ONDE.

Le onde non sono localizzate  
(non è possibile definire dove si trovano).



... e, a proposito di Onde...

... come lo sappiamo che la Luce è un'Onda?

È possibile dimostrarlo?



# Teorie contrapposte



Secondo H., la luce è composta da onde che si propagano in ogni direzione.

Christiaan Huygens  
(1629 – 1695)



Sir Isaac Newton  
(1643 – 1727)

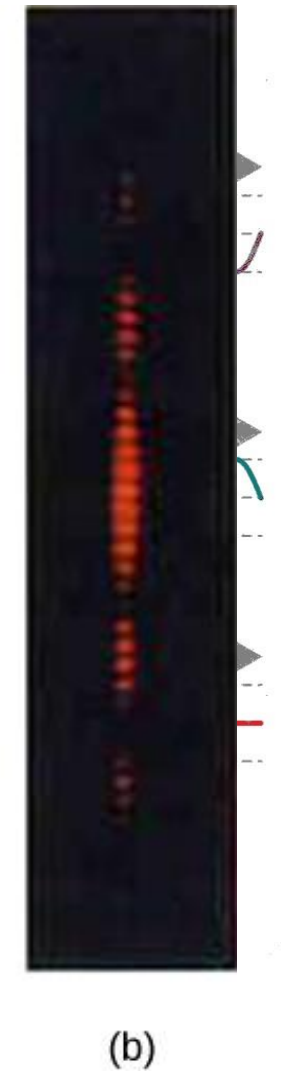
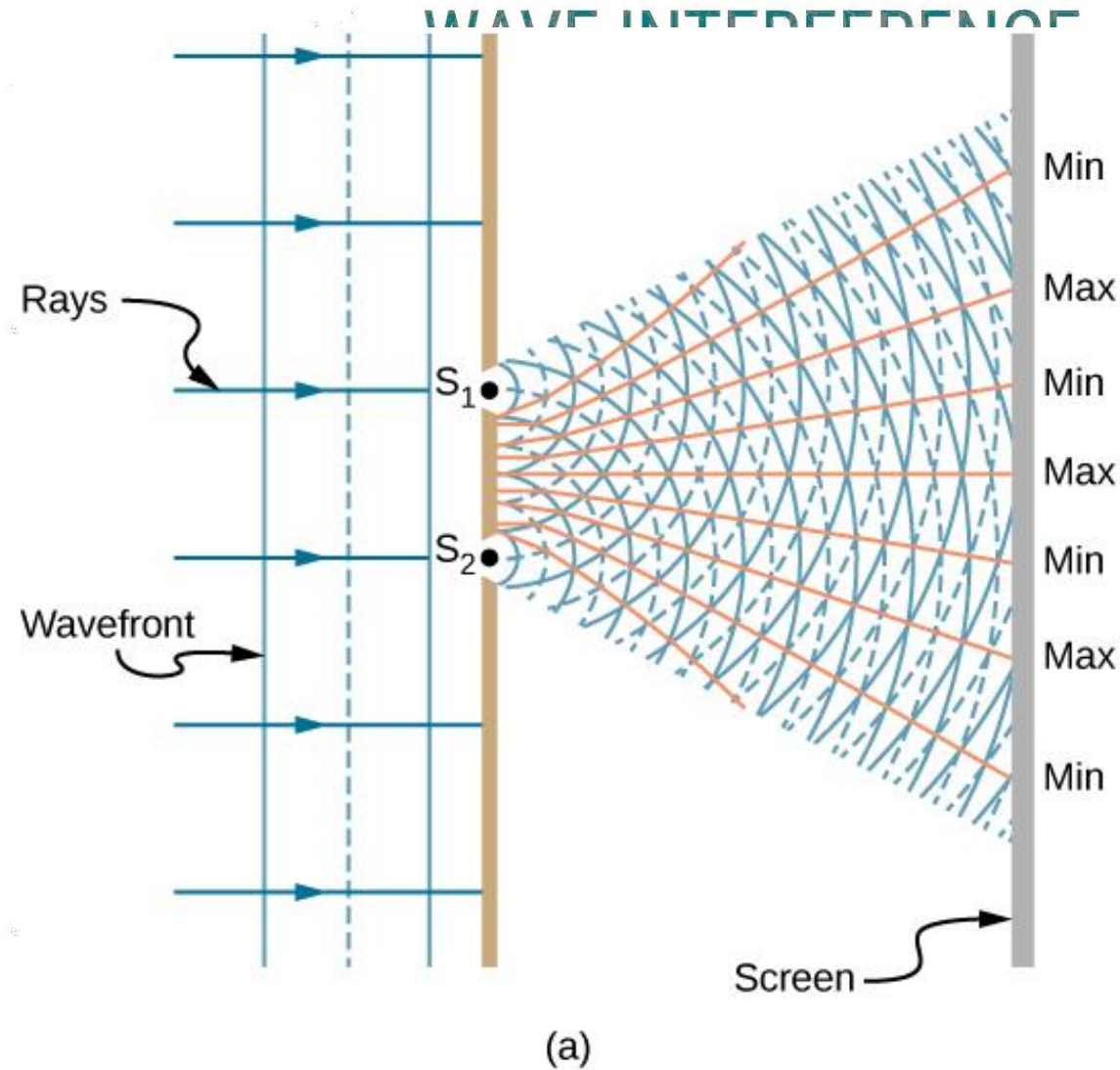
Secondo N., la luce è composta da corpuscoli che si propagano in linea retta.



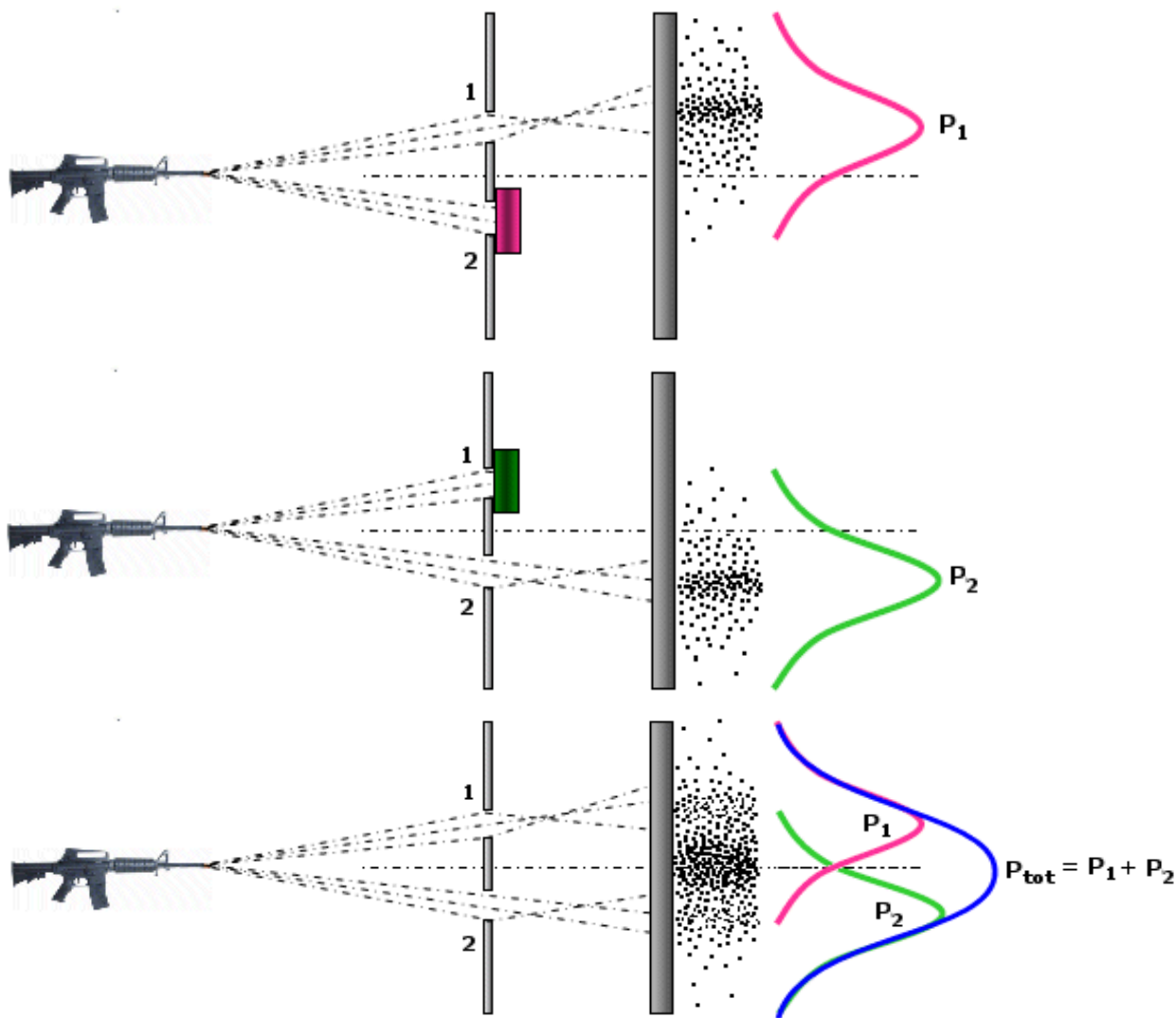


# Se la luce è un'onda (fisica classica)

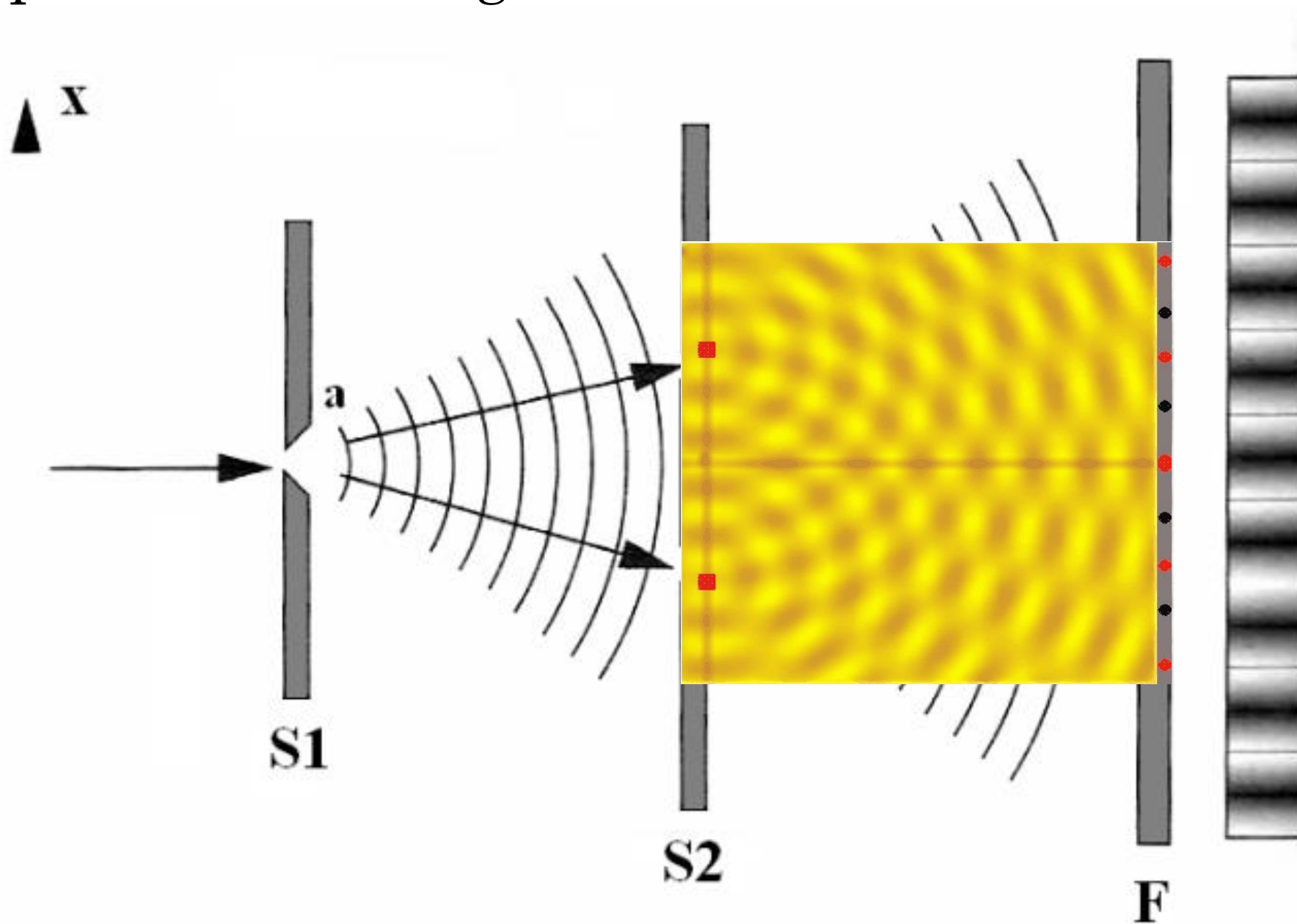
Fenomeni di  
interferenza tra  
onde



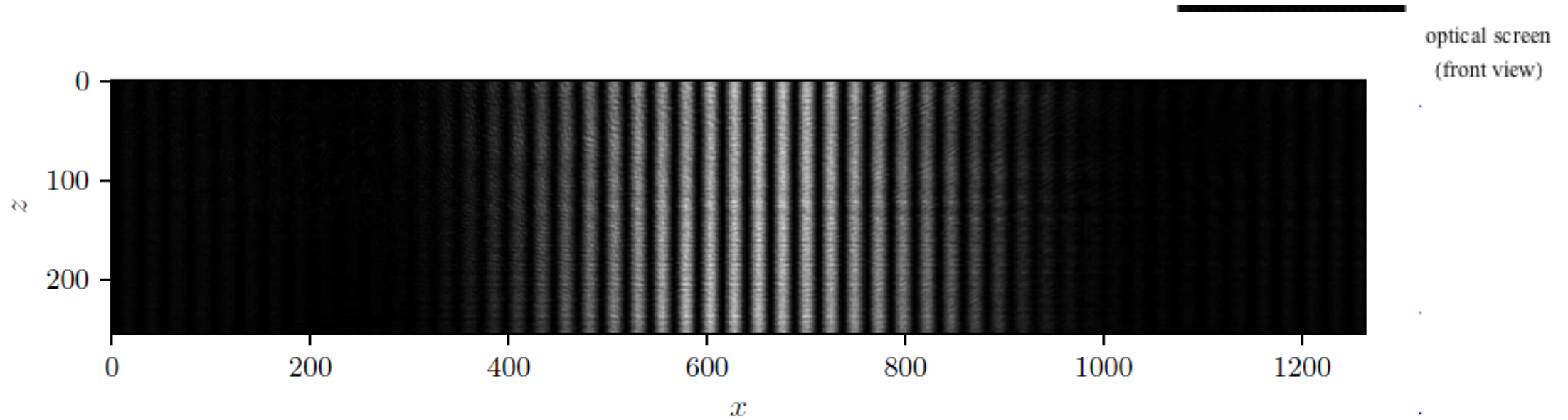
Se la luce è un corpuscolo (fisica classica)



# Esperienza di Young (1801)



# Esperienza di Young (1801)



Quindi: la luce è un'Onda!

# Scricchiolii... i primi problemi

L'anno 1900 segna il passaggio a un nuovo tipo di Fisica

All'inizio si trattò solo di piccoli (?) problemi di spiegazione di esperimenti (apparentemente) poco importanti

Oggi riconosciamo questo momento come lo spartiacque di una **Rivoluzione**, quella della **Fisica Quantistica**





# 1. Il corpo nero (1900)



Max Planck (1858 – 1947)

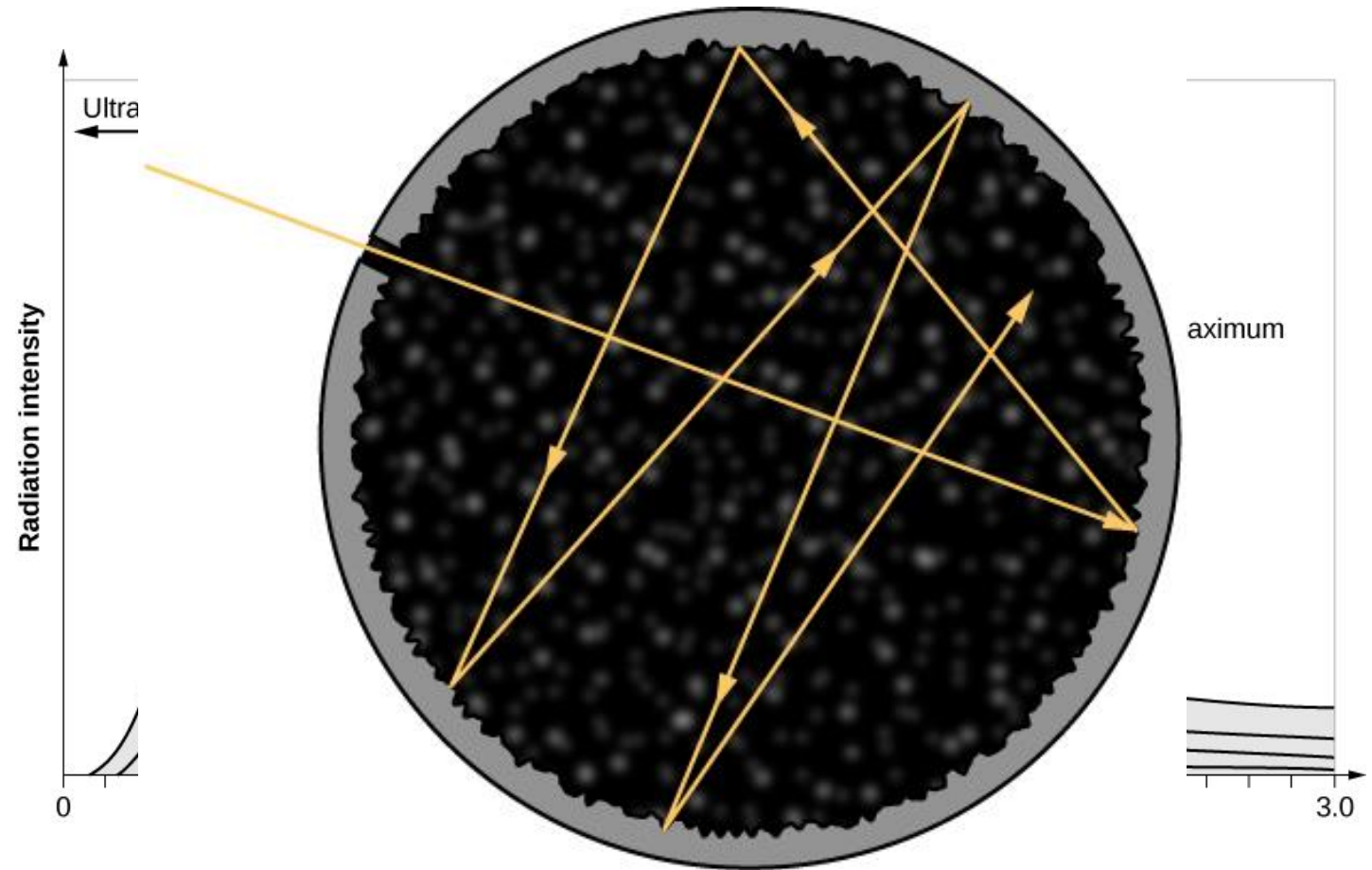
Nobel per la Fisica 1918

Un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente e non la riflette. Per questo motivo è detto "nero".

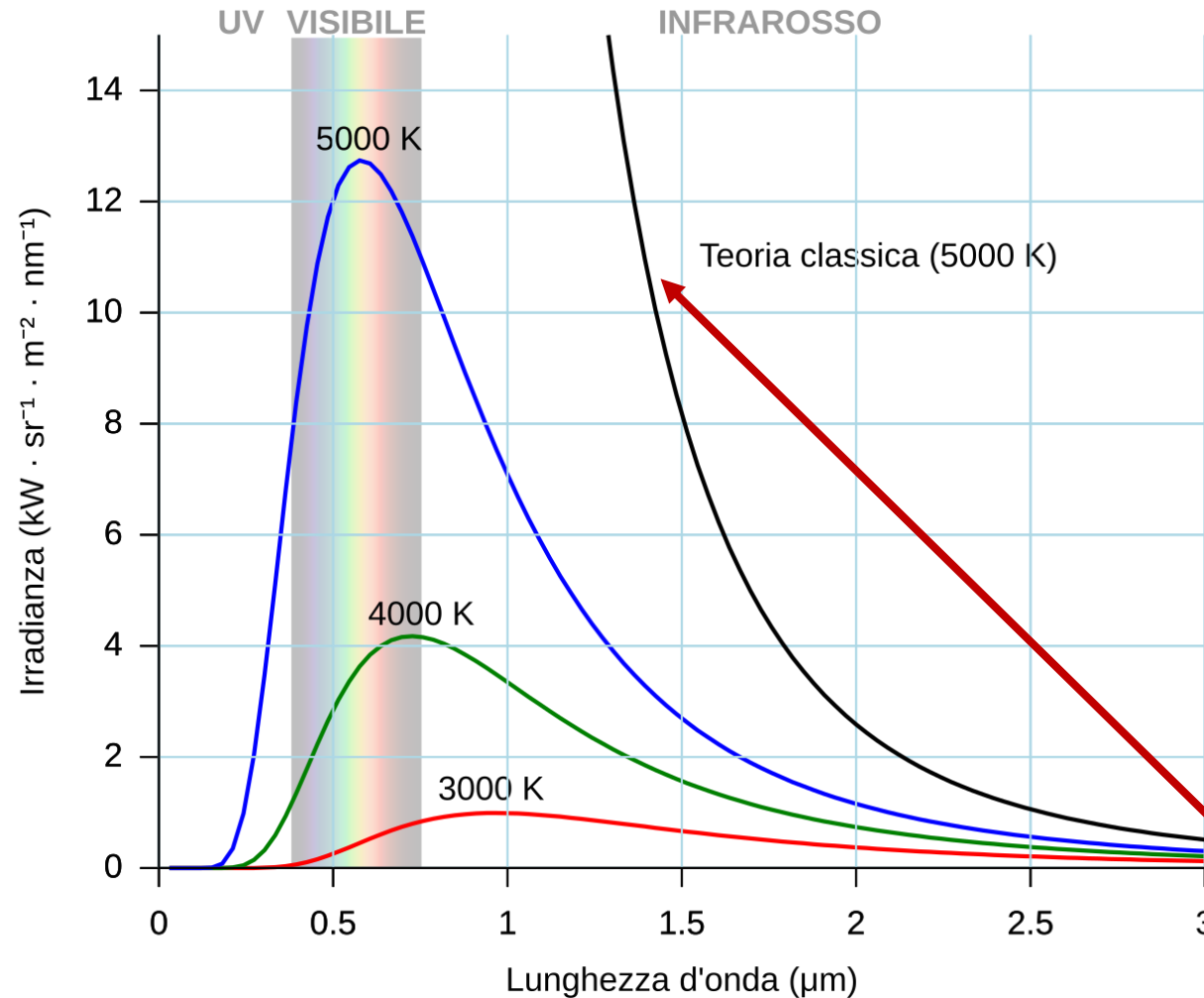
Per la legge di conservazione dell'energia il corpo nero re-irradia tutta l'energia assorbita.

*In natura non esistono corpi che soddisfano perfettamente tale caratteristica.*

Radiazione di corpo nero a diverse temperature



# Previsioni della fisica classica per il corpo nero

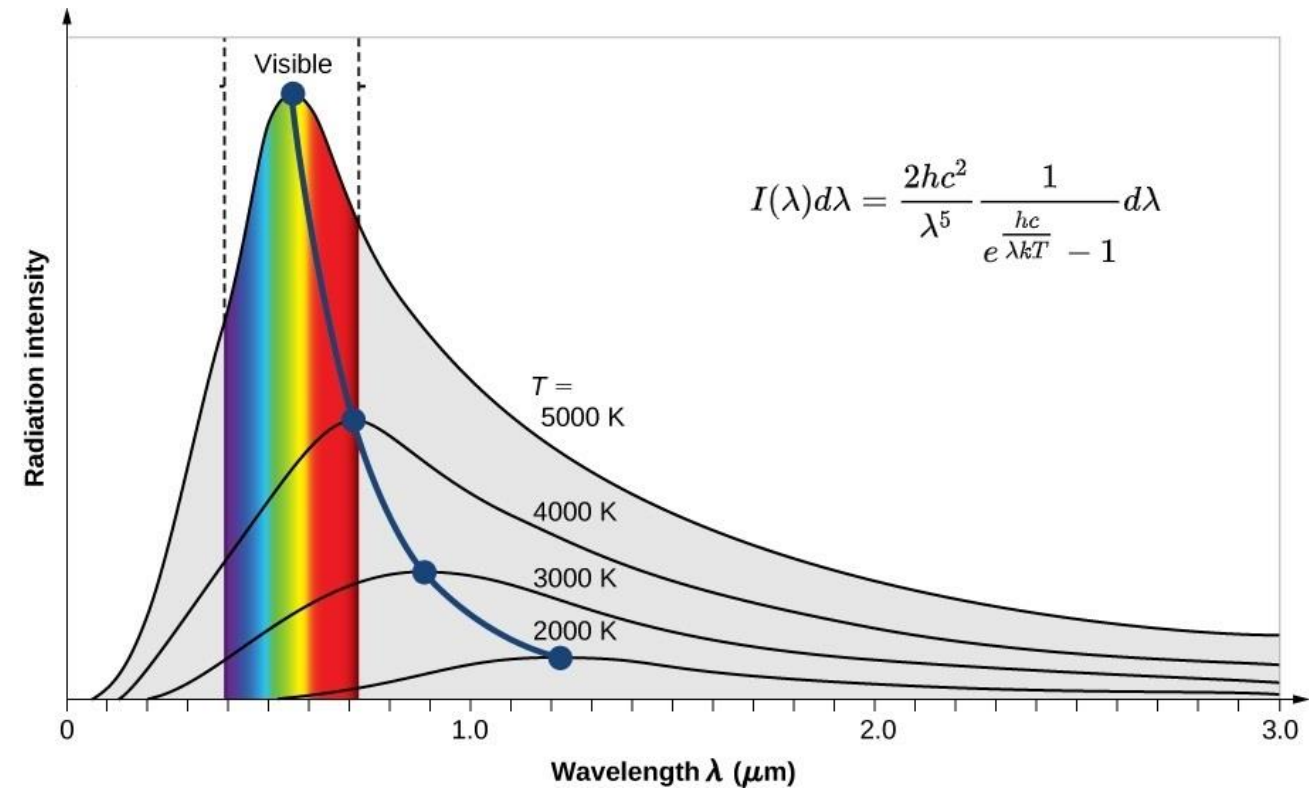


Il modello “classico” per il corpo nero fornisce previsioni del tutto errate sulle lunghezze d’onda inferiori (verso il violetto)

Esso prevede una **quantità infinita** di energia emessa dalla cavità, a qualunque temperatura si trovi («catastrofe ultravioletta»).

# Le ipotesi di Planck

L'ipotesi di Planck prevede che le pareti si comportino come piccoli oscillatori e.m. con frequenza caratteristica. Essi hanno (per ipotesi) due caratteristiche:



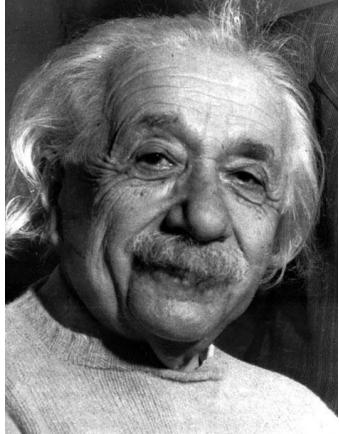
1. Gli oscillatori **non possono avere qualsiasi valore di energia**, ma solo quelli dati da

$$E = h \times n \times \nu \quad h = 6,626\,069\,57(29) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135\,628\,52 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

dove  $\nu$  (ni) è la frequenza di oscillazione,  $h$  è una costante (detta di Planck) e  $n$  è un numero che può assumere solo valori interi positivi.

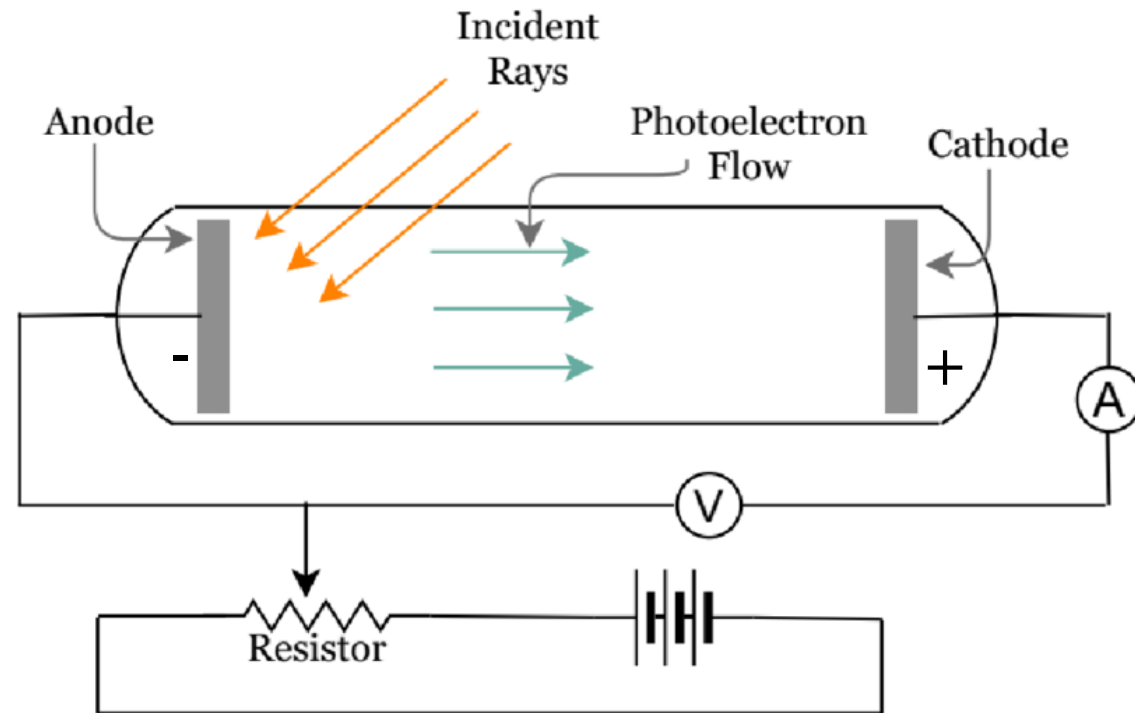
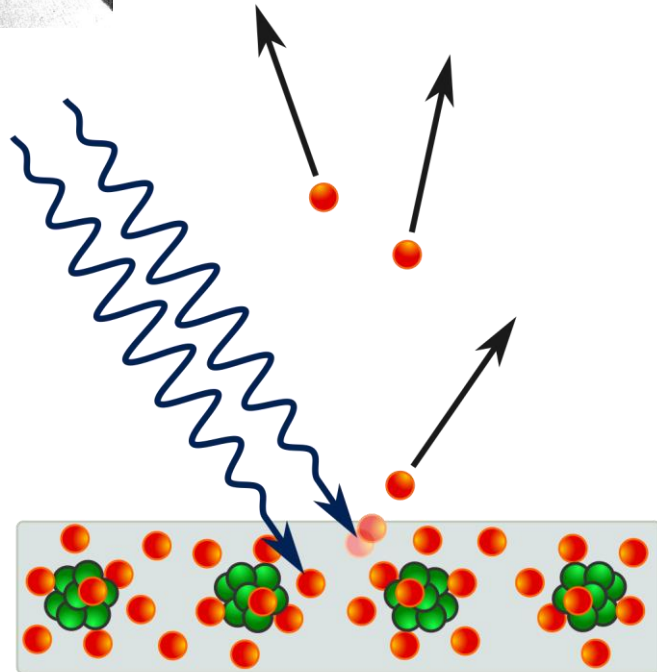
2. Gli oscillatori **non emettono energia secondo quantità continue, ma solo “a salti”**. Tali salti vengono compiuti solo quando un oscillatore passa da uno stato di energia a un altro. Finché un oscillatore rimane in uno dei suoi stati quantizzati esso non emette energia. Questa energia QUANTIZZATA verrà chiamata **fotone**.

## 2. L'effetto fotoelettrico (1905)



Albert Einstein (1879 – 1955)

Nobel per la Fisica 1921



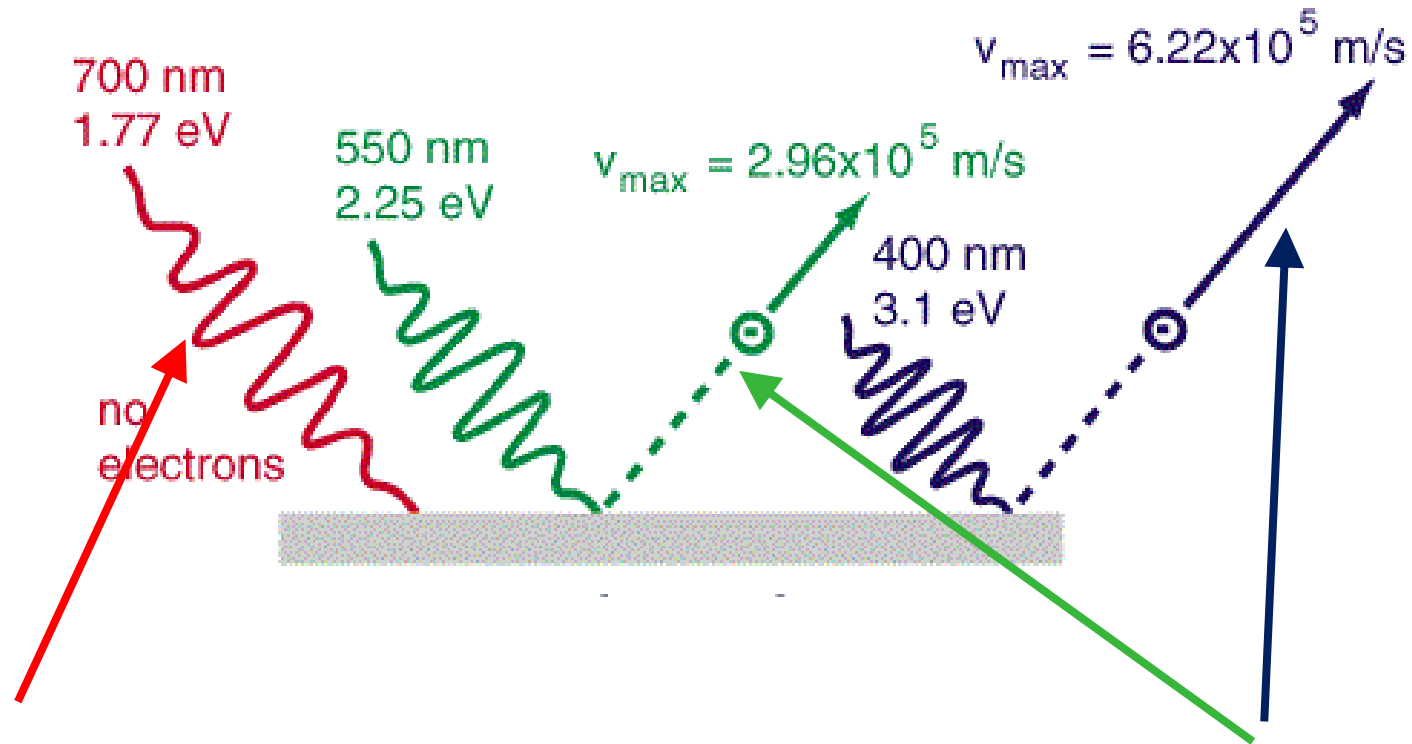
# Comportamenti (teorici) dell'effetto fotoelettrico nella fisica classica



1. Teoricamente l'energia cinetica dei fotoelettroni dovrebbe poter aumentare aumentando l'intensità del fascio di luce incidente.
2. L'effetto f.e. dovrebbe avvenire per qualsiasi frequenza della luce incidente, purché l'intensità della luce sia sufficientemente grande.
3. Un elettrone nel metallo riceverebbe energia dalla luce molto lentamente, potendo intercettare solo una piccolissima porzione del fronte dell'onda incidente.



# Strani comportamenti dei fotoelettroni



Sotto una frequenza minima non si ha corrente

Superata la frequenza minima l'intensità di corrente ( → **il numero di elettroni liberati** ) non dipende dall'intensità luminosa; cambia invece la velocità di tali elettroni

# Ipotesi di Einstein

La luce, *in determinate circostanze*, si comporta come se fosse concentrata in quantità finite e localizzate (particelle dette **fotoni**).

L'energia di un fotone è data da:

$$E = h \times \nu$$

Ne deriva che, per un fotone che colpisce il metallo:

$$h \times \nu = \Phi + E_{c \text{ max}}$$

$(\Phi = h \times \nu_0)$

Quindi: la luce è una Particella!

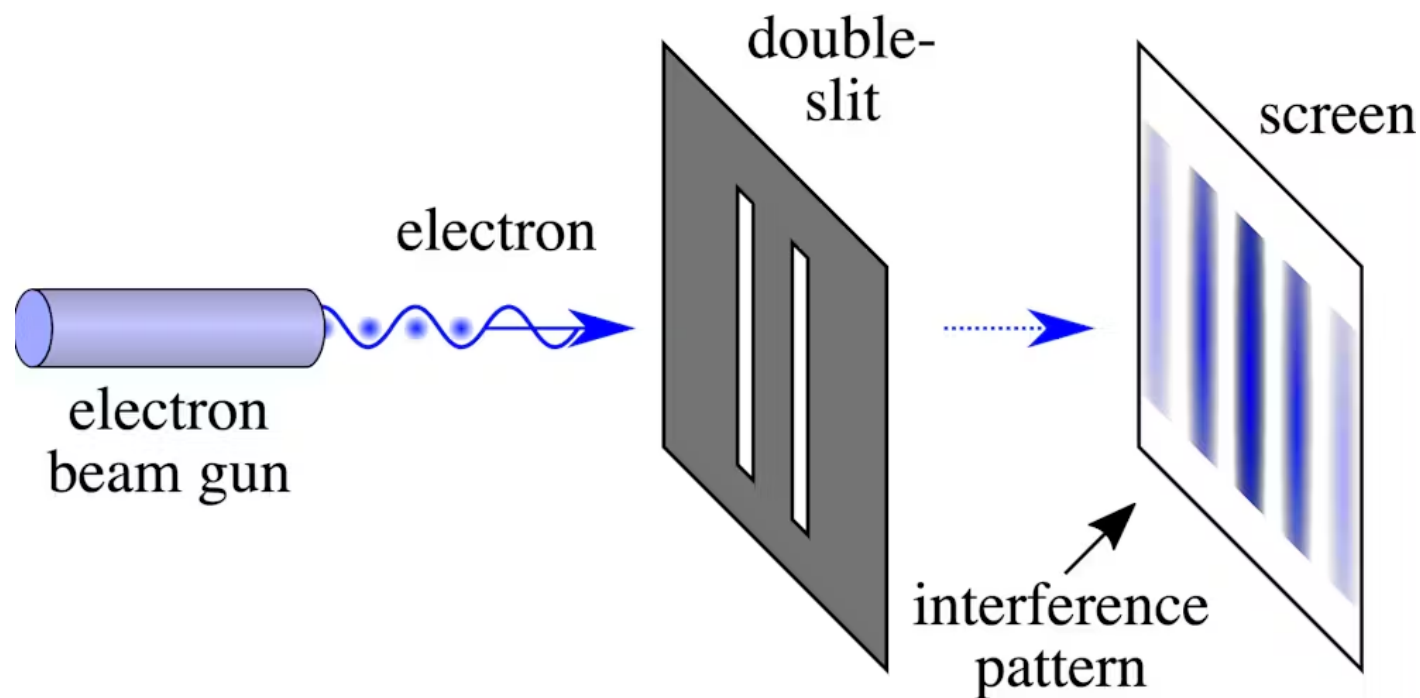


### 3. Onde materiali (1924)



Louis de Broglie (1892 – 1987)

Nobel per la Fisica 1929



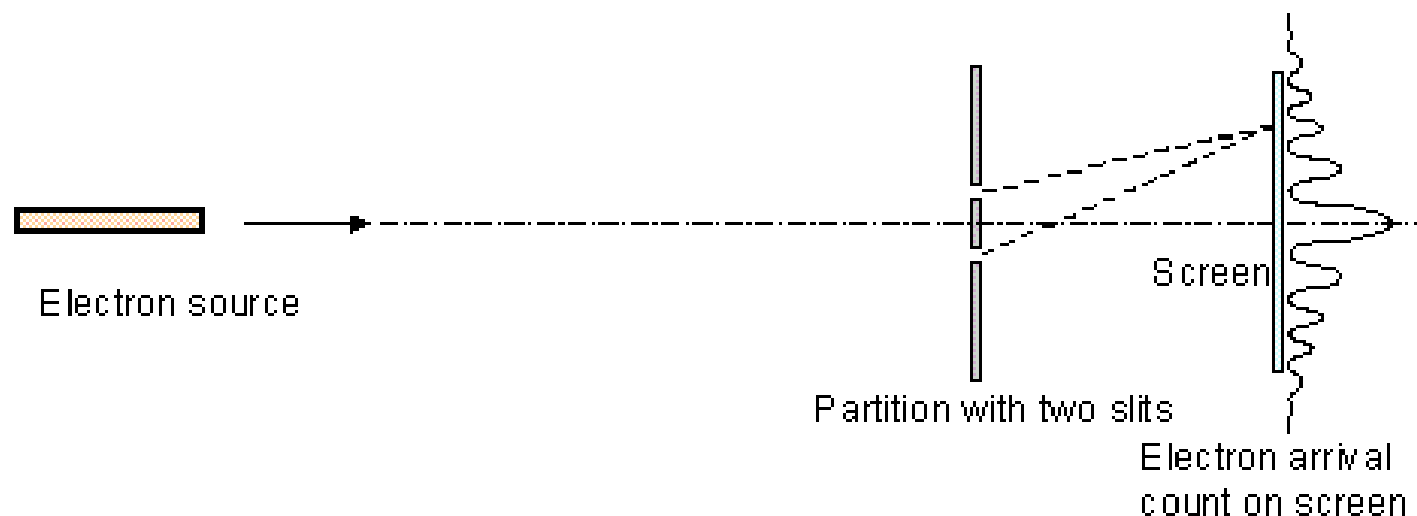
La frequenza di un'onda materiale è

$$\nu = E / h$$

La sua lunghezza d'onda è

$$\lambda = h / (m \times v)$$

# Interferenza di elettroni



Gli elettroni riproducono il comportamento della luce nell'esperienza di Young e subiscono interferenza

La materia *in alcune circostanze* può comportarsi da Onda!



# Riassumendo...



Si comporta come  
un'onda

Si comporta come  
una particella

Radiazione e.m. (luce)



Esperienza di Young  
(Fisica classica)



Effetto fotoelettrico

Particelle (elettroni)



Esperienza di  
De Broglie



Fisica classica



# È tutto chiaro?



È proprio per la (giustificata) fama di incomprensibilità che la Fisica Quantistica si è guadagnata che essa viene usata da molti cialtroni e/o venditori di fumo per «spiegare» altri fenomeni di cui non conosciamo il funzionamento:

- La coscienza
- Libero arbitrio
- Spiritualità
- ...

Meccanismo logico:

Ti spiego qualcosa (che non capisci) usando qualcos'altro (che capisci ancora meno, ma che suona MOLTO scientifico...)

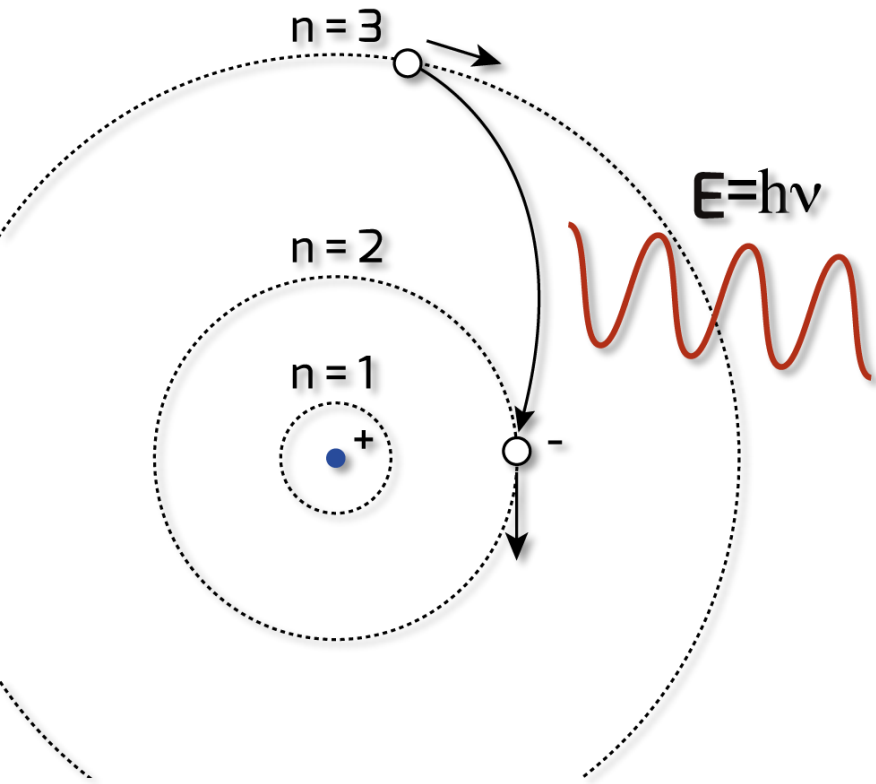
Quando incontrate un testo o un video con un titolo del tipo: «La fisica dei Quanti e (X)»

**DIFFIDATE!**

# Fermiamoci un attimo...

Abbiamo capito che le descrizioni della Fisica Classica (Particelle, Onde) non sono più adeguate per descrivere la realtà al livello più elementare (sotto le dimensioni dell'atomo).

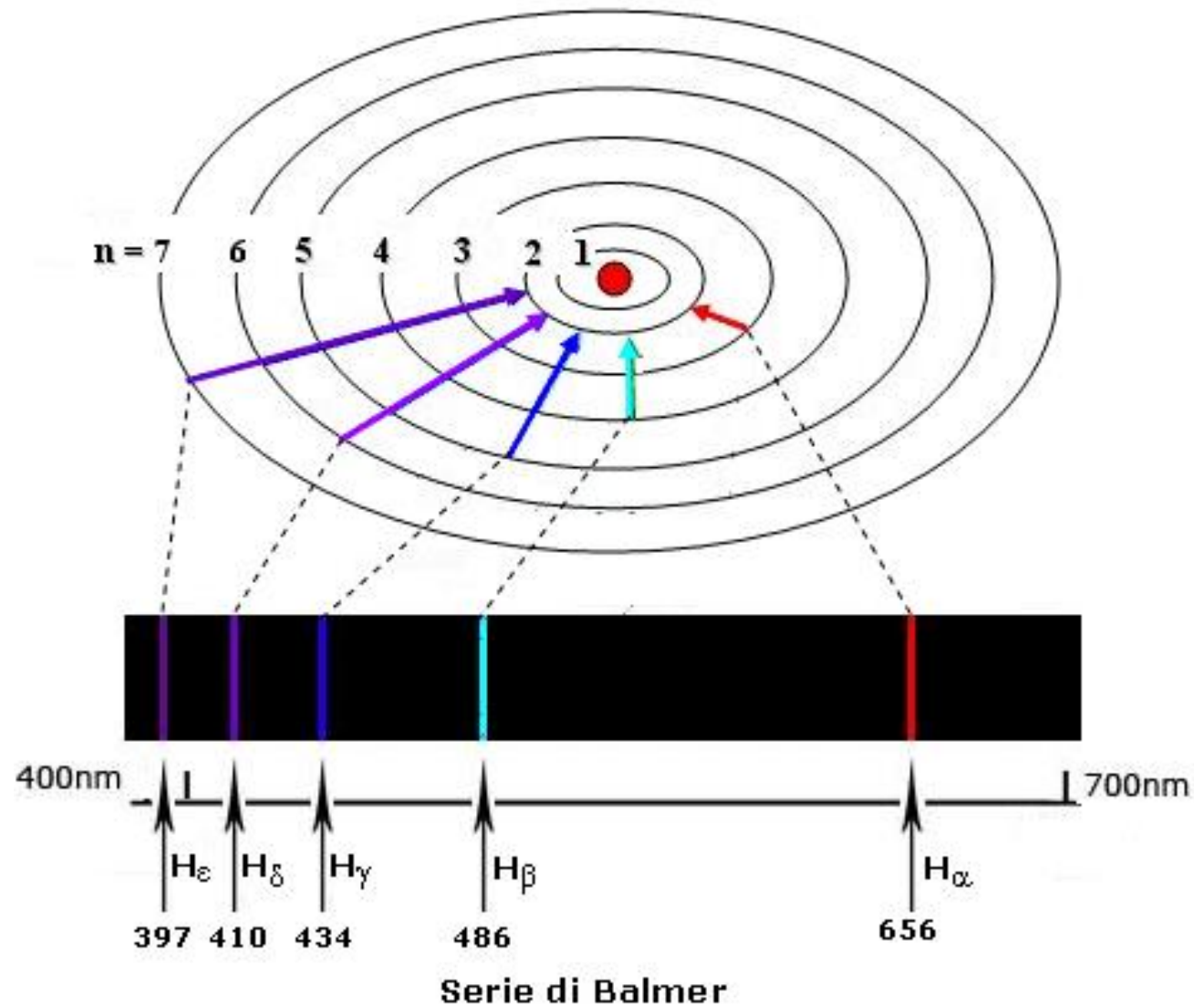
A questo livello, possiamo trattare l'energia come **un'onda quando si propaga**, ma dobbiamo considerarla **una particella quando interagisce con altre particelle**.



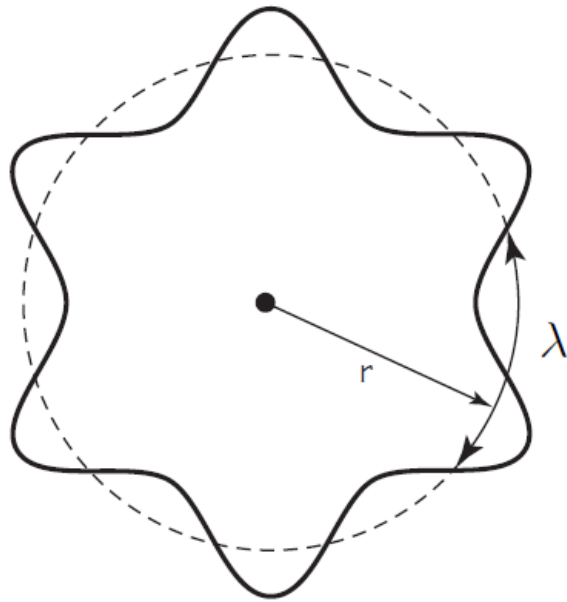
Considerare gli elettroni secondo un modello planetario in rotazione attorno a un nucleo non è adeguato a descriverne in comportamento. Essi possono possedere solo alcuni livelli di energia (essa si definisce perciò quantizzata) a seconda degli **orbitali** che occupano, e nel passare da un livello a un altro possono emettere o assorbire solo le quantità esattamente pari alla differenza energetica tra i due livelli.



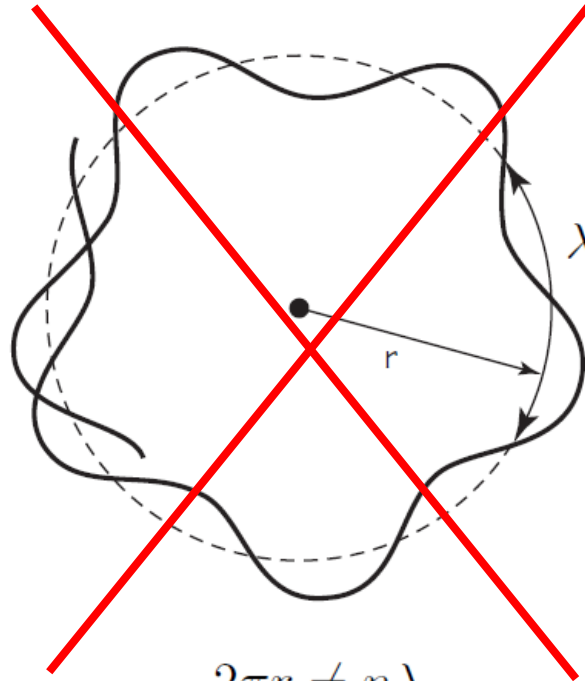
# Fermiamoci un attimo...



# Gli elettroni nell'atomo di Bohr



$$2\pi r = 6\lambda$$



$$2\pi r \neq n\lambda$$



Niels Bohr (1885 – 1962)

Nobel per la Fisica 1922

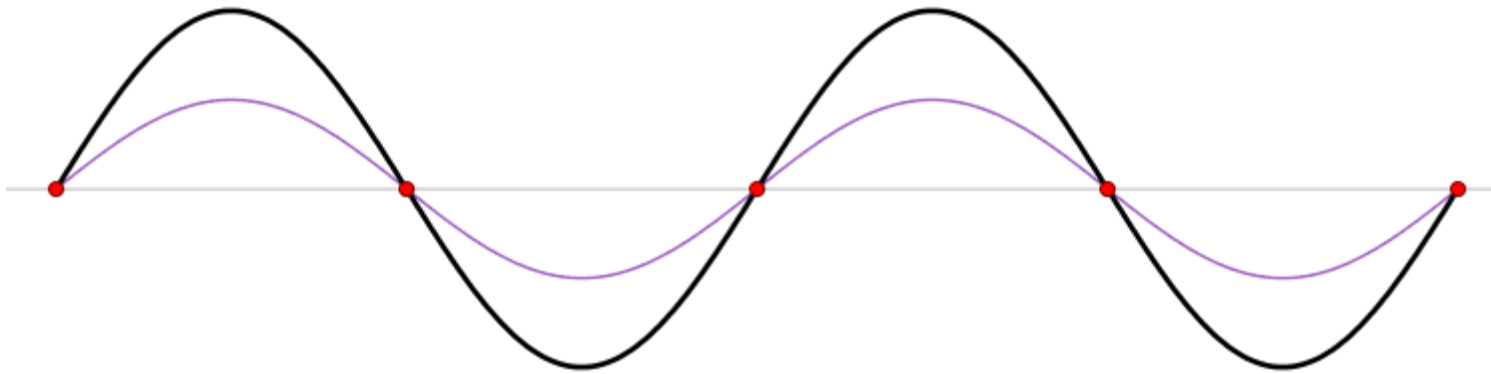
Nell'atomo di Bohr consideriamo gli elettroni come **onde stazionarie**.

La lunghezza d'onda dev'essere contenuta un **numero intero** di volte nella circonferenza:

$$n \times \lambda = 2 \times \pi \times r$$

altrimenti si autodistruggerebbe gradualmente per interferenza.

# Gli elettroni nell'atomo di Bohr



Un'onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio: in pratica non c'è propagazione lungo una certa direzione nello spazio, ma solo un'oscillazione nel tempo.

Pertanto, è soltanto il profilo dell'onda stazionaria a muoversi, oscillando "su e giù" in alcuni punti.



# La funzione d'onda $\Psi$ (1927)

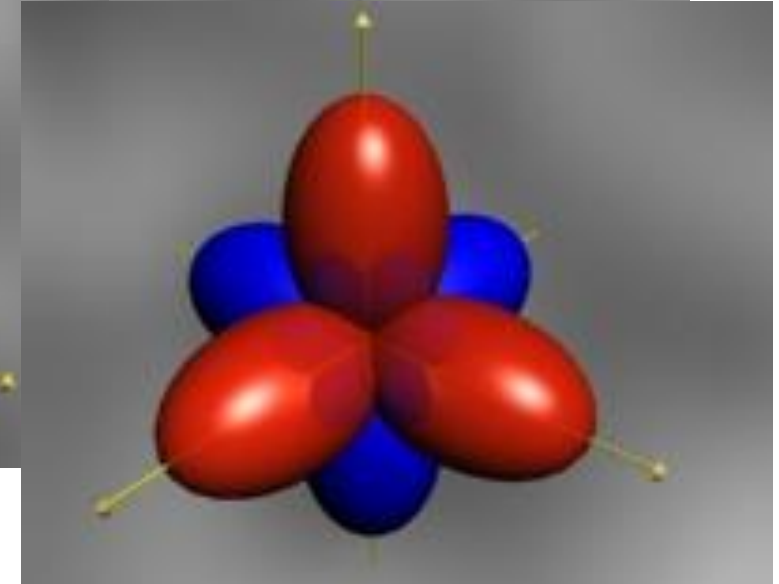
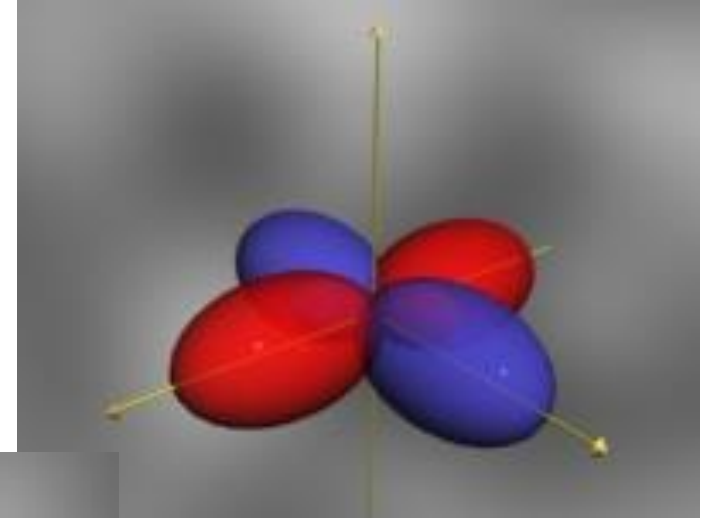
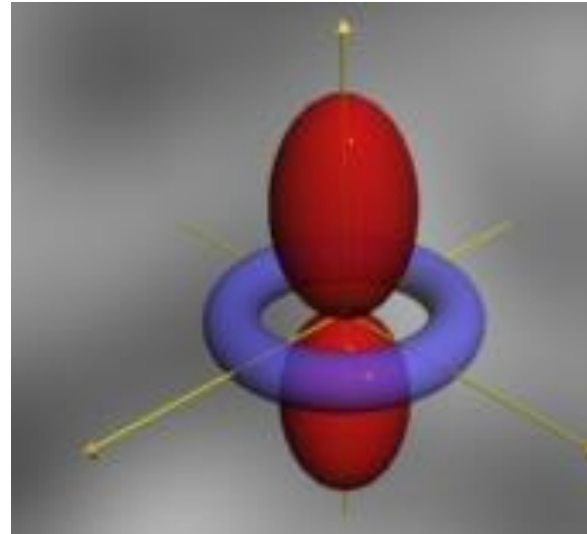


Max Born (1882 – 1970)

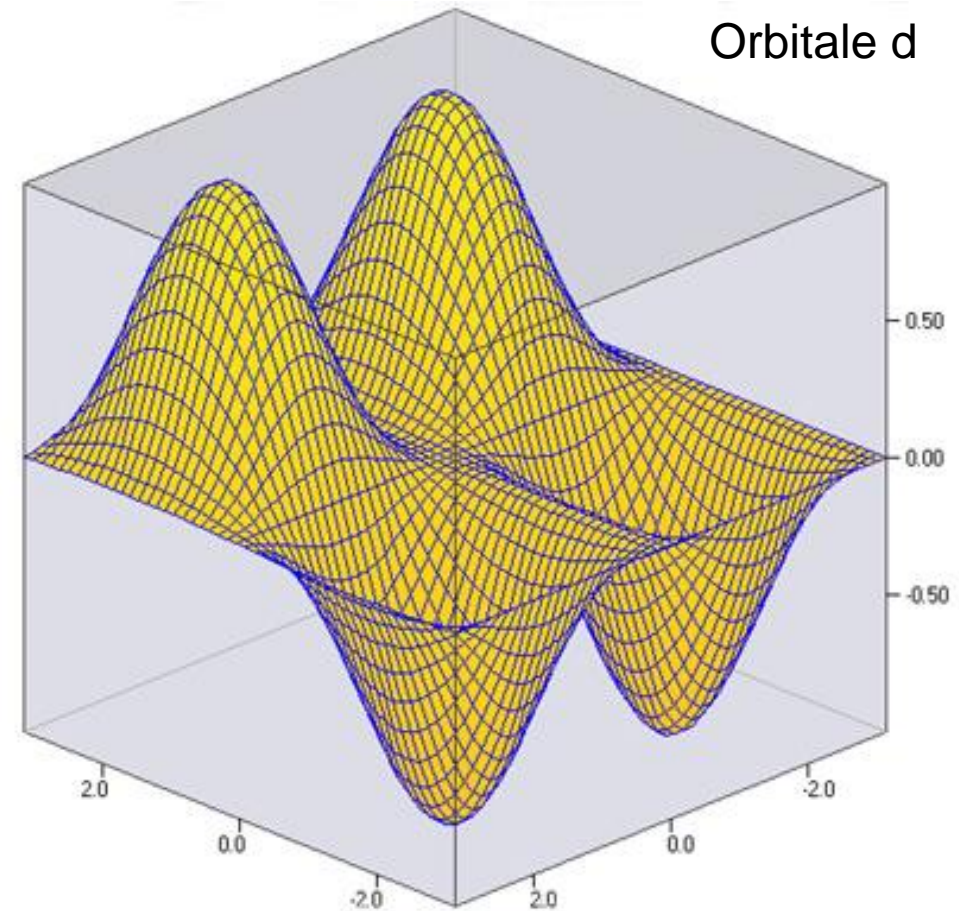
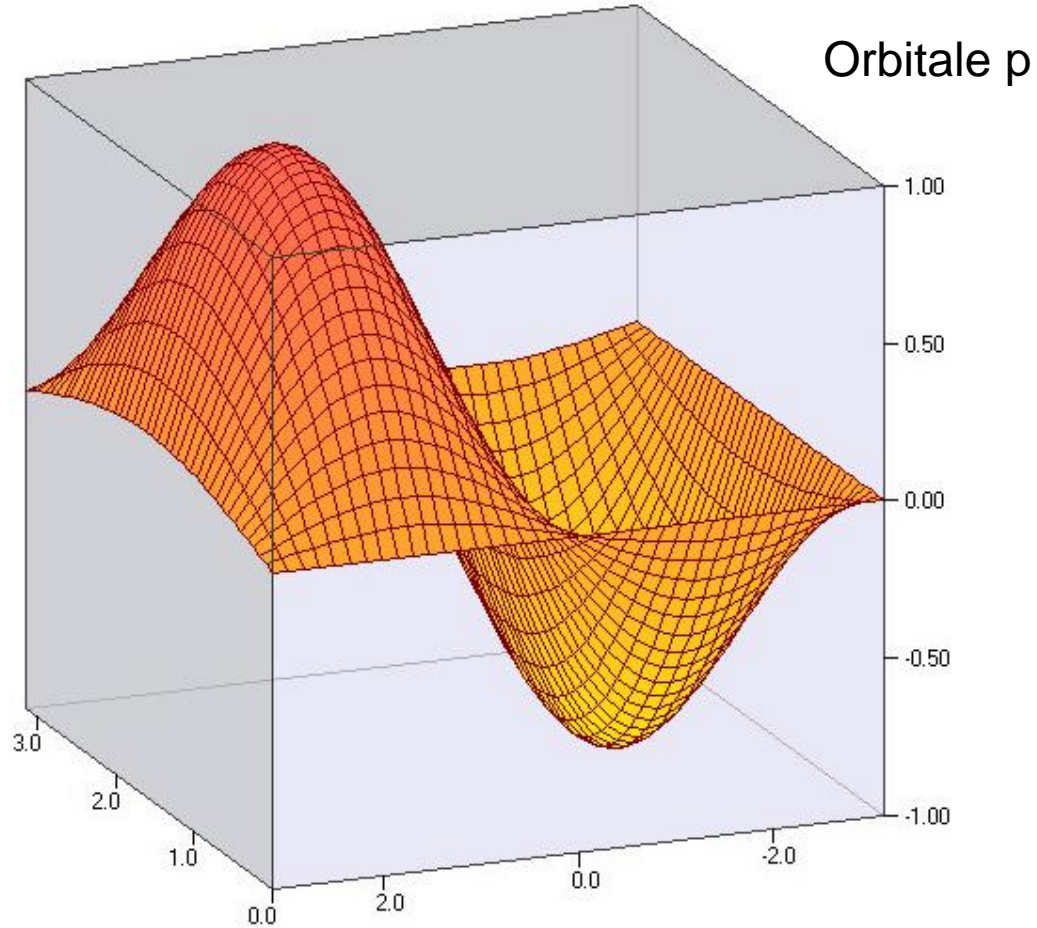
Nobel per la Fisica 1954

La funzione d'onda  $\Psi$  sostituisce l'orbita tradizionale dell'elettrone.

Born propone di considerare  $\Psi^2$  in ciascun punto come la probabilità che la particella si trovi in quel punto.



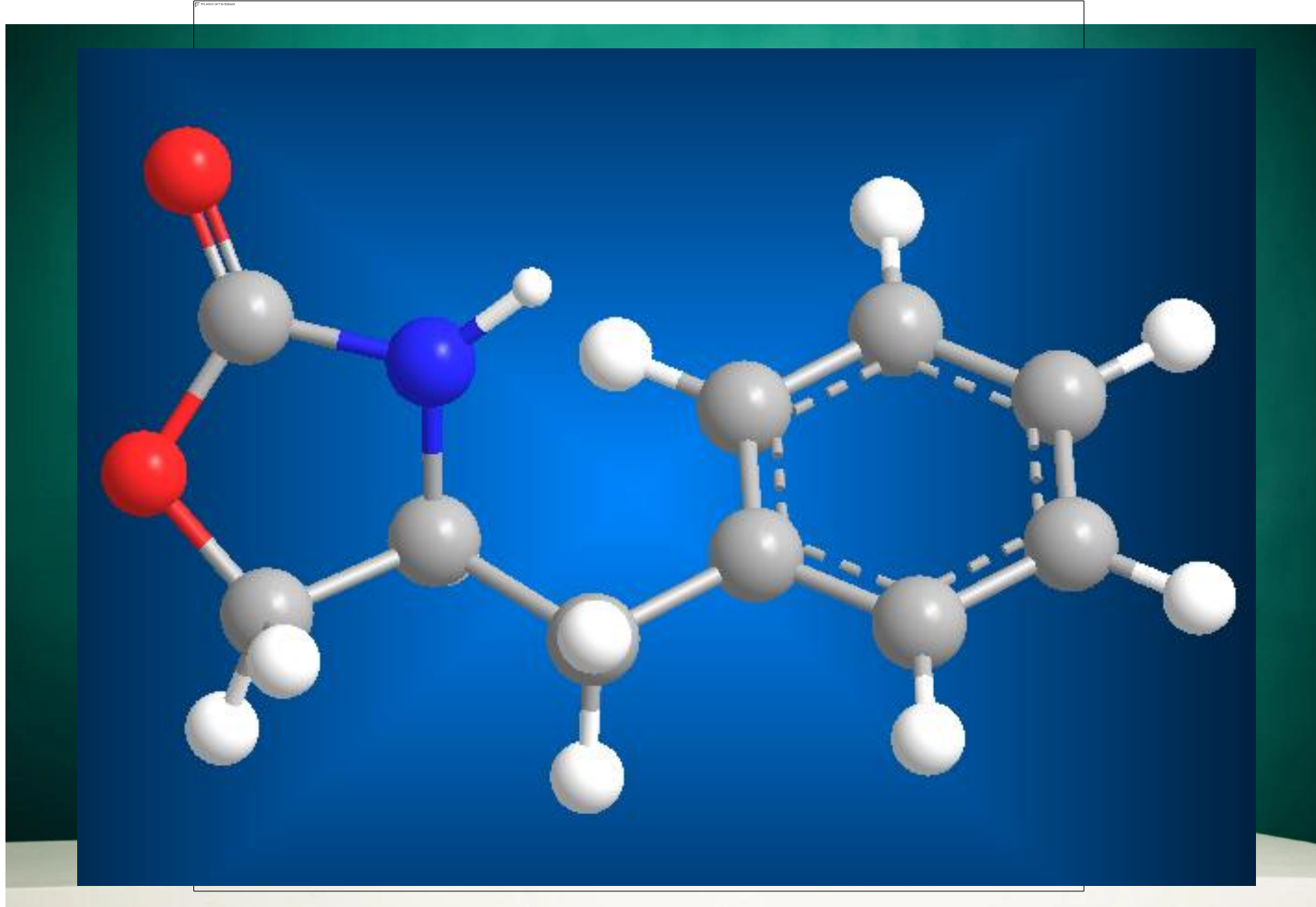
# La funzione d'onda $\Psi$



Secondo questa interpretazione, è più probabile trovare la particella in corrispondenza di picchi e valli dell'onda ( $\Psi^2$  maggiore)



Ma, allora... di cosa è fatto il mondo?





Ma, allora... di cosa è fatto il mondo?



# Il principio di indeterminazione



Werner Heisenberg (1901 – 1976)

Nobel per la Fisica 1932

$X \rightarrow$  **Posizione** della particella

$P \rightarrow$  Suo **Impulso** o **Quantità di moto** ( $= mv$ )

Non è possibile misurare contemporaneamente e con estrema esattezza le proprietà che definiscono lo stato di una particella elementare. Se ad esempio potessimo determinare con precisione assoluta la posizione, ci troveremmo ad avere massima incertezza sulla sua velocità.

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

( $\hbar$  è la costante di Planck ridotta)



# Il principio di indeterminazione



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

Si noti come questo sia in assoluto contrasto con i principi della Fisica classica, che consente, *in linea di principio*, una misura **perfetta** di ogni grandezza fisica.

Si tratta di una conseguenza diretta della **natura ondulatoria della materia**. Le particelle sono descritte da funzioni d'onda, e una localizzazione precisa nello spazio (onda localizzata) corrisponde a un'ampia gamma di lunghezze d'onda, e quindi a un'incertezza sulla quantità di moto (che è legata alla lunghezza d'onda).

Si tratta di una conseguenza diretta della **natura particellare della materia**. Una particella, colpita da un fotone, ne subisce un contraccolpo che la sposta dalla posizione in cui si trovava. Per sapere dov'è, si direbbe, la devi per forza spostare...



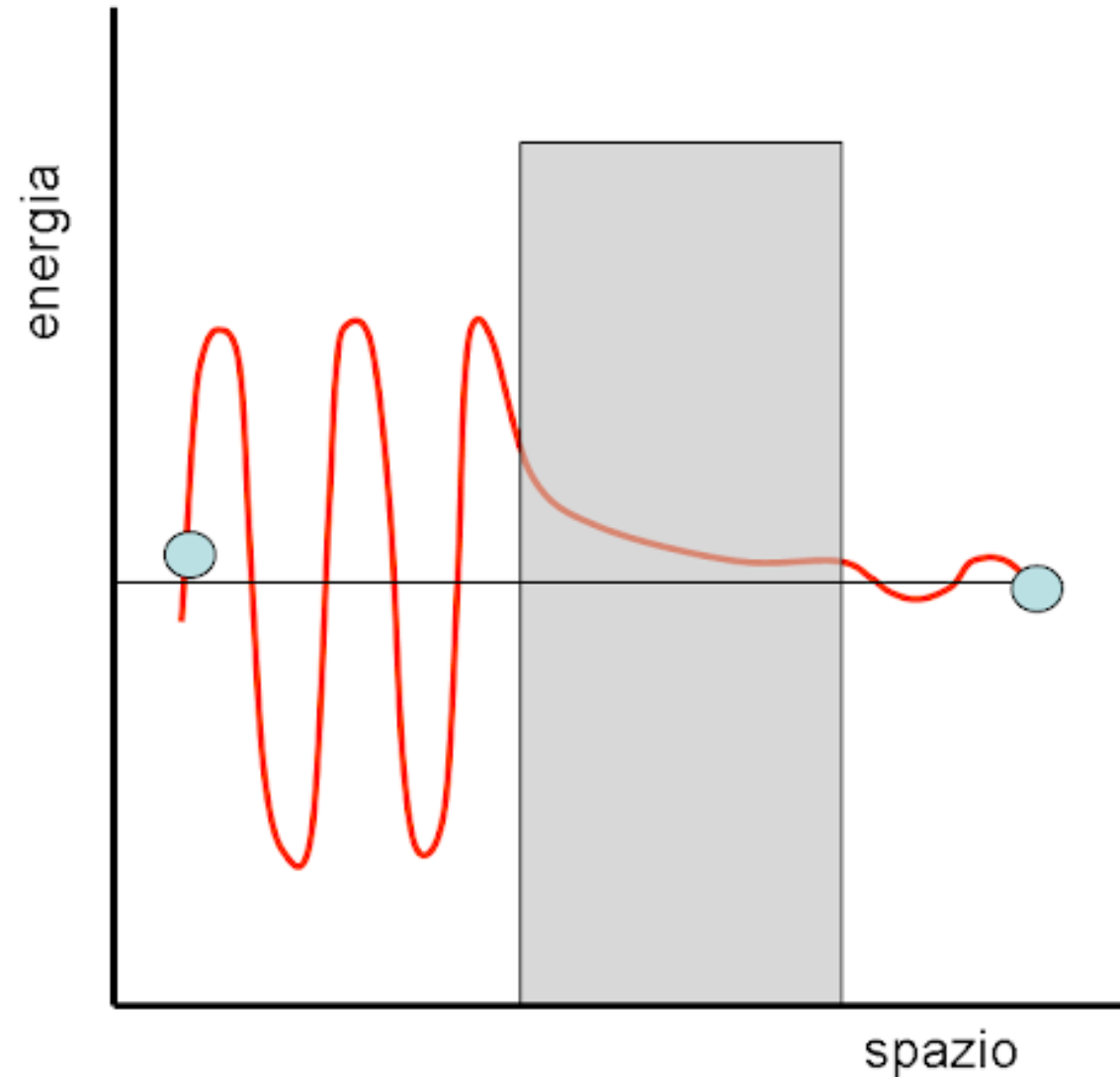
# Il principio di indeterminazione



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

Ad esempio, per l'e

Questo significa ch  
energia, purché pe



Ciò implica la possibilità di superare barriere che, in linea teorica, sono invalicabili.







# Il principio di sovrapposizione

La sovrapposizione quantistica è la proprietà fondamentale dei sistemi quantistici, come gli atomi o le particelle subatomiche, di **esistere in più stati contemporaneamente**.

Immaginiamo un elettrone che si muove attraverso uno spazio vuoto. Nella fisica classica, l'elettrone seguirebbe un percorso definito, passando da un punto all'altro. Nella meccanica quantistica, invece, l'elettrone si trova in una sovrapposizione di stati, ovvero **è presente in tutti i punti dello spazio contemporaneamente**, fino a quando non viene misurato. In questo senso, l'elettrone è come un'onda che si propaga in tutte le direzioni, *con una certa probabilità* di essere rilevato in un punto specifico.

Possiamo immaginare la situazione di un sistema fisico semplice in cui ci sono solo due stati, come nel caso di una moneta lanciata in aria. La faccia di una moneta classica ha sempre un valore definito, testa o croce, anche se dobbiamo aspettare che atterri per conoscerlo. Una moneta quantistica, invece, può trovarsi in una sovrapposizione dei due stati, ovvero **non è né testa né croce**, fino a quando non la osserviamo e il suo stato diventa definito.

# Il gatto di Schroedinger

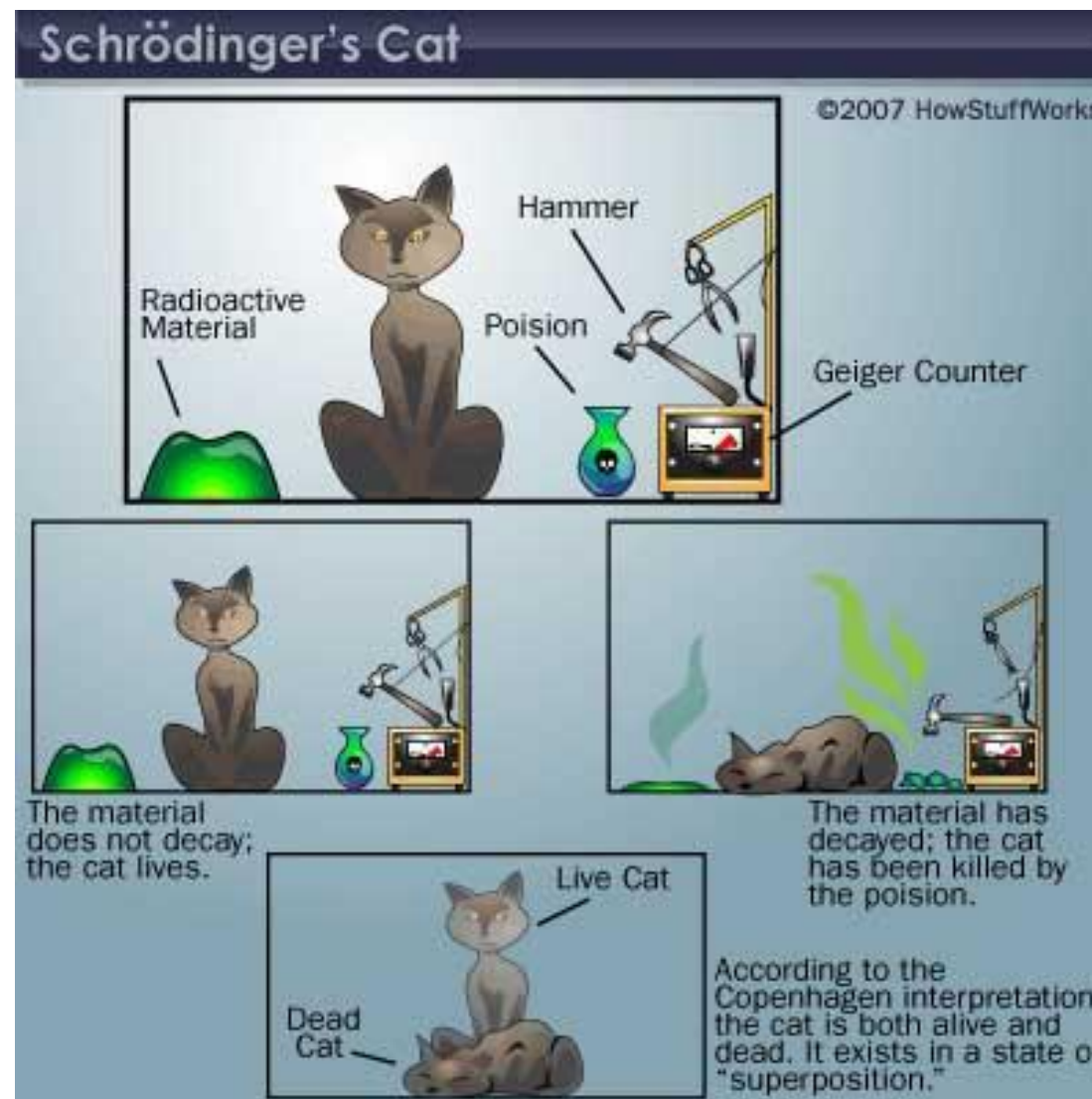


Erwin Schrödinger (1887 – 1961)

Nobel per la Fisica 1933

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat alive}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat dead}\rangle$$

Per il principio di sovrapposizione,  
il gatto è sia vivo che morto.



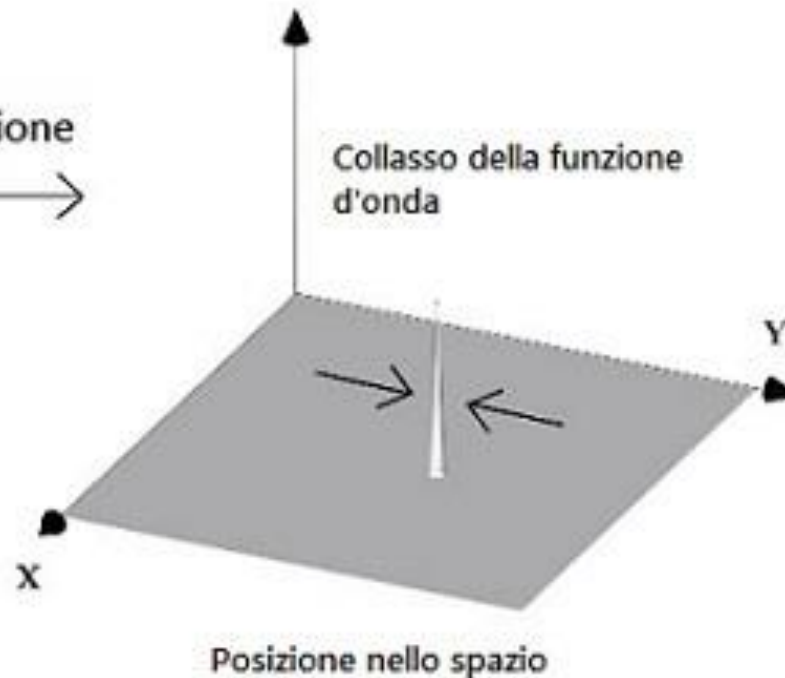
# Collasso della funzione d'onda

L'**interpretazione di Copenhagen** della meccanica quantistica afferma che **a seguito di una misura**, ad esempio della posizione o della velocità di una particella, la funzione d'onda subisce un processo **istantaneo e irreversibile** per il quale non rappresenterà più una sovrapposizione di stati possibili (detti **autostati**) della grandezza misurata, ma sarà "collassata" in uno solo di essi.

Nell'**interp**  
avviene ne  
ciascuno d  
non risolve  
deve usare  
misure sul



Misurazione



ura non  
si paralleli in  
a molti mondi  
fatto il fisico  
su successive

# il Grande Problema ...



La teoria della relatività (l'universo su grande scala, corpi a velocità prossime a quelle della luce) e la meccanica quantistica (livello atomico e sub-atomico) convivono perché si applicano in ambiti separati.

Se applicate contemporaneamente generano risultati assurdi  
(quantità infinite)



È necessario trovare una teoria che superi le difficoltà lasciate aperte  
dall'incompatibilità delle due teorie.

Teoria delle stringhe ? Gravità quantistica a loop?

# Una possibile conclusione...



Brian Greene

... forse ... a livello microscopico l'universo si comporta in modo così oscuro che la mente umana, evolutasi al fine di comprendere i fenomeni della vita quotidiana, non è in grado di sapere cosa accade davvero? O forse, per un caso della storia, l'uomo è arrivato a scoprire una formulazione particolarmente arzigogolata della teoria che, sebbene utile dal punto di vista quantitativo, offusca la vera natura delle cose? Nessuno lo sa.

(...)

La sola cosa certa è che la meccanica quantistica ci mostra senza ombra di dubbio che alcuni concetti basilari del mondo macroscopico *perdono ogni significato* a livello atomico e subatomico.

Brian Greene, 1999