

**WANTED**  
**SCHRÖDINGER'S CAT**



**DEAD AND ALIVE**

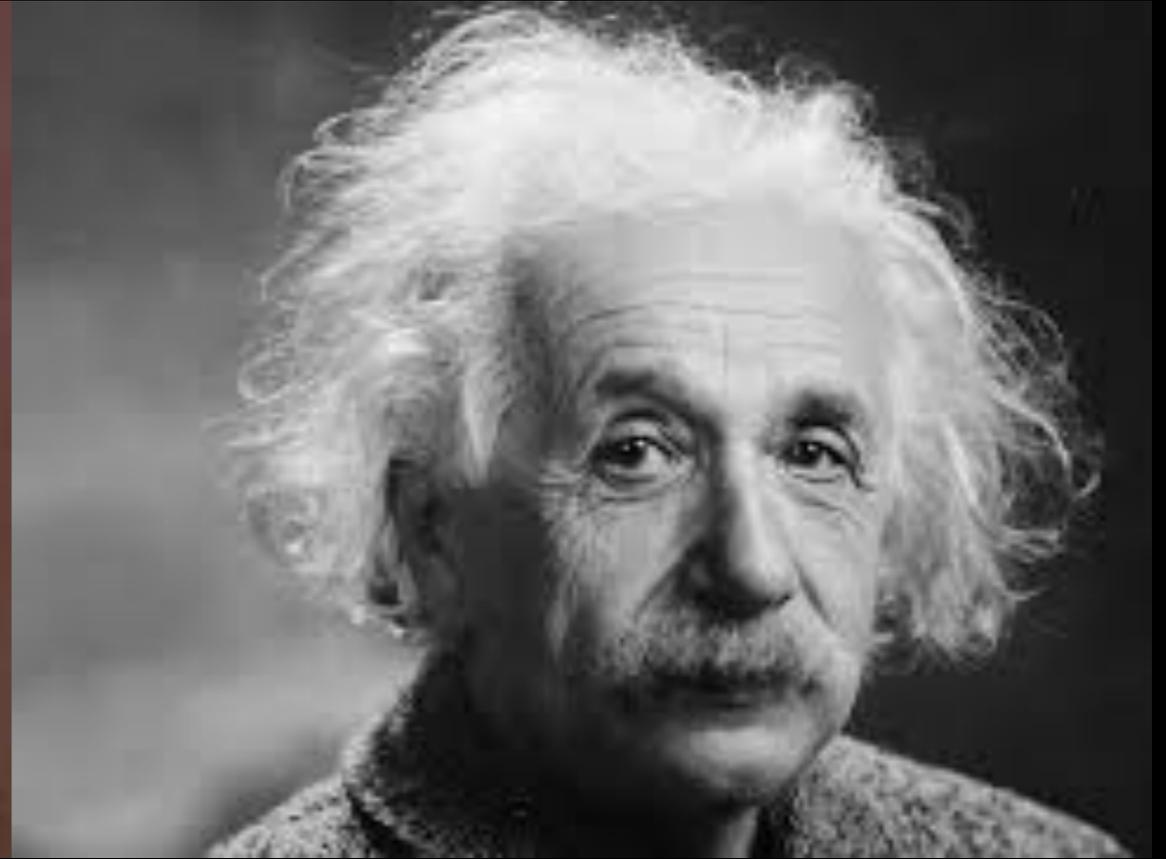
Dalla fisica classica  
alla meccanica  
quantistica

Ettore Budassi

Meccanica Newtoniana



Relatività



Meccanica quantistica



Teorie quanto-relativistiche



# Stato dell'arte fisico

## Meccanica

- Relatività galileiana
- Spazio e tempo assoluti
- Dinamica deterministica



# Spazio e tempo assoluti

- Lo spazio è l'arena ove sono posizionati gli oggetti;
- Il tempo scorre uniformemente per tutti gli osservatori.



# Determinismo

“Dobbiamo considerare lo stato presente dell’universo come l’effetto del suo stato anteriore e come la causa del suo stato futuro. Un’intelligenza che, per 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 abbastanza profonda per sottomettere questi dati all’analisi, abbraccerebbe 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. de Laplace (1749 - 1827)

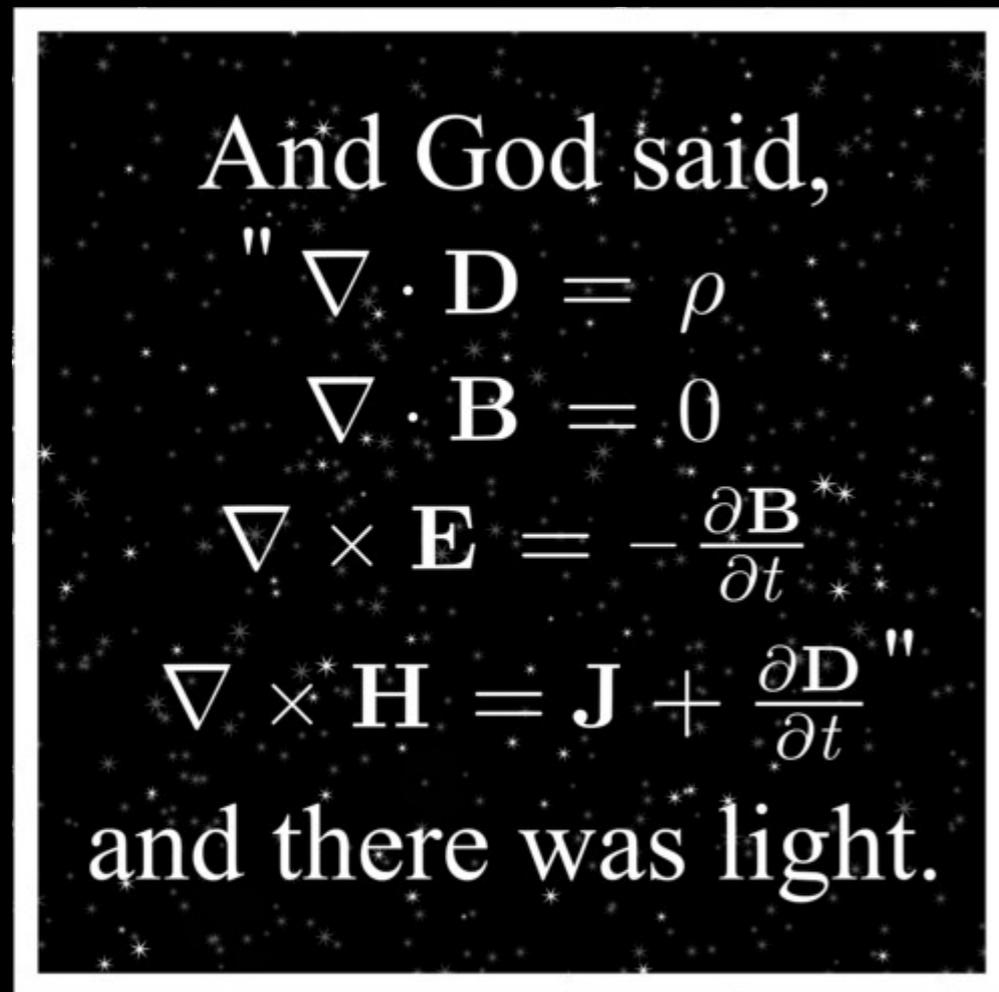


# Probabilità epistemica e determinismo



Sistemi deterministici. La scarsa conoscenza delle condizioni iniziali o finali porta a comportamenti imprevedibili.

# Stato dell'arte fisico



$$\partial_i F_{jk} + \partial_k F_{ij} + \partial_j F_{ki} = 0$$

$$\partial_k F^{ik} = -\frac{4\pi}{c} J^i$$

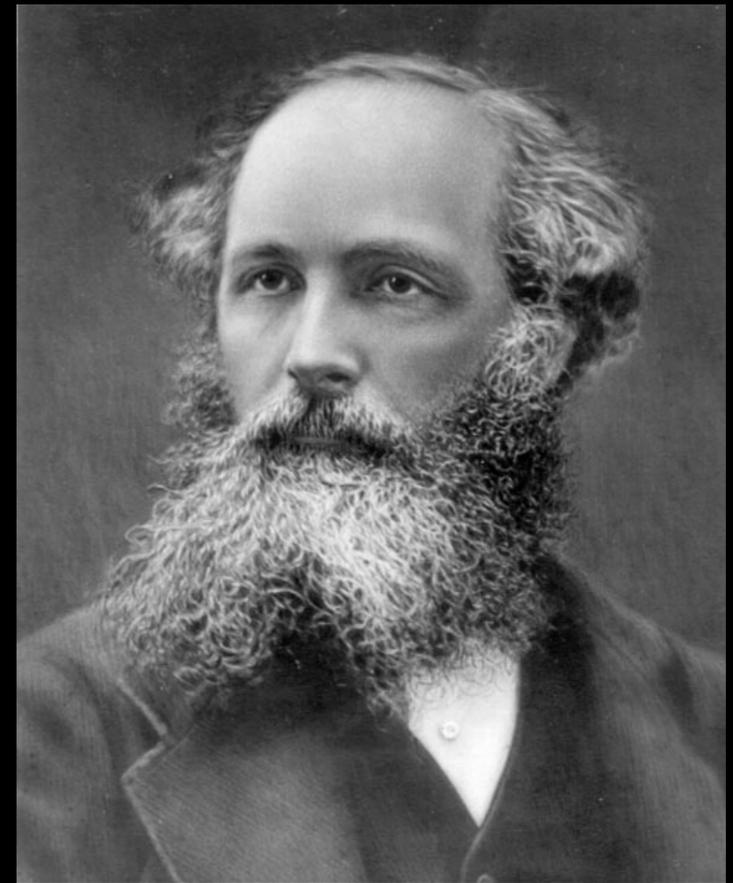
Elettromagnetismo

Elettrodinamica classica relativistica

# Dibattito Storico sulla natura della luce



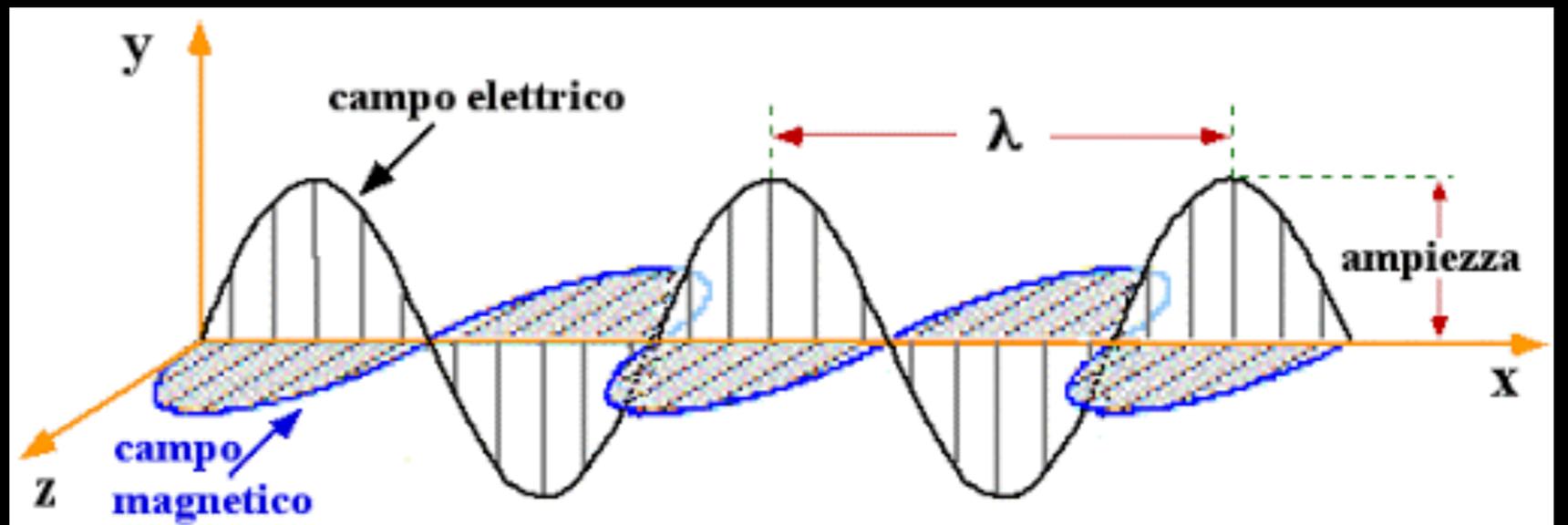
*Huygens, 1690*



*Maxwell, 1864*

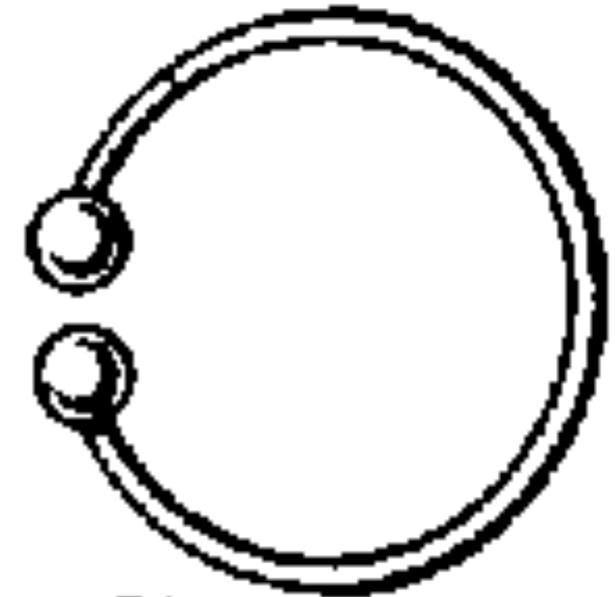
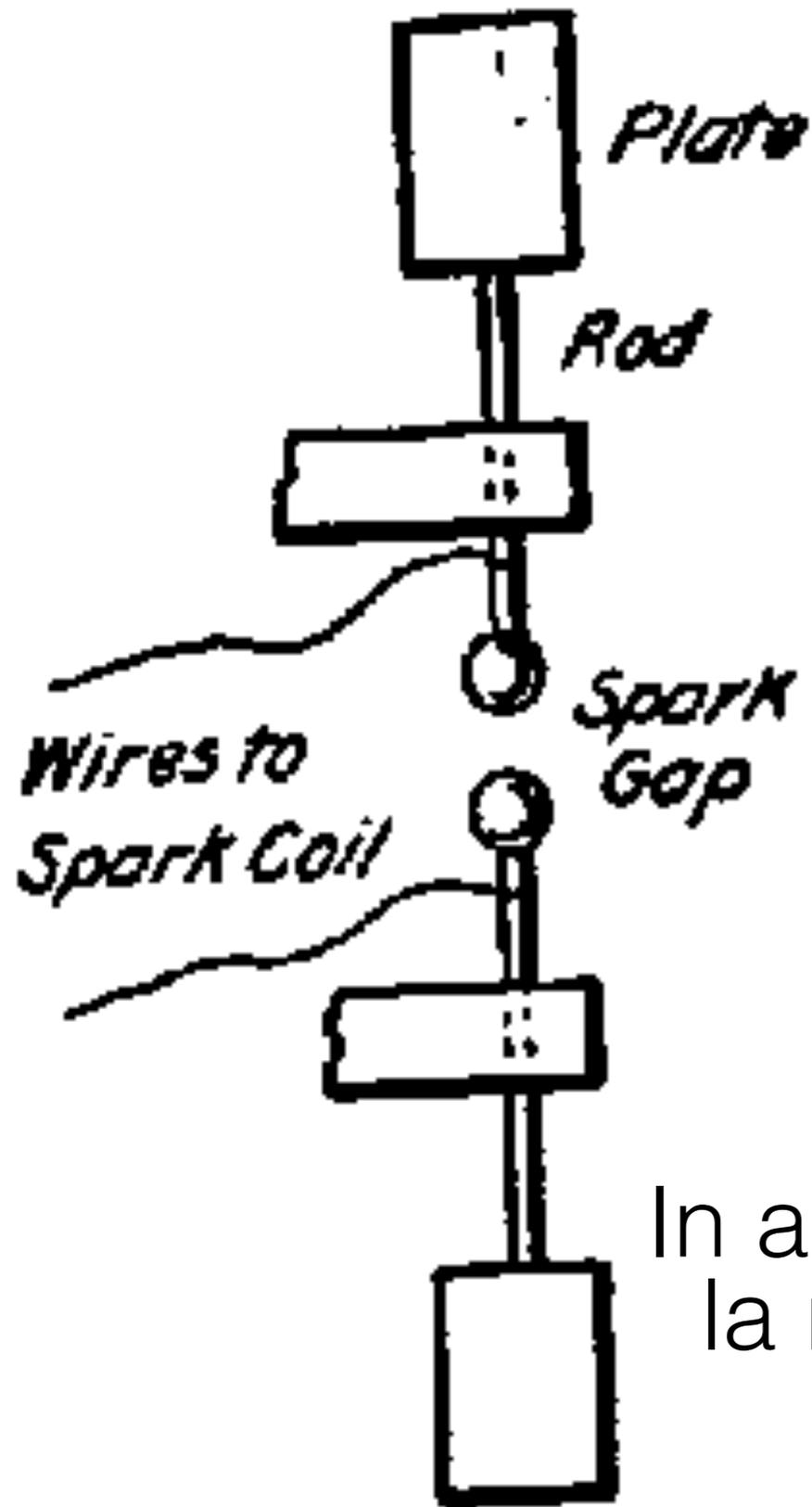
Moderna visione  
ONDULATORIA:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$



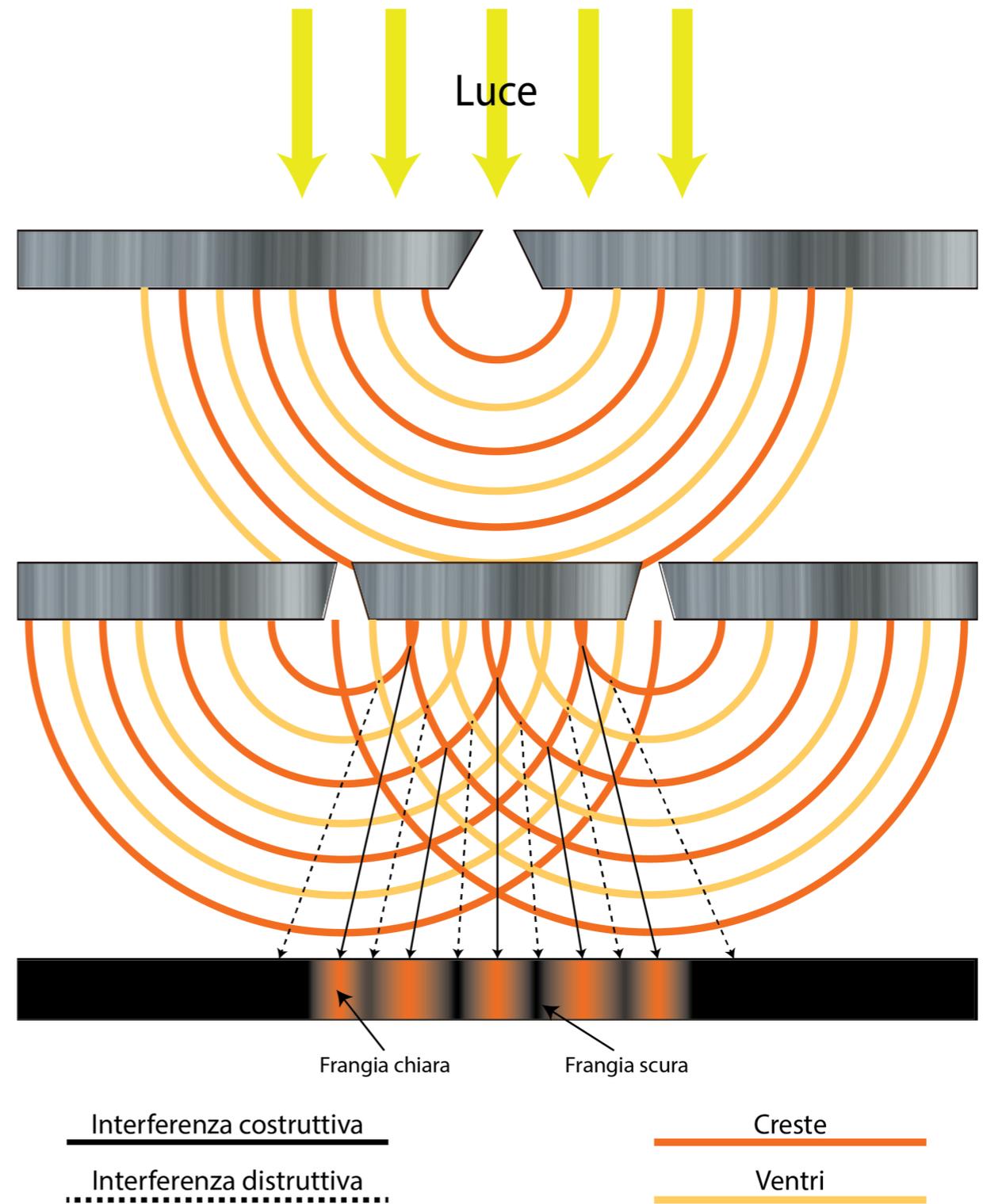
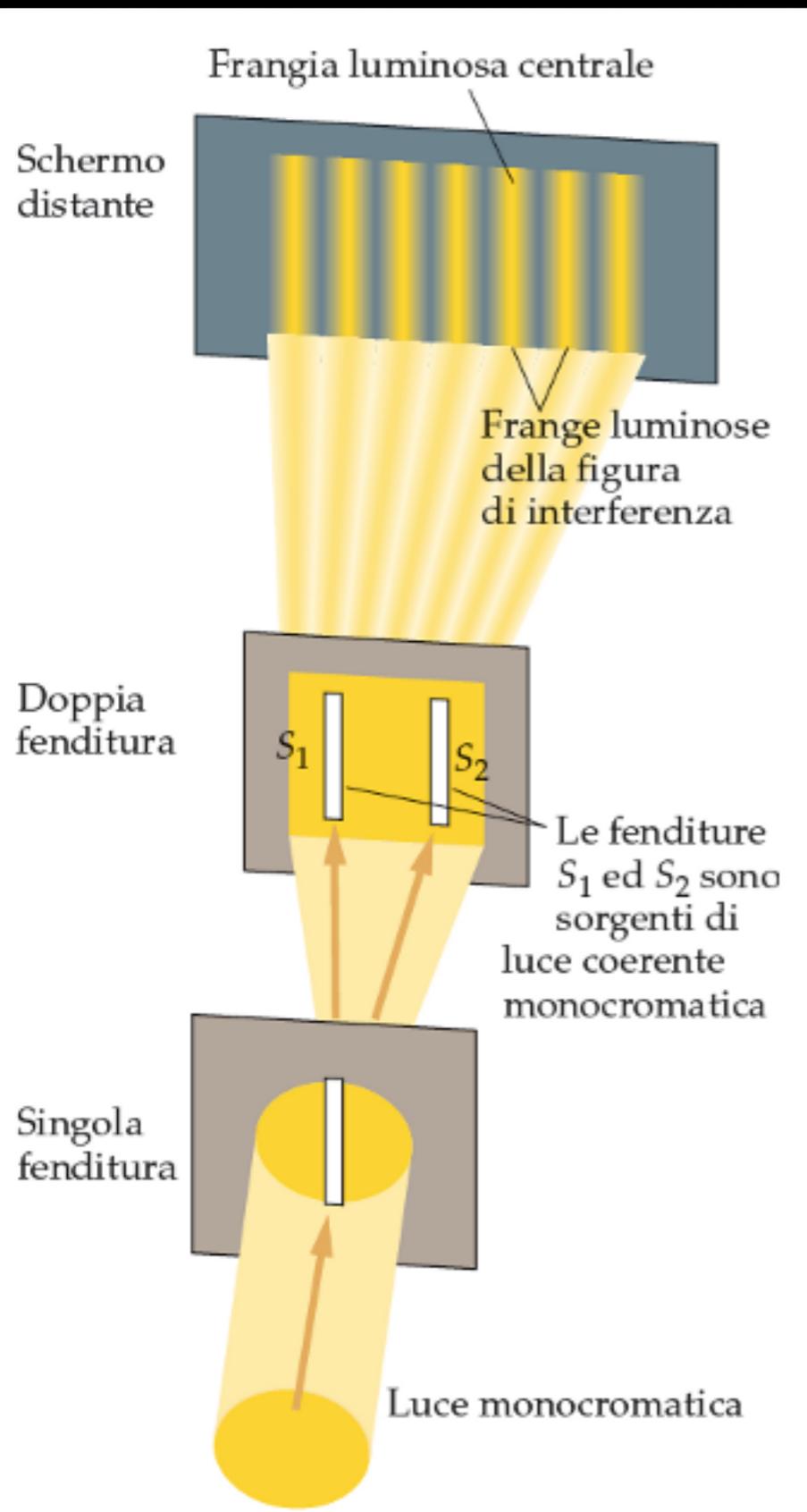
# Dibattito Storico sulla natura della luce

Esperimento di  
Hertz, 1886



In accordo con le equazioni di Maxwell,  
la radiazione elettromagnetica sembra  
essere ondulatoria...

# Le due fenditure di Young



# Stato dell'arte fisico

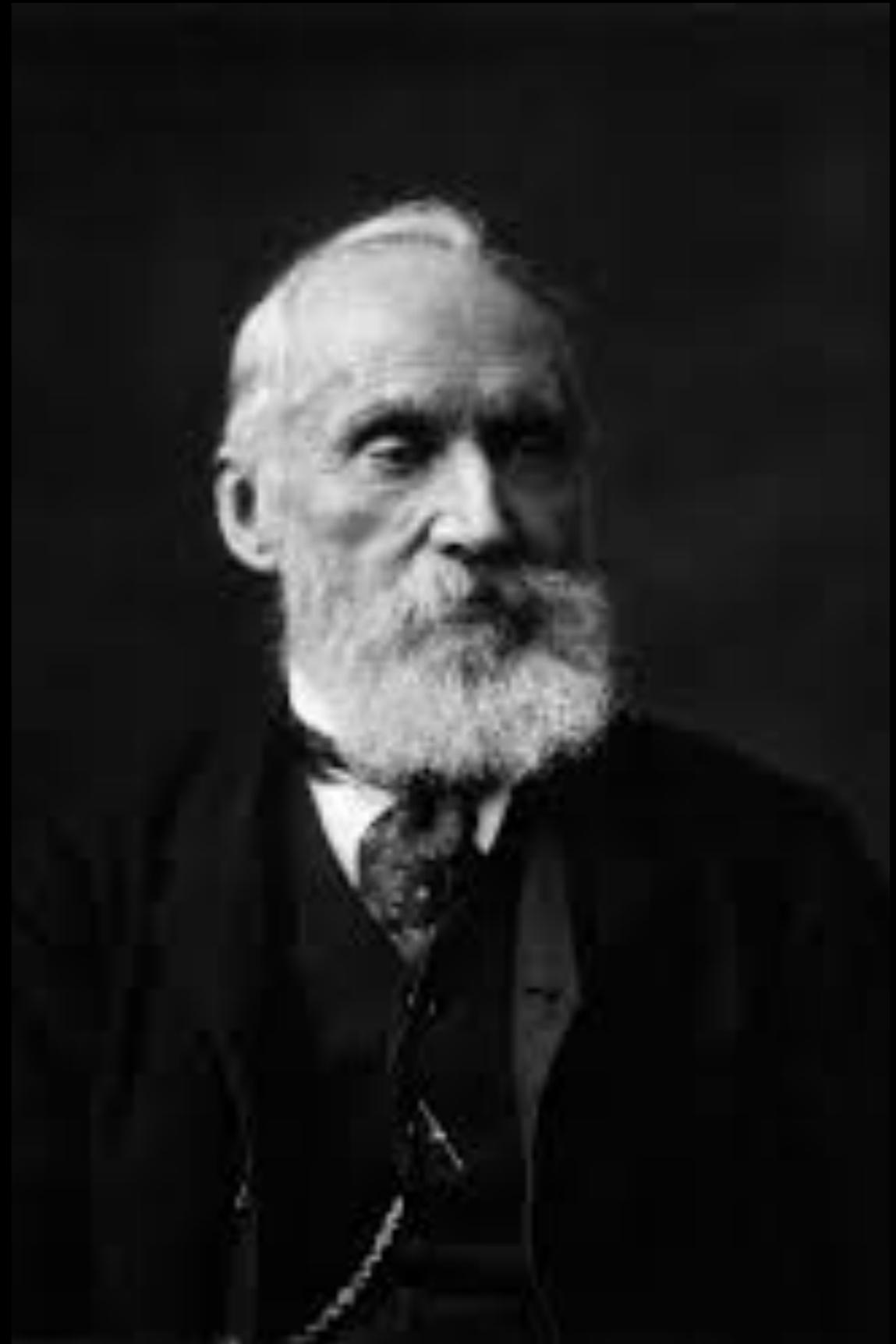
A close-up photograph of a lit matchstick. The matchstick is positioned vertically at the bottom right of the frame. The flame is bright yellow and orange, with a blue base near the matchstick. Blue smoke rises from the flame, forming a large, billowing shape that fills the upper right portion of the image. The background is solid black.

Termodinamica classica

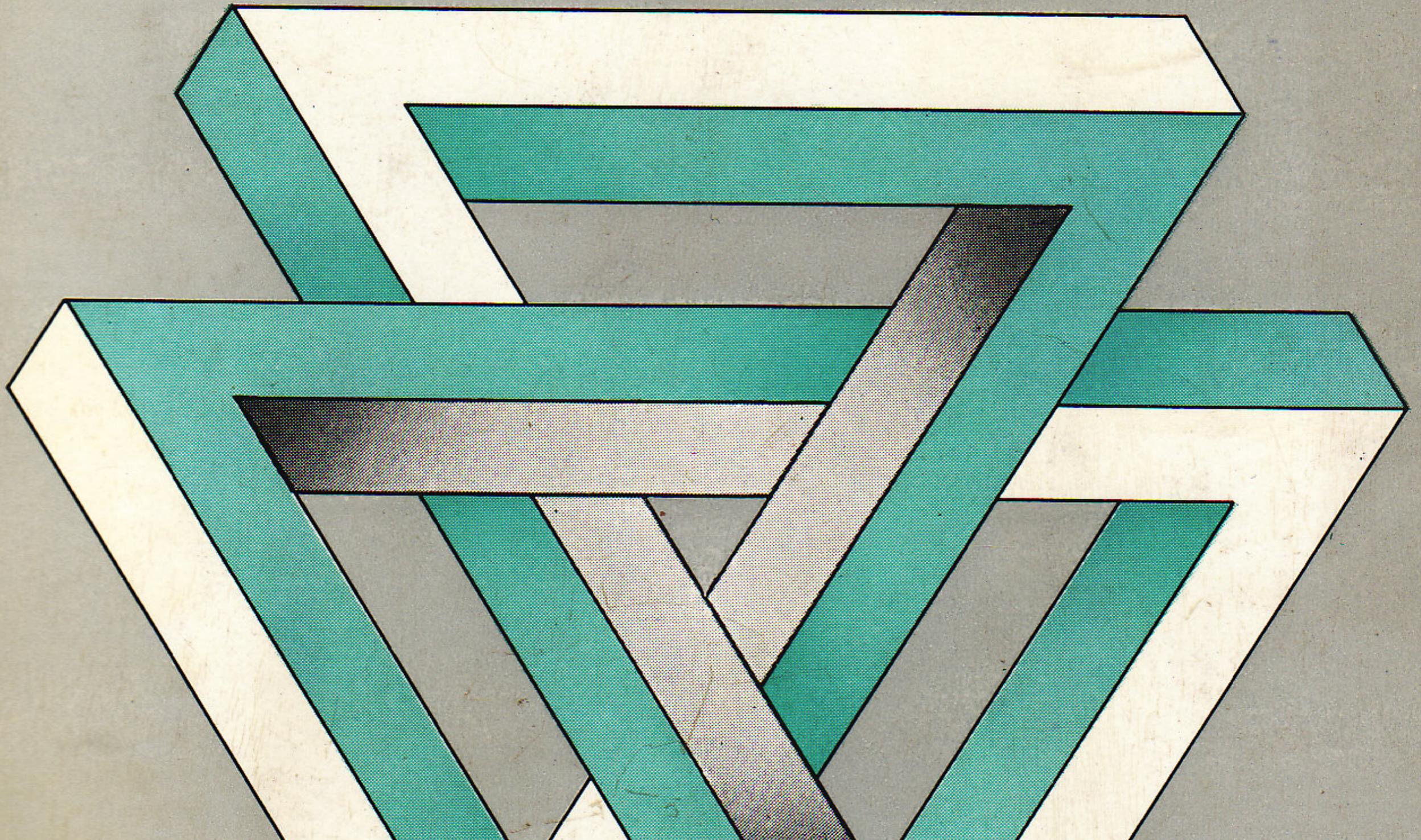
# Lord Kelvin

Signori, vi annuncio la fine della fisica: ormai conosciamo le grandi leggi della natura e i segreti dell'armonia cosmica. I pianeti e tutti i corpi dotati di massa si muovono nell'universo, seguendo le leggi della gravitazione di Sir Isaac Newton; la luce e tutte le onde elettromagnetiche si propagano per il cosmo seguendo le leggi di Sir James Clerk Maxwell; il calore si trasferisce da un corpo a un altro seguendo le leggi della termodinamica che anche io, modestamente, ho contribuito a formulare. Tutti i fondamenti della fisica ci sono noti e null'altro di sostanziale c'è dunque da scoprire sulla natura fisica delle cose.

Address to the British Association for the Advancement of Science (1900)

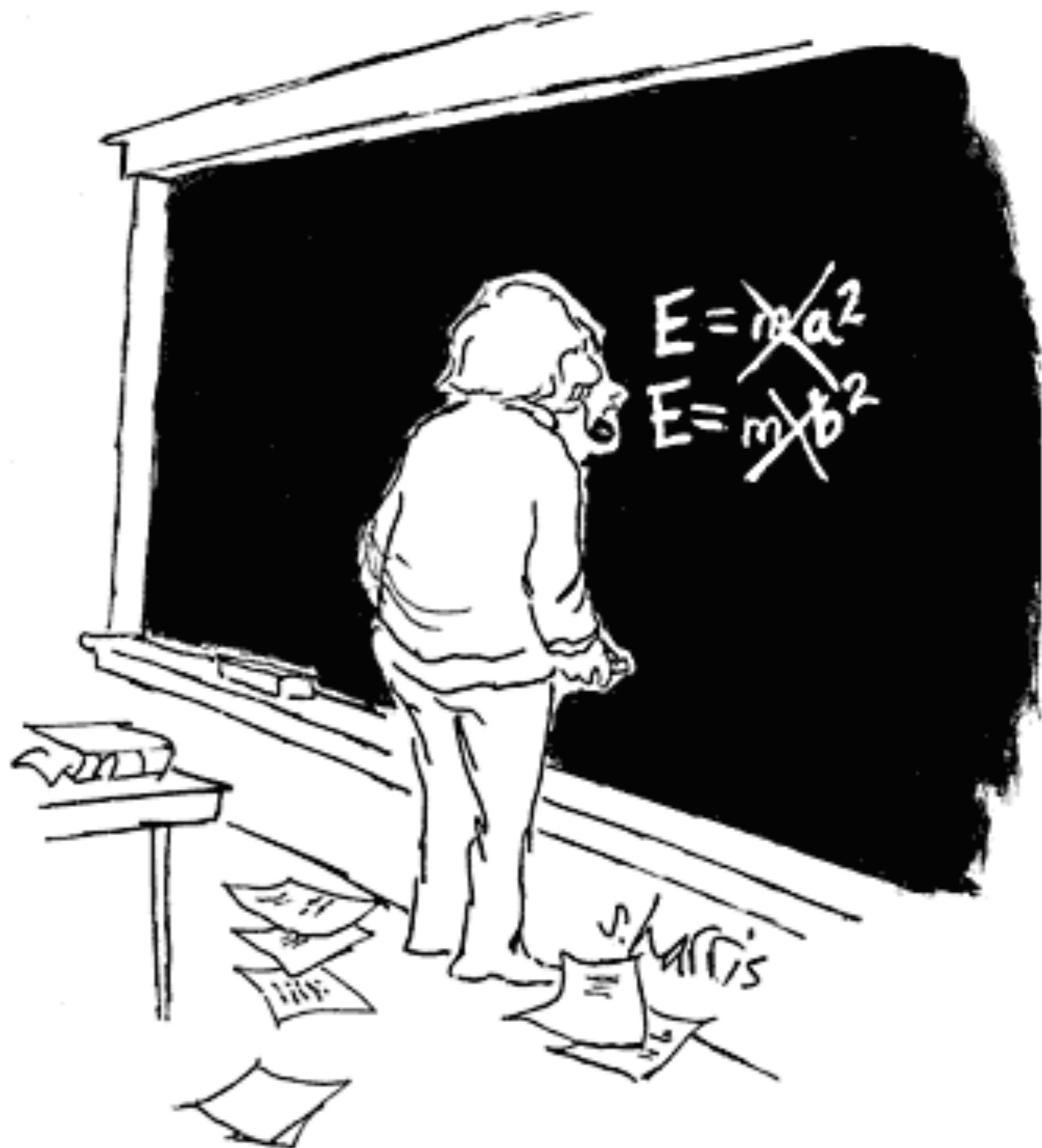


Perché è stato necessario  
rivoluzionare il panorama della fisica?



# Problemi

Sono sorti problemi sia teorici che sperimentali...

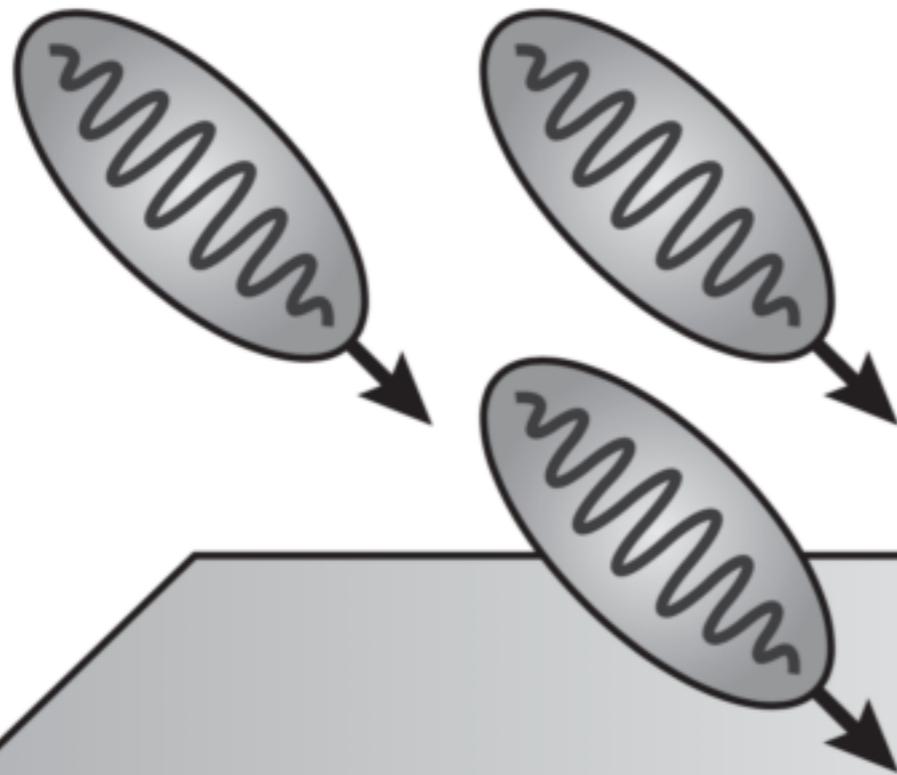




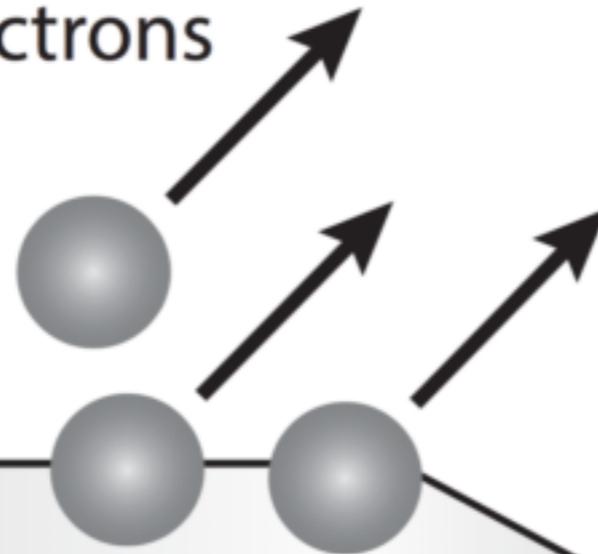
Esempi di  
problemi  
teorici

# Effetto Fotoelettrico

Incoming  
Photons



Ejected  
Electrons



L'effetto non si presenta se la radiazione incidente ha frequenza inferiore ad un valore di soglia, indipendentemente dall'intensità

# Crisi dei modelli atomici

## I MODELLI ATOMICI



Dalton

1808



Thomson

1897



Rutherford

1911



Bohr

1913



Chadwick

1932



Modern

Present

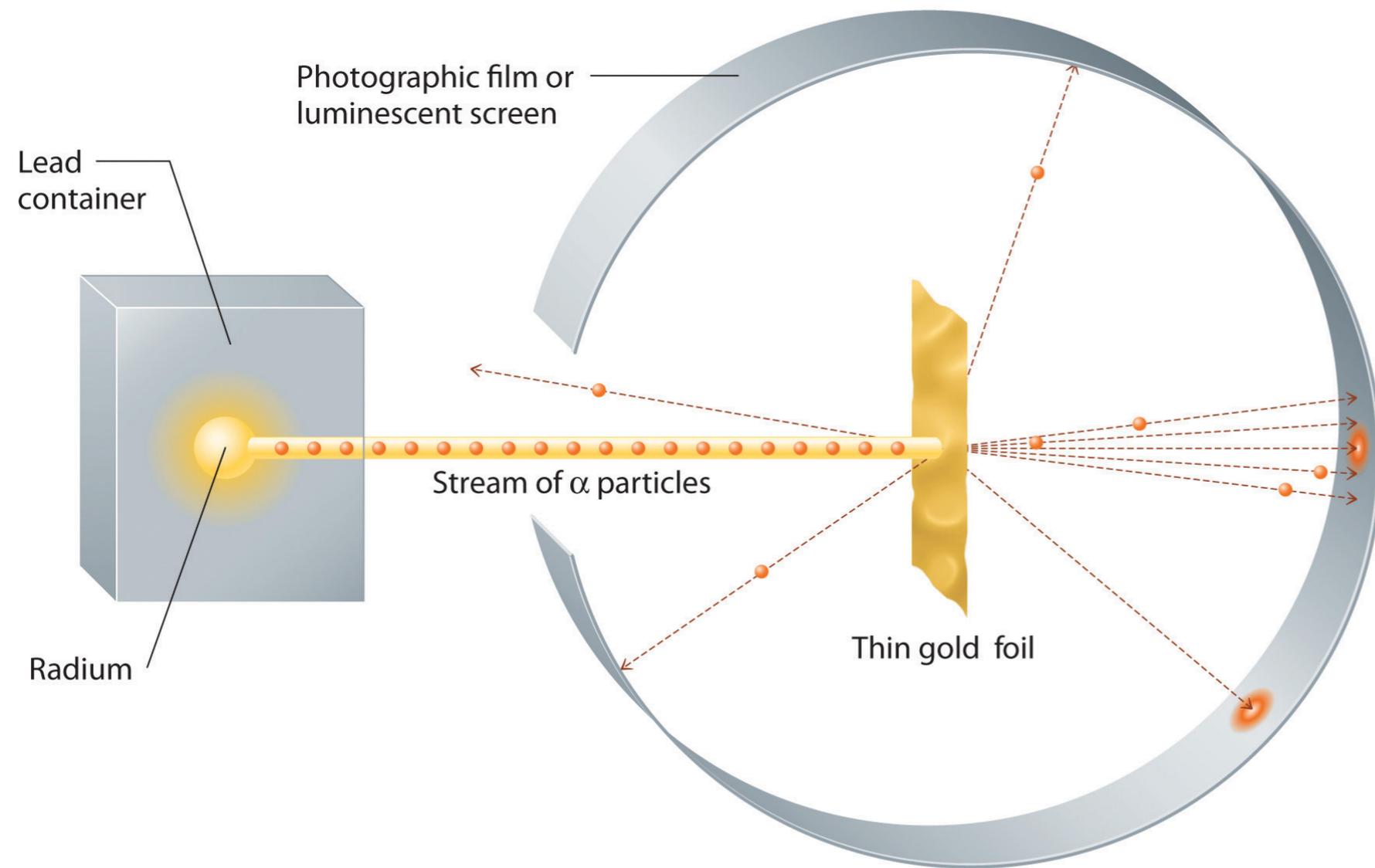
# Atomo di Thomson

J.J. Thomson

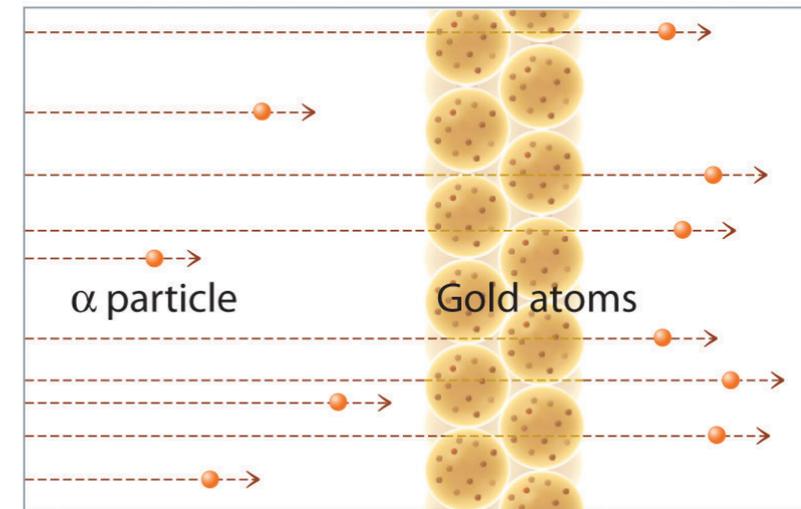
His  
model of  
the atom



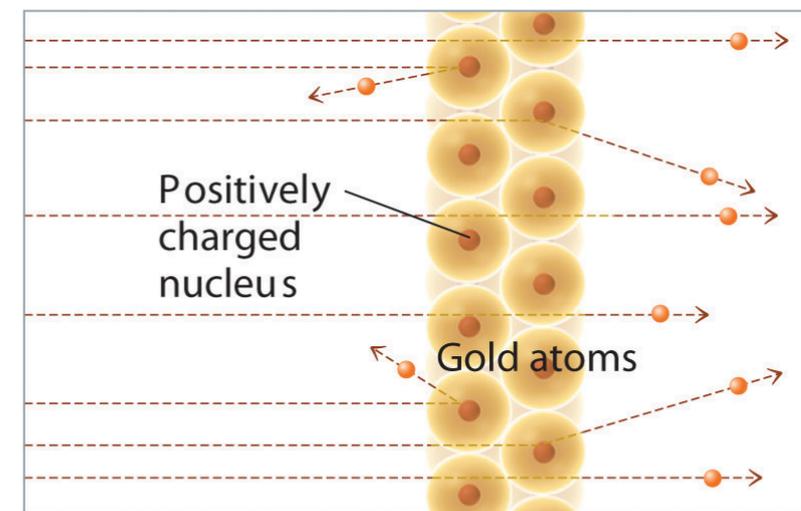
# Geiger-Marsden-Rutherford



(a) Rutherford's experiment



(b) What Rutherford expected if Thomson's model were correct



(c) What Rutherford actually observed

Hanno lanciato nuclei di elio contro una sottile lamina d'oro

# Modello atomico di Rutherford



Modello planetario

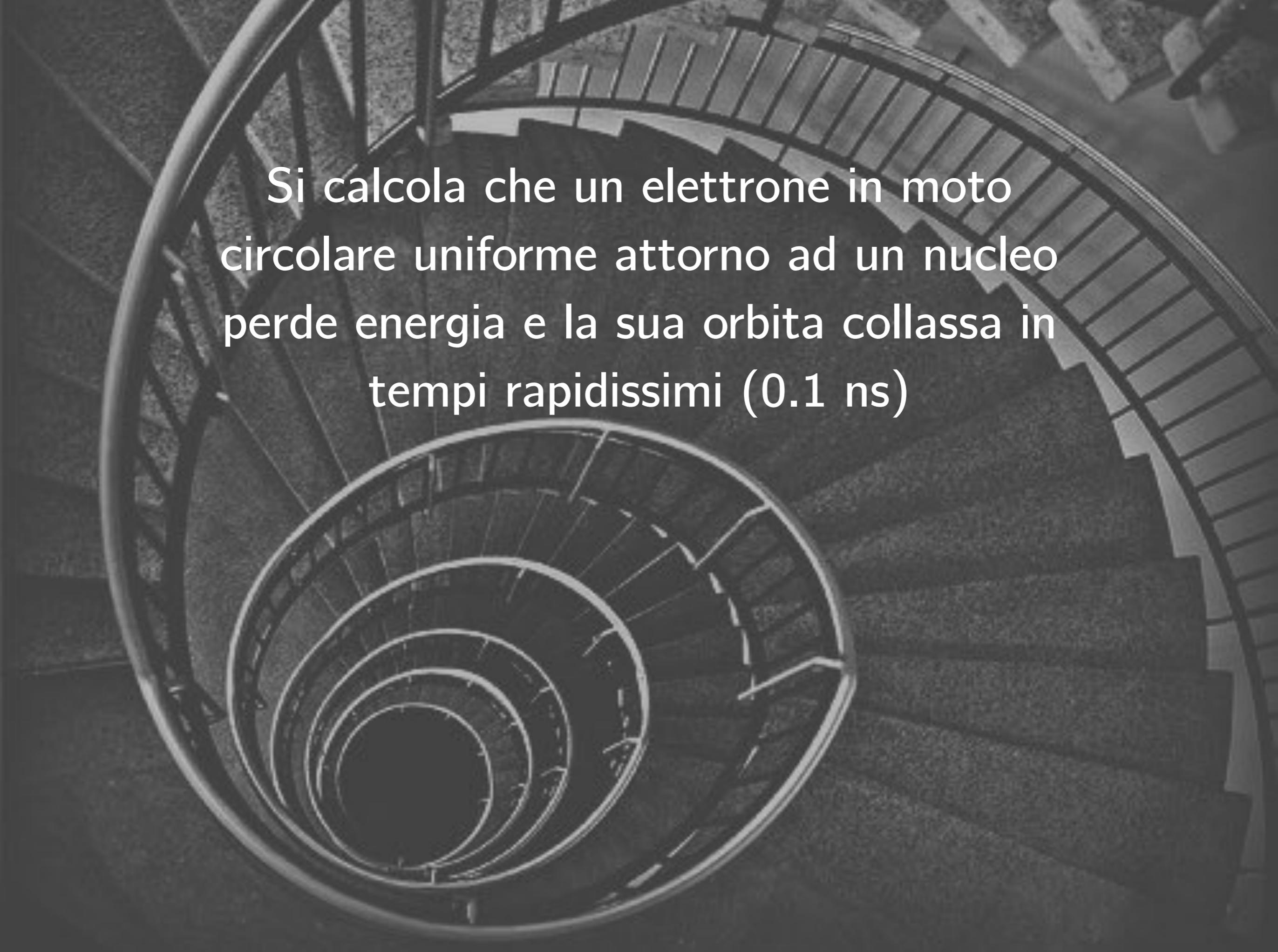
Esiste un nucleo positivo attorno al quale ruotano cariche negative (elettroni)

# Primi problemi...

$$P = \frac{2q^2 a^2}{3c^3}$$

Viene violata la legge di Larmor

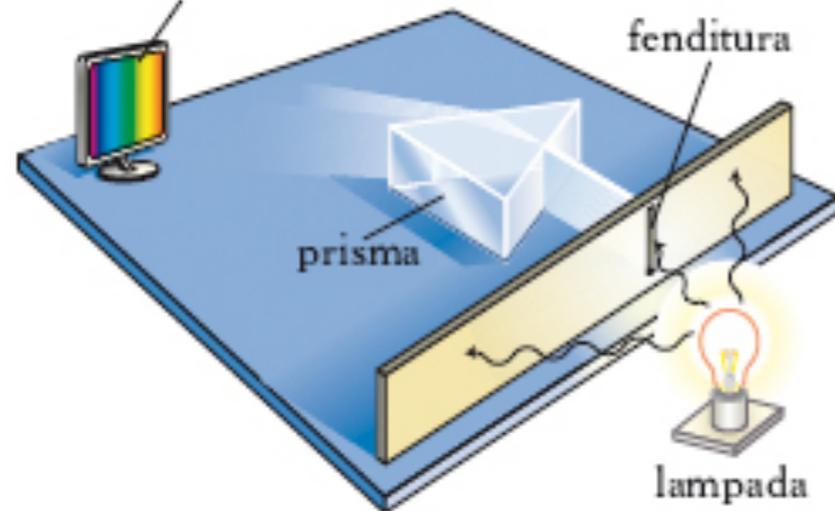
Una particella carica e accelerata emette radiazioni.  
In tal modo perde energia (energia cinetica).

A black and white photograph of a spiral staircase, viewed from above. The staircase is made of metal railings and wooden steps, spiraling downwards. The text is overlaid in the center of the image.

Si calcola che un elettrone in moto circolare uniforme attorno ad un nucleo perde energia e la sua orbita collassa in tempi rapidissimi (0.1 ns)

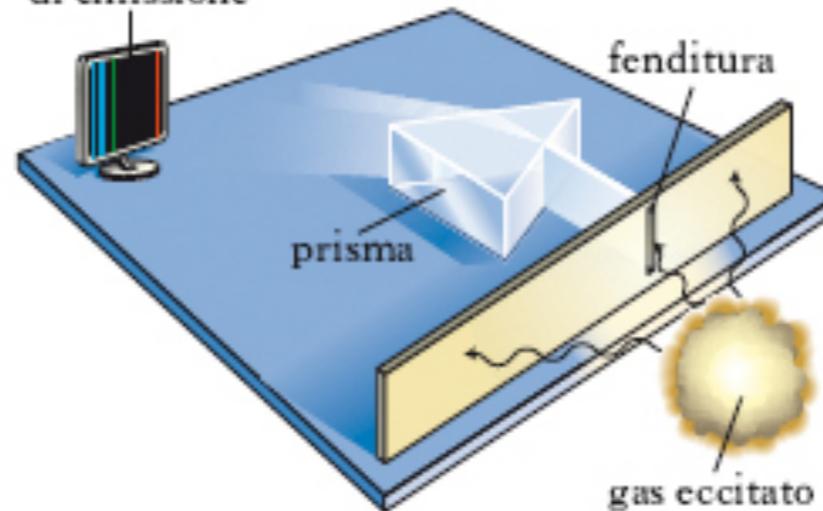
# Spettri atomici

spettro di emissione continuo



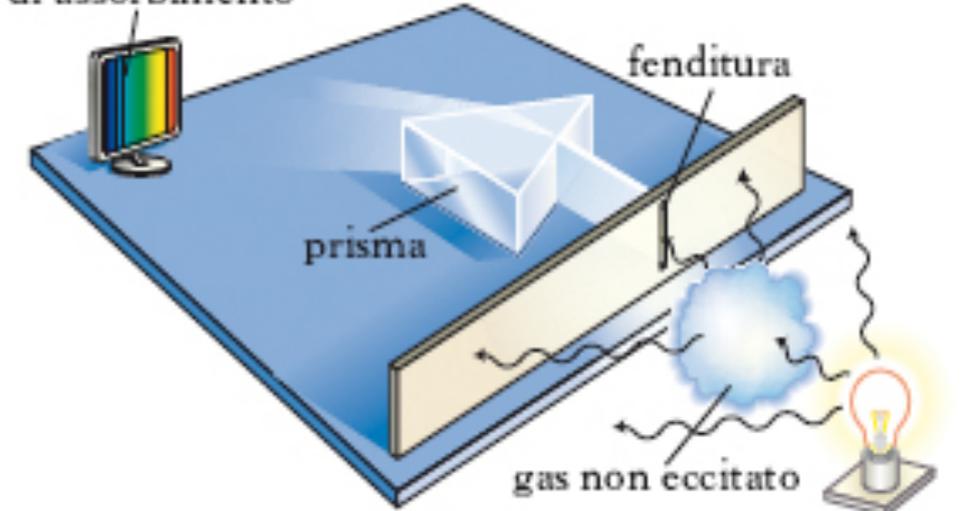
A

righe dello spettro di emissione



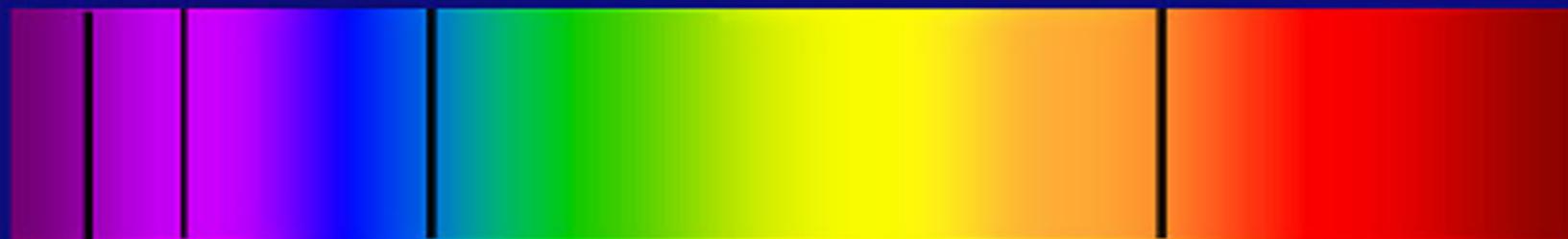
B

righe dello spettro di assorbimento

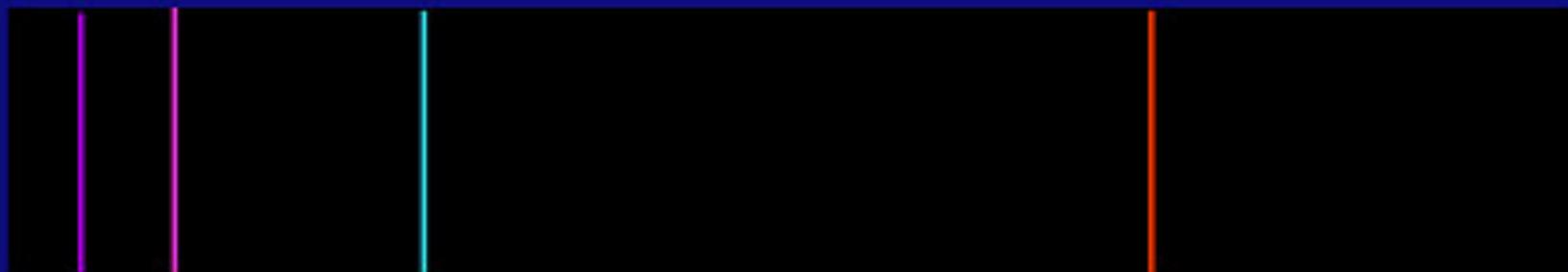


C

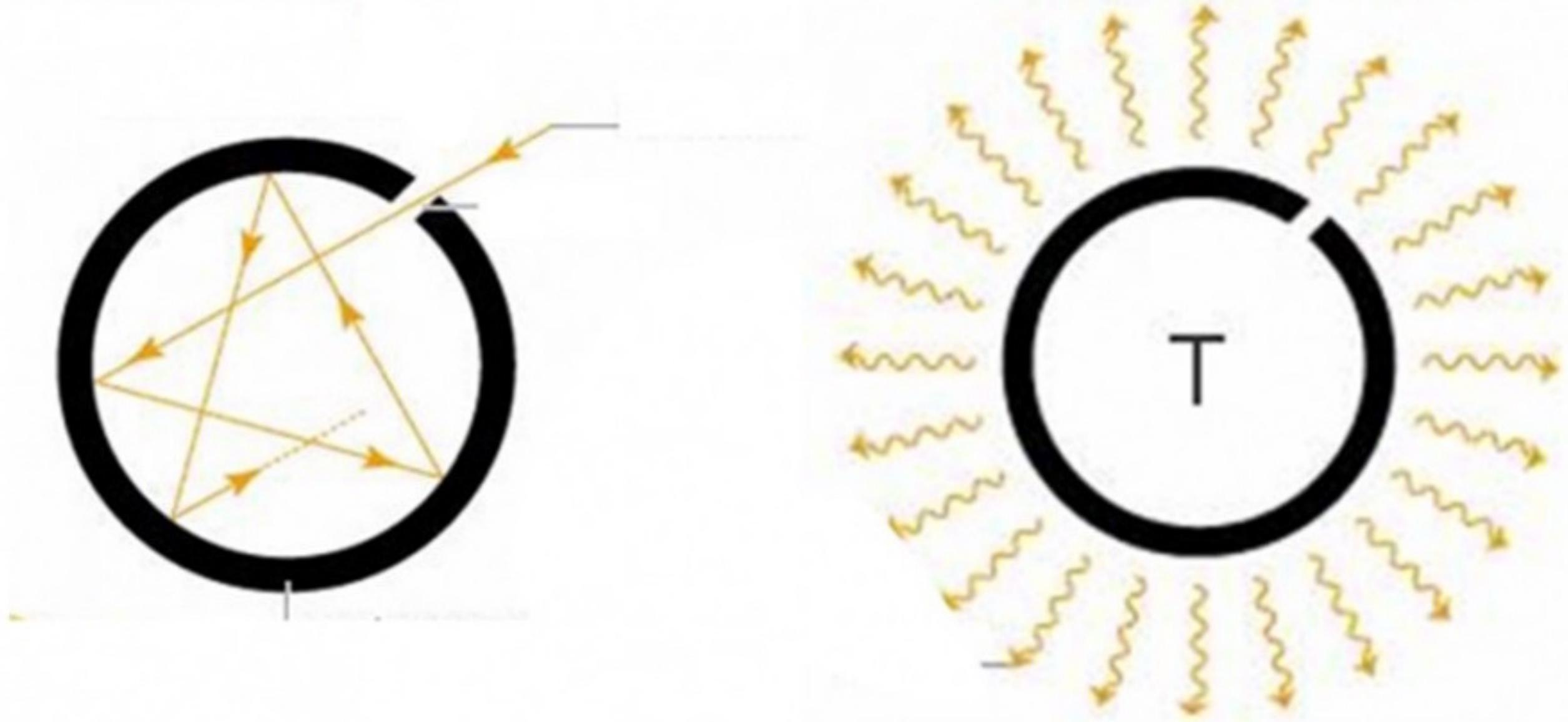
Spettro di ASSORBIMENTO dell'idrogeno



Spettro di EMISSIONE dell'idrogeno



# Corpo nero



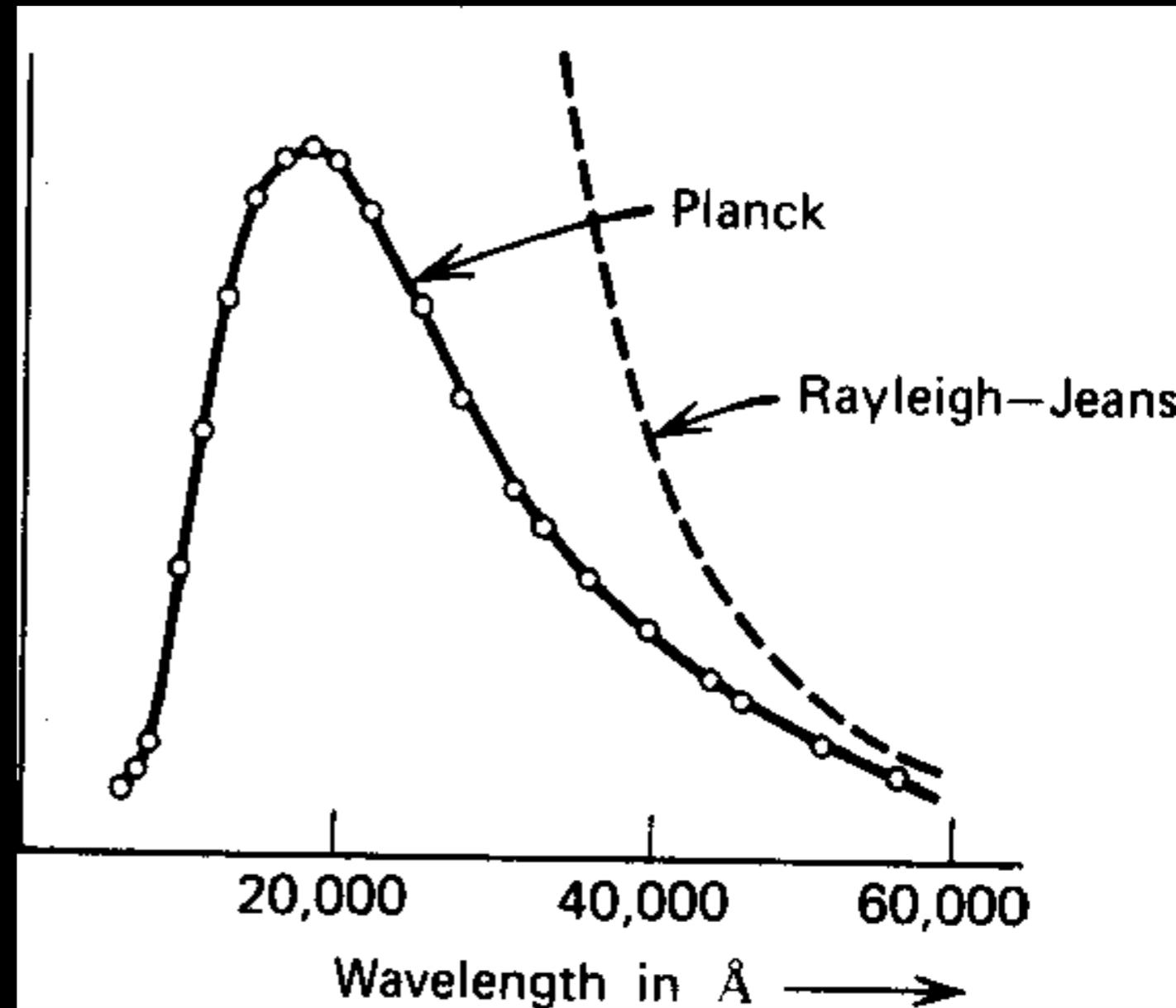
A temperatura costante, gli atomi delle pareti assorbono e emettono radiazione e.m.

Equilibrio tra campo e.m. e atomi delle pareti, con densità di energia costante.

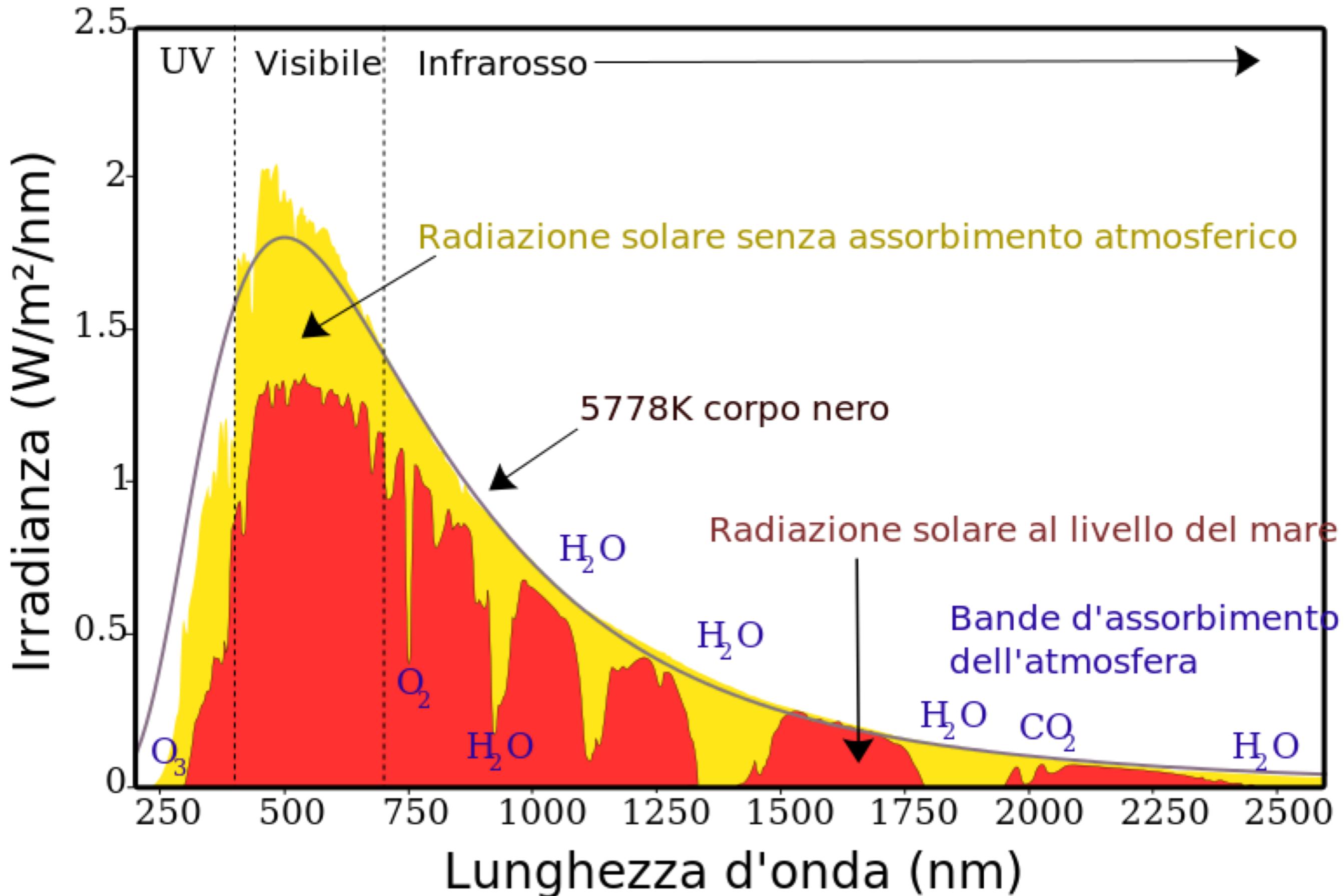
# Corpo nero

Supponendo che le pareti e il campo e.m. si possano scambiare quantità arbitrarie di energia → **catastrofe ultravioletta**

Un corpo nero ideale emetterebbe un'infinita quantità di energia



# Spettro della radiazione solare (Terra)





# Principale problema sperimentale

# Calore specifico

Quantità di energia (calore) per unità di massa che serve per alzare o abbassare la temperatura di una sostanza di 1 grado K.



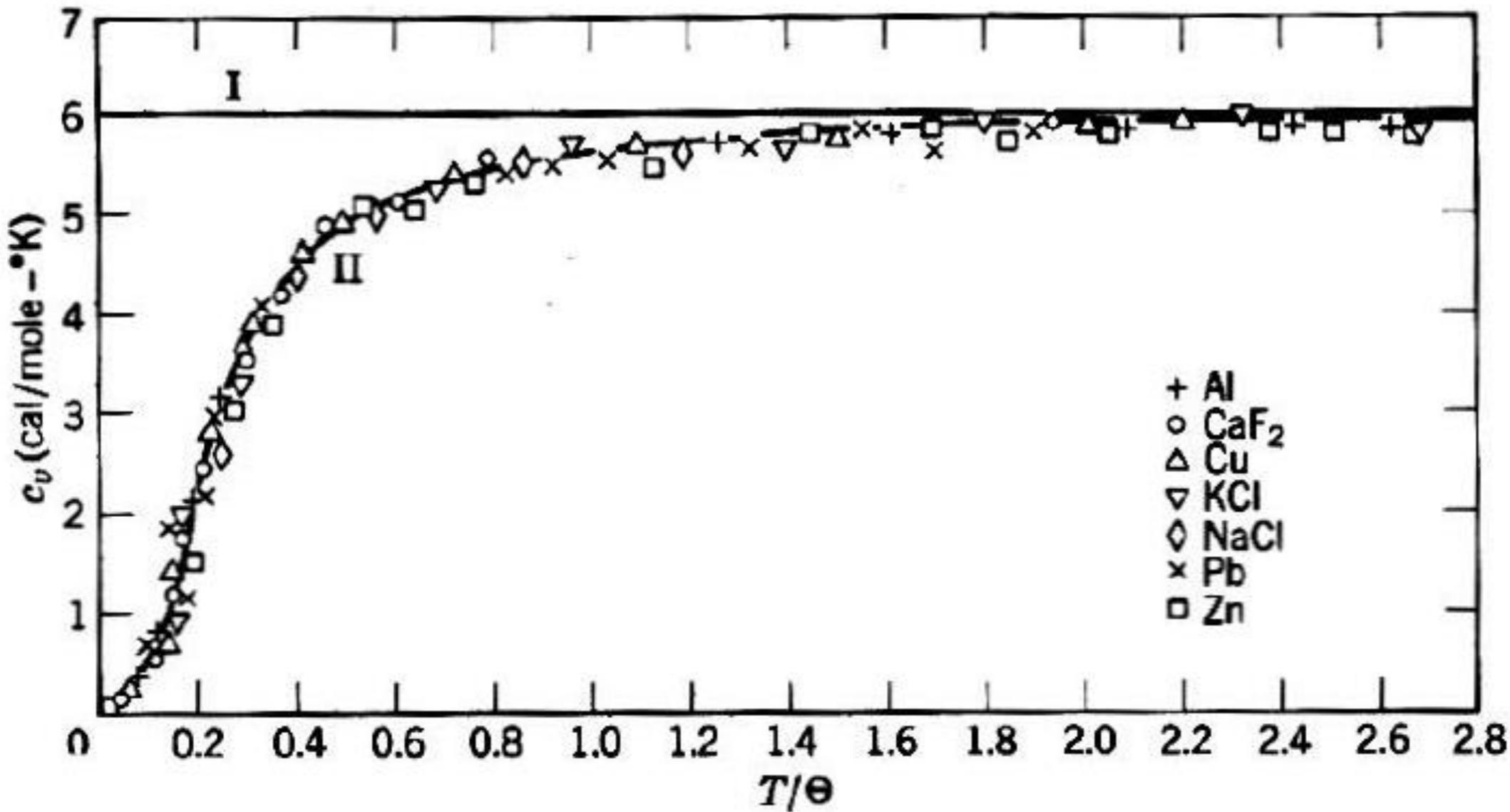
# Legge di Dulong-Petit



Vale la legge di Dulong-Petit: il calore specifico è costante per ogni temperatura

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

# Ma...



**Figure 11-5** The measured specific heat at constant volume, as a function of temperature, for several materials. Horizontal line I represents the Dulong-Petit law, and curve II represents the predictions of the Debye theory.

Si osserva sperimentalmente che, a basse temperature, il calore specifico non è affatto costante, anzi tende ad azzerarsi.

# Nuove idee

Planck (1900): gli scambi energetici sono quantizzati, ovvero l'energia scambiata tra due corpi microscopici può essere solamente un multiplo intero del quanto fondamentale:

$$E = nh\nu$$

dove  $\nu$  è la frequenza di oscillazione e  $n \in \mathbb{Z}_0$

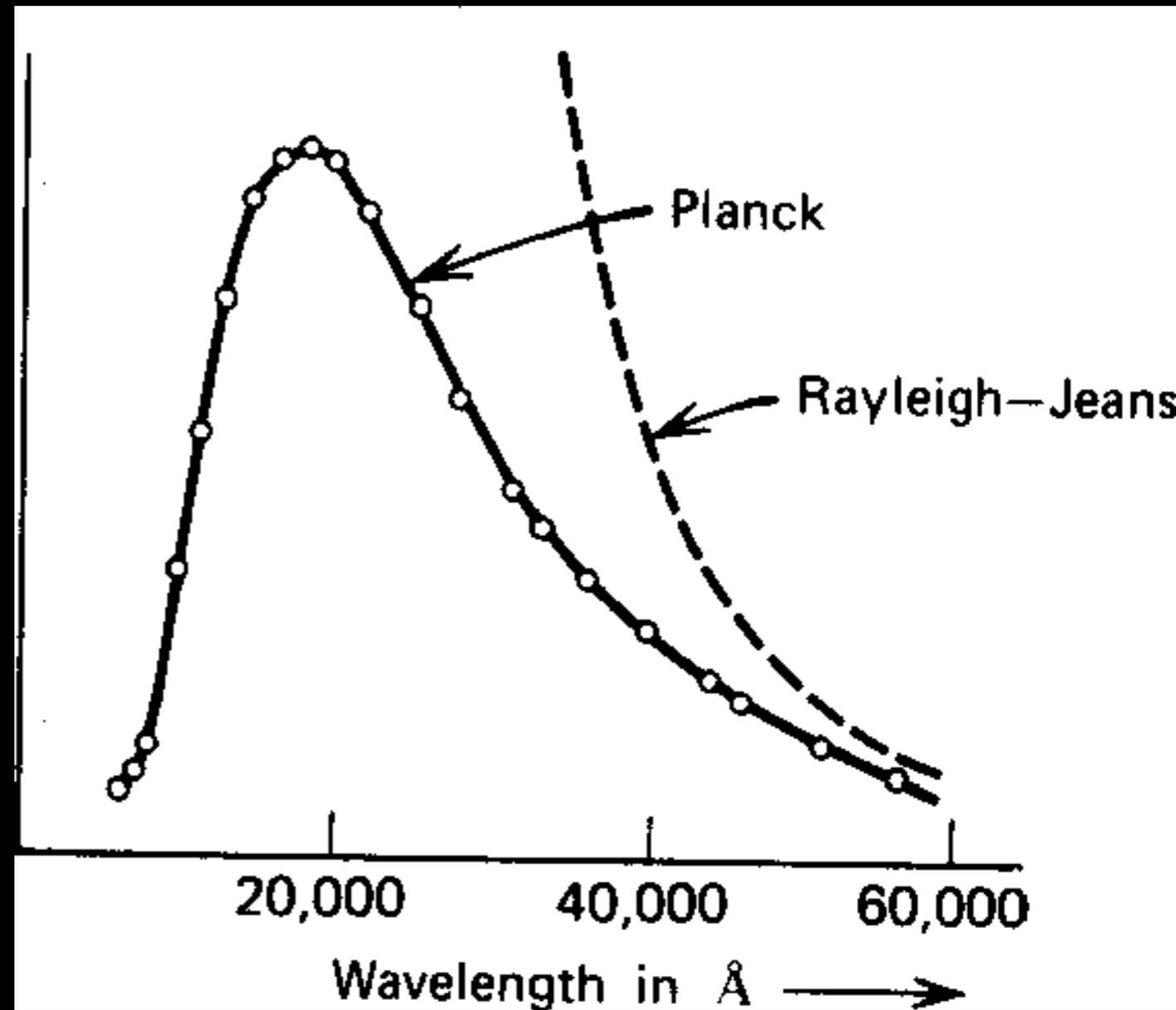
$$h = 6.36 \times 10^{-34} J \cdot s$$



# Corpo nero

Se gli scambi di energia tra le pareti e il campo e.m. avvengono secondo la relazione  $E = nh\nu \rightarrow$  densità di energia nella cavità segue bene i dati sperimentali.

$$\rho(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu$$



# Nuove idee

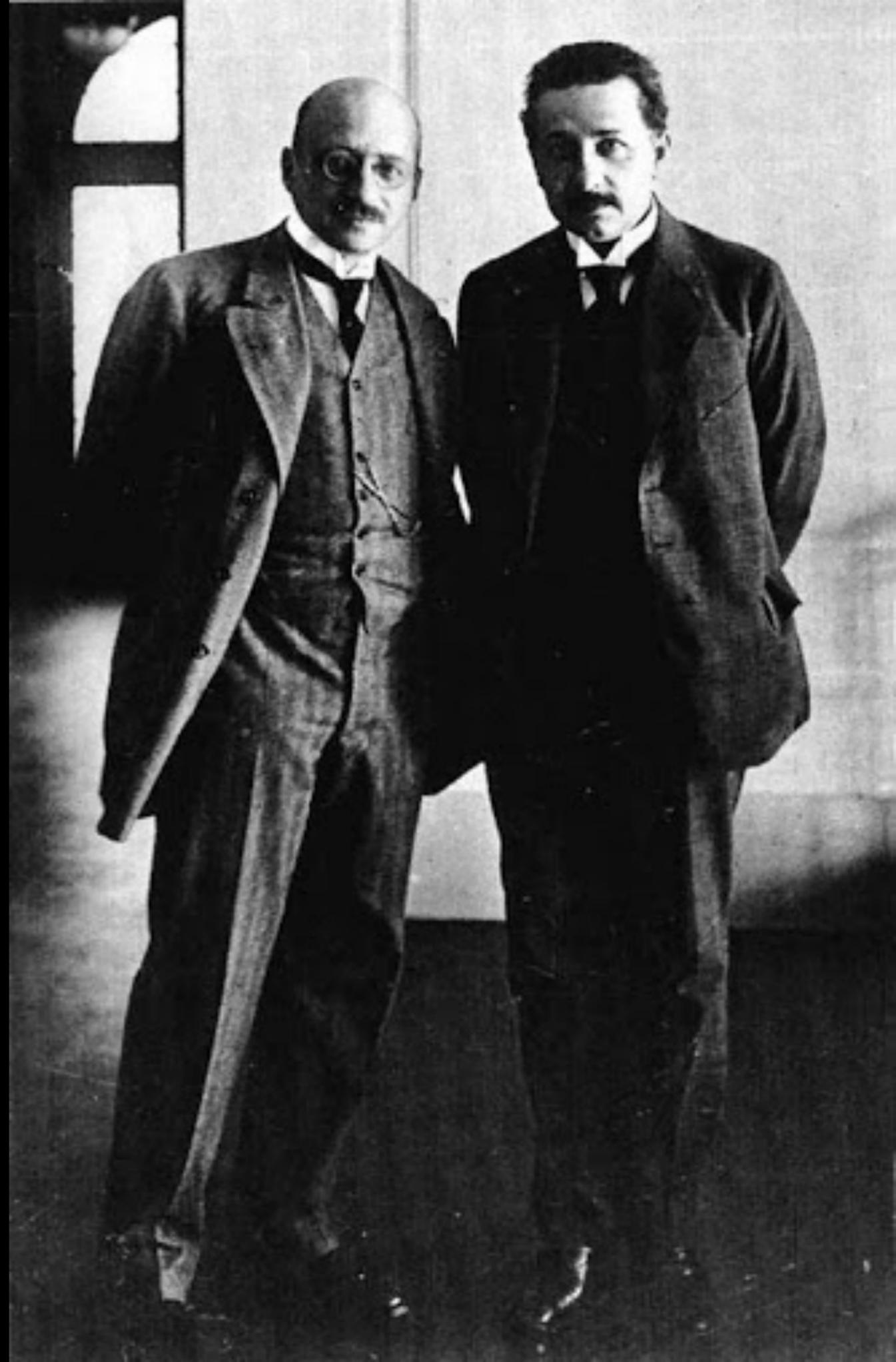
Einstein (1905): applica l'ipotesi di Planck all'energia della radiazione elettromagnetica

$$E = h\nu,$$

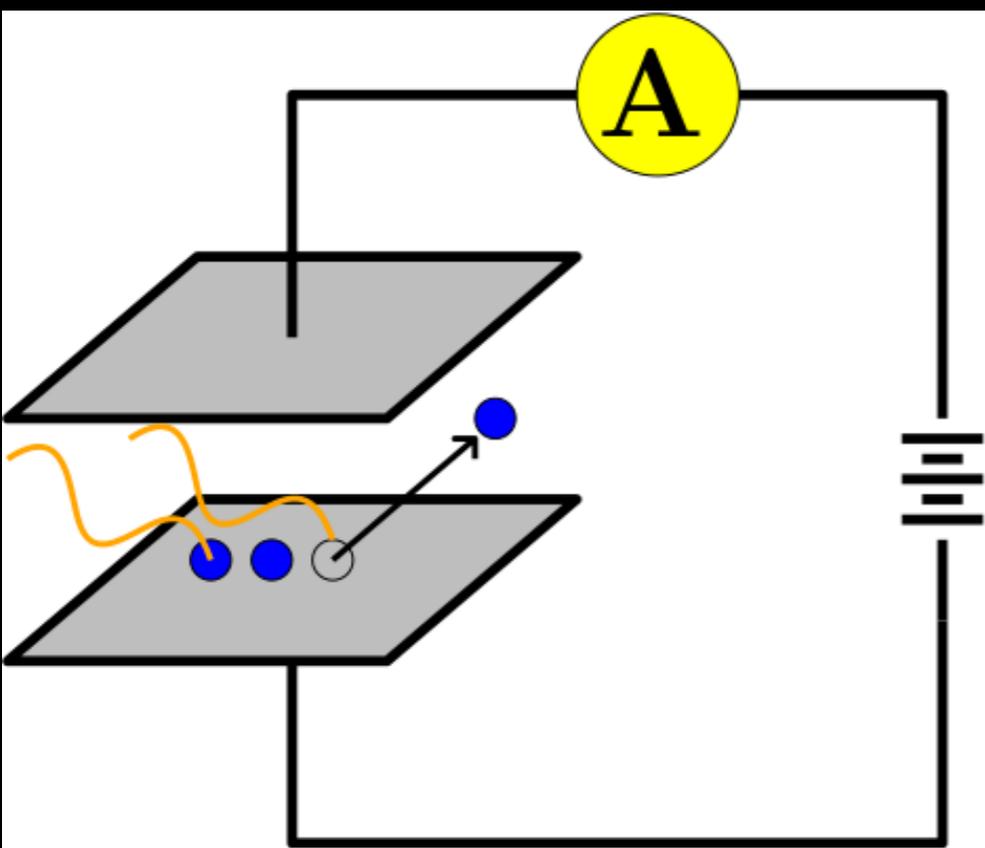
con  $\nu$  frequenza caratteristica del fotone (particella di luce).

Risolve il problema dell'effetto fotoelettrico

Riapre il dibattito sulla natura della luce.



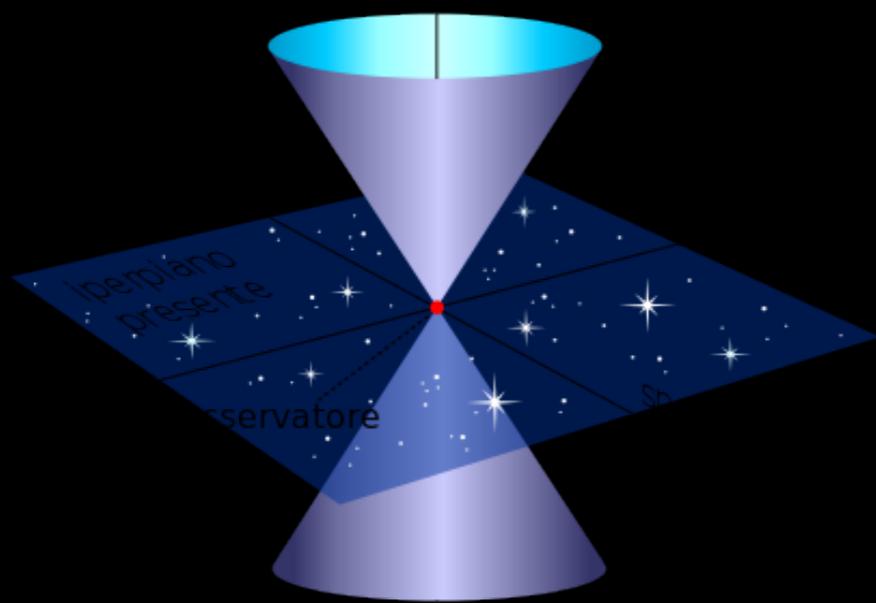
# *Annus mirabilis*



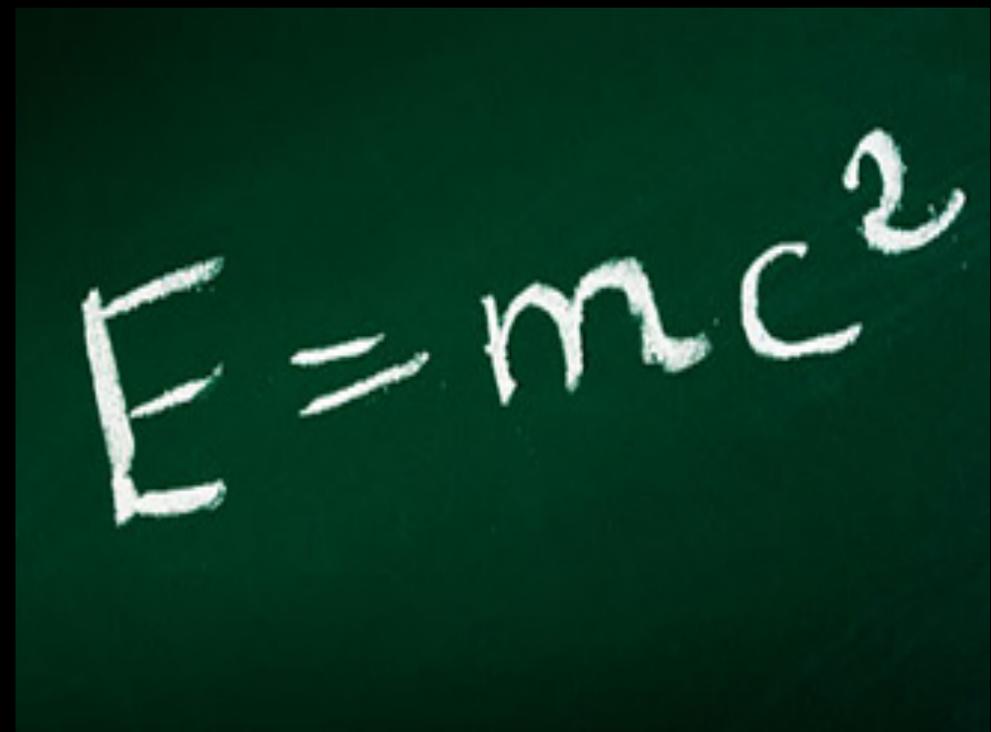
Effetto fotoelettrico



Moto browniano



Relatività speciale



Massa-Energia

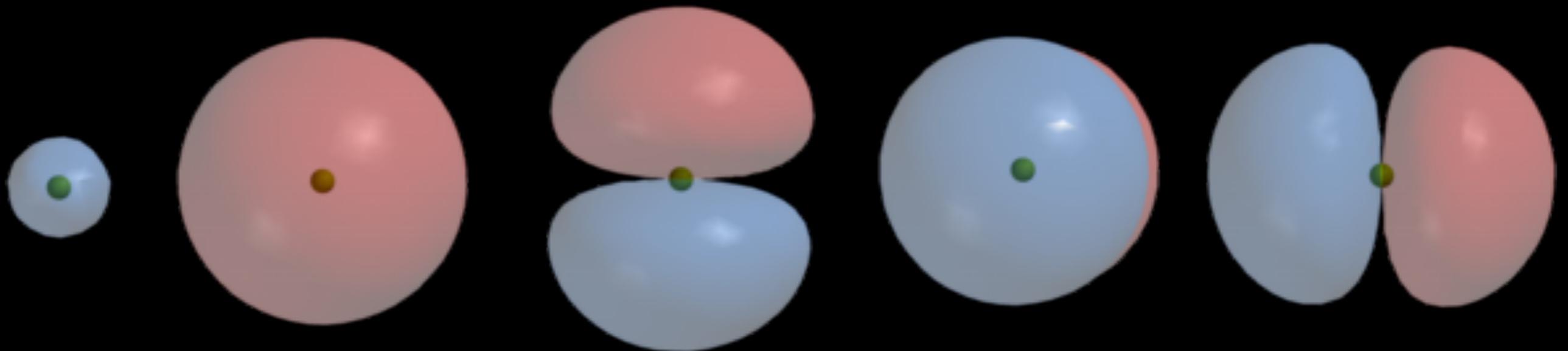
# Atomo di Bohr

Bohr (1913): gli elettroni non sono su orbite circolari. Introduce il concetto di *orbitale atomico*.

Ogni orbitale è associato a un valore energetico definito.

Gli elettroni occupano gli orbitali, cioè assumono quei determinati valori energetici.

$$|E_i - E_f| = \Delta E = h\nu$$

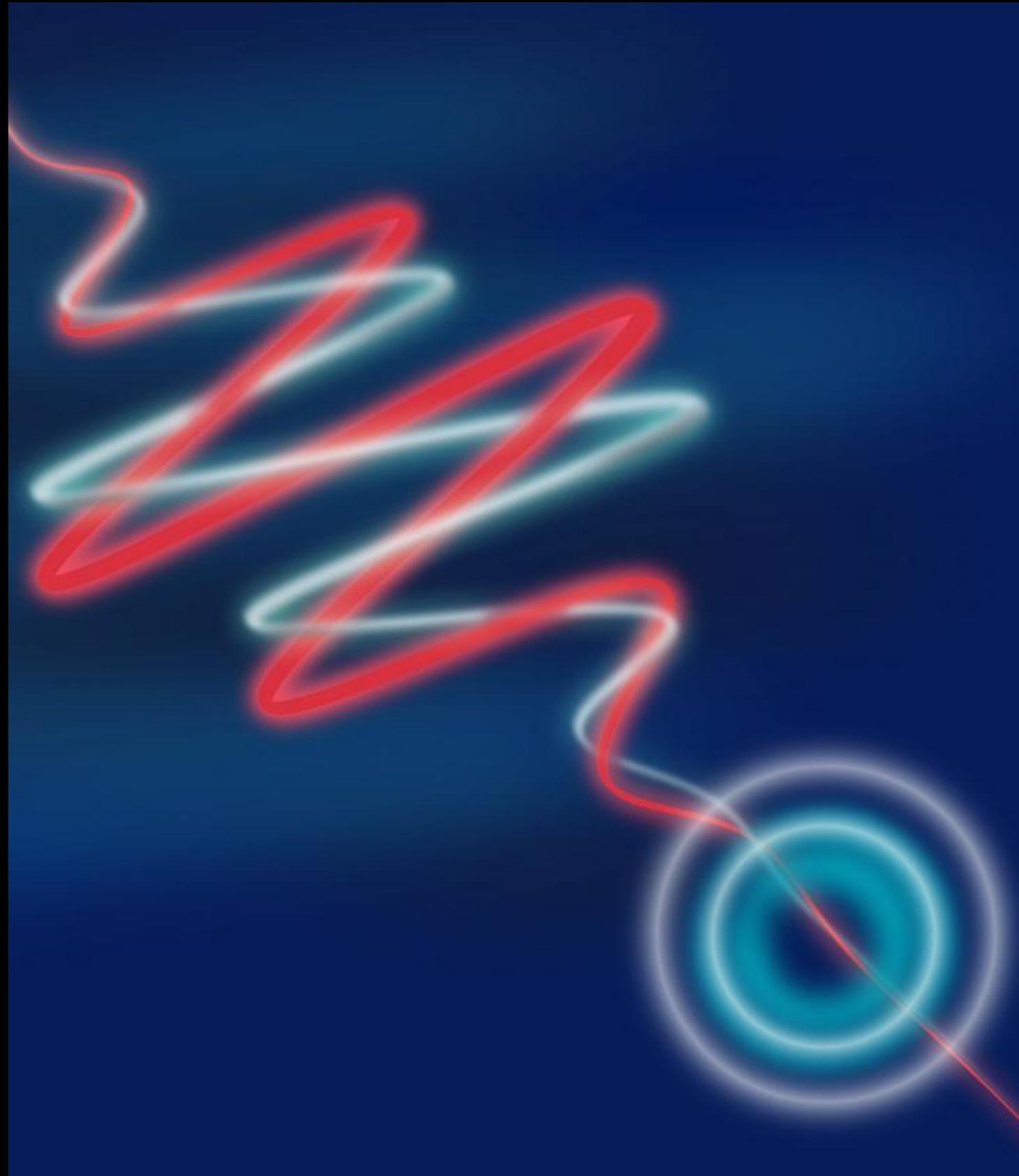


# De Broglie

Louis De Broglie (1924): a ogni corpo dotato di quantità di moto  $p$ , è possibile associare una lunghezza d'onda  $\lambda$ , detta di De Broglie:

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

*Onda di materia*



Perché non avvertiamo la  
nostra natura ondulatoria?



$$m_{man} = 70kg$$

$$v_{man} = 2 \frac{m}{s}$$

$$p_{man} = mv = 140kg \frac{m}{s}$$

$$h = 6.626 * 10^{-34} \frac{m^2}{s}$$

$$\lambda_{man} \simeq 4.7 * 10^{-36} m$$

# Passaggio a una teoria quantistica

Old quantum theory



Nuovo paradigma

- Correzioni alla fisica classica senza formalizzazione di una nuova teoria

- Teoria ben formalizzata
- Principi fondamentali
- Previsioni corrette

{ Bohr-Heisenberg  
Born  
Schrodinger

# Storia non lineare...

- Niels Bohr e Werner Heisenberg erano all'università di Copenhagen
- L'interpretazione ortodossa si è formalizzata dagli anni '20 agli anni '50
- Storia lunga, fatta di proposte e contro-proposte
- “Shut up and calculate”: David Mermin

# Storia non lineare... Però

Oggi esistono principi fondamentali

MQ è probabilistica (intrinsecamente!).

Si abbandona il determinismo?

# Storia non lineare... Però

Oggi esistono principi fondamentali

Vale un “limite classico”:



→  
*Oggetti grandi*  
*Energie grandi*



# Storia non lineare... Però

Oggi esistono principi fondamentali

Vale un "limite classico":



→  
*Oggetti grandi*  
*Energie grandi*



→  
*Oggetti lenti*



# Indeterminazione

Coppie di grandezze fisiche non possono essere misurate congiuntamente con precisione arbitraria.

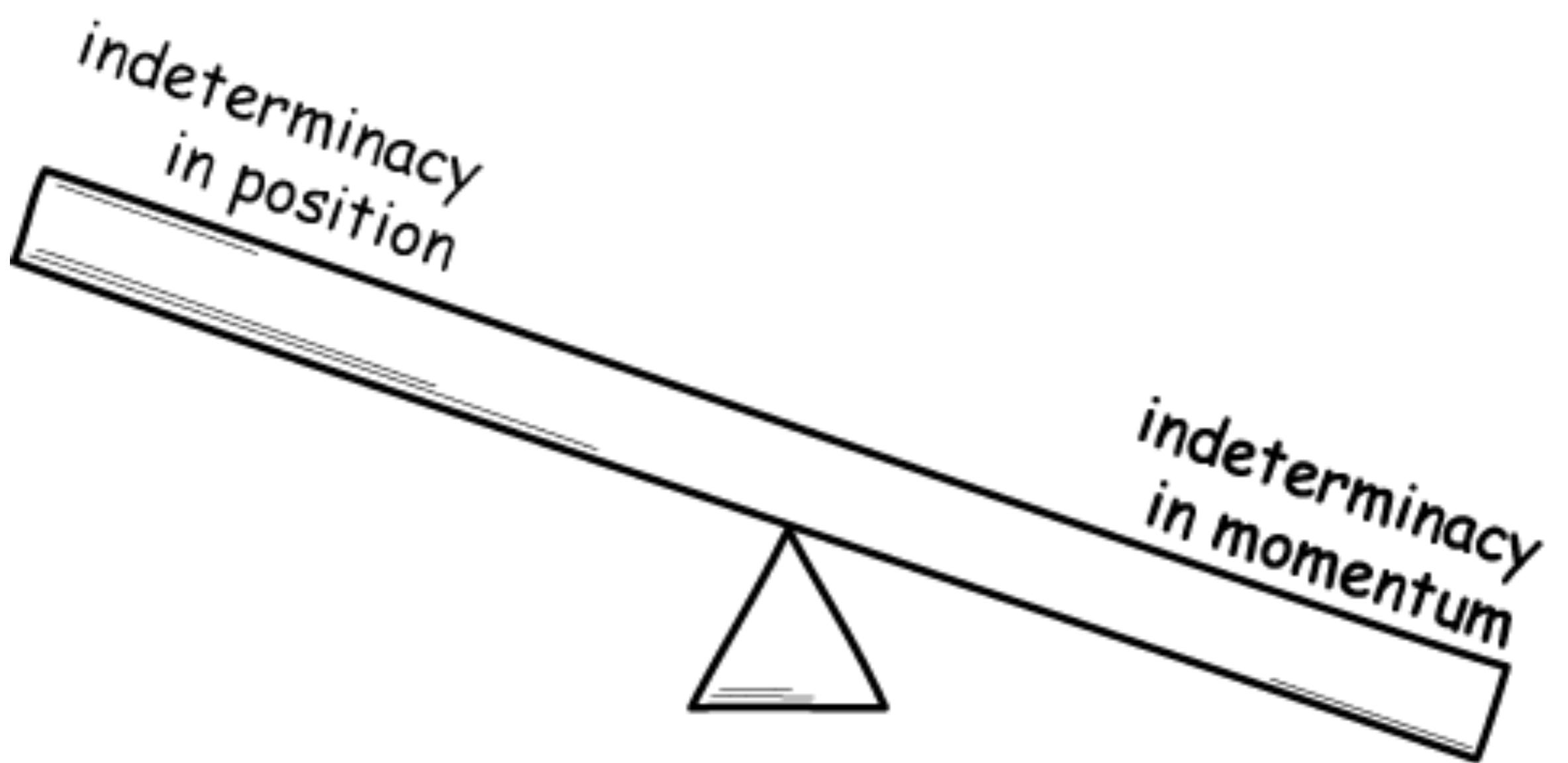
$$[A, B] \neq 0$$

$$AB - BA \neq 0$$

$$[x, p] = i\hbar$$

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

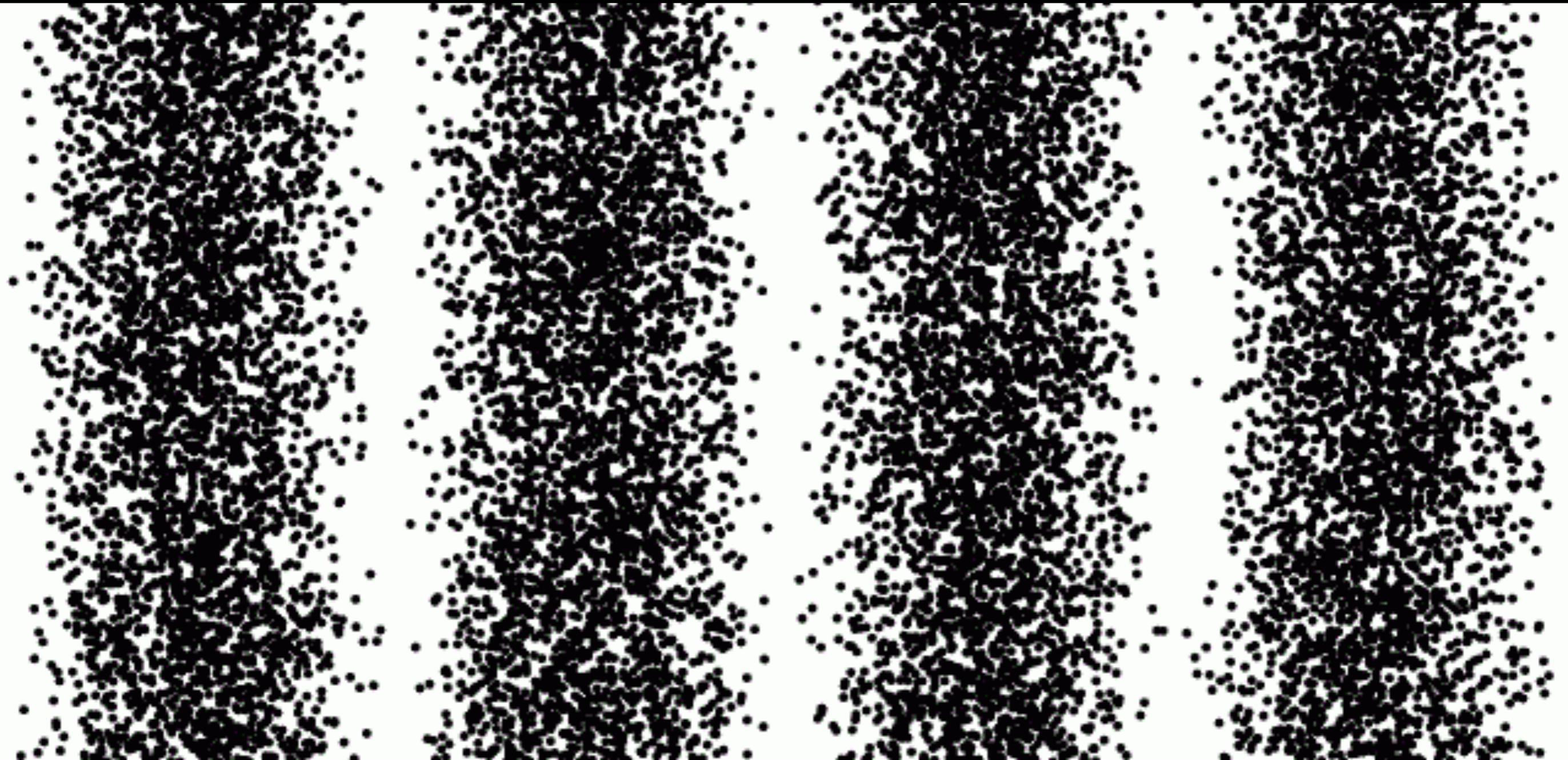




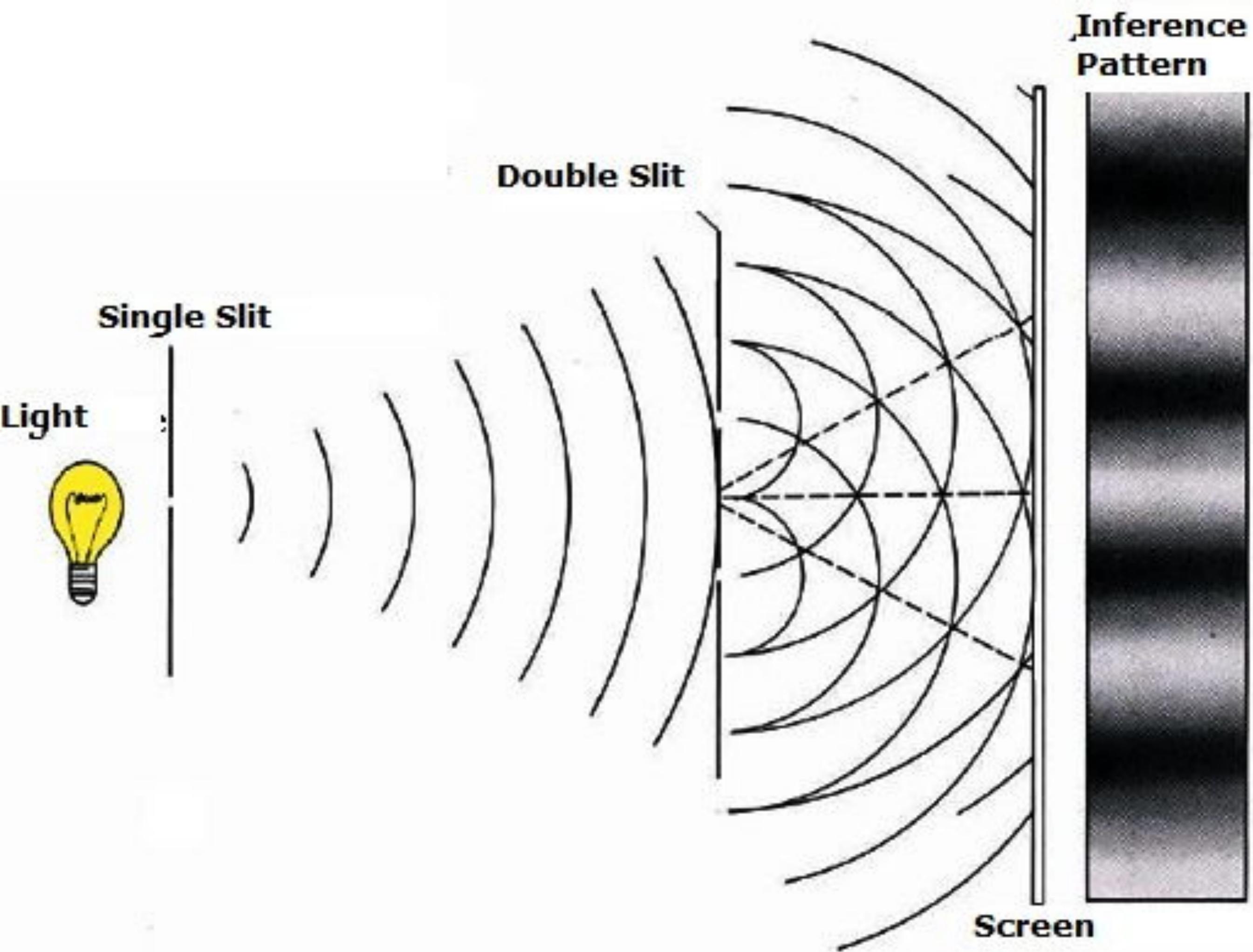
Esempio: posizione e velocità di una particella.

Più riesco a localizzare la particella, meno conosco la sua velocità, e viceversa.

# Complementarità

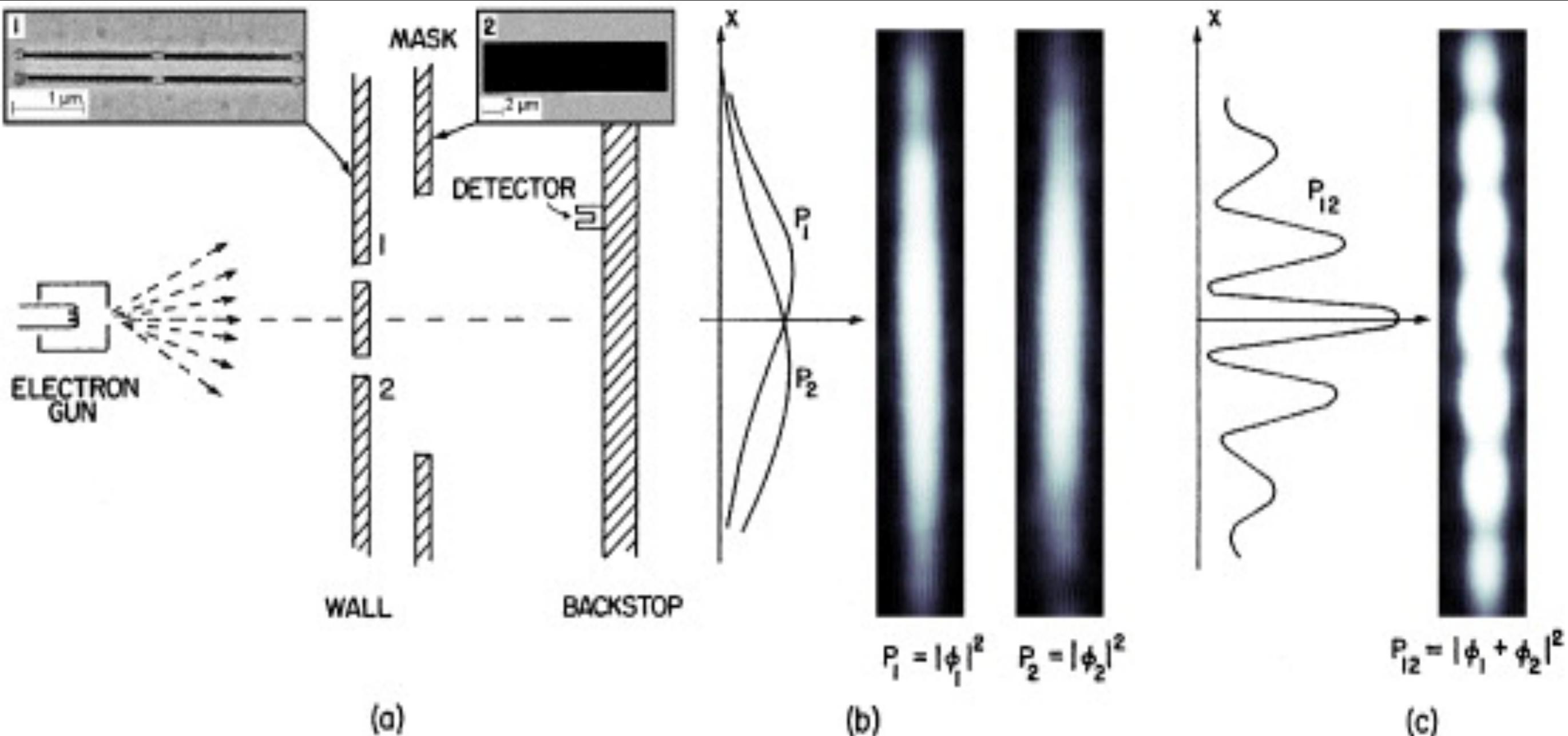


Due diverse nature di un sistema fisico non possono mai essere rivelate contemporaneamente.



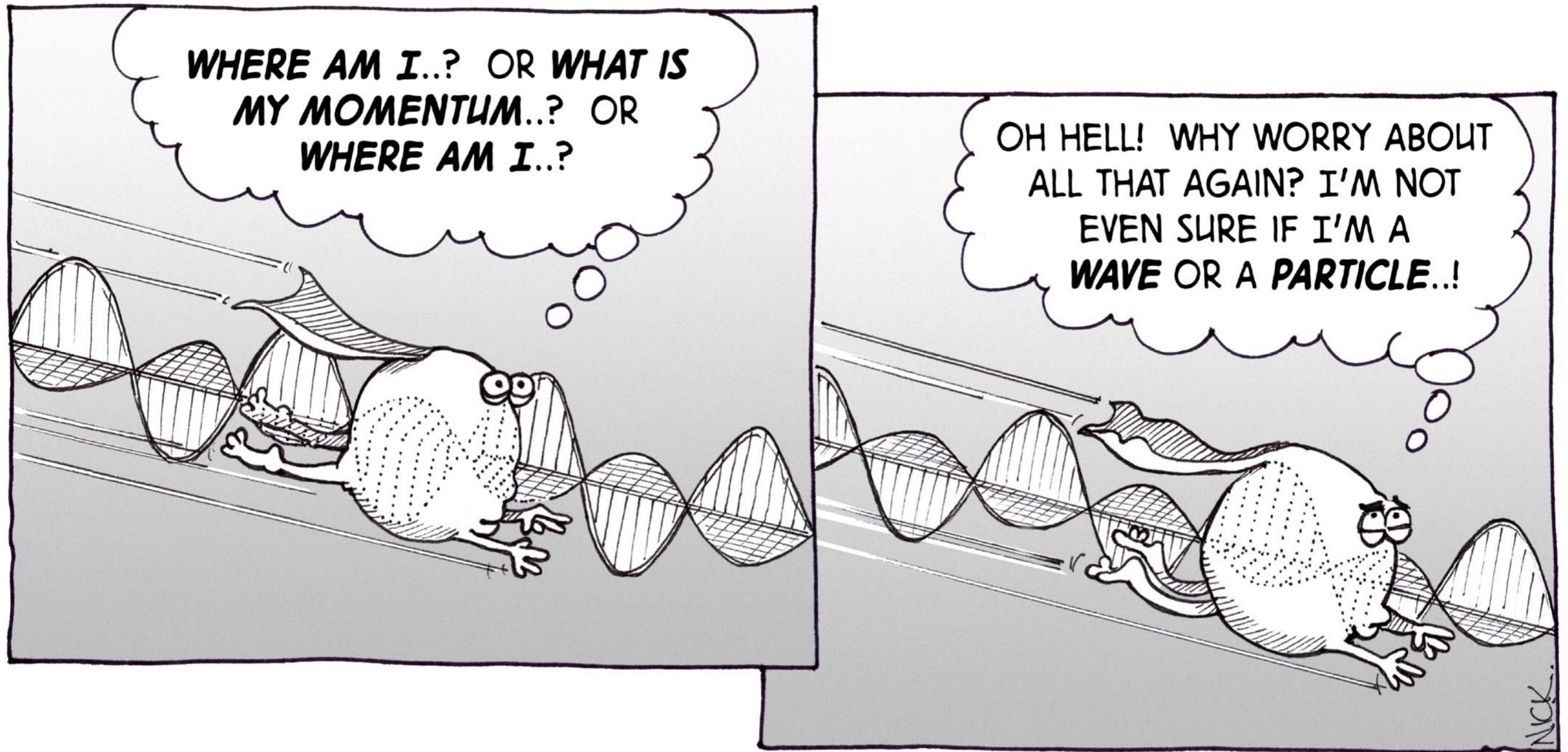
Anche gli elettroni hanno una doppia natura.

È possibile fare esperimenti che mostrino l'una o l'altra, ma in nessun esperimento si riuscirà mai a vederle *entrambe* in contemporanea.



Jonsson (1961), Merli-Missiroli-Pozzi (1974), Tonomura (1989)

# Detto in sintesi...



Photon self-identity issues

# Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi$$



Schrödinger si chiede come evolvano le onde di materia al passare del tempo: nel 1926 pubblica la sua famosa equazione.

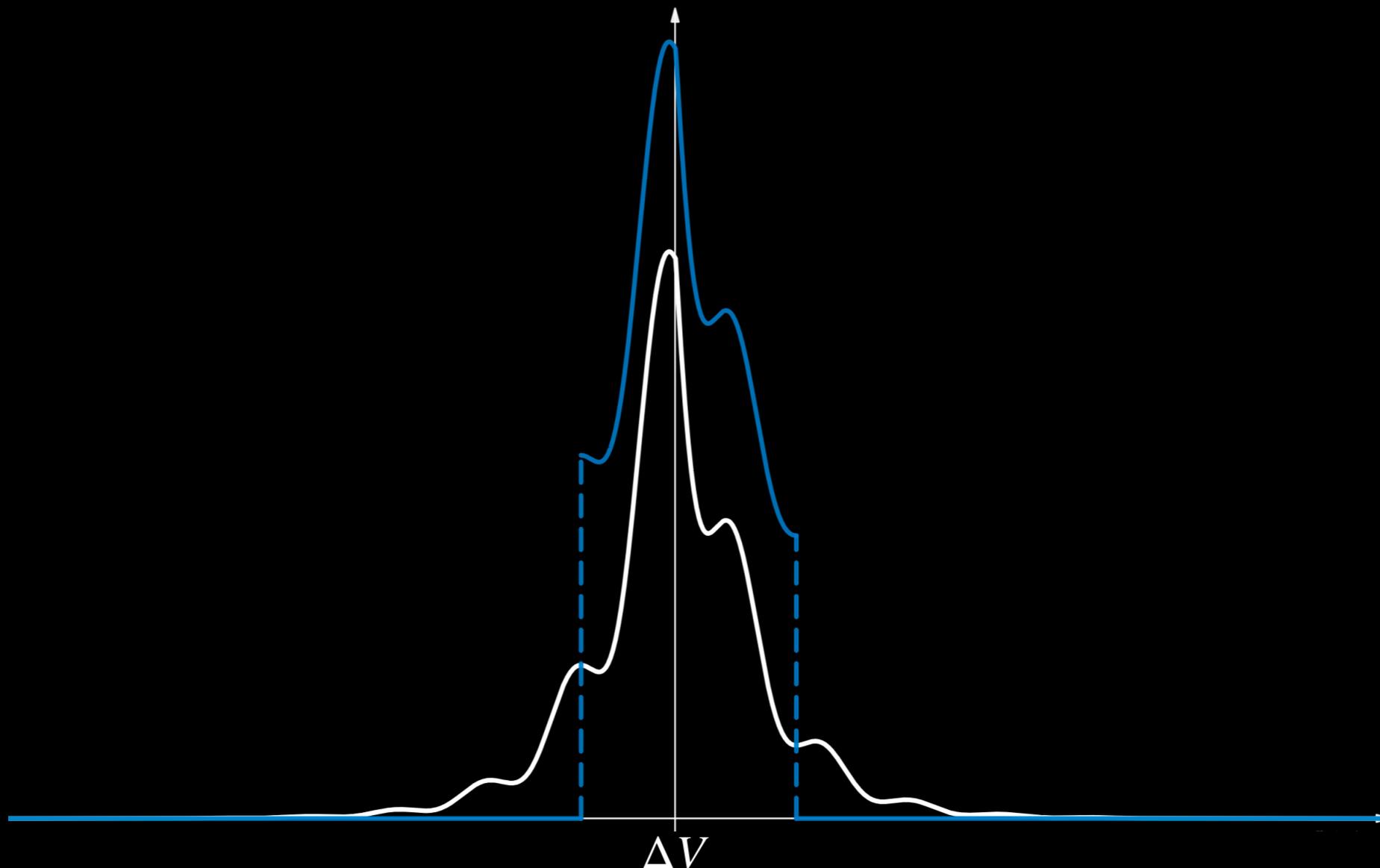
# Equazione di Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right) \psi(x, t)$$

- Principio dinamico fondamentale (come le leggi di Newton o le equazioni di Maxwell).
- Evoluzione indisturbata del sistema quantistico.
- **No** traiettorie.
- $\psi(x, t)$  = funzione d'onda, soluzione della Equazione.
- $|\psi\rangle$  = *stato* del sistema.

# Funzione d'onda?

- Regola di Born, **interpretazione ortodossa**:  $\psi(x, t)$  è una *ampiezza di probabilità*.
- $|\psi(x, t)|^2 \cdot \Delta V$  è la probabilità di trovare la particella nel volume  $\Delta V$ , attorno alla posizione  $x$  e al tempo  $t$ .
- Probabilità non epistemica.



# Sovrapposizione

La sovrapposizione (somma) di due soluzioni dell'equazione di Schrödinger è anch'essa soluzione della stessa equazione

$$\Psi_1(x, t);$$

$$\Psi_2(x, t);$$

$$\Psi(x, t) = a_1\Psi_1(x, t) + a_2\Psi_2(x, t).$$

$$\rho_1(x, t) = \Psi_1^*(x, t)\Psi_1(x, t) = |\Psi_1(x, t)|^2;$$

$$\rho_2(x, t) = \Psi_2^*(x, t)\Psi_2(x, t) = |\Psi_2(x, t)|^2;$$

Interferenza quantistica

$$\rho(x, t) = |\Psi_1(x, t)|^2 + |\Psi_2(x, t)|^2 + \Psi_1^*(x, t)\Psi_2(x, t) + \Psi_2^*(x, t)\Psi_1(x, t)$$

# Misurazione

- Se misuro una particella in un volume  $V$  al tempo  $t$ , una misurazione *immediatamente* successiva rivela **certamente** la particella ancora in  $V$ .
- **Collasso** della funzione d'onda: si deve azzerare fuori da  $V$ .

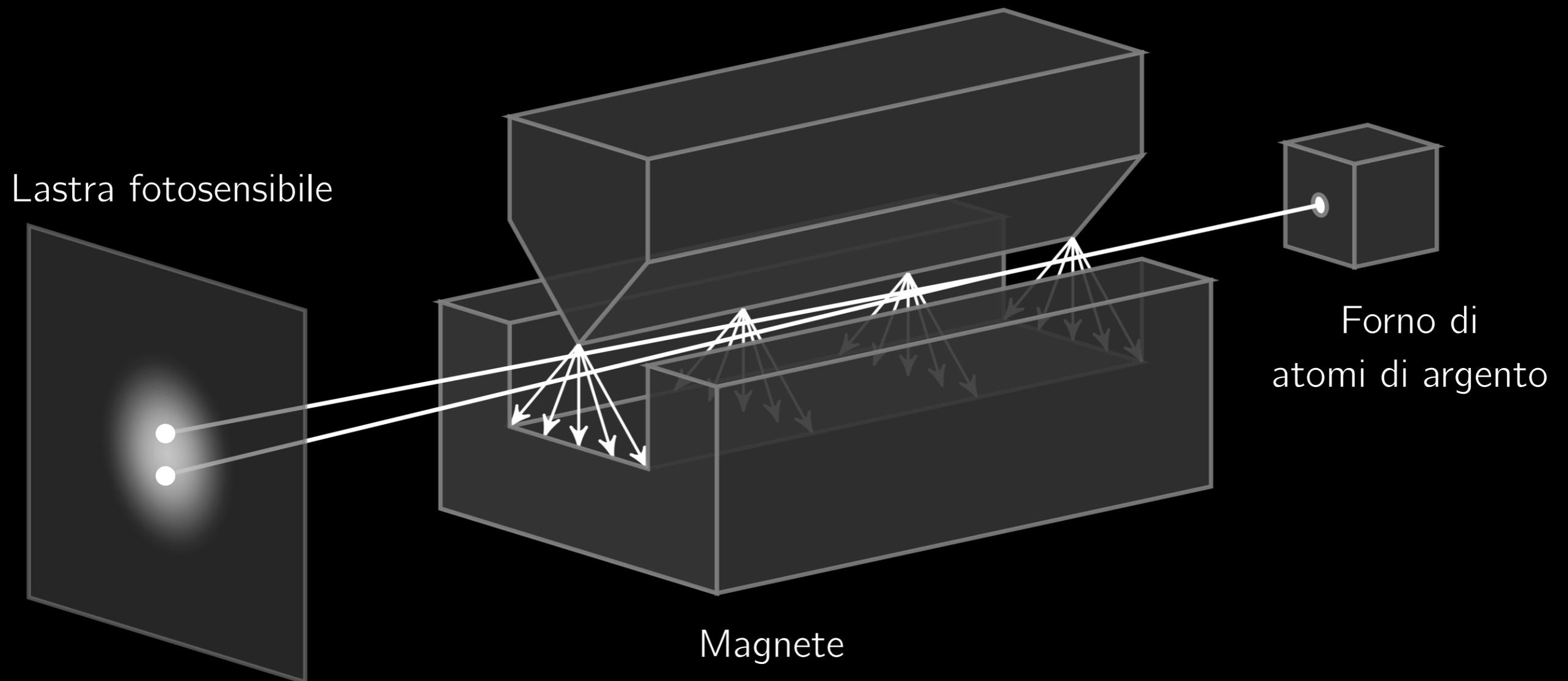
## Due dinamiche ben distinte

- Equazione di Schrödinger (lineare e deterministica)
- Collasso della funzione d'onda (stocastico, non lineare) dopo a una misurazione.

# Stern-Gerlach

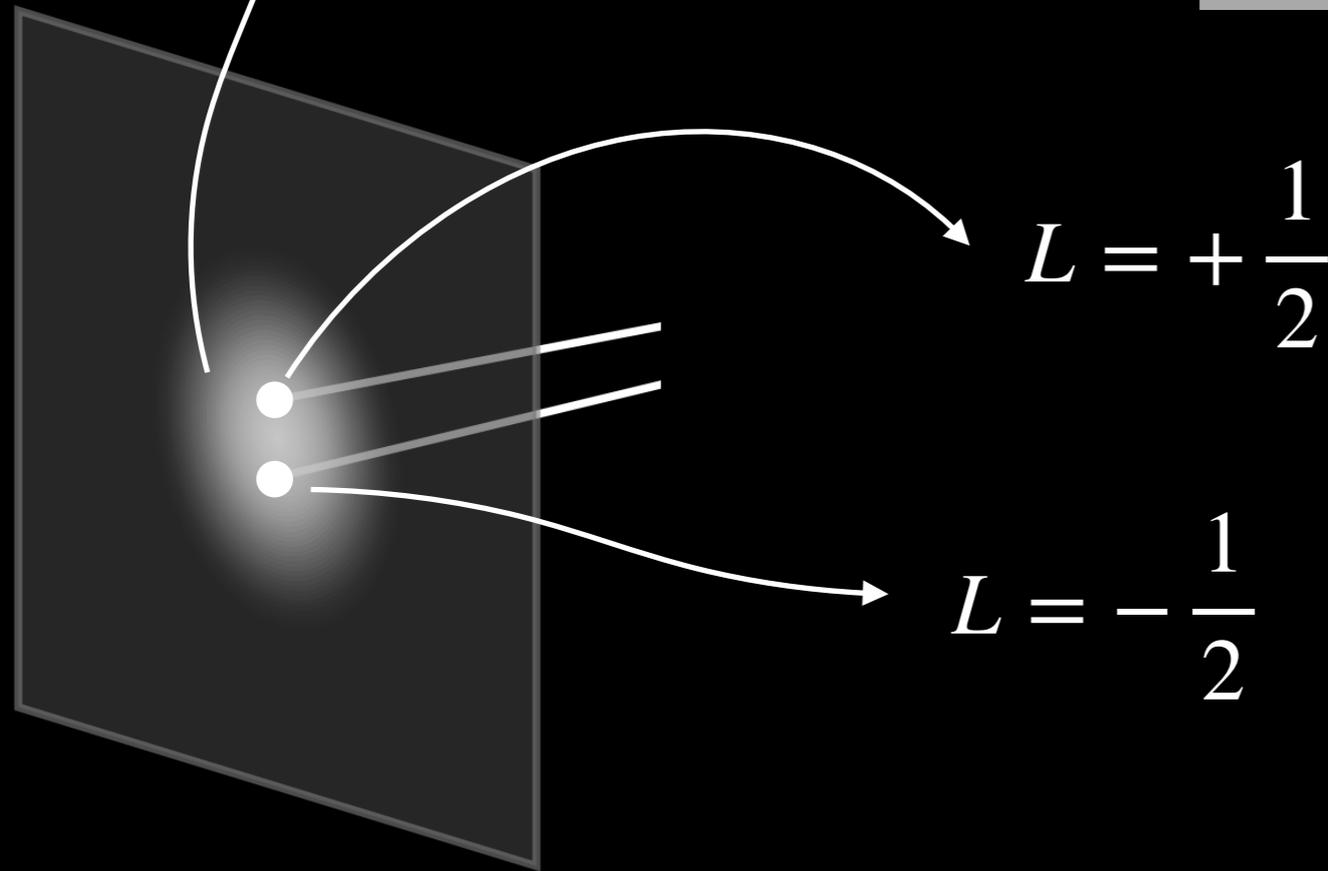
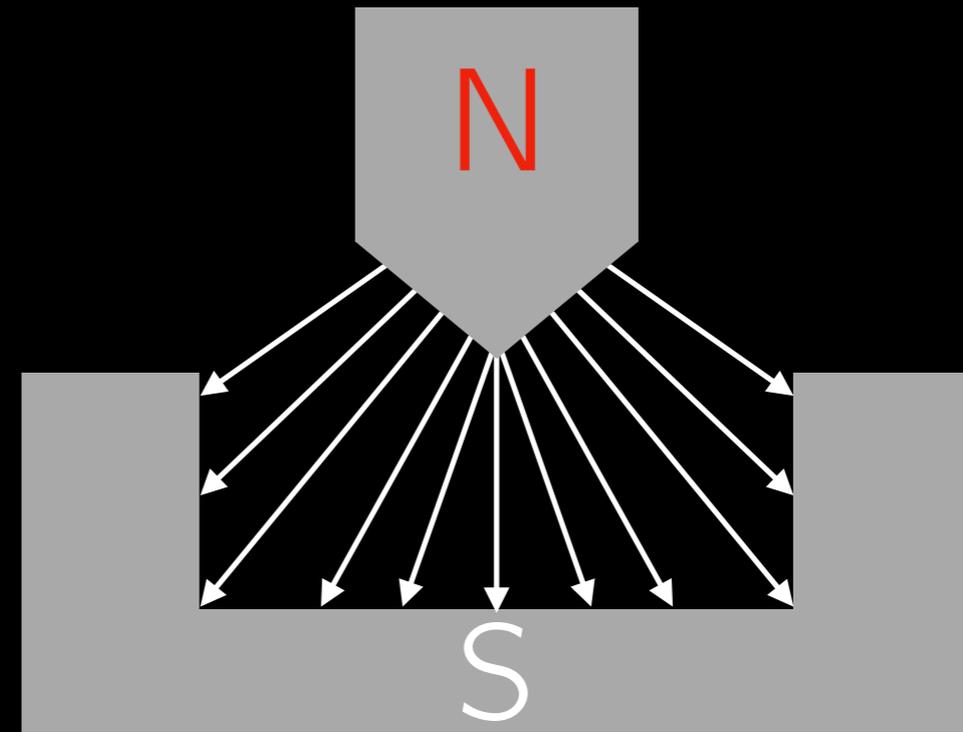
Dimostrano che il momento angolare è spazialmente quantizzato...

Ma noi lo usiamo per capire come si applica la regola di Born!



# Stern-Gerlach

$L$  non è quantizzato e può assumere ogni possibile valore

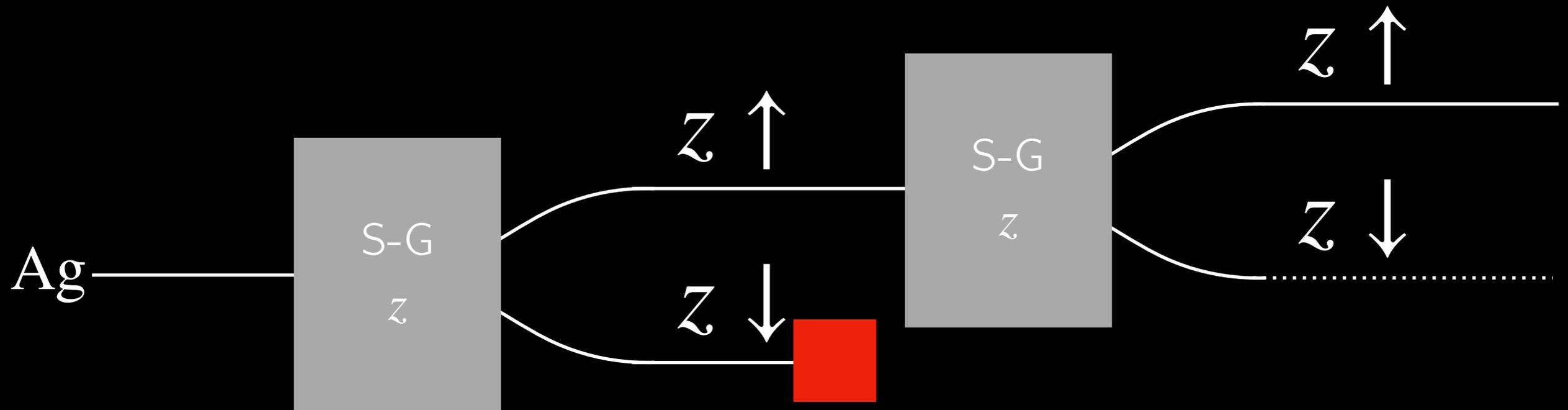


$$L = +\frac{1}{2}$$

$$L = -\frac{1}{2}$$

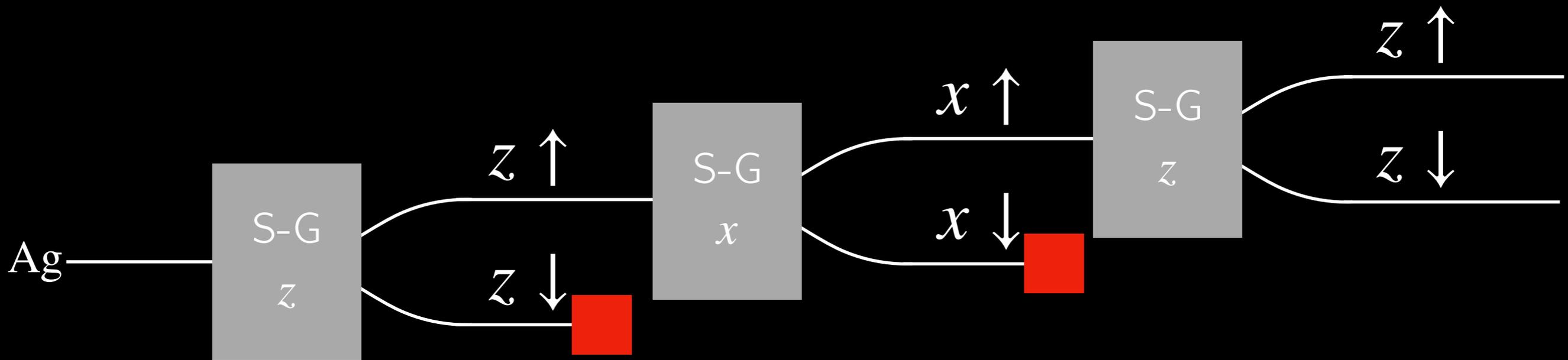
Cioè è quantizzato: la misura può **solamente** dare due soli valori

# Stern-Gerlach



Misure successive del momento  
angolare nella stessa direzione  
“selezionano” un risultato di misura

# Stern-Gerlach



Una misura successiva del momento angolare in direzione  $x$  “distrugge” la determinazione della misura lungo  $z$

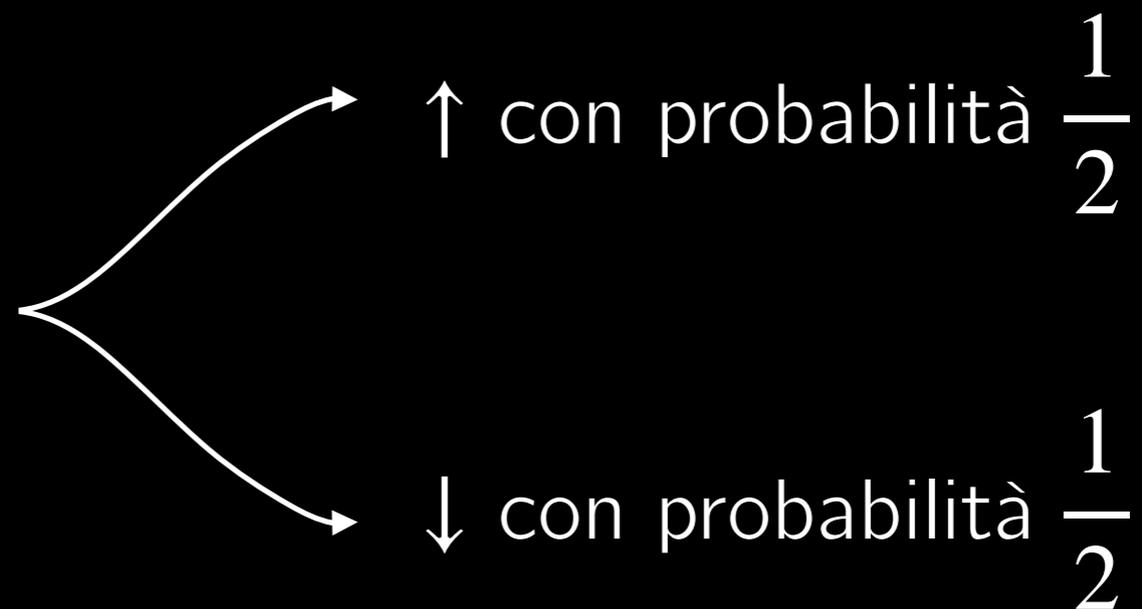
# Stern-Gerlach

Prototipo per una misurazione ideale quantistica

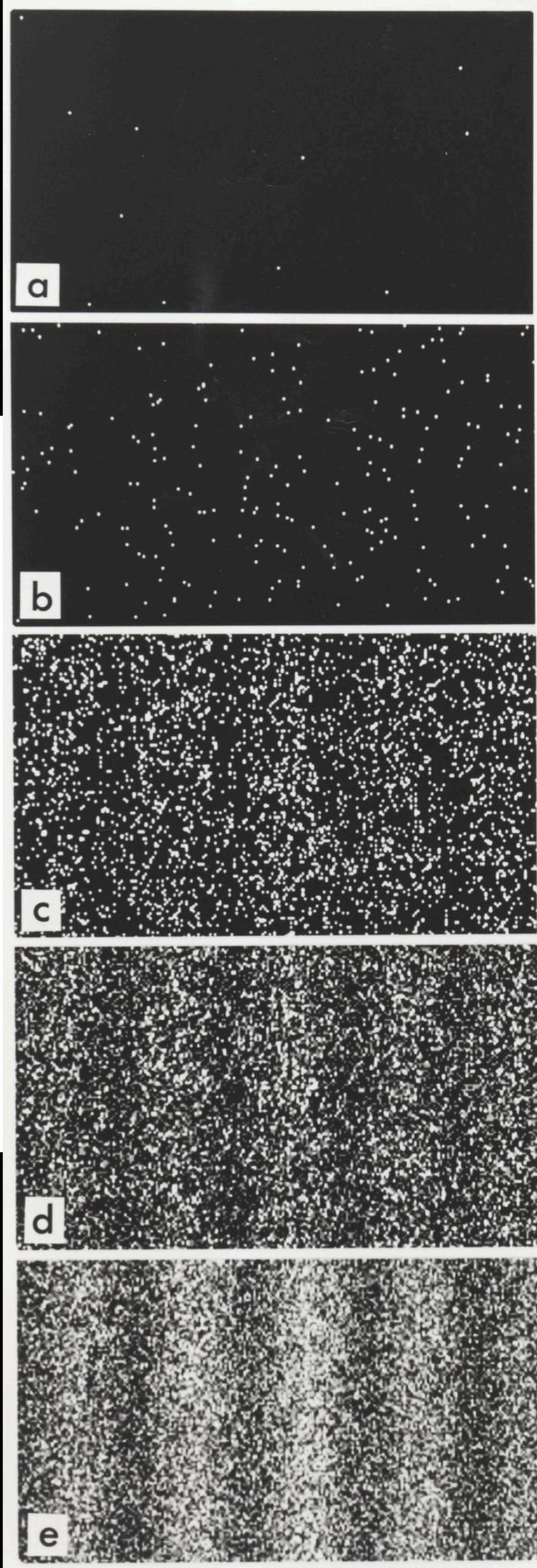
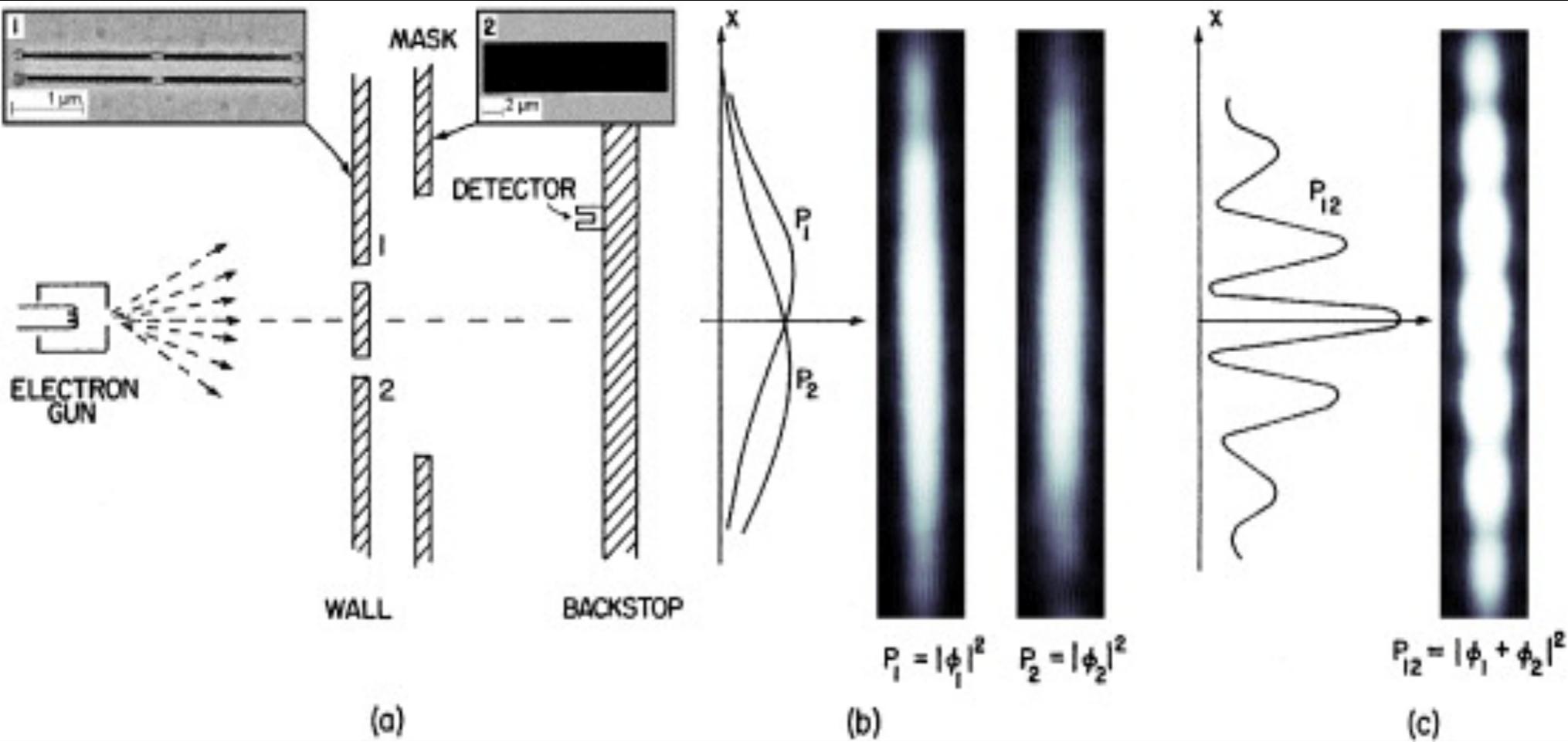
Un singolo atomo di Ag ha funzione d'onda in

sovrapposizione:  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$

Quando misurato, lo stato collassa in:



# Esperimento Young-Tonomura

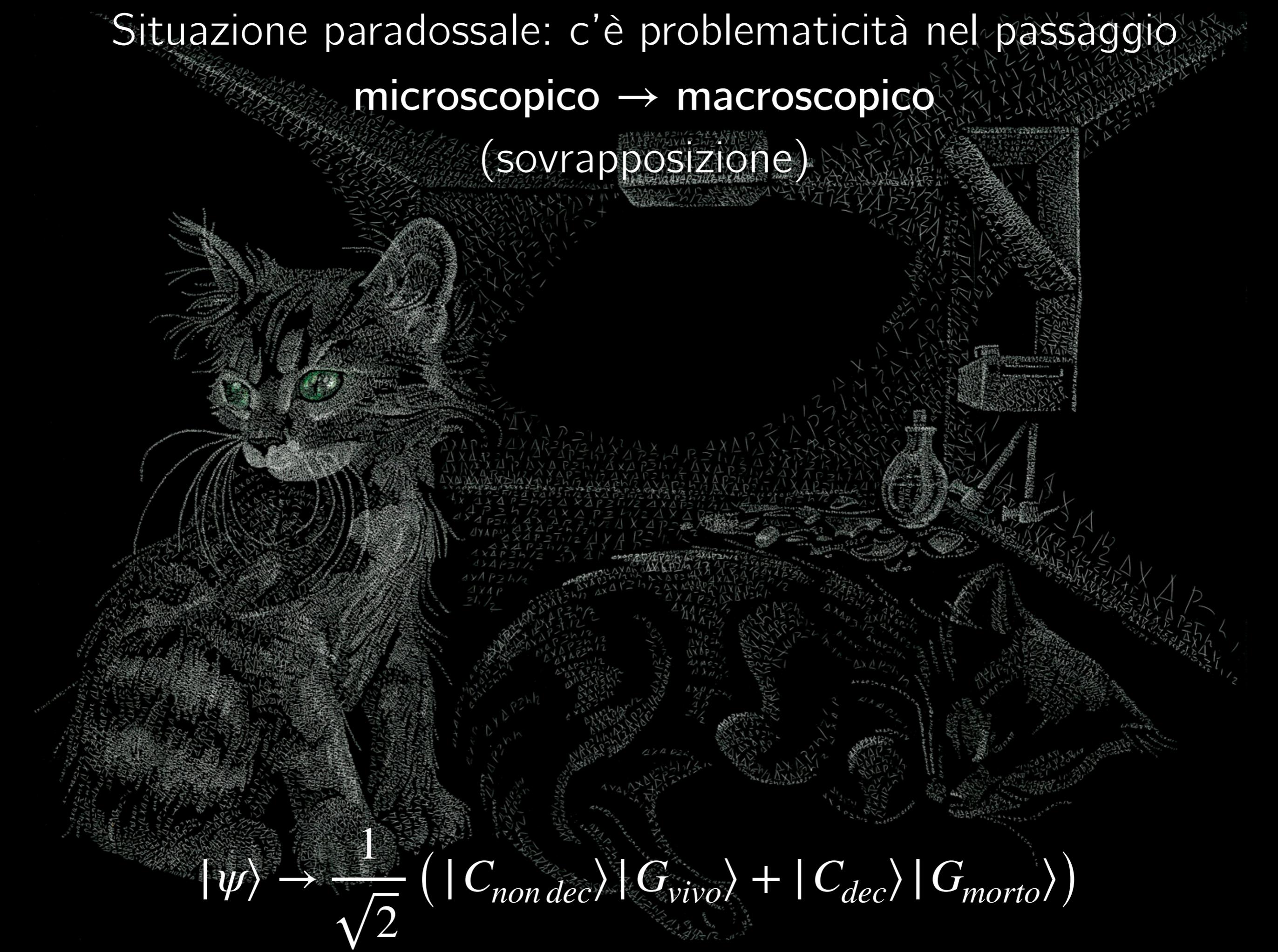


Jonsson (1961), Merli-Missiroli-Pozzi (1974),  
Tonomura (1989)

Situazione paradossale: c'è problematicità nel passaggio

microscopico  $\rightarrow$  macroscopico

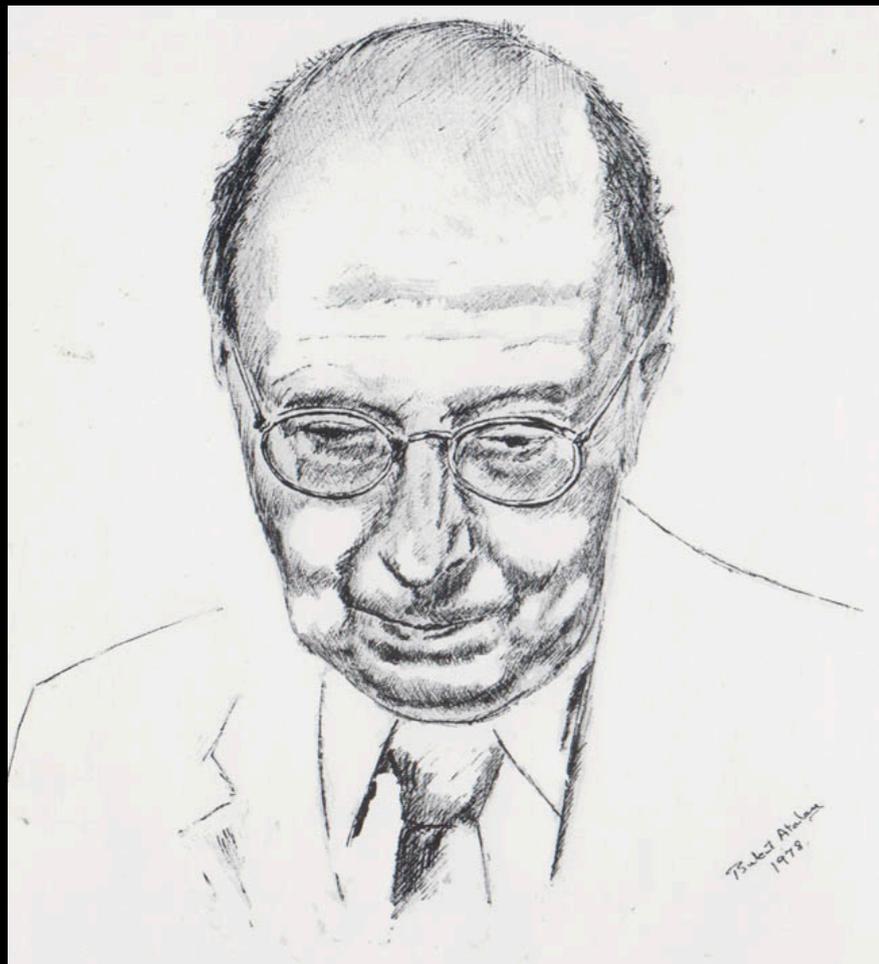
(sovrapposizione)


$$|\psi\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|C_{non\ dec}\rangle |G_{vivo}\rangle + |C_{dec}\rangle |G_{morto}\rangle)$$

# L'amico di Wigner

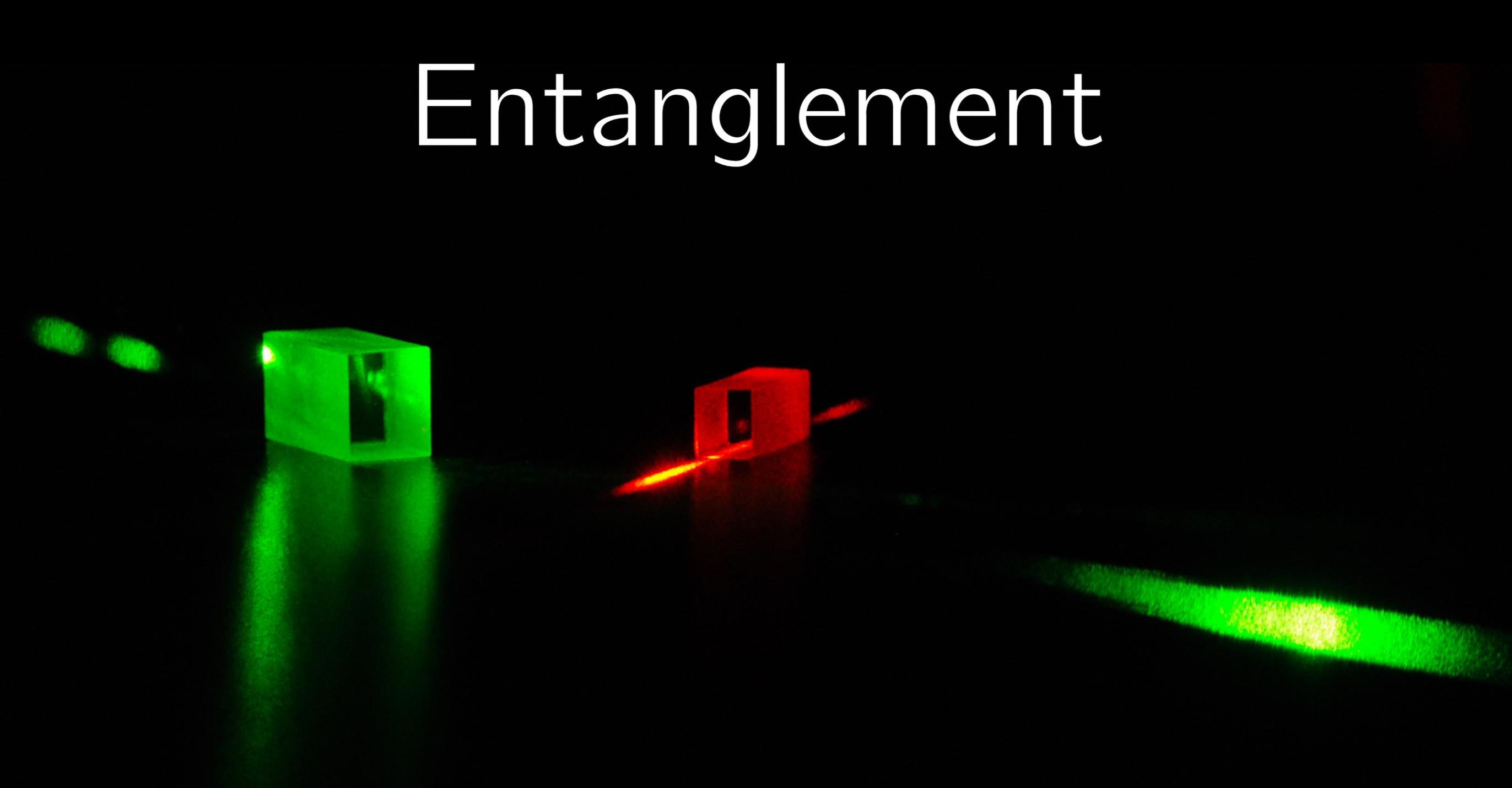
Un amico di Wigner fa l'esperimento del gatto nella scatola.

Wigner in quel momento non si trova nel laboratorio, e non sa il risultato



$$|\psi\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|C_{non\ dec}\rangle |G_{vivo}\rangle + |C_{dec}\rangle |G_{morto}\rangle)$$

# Entanglement



Due particelle si dicono *entangled* quando, se conosco lo stato di una, riesco a sapere lo stato dell'altra senza alcuna misurazione.

# Interpretazioni della Meccanica Quantistica

- Copenhagen/ortodossa
- Onda pilota, Bohm
- Von Neumann
- Molti mondi
- Decoerenza efficace
- Collasso spontaneo della funzione d'onda
- ...

# Ricapitoliamo

- Molti problemi sono sorti nella formulazione classica → nuove idee in fisica.
- Quantizzazione dell'energia e del momento angolare
- Principii quantistici (Indeterminazione, complementarità)
- Equazione di Schrödinger
- Misurazione e collasso della funzione d'onda
- **Interpretiamo la Meccanica Quantistica**