

**WANTED**  
**SCHRÖDINGER'S CAT**



**DEAD AND ALIVE**

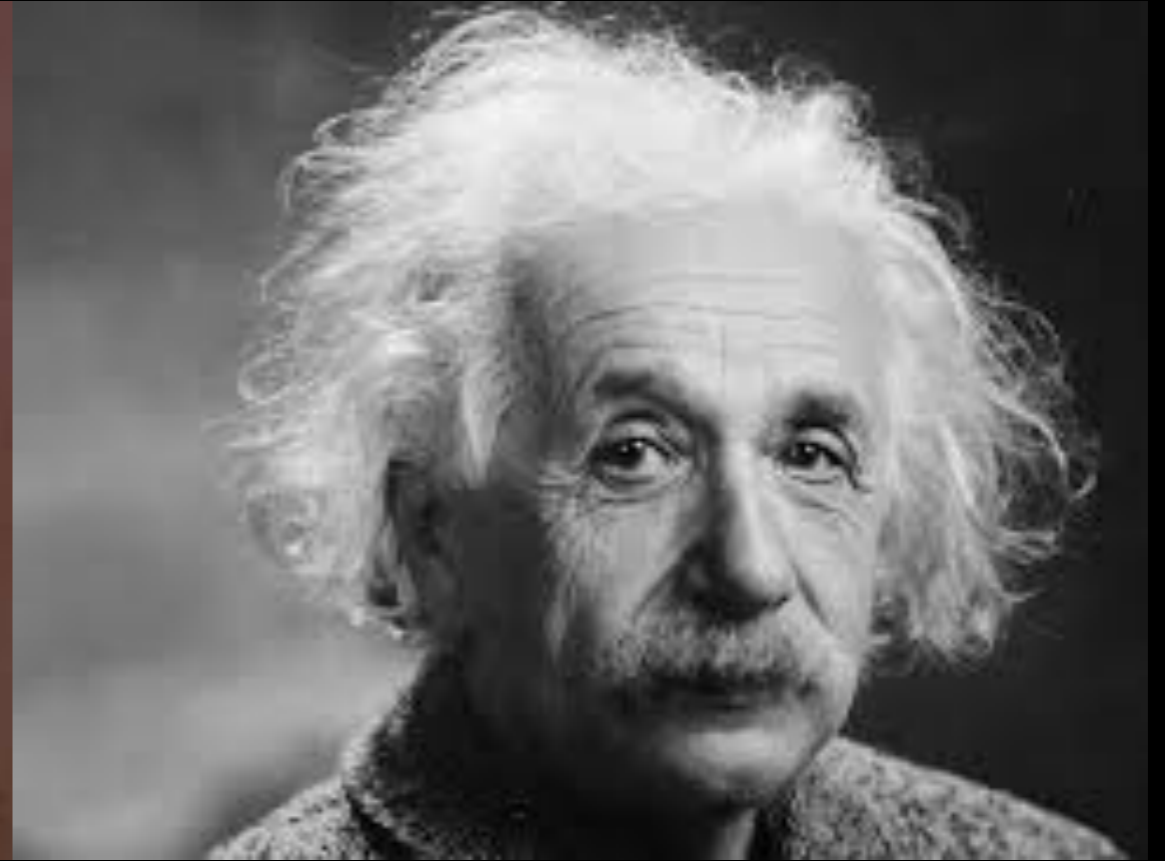
Dalla fisica classica  
alla meccanica  
quantistica

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.



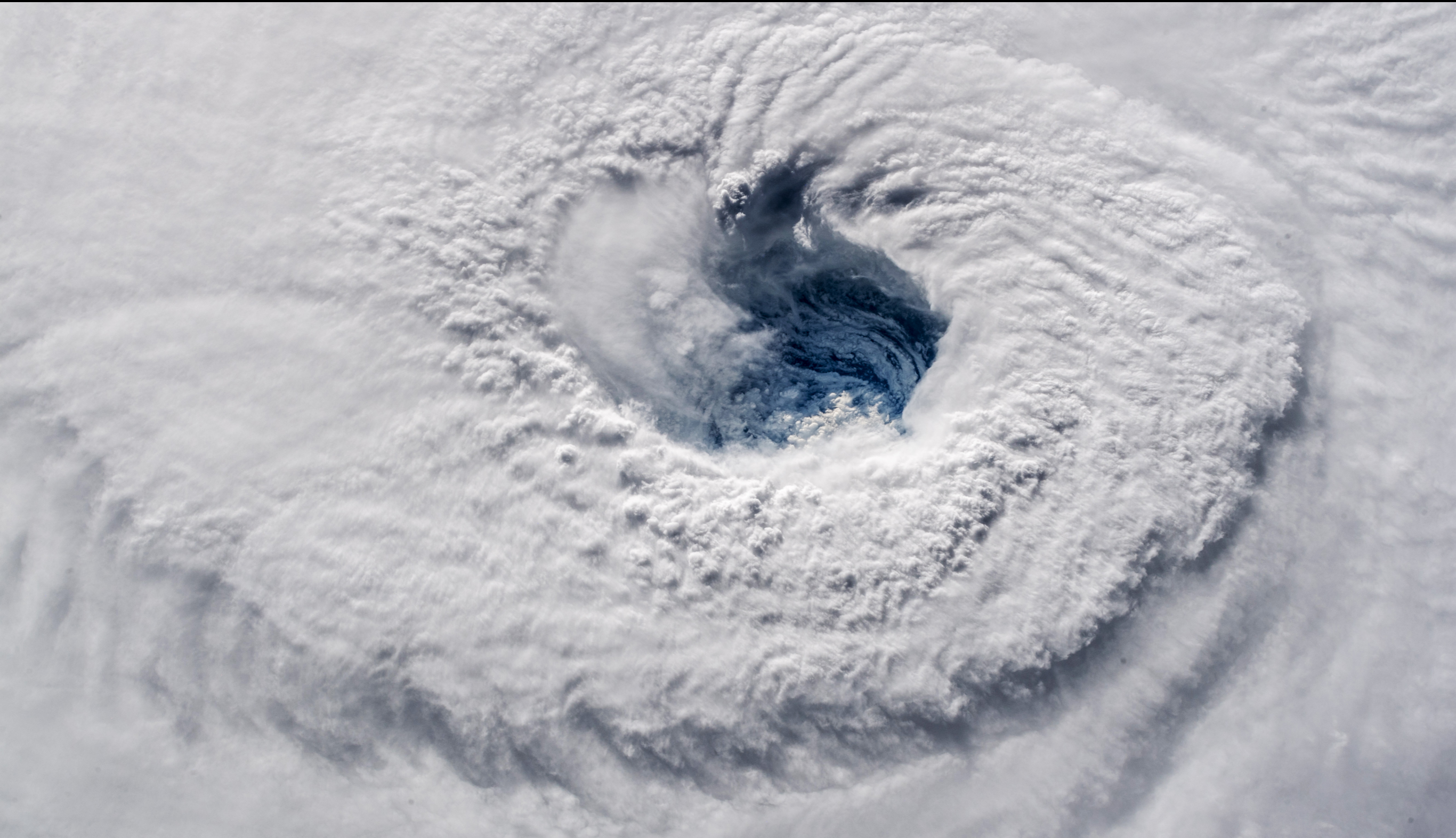
# Determinismo

“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)

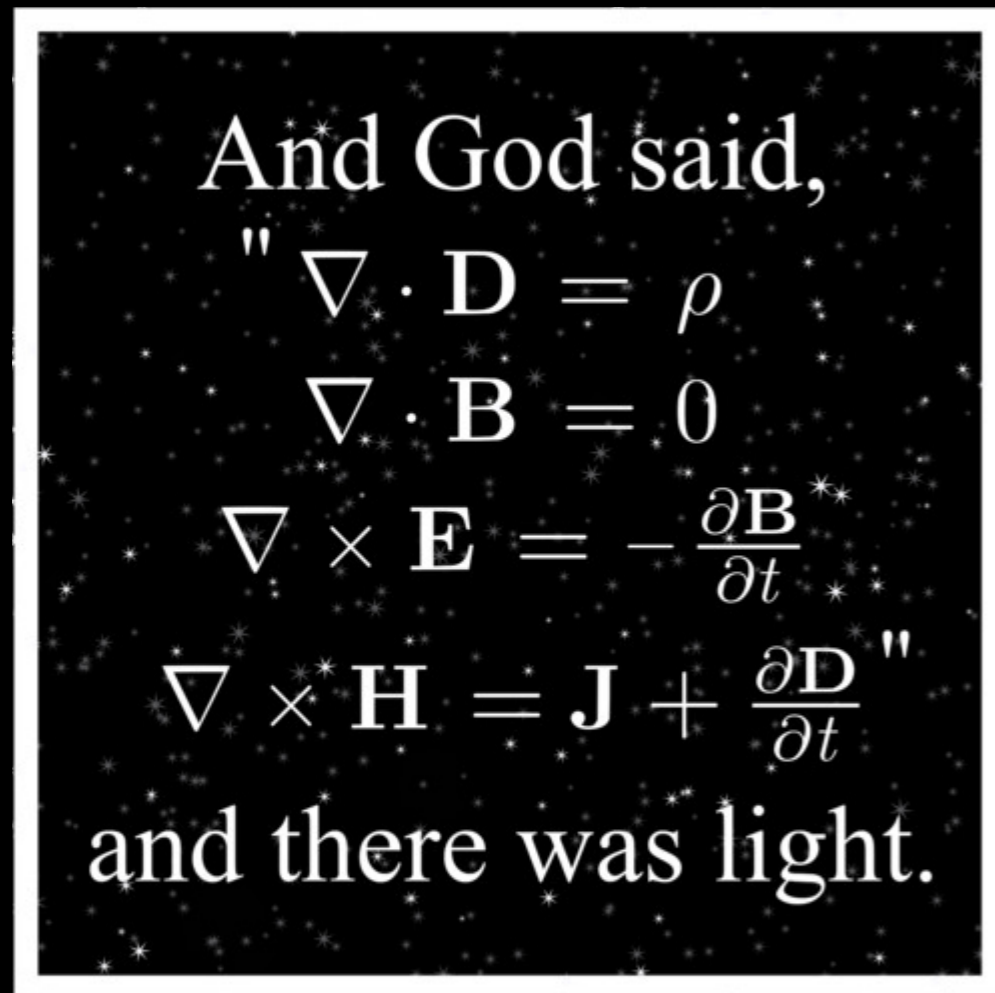


# Probabilità epistemica e determinismo



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

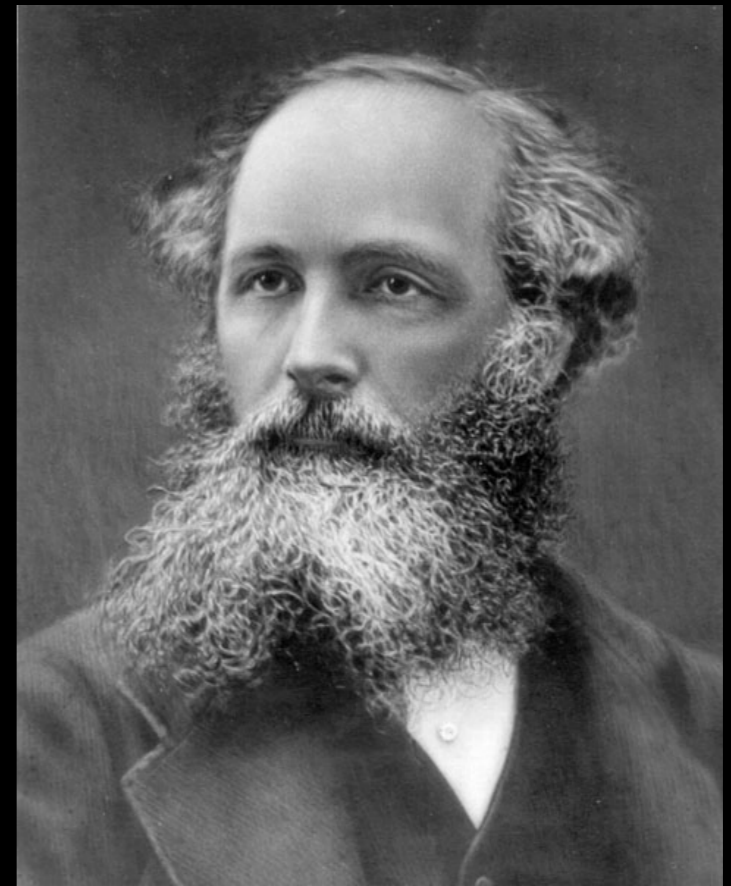
Elettrodinamica classica relativistica



# Dibattito Storico sulla natura della luce



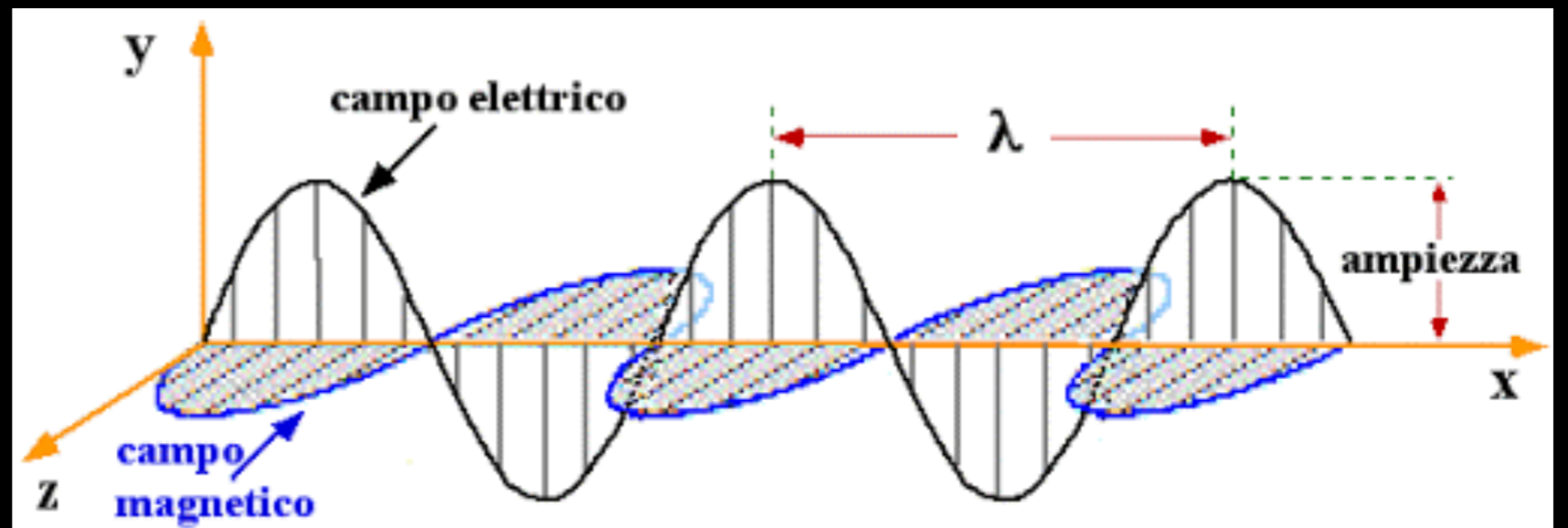
*Huygens, 1690*



*Maxwell, 1864*

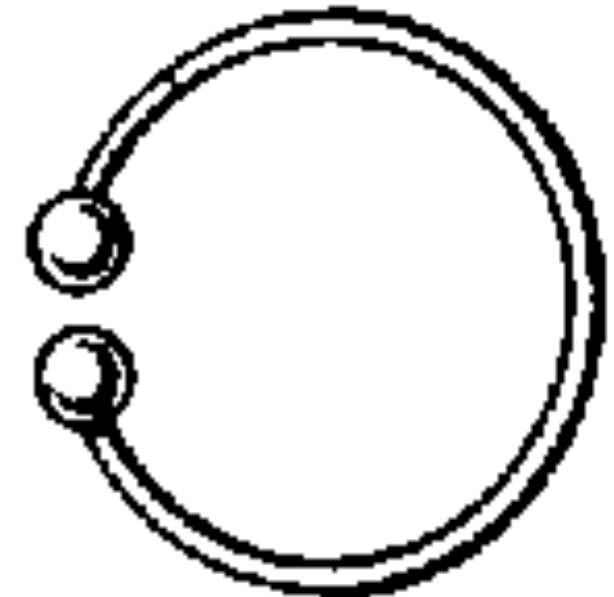
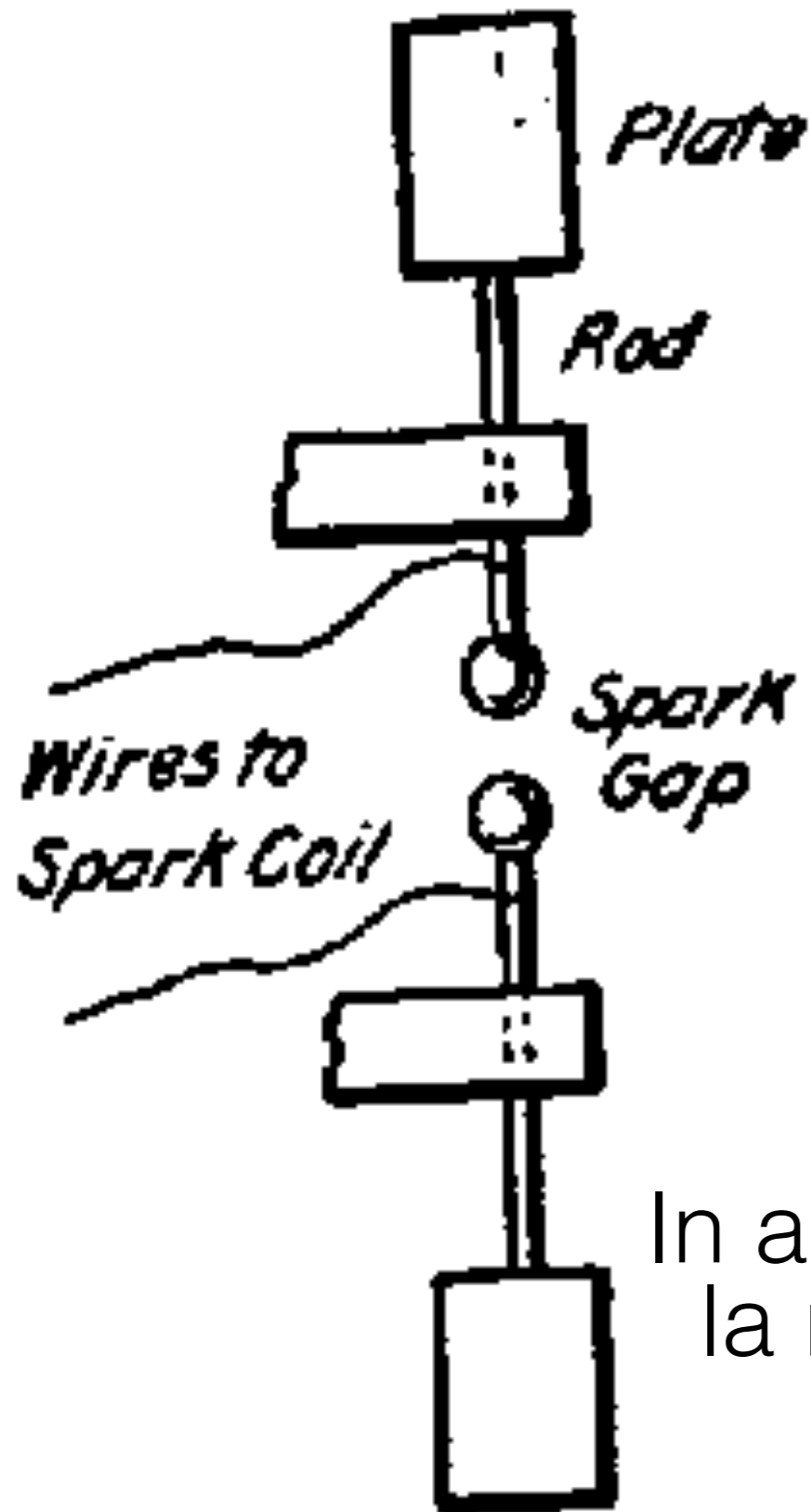
Moderna visione  
ONDULATORIA:

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



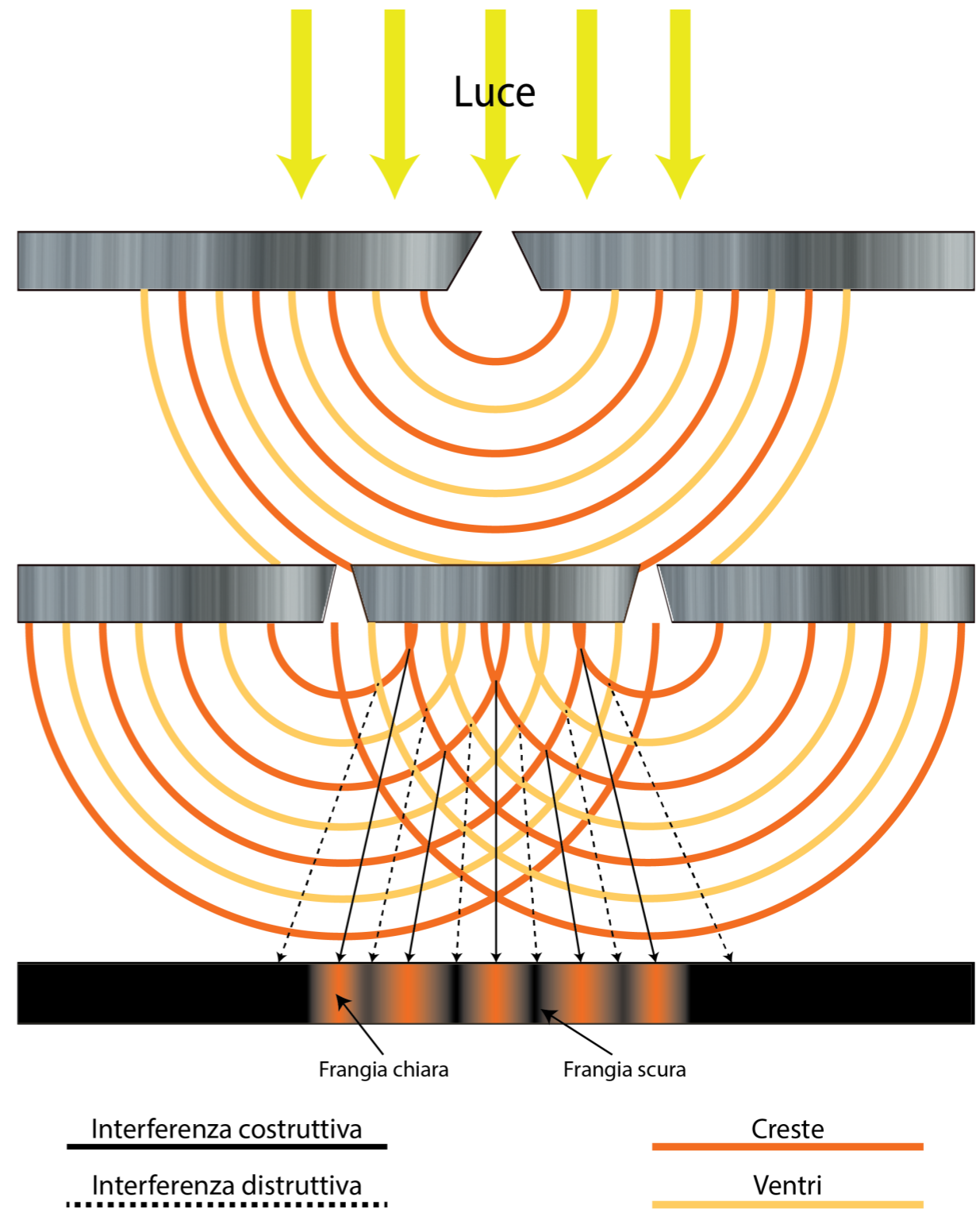
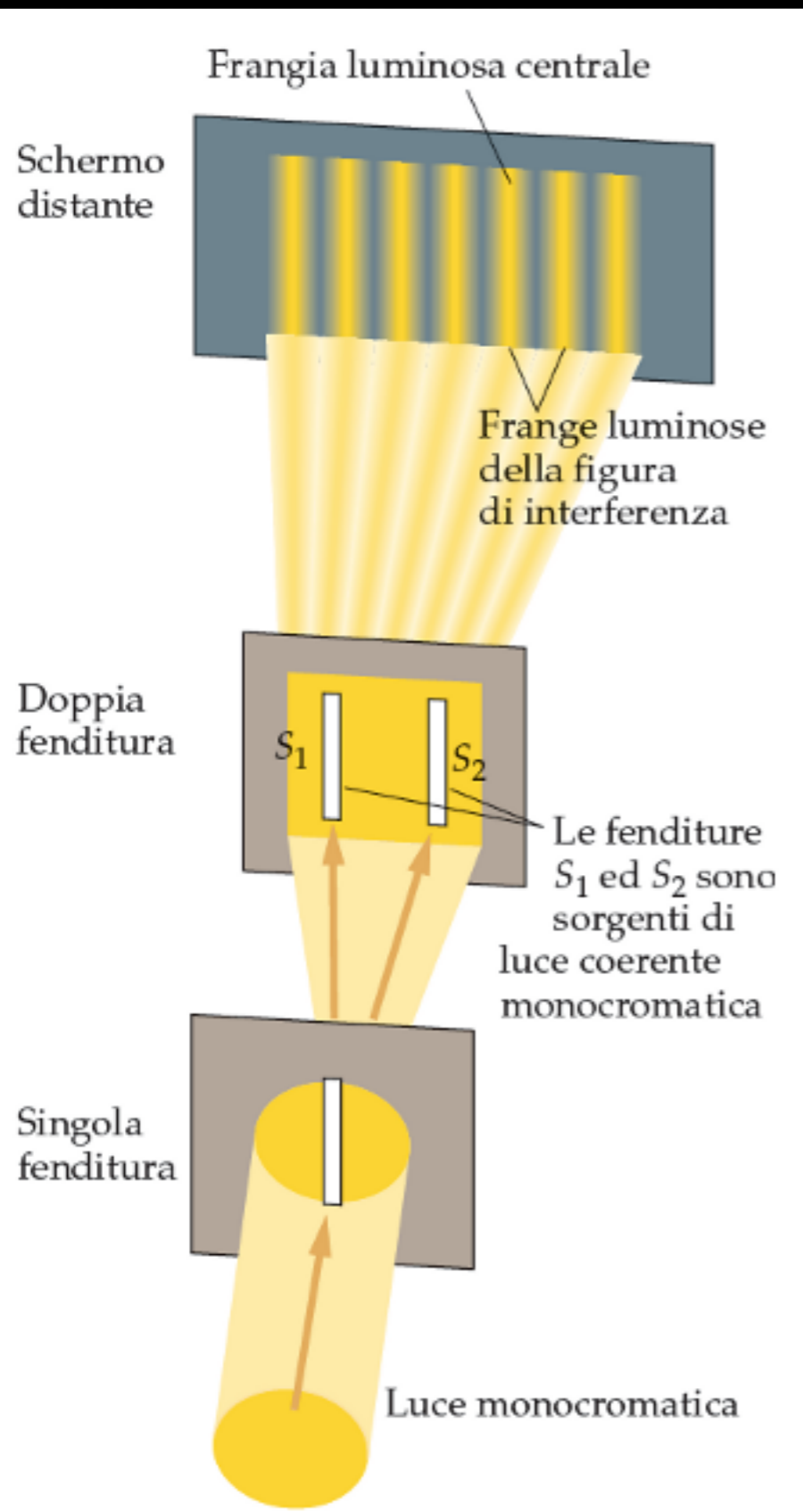
# Dibattito Storico sulla natura della luce

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

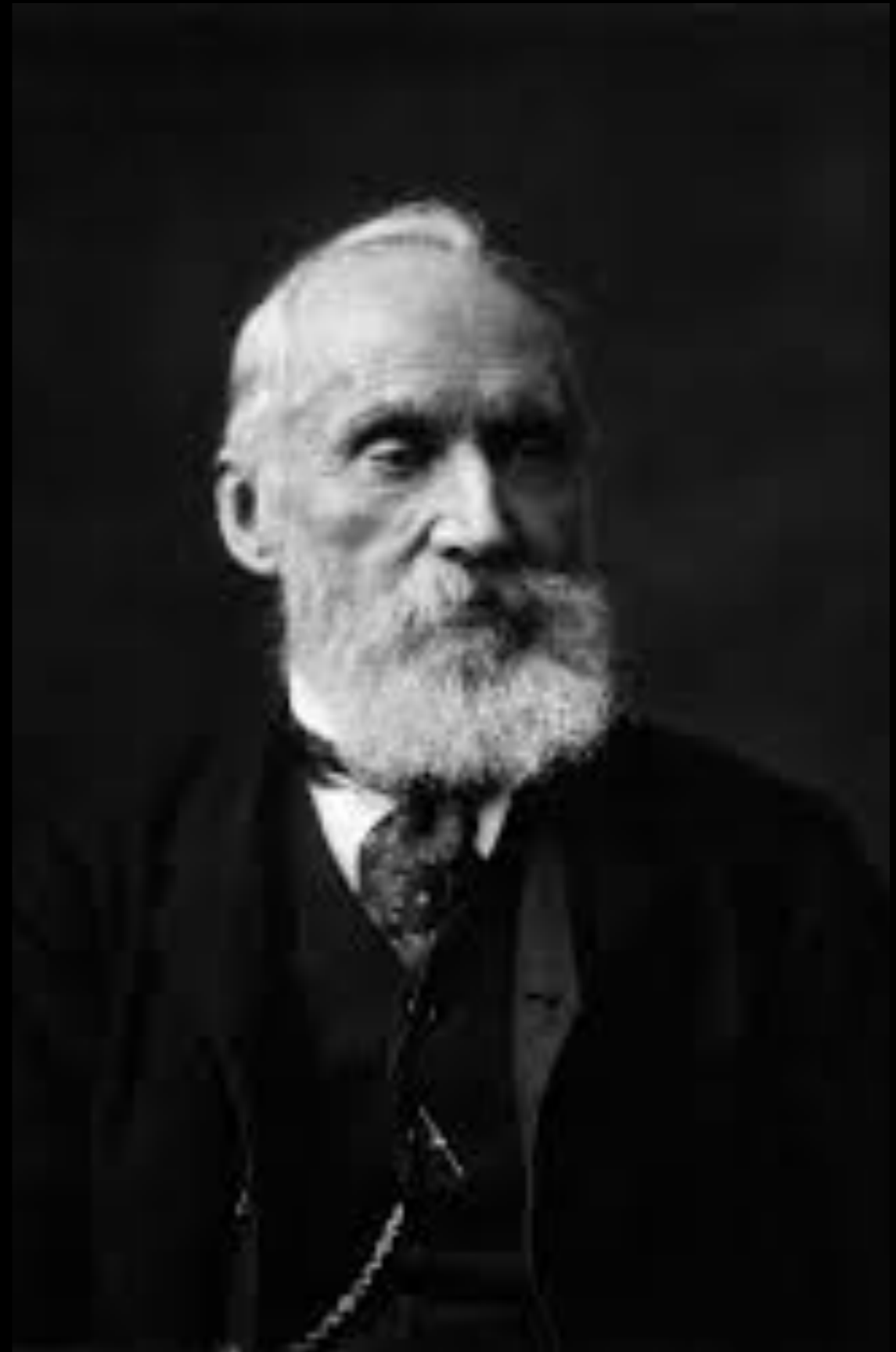
A close-up photograph of a lit matchstick. The matchstick is positioned vertically at the bottom right of the frame. The flame is bright yellow and orange, with a blue base near the matchstick head. Blue smoke rises from the flame, forming a large, billowing shape that fills the upper right portion of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

Termodinamica classica

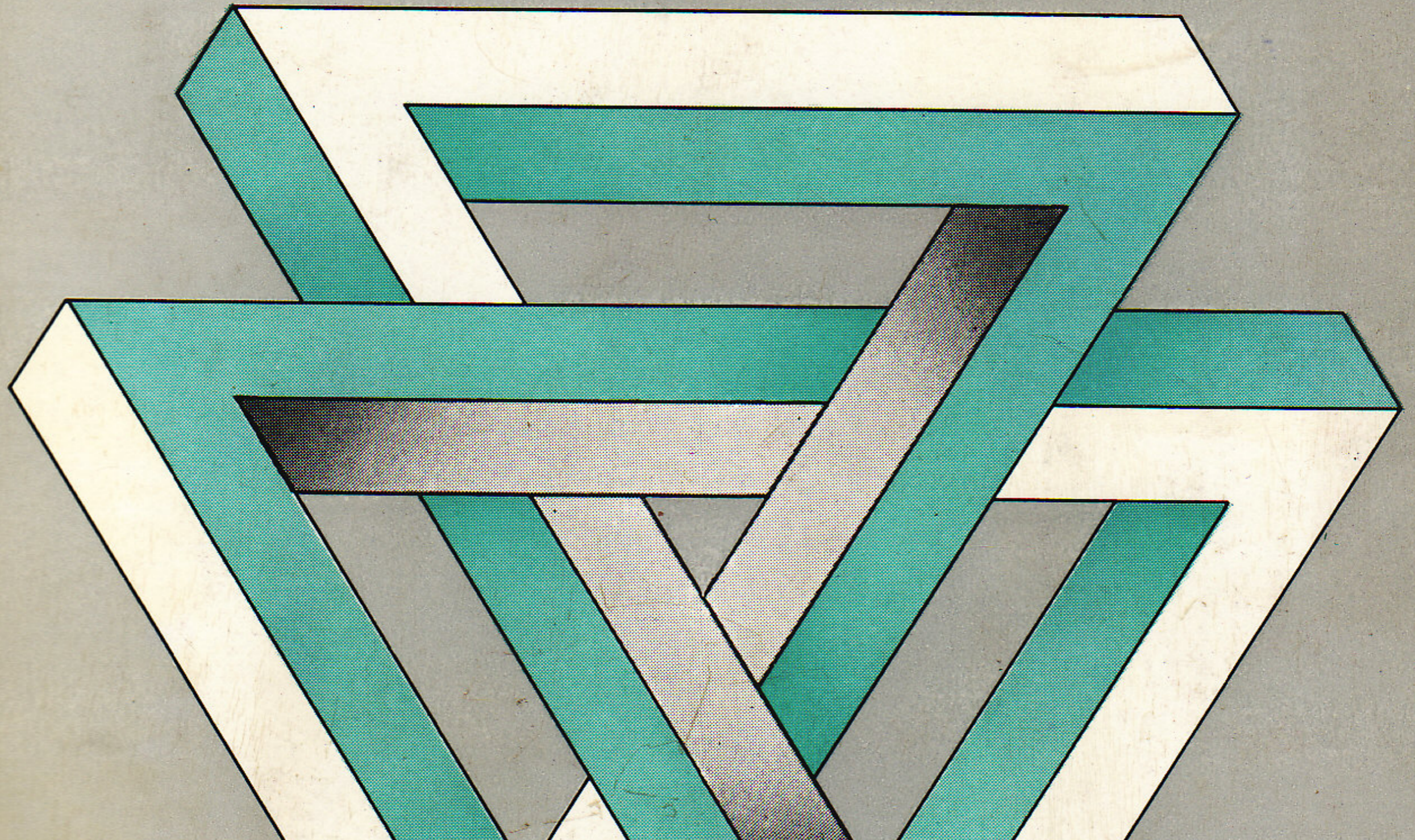
# Lord Kelvin

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)

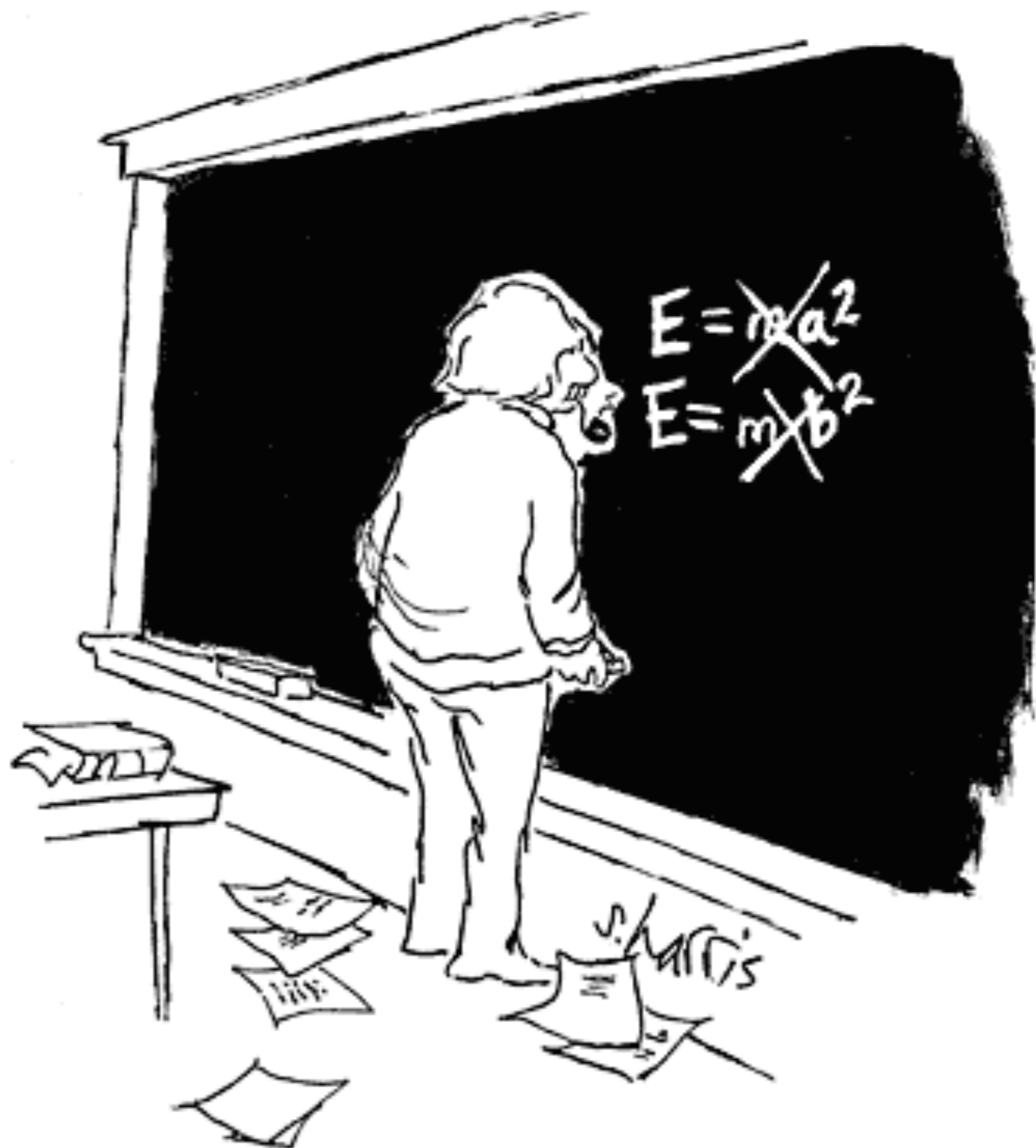


Perché è stato necessario  
rivoluzionare il panorama della fisica?



# Problemi

Sono sorti problemi sia teorici che sperimentali...



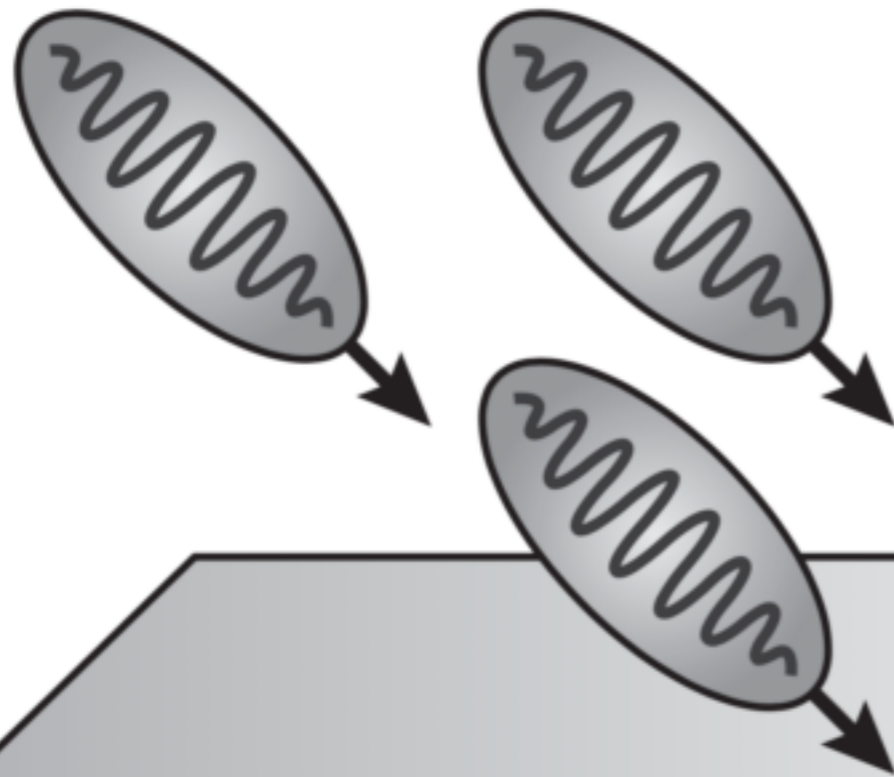


Esempi di  
problemi  
teorici

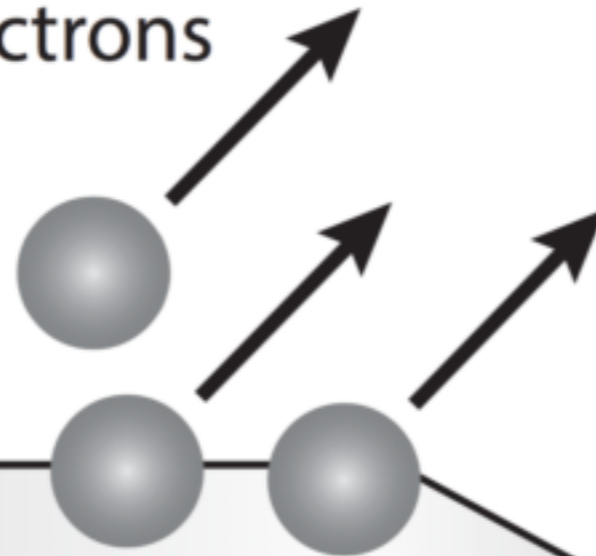


# Effetto Fotoelettrico

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

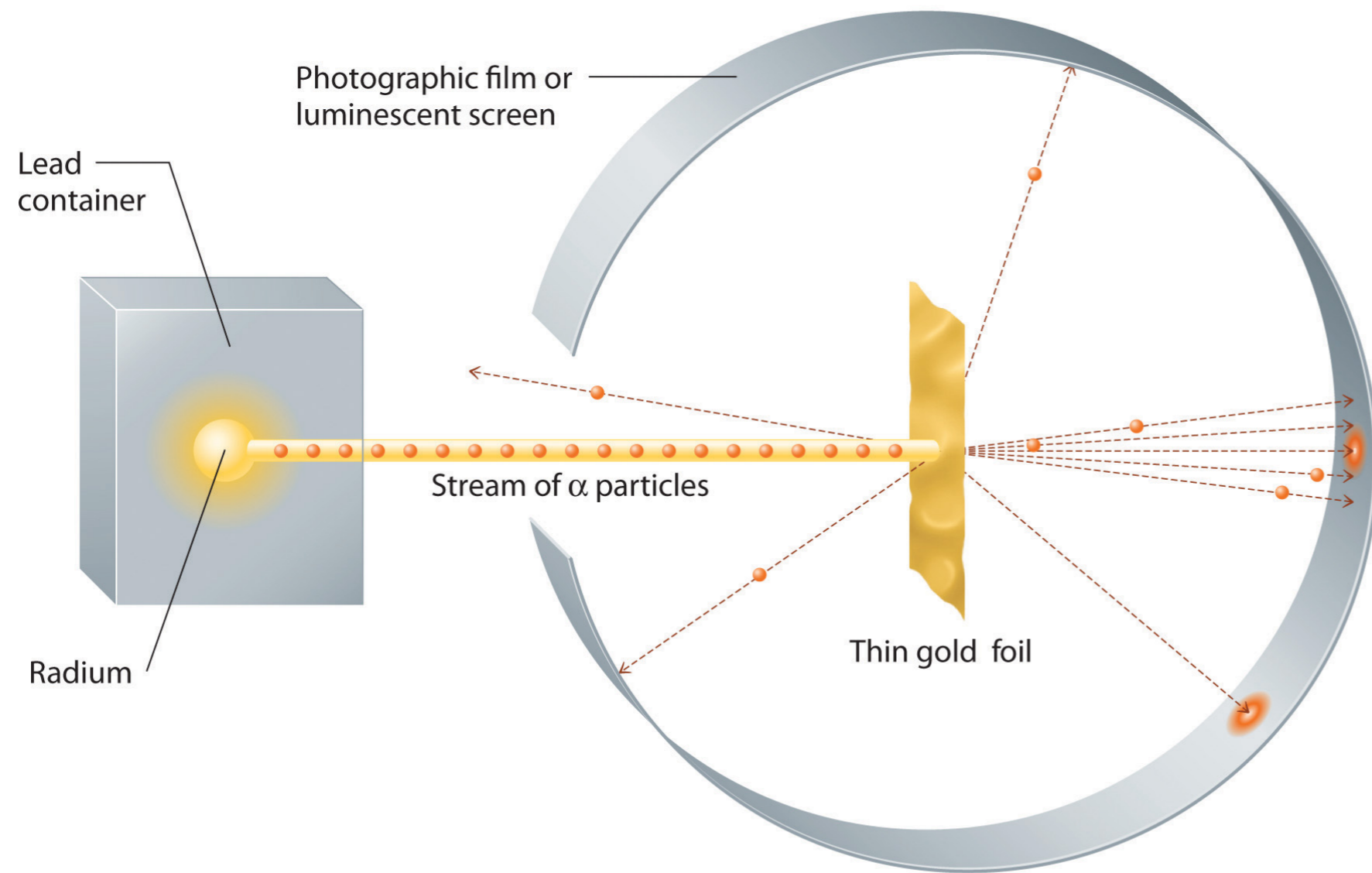
# Atomo di Thomson

J.J. Thomson

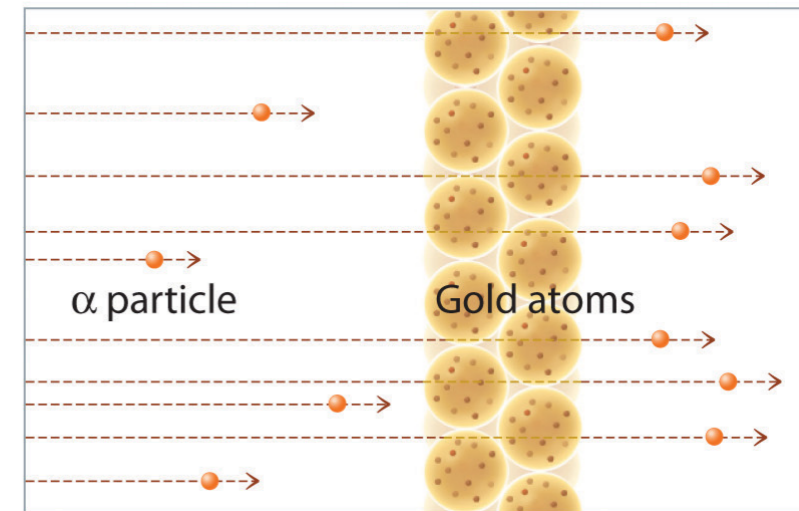
His  
model of  
the atom



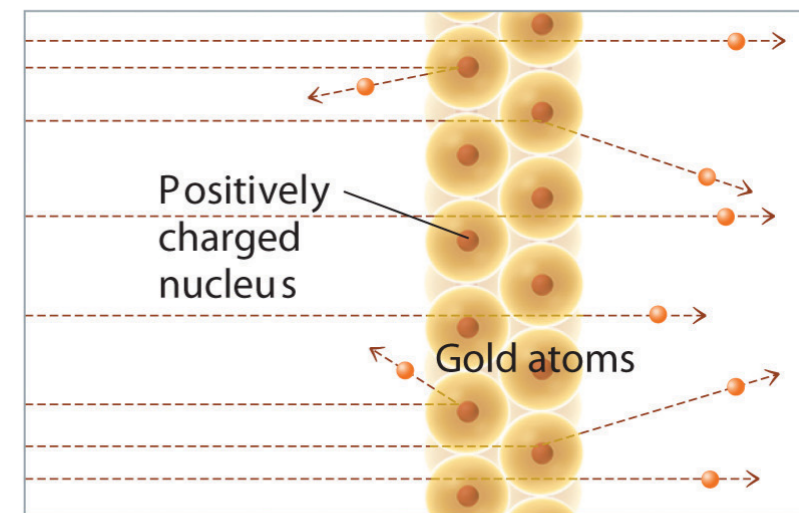
# Geiger-Marsden-Rutherford



(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

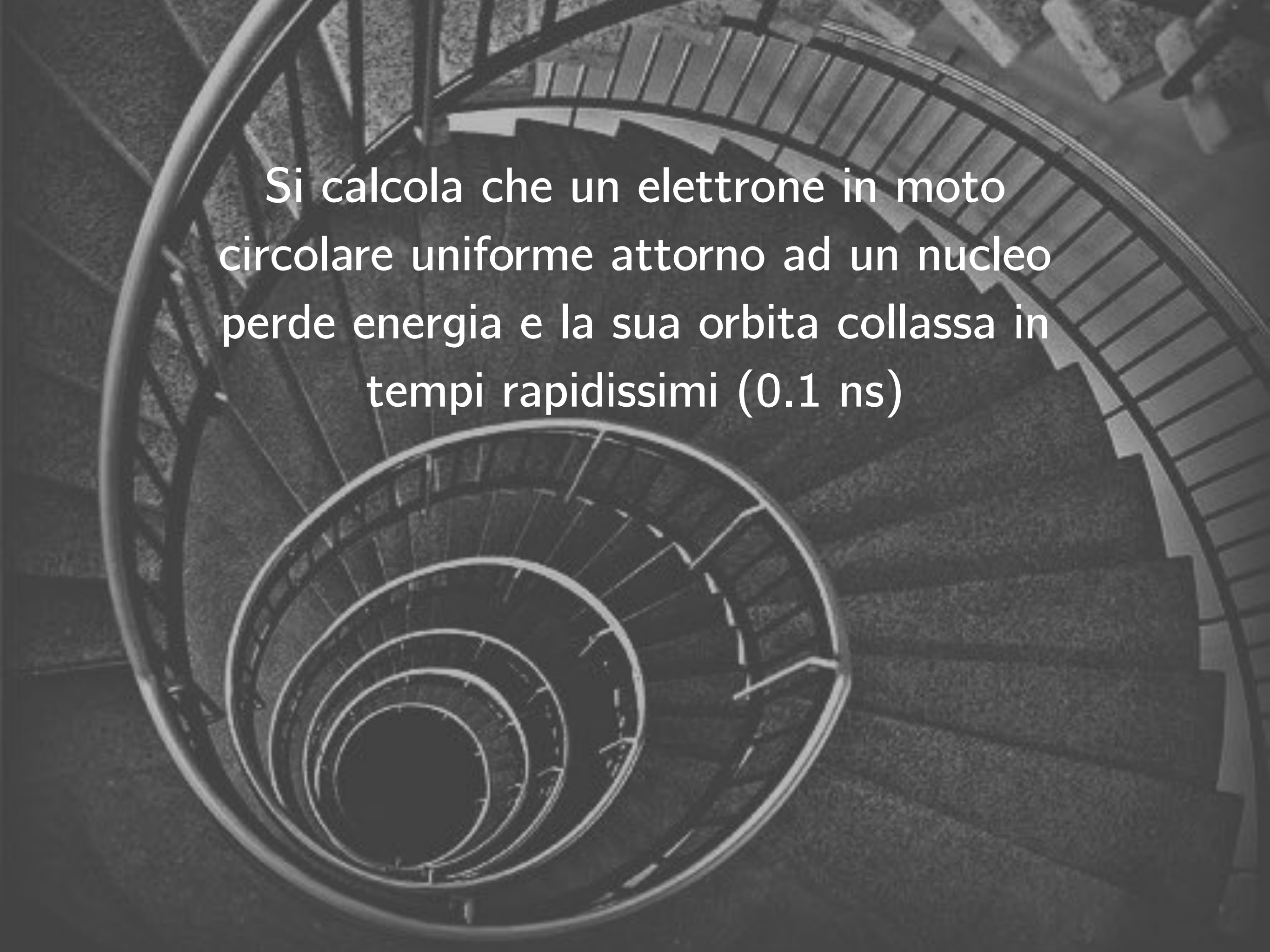
Esiste un nucleo positivo attorno al quale ruotano cariche negative (elettroni)

# Primi problemi...

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

Viene violata la legge di Larmor

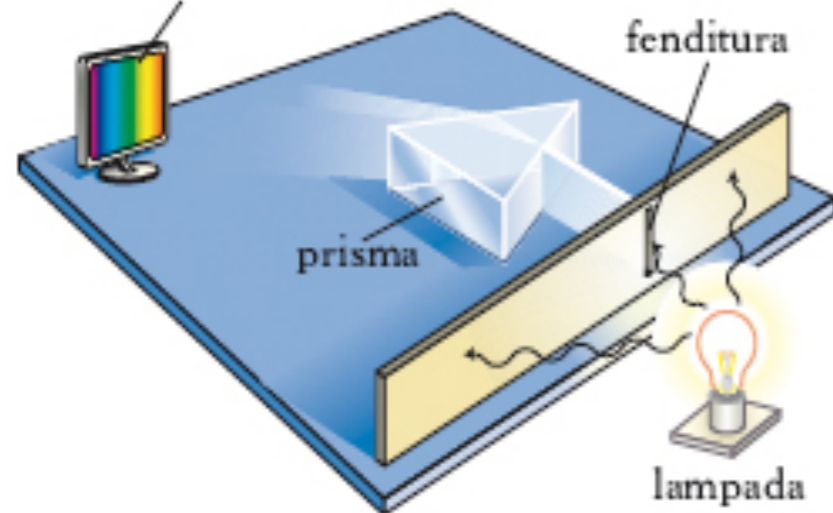
Una particella carica e accelerata emette radiazioni.  
In tal modo perde energia (energia cinetica).

A black and white photograph of a spiral staircase, viewed from above. The staircase is made of metal railings and wooden steps, spiraling downwards towards the center. The image is used as a background for a text overlay.

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)

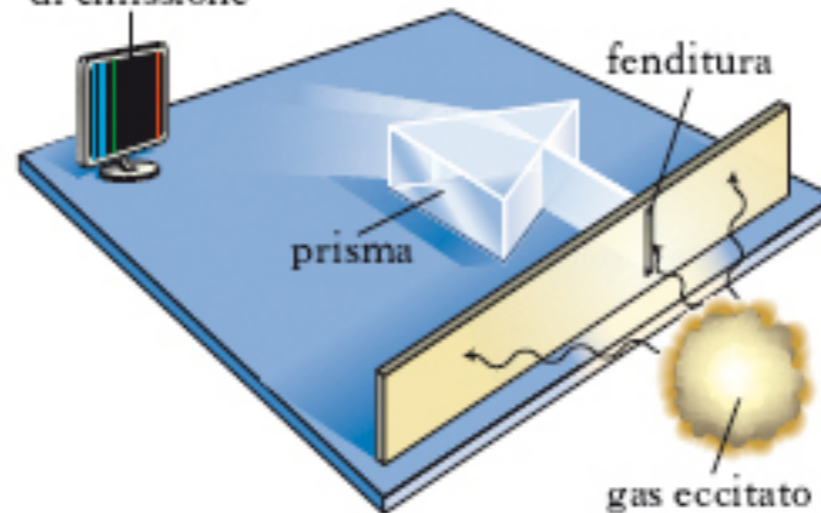
# Spettri atomici

spettro di emissione continuo



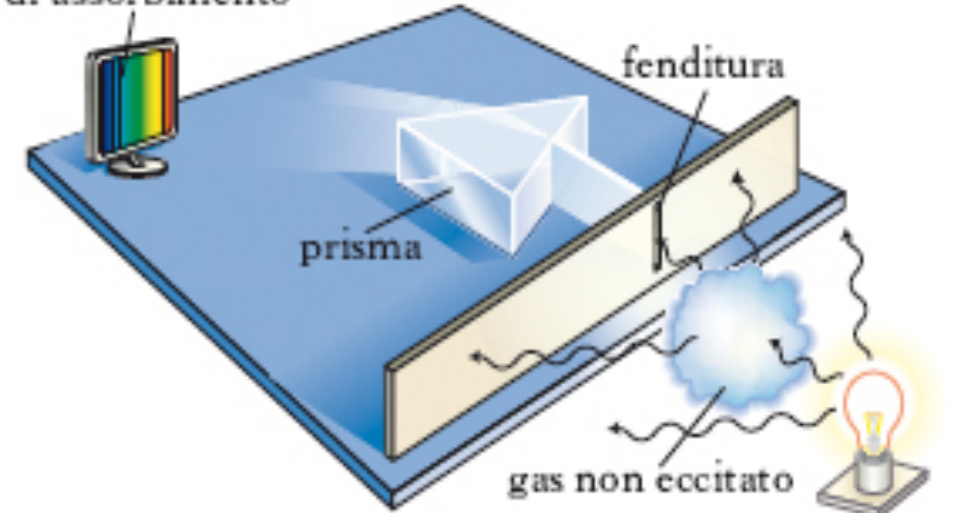
A

righe dello spettro di emissione



B

righe dello spettro di assorbimento

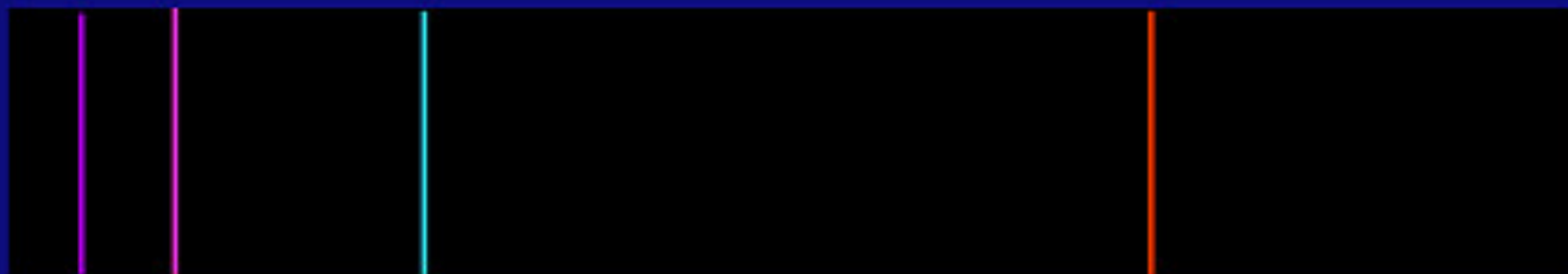


C

Spettro di ASSORBIMENTO dell'idrogeno

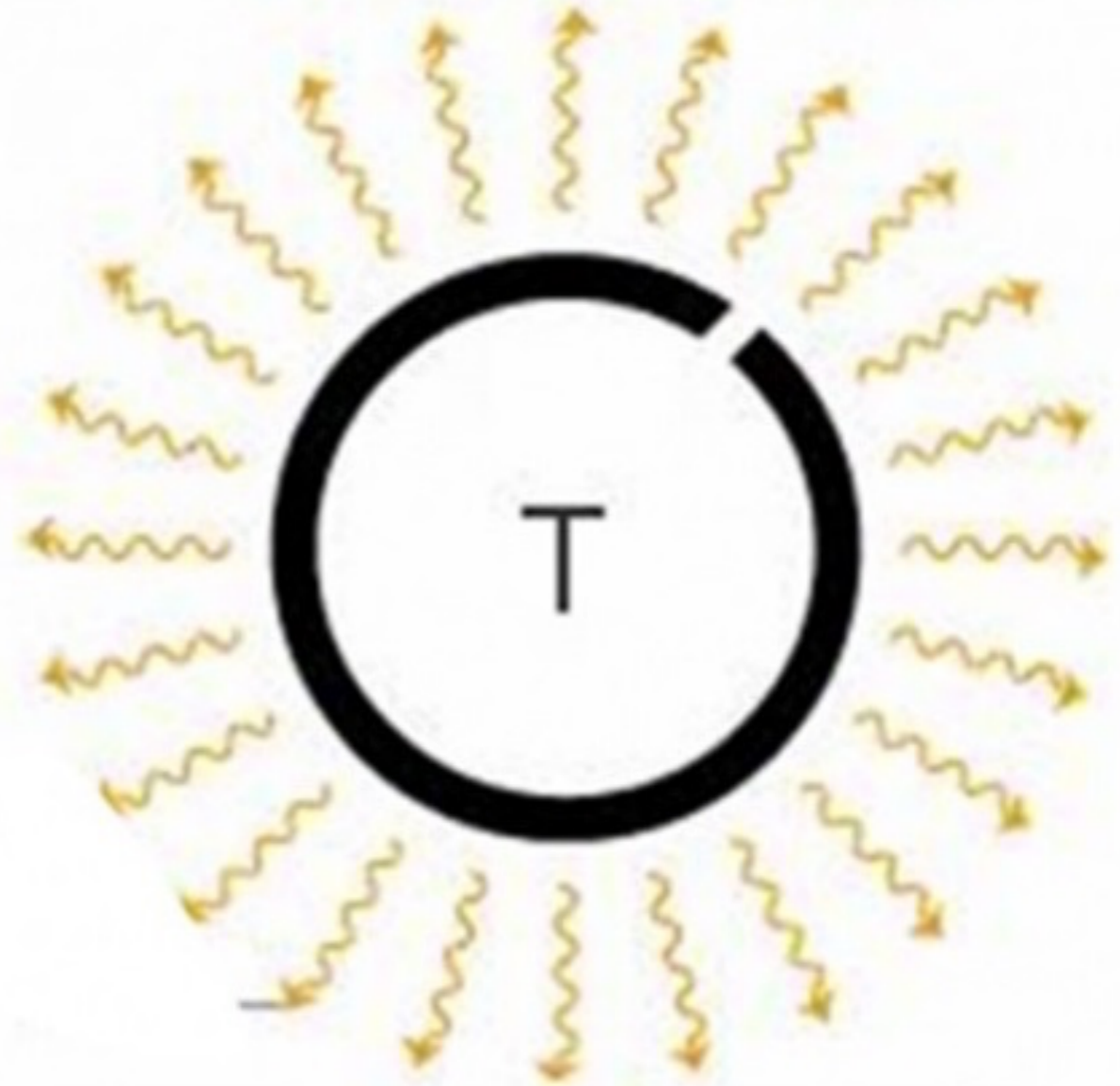
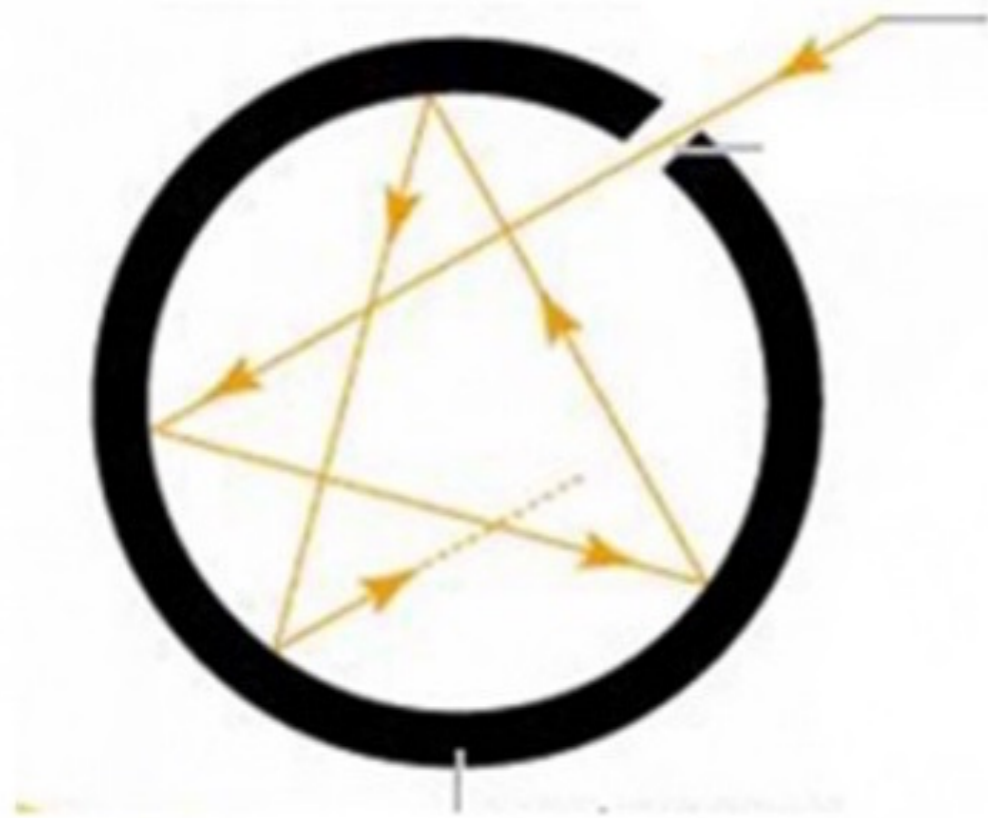


Spettro di EMISSIONE dell'idrogeno





# Corpo nero



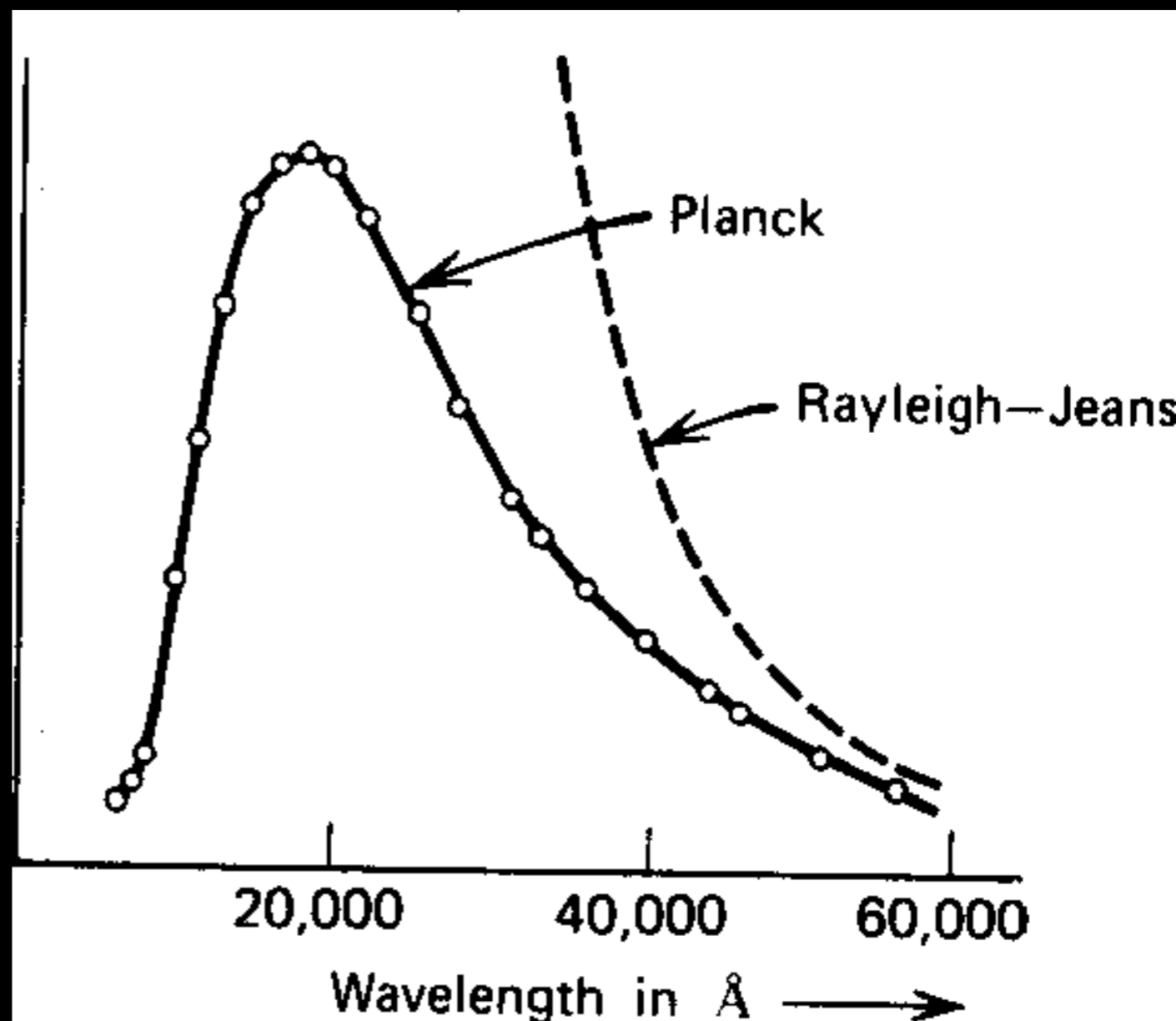
A temperatura costante, gli atomi delle pareti assorbono e emettono radiazione e.m.

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

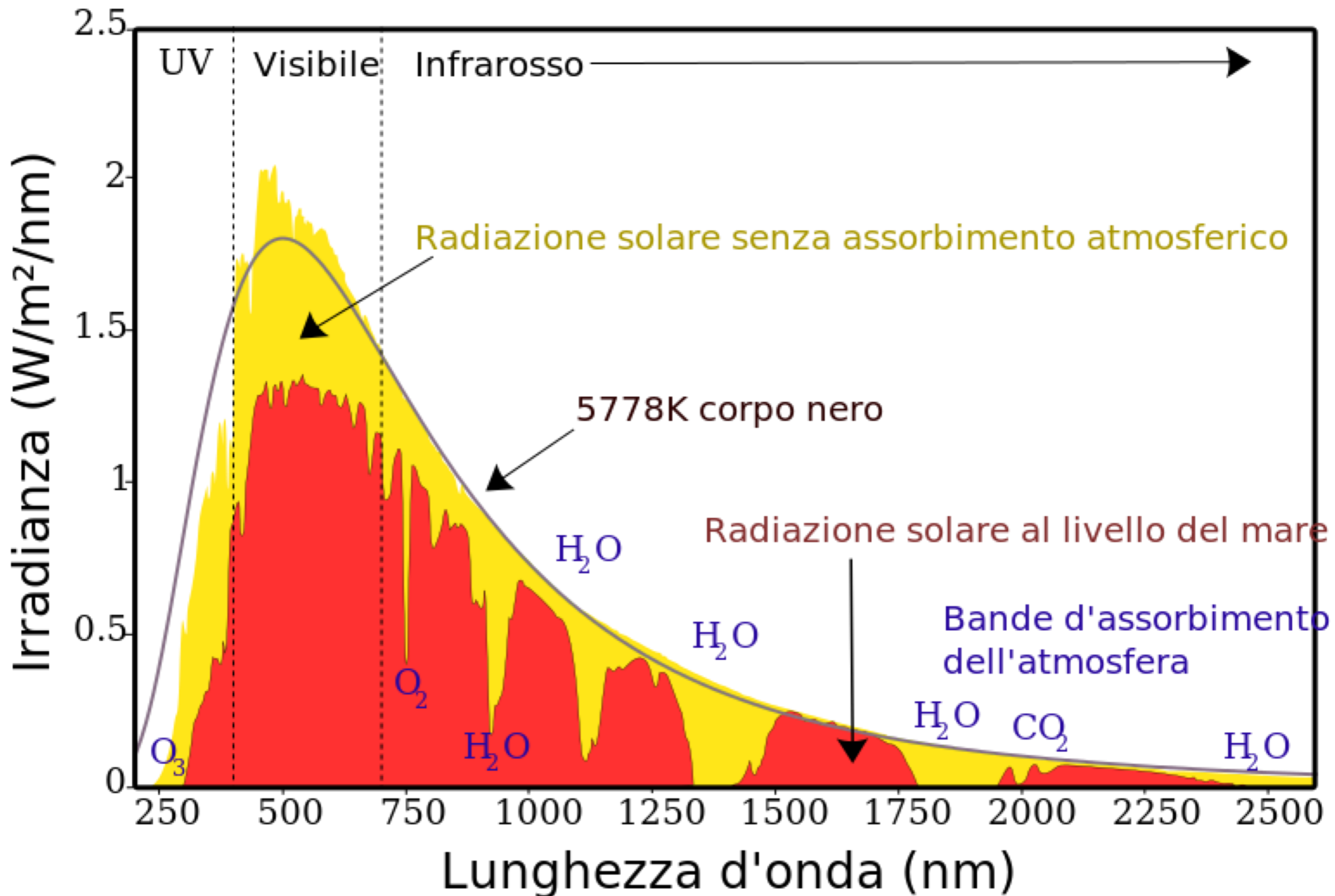
# Corpo nero

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)





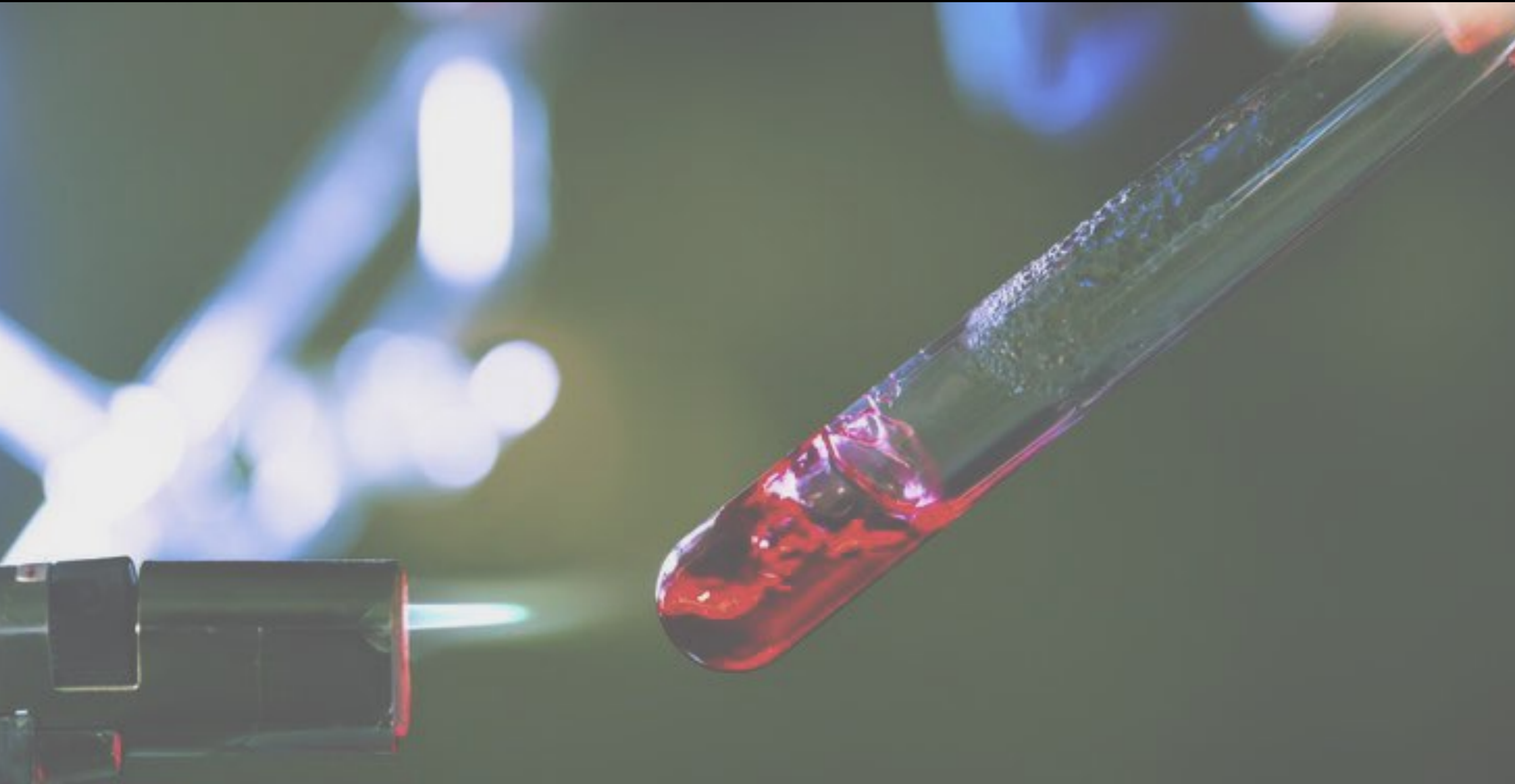
# Principale problema sperimentale

# 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.



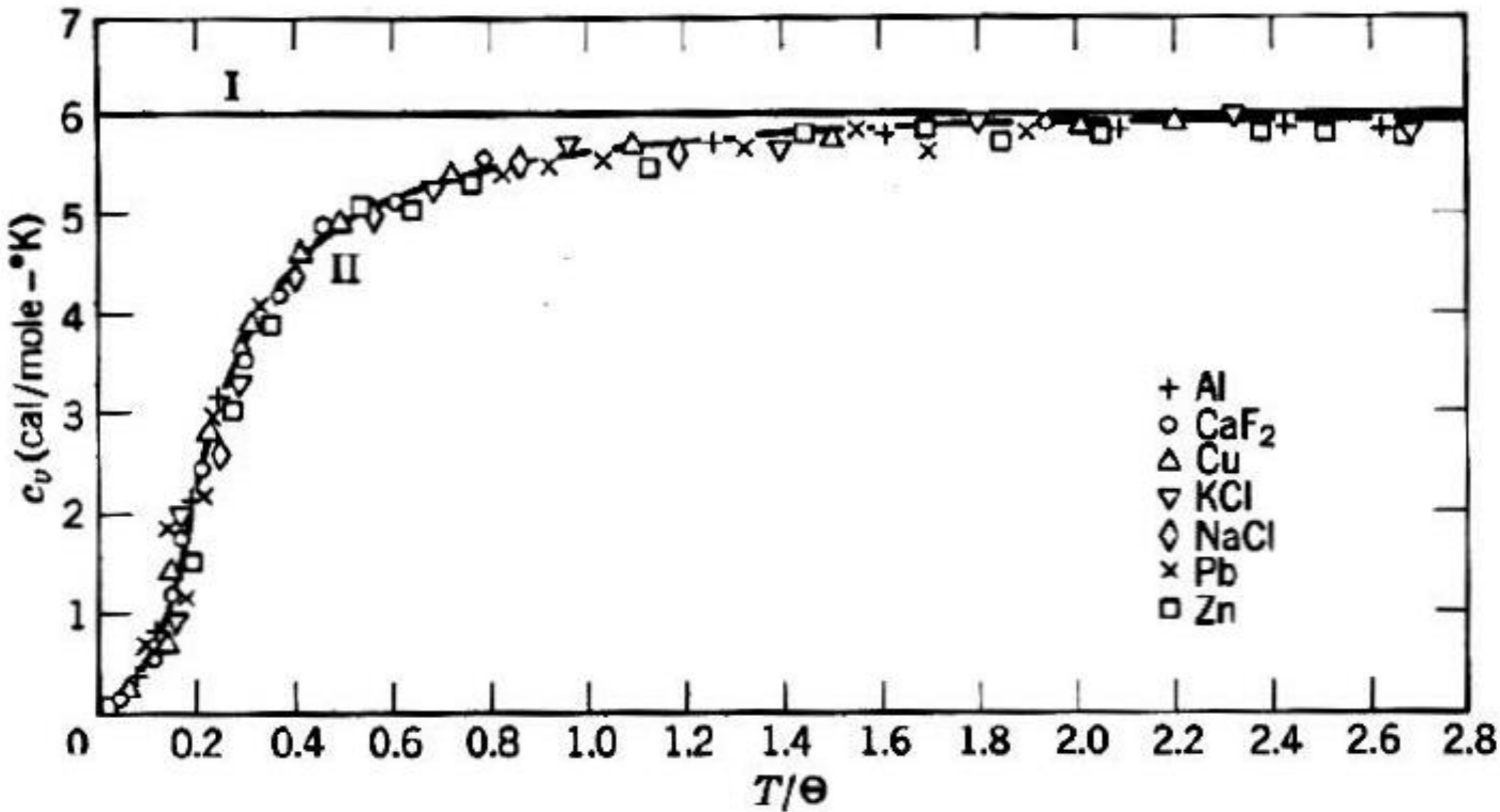
# Legge di Dulong-Petit



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  $n \in \mathbb{Z}_0$

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

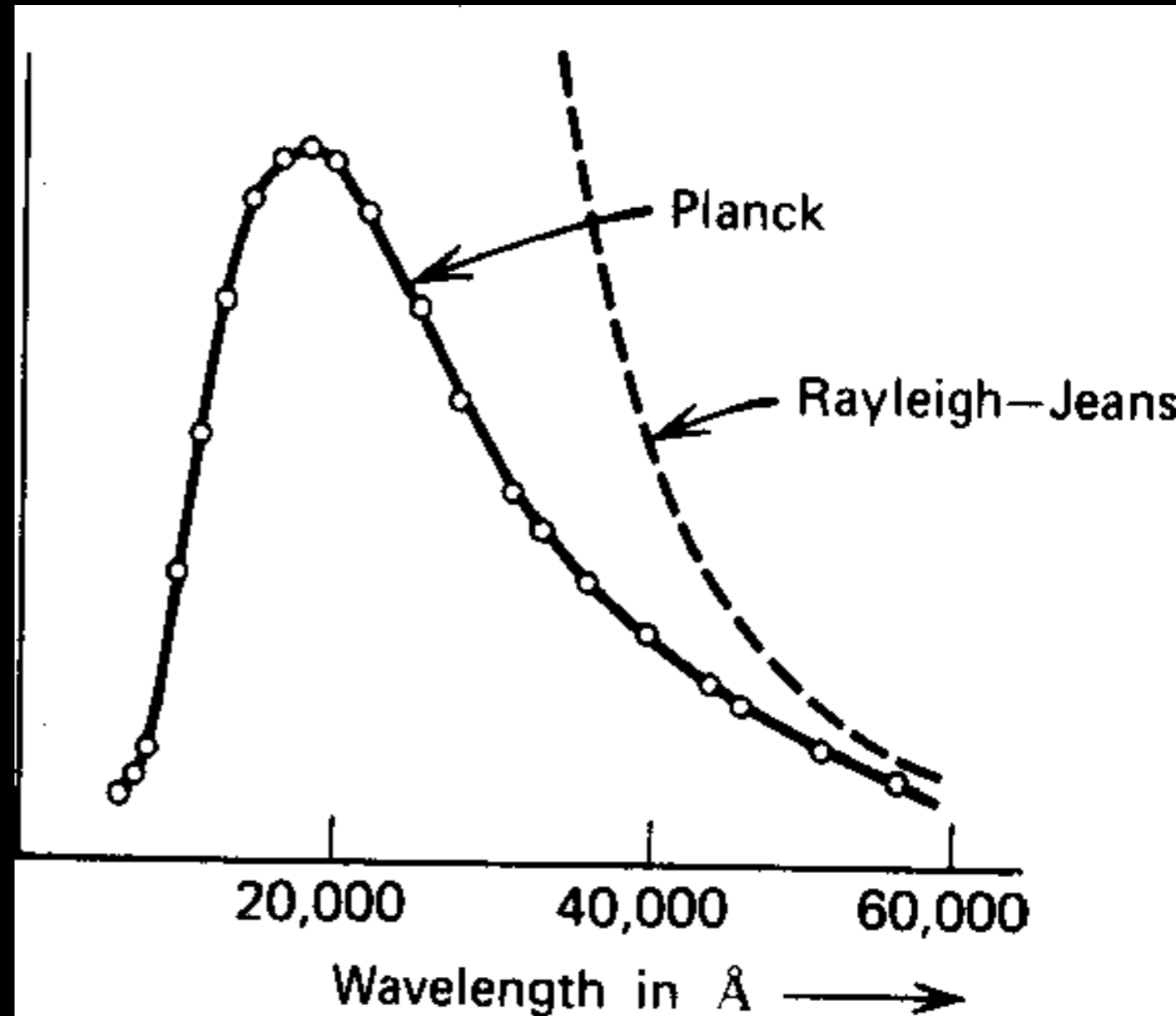




# Corpo nero

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

$$E = h\nu,$$

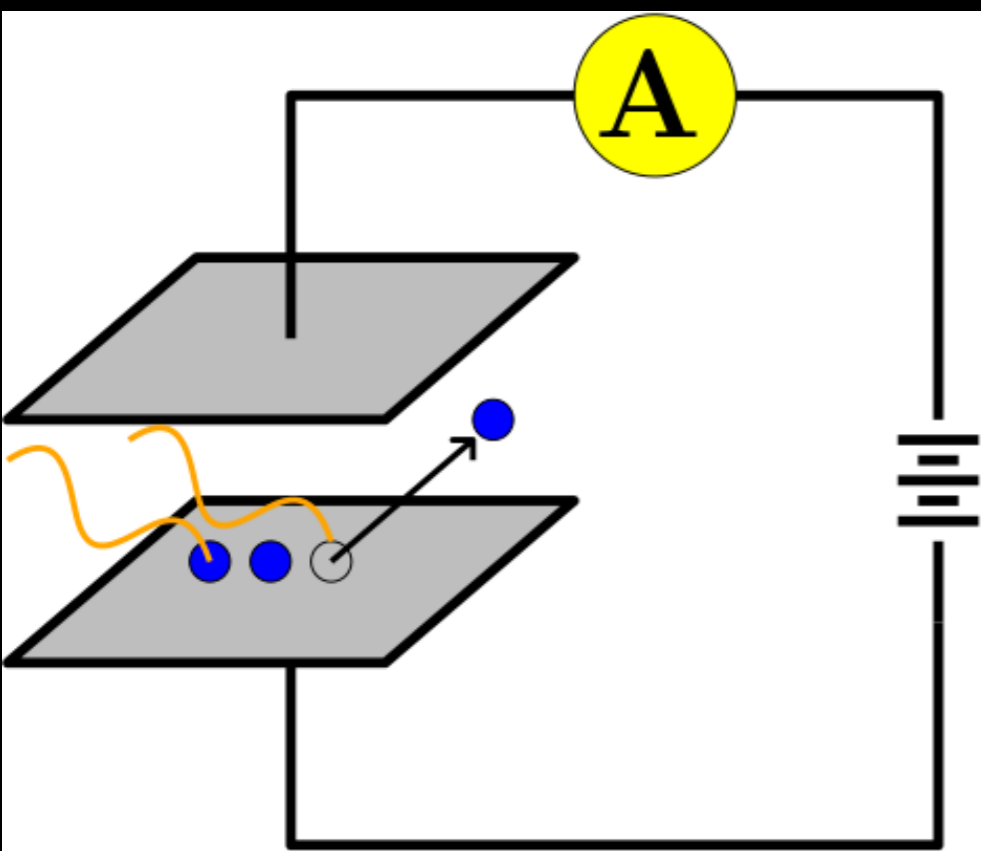
con  $\nu$  frequenza caratteristica del fotone (particella di luce).

Risolve il problema dell'effetto fotoelettrico

Riapre il dibattito sulla natura della luce.



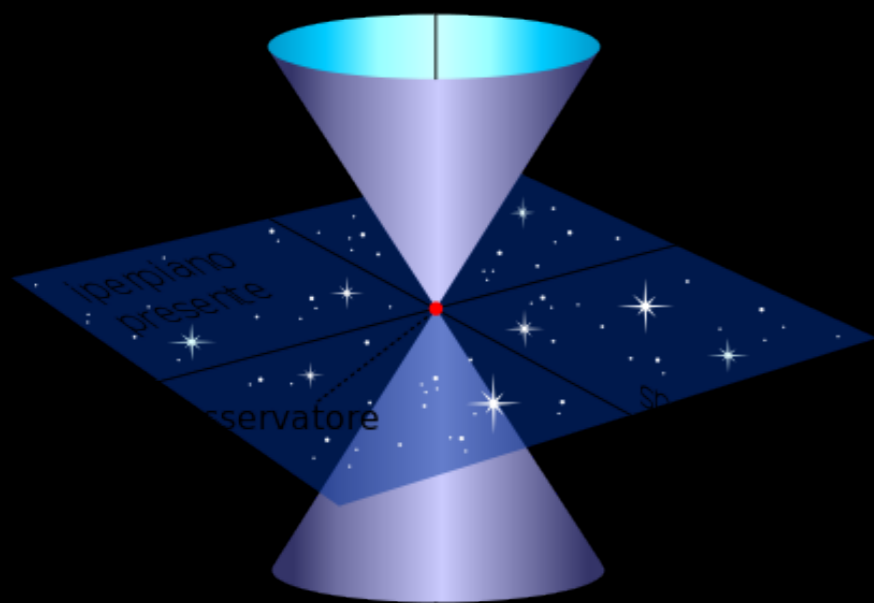
# *Annus mirabilis*



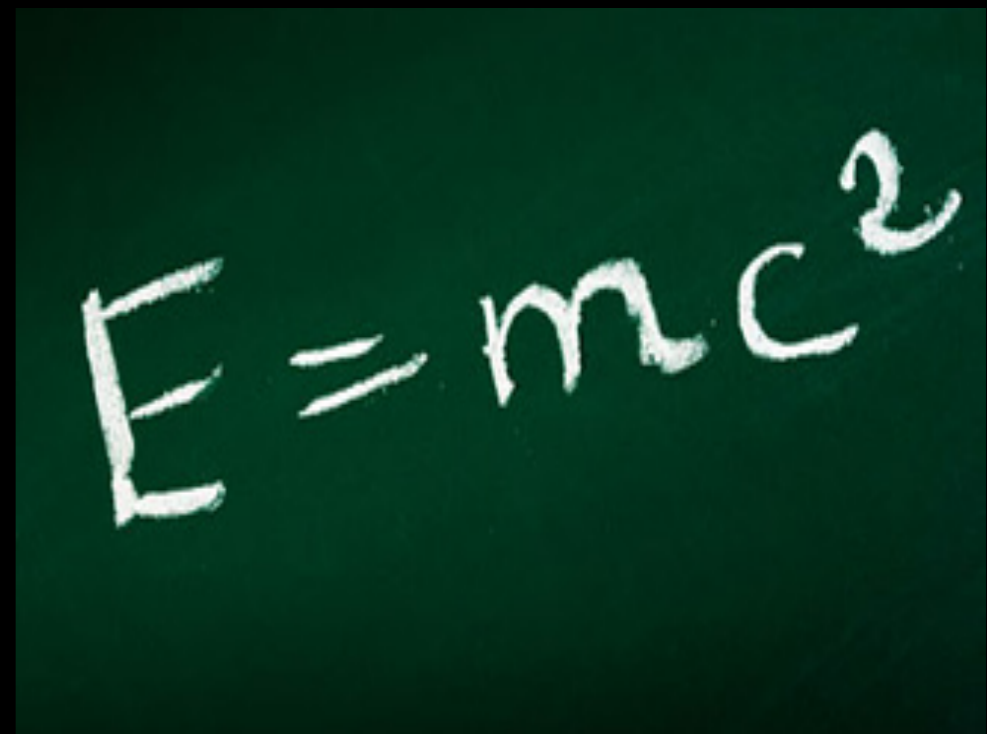
Effetto fotoelettrico



Moto browniano



Relatività speciale



Massa-Energia

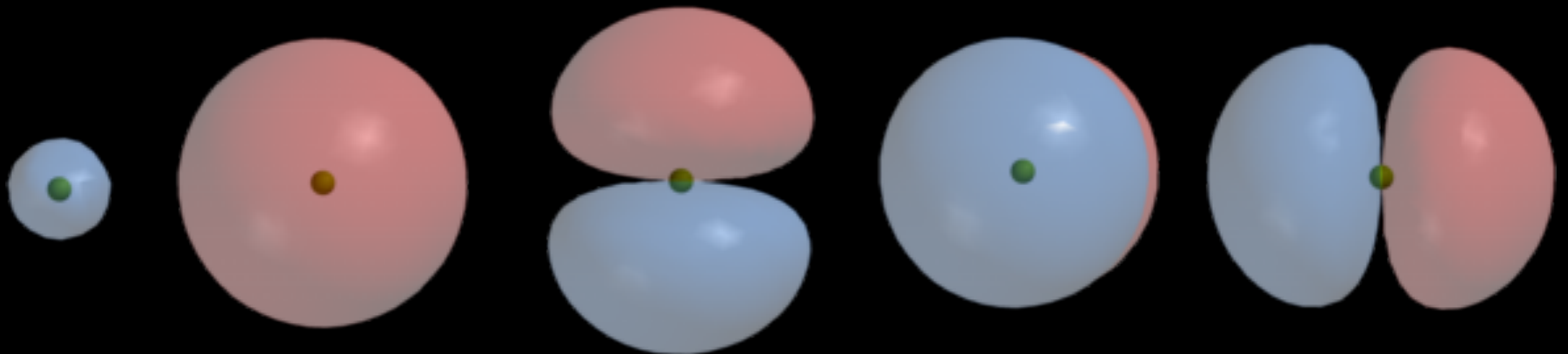
# Atomo di Bohr

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.

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

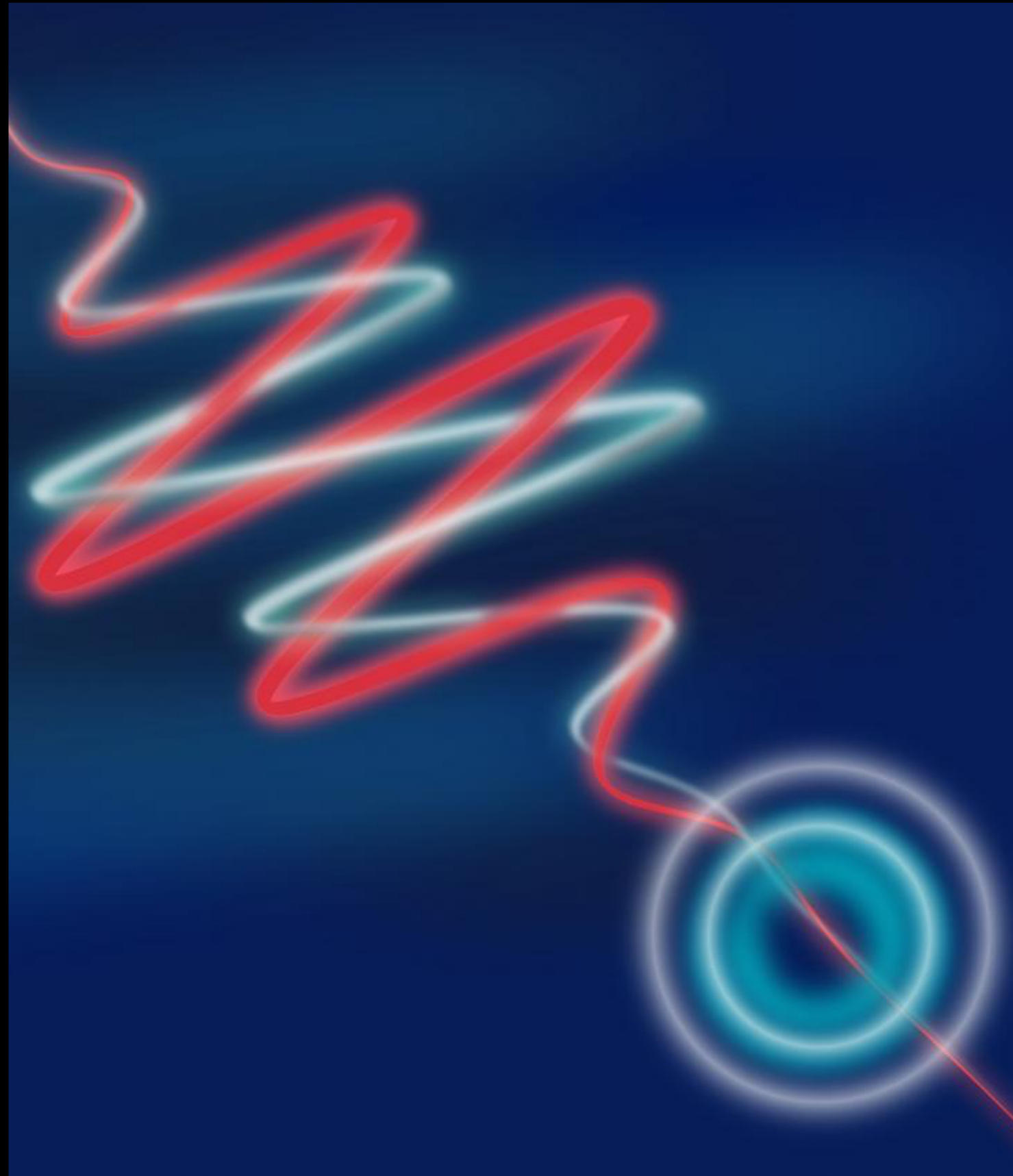


# De Broglie

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.

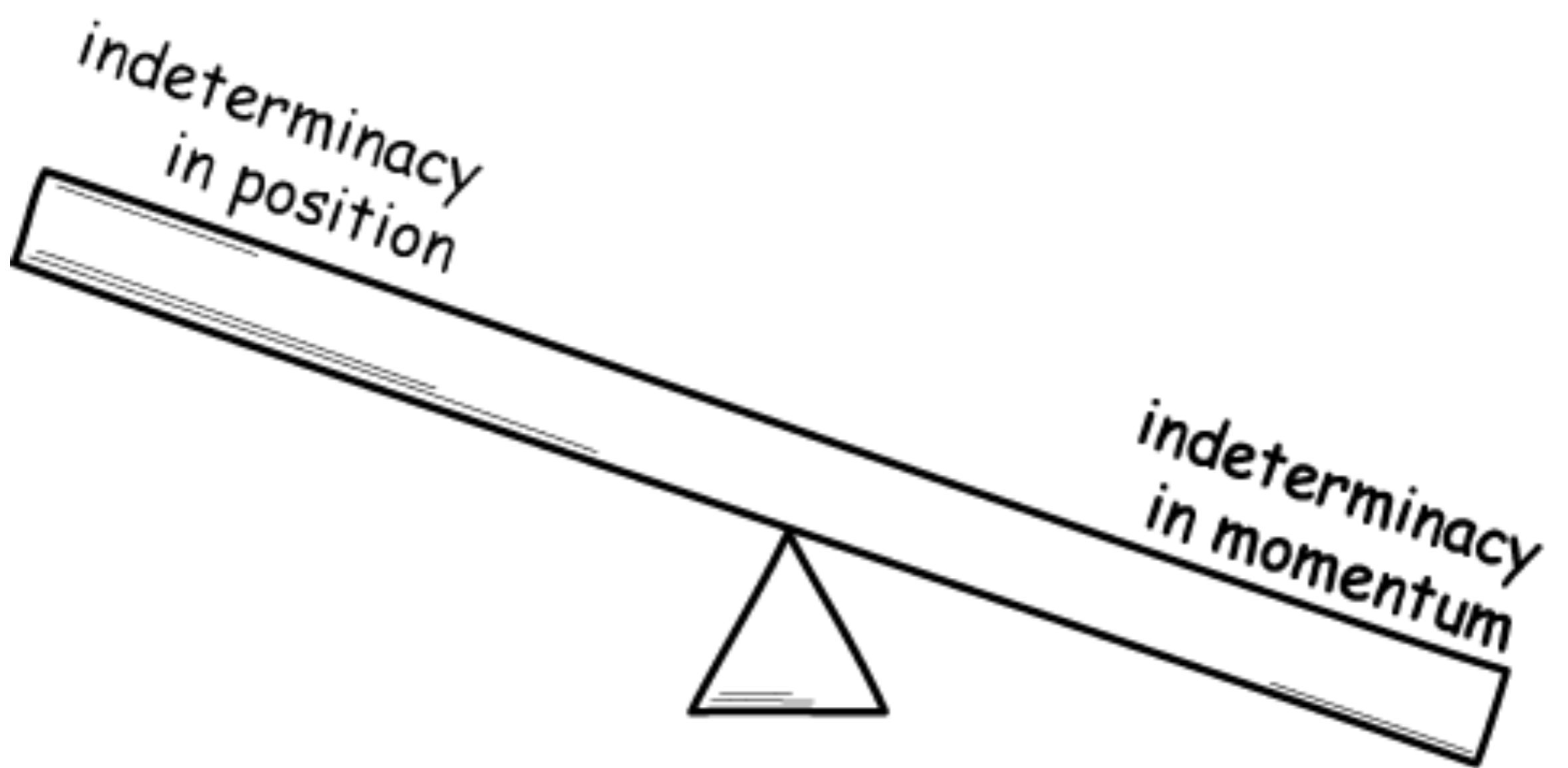
$$[A, B] \neq 0$$

$$AB - BA \neq 0$$

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

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

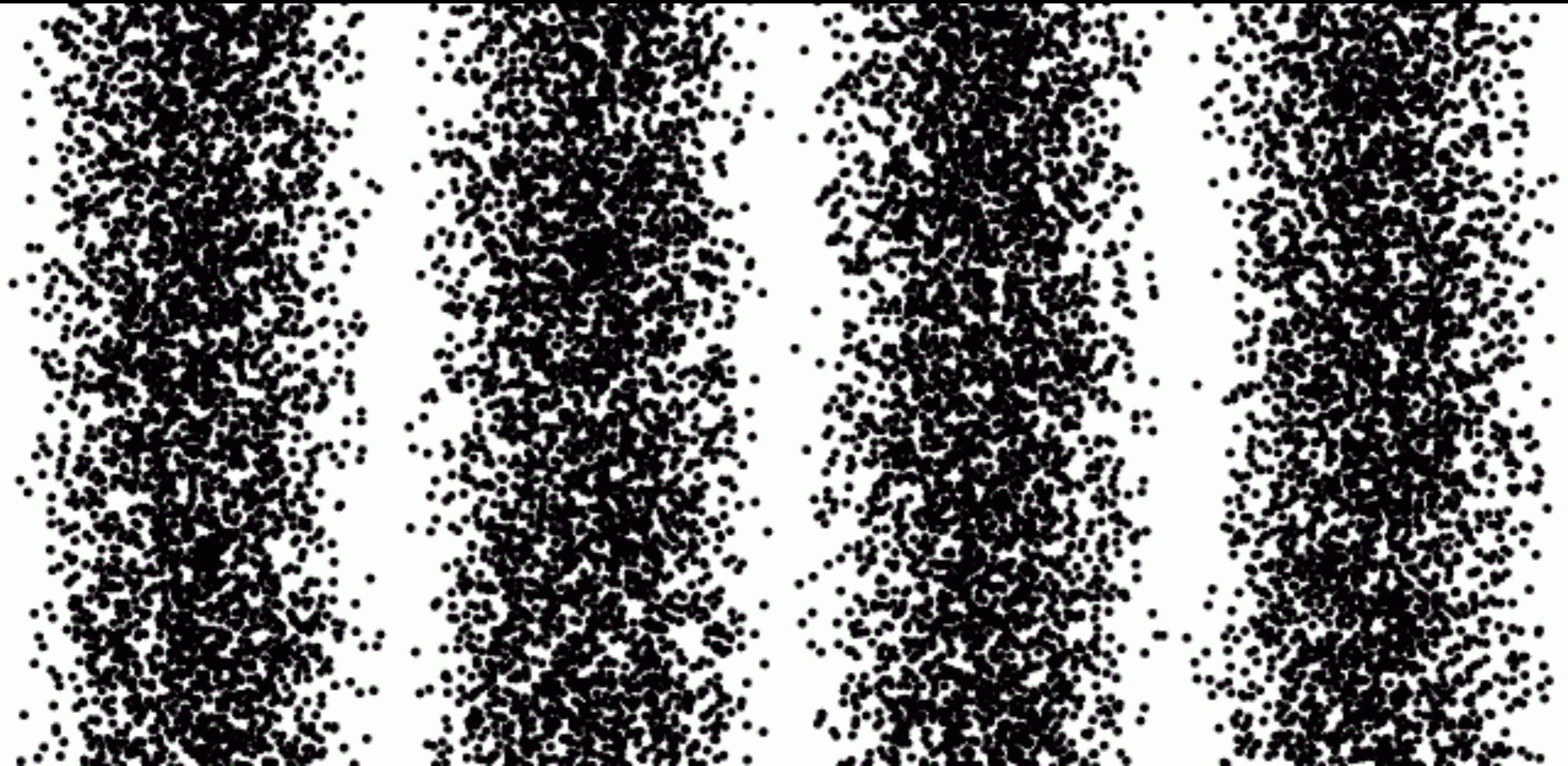




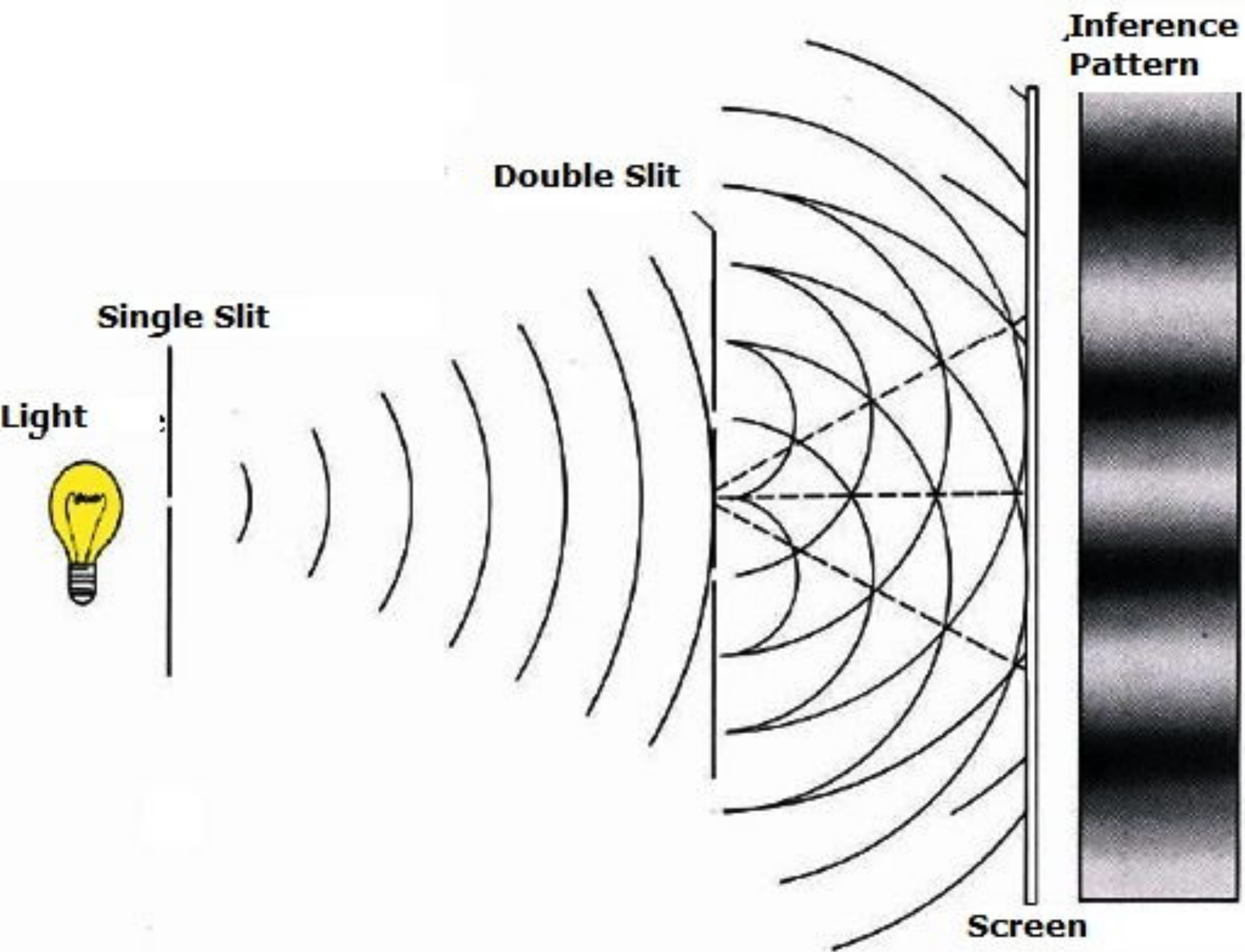
Esempio: posizione e velocità di una particella.

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

# Complementarità

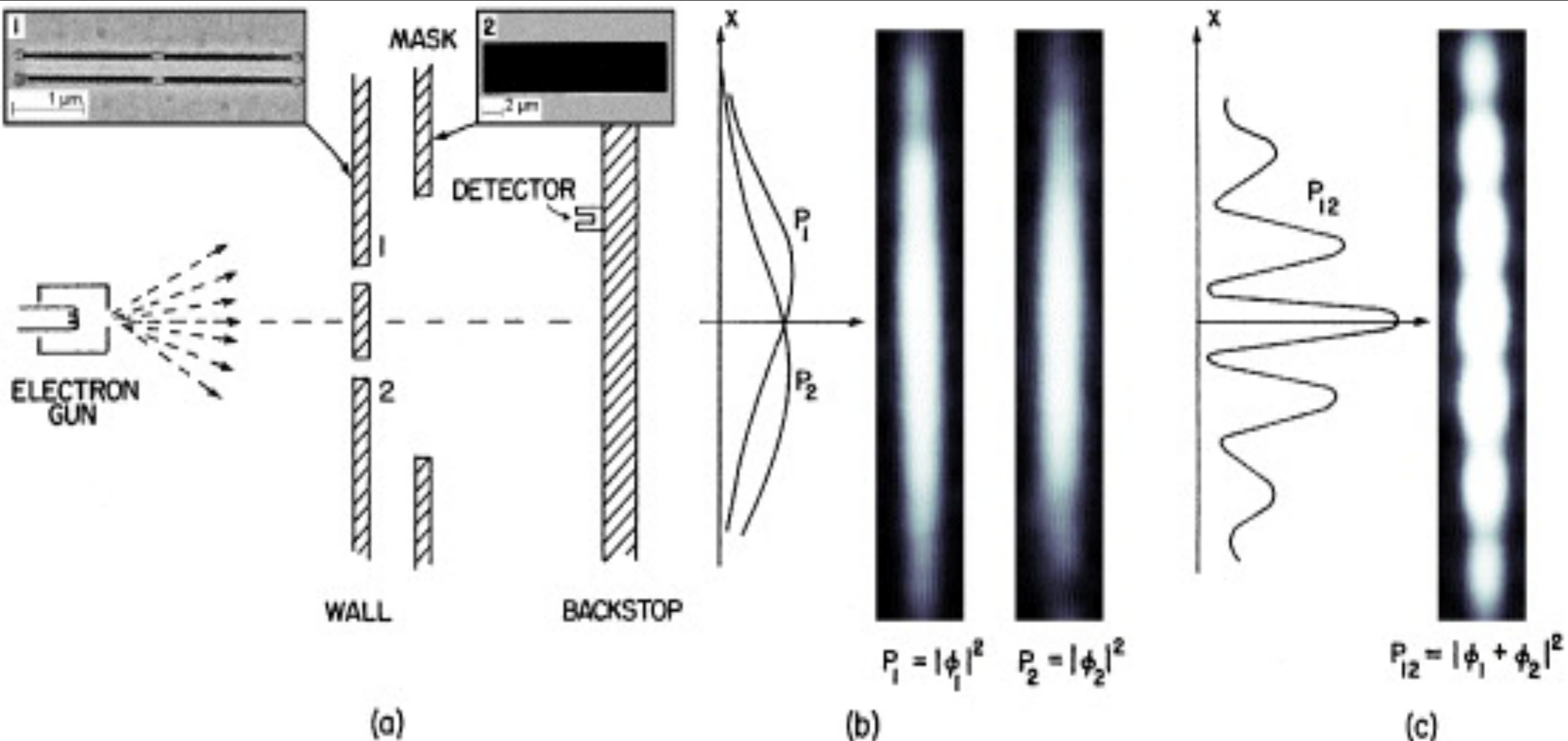


Due diverse nature di un sistema fisico non possono mai essere rivelate contemporaneamente.



Anche gli elettroni hanno una doppia natura.

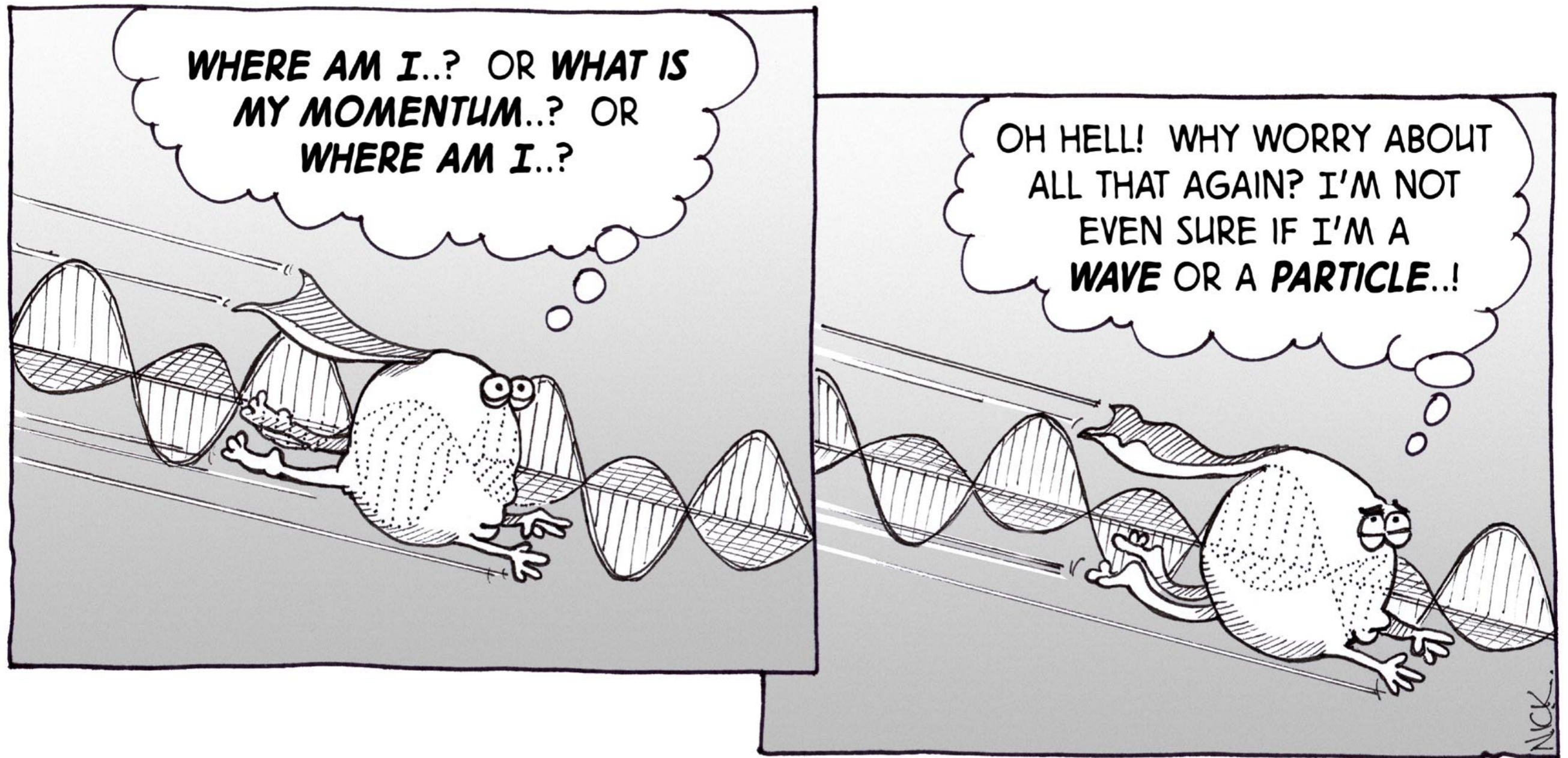
È possibile fare esperimenti che mostrino l'una o l'altra, ma in nessun esperimento si riuscirà mai a vederle *entrambe* in contemporanea.



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.

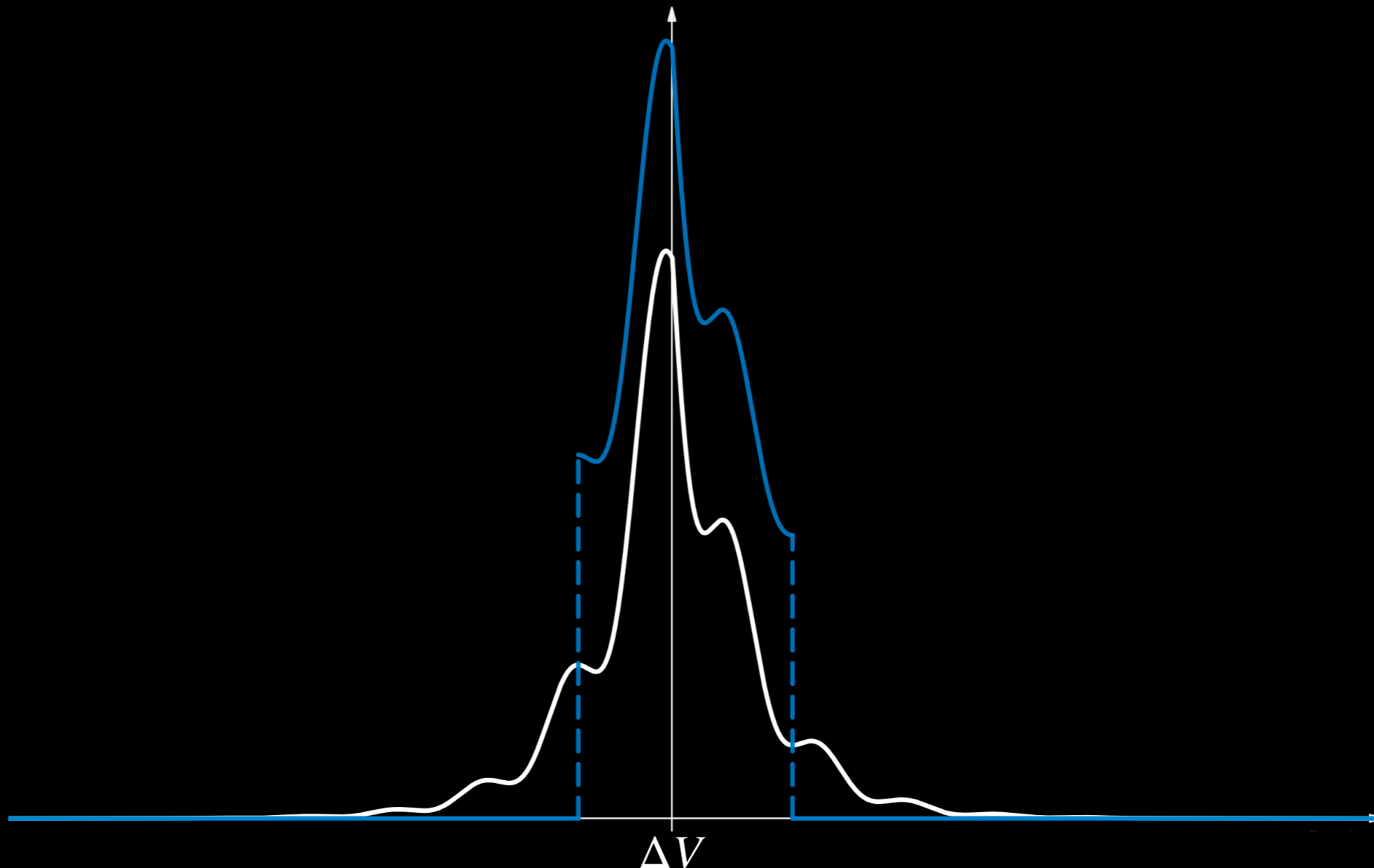
# Equazione di Schrödinger

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

- 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  $V$ .

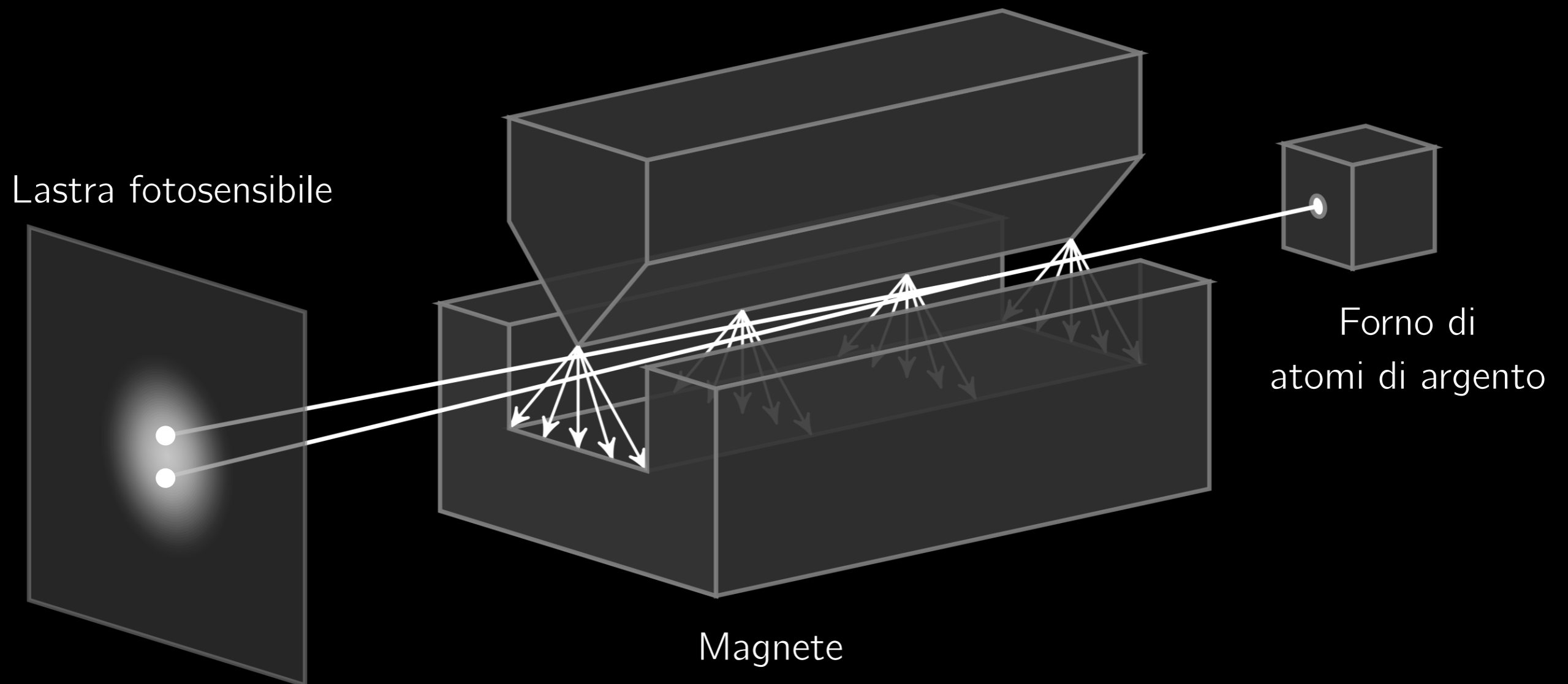
## Due dinamiche ben distinte

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

# Stern-Gerlach

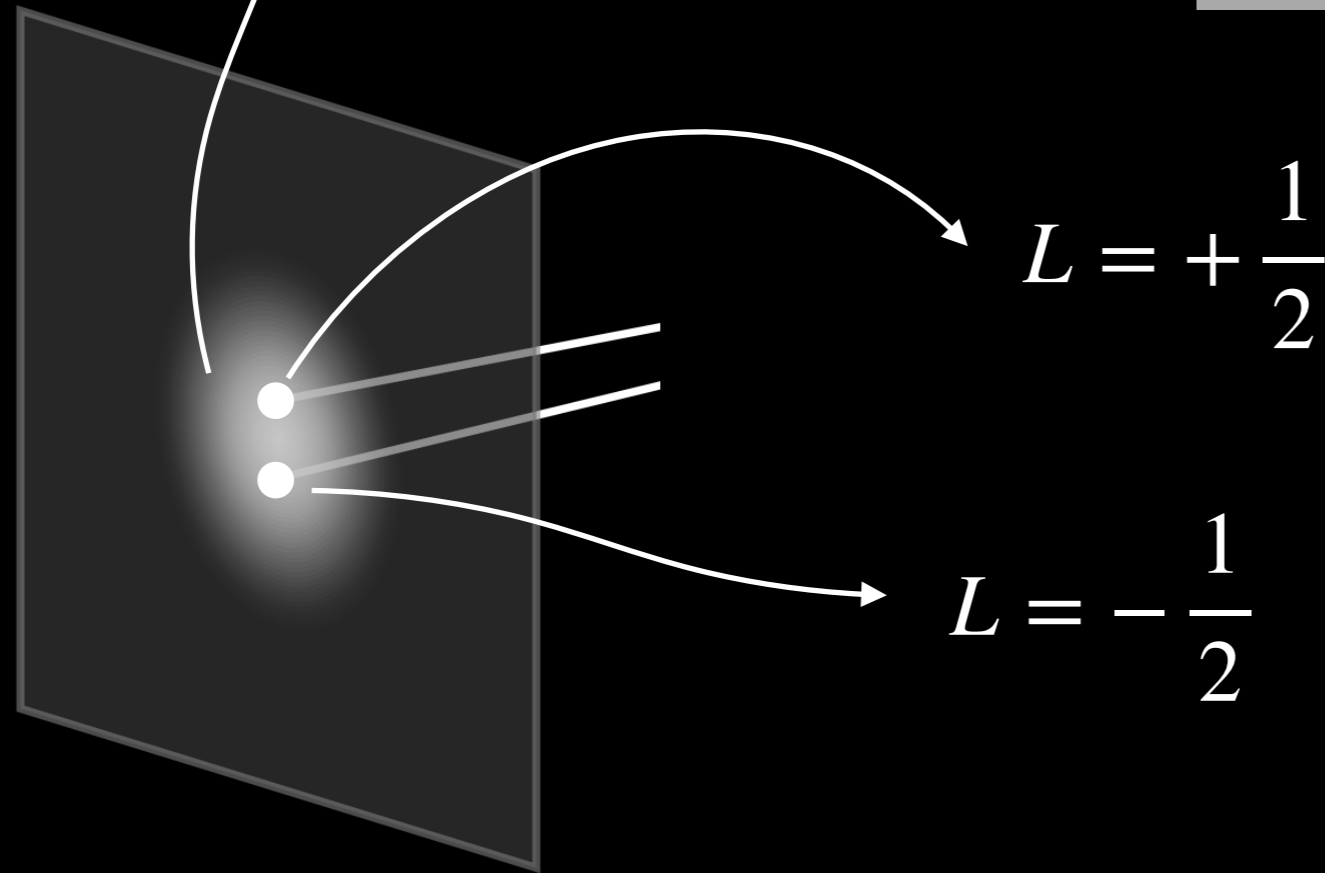
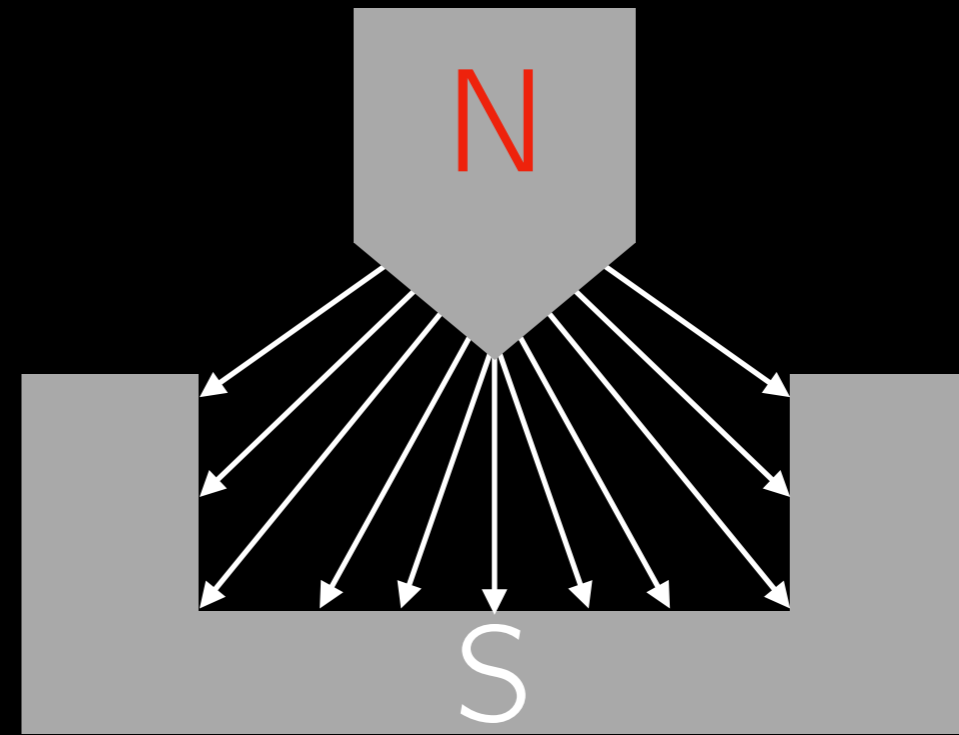
Dimostrano che il momento angolare è spazialmente quantizzato...

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



# Stern-Gerlach

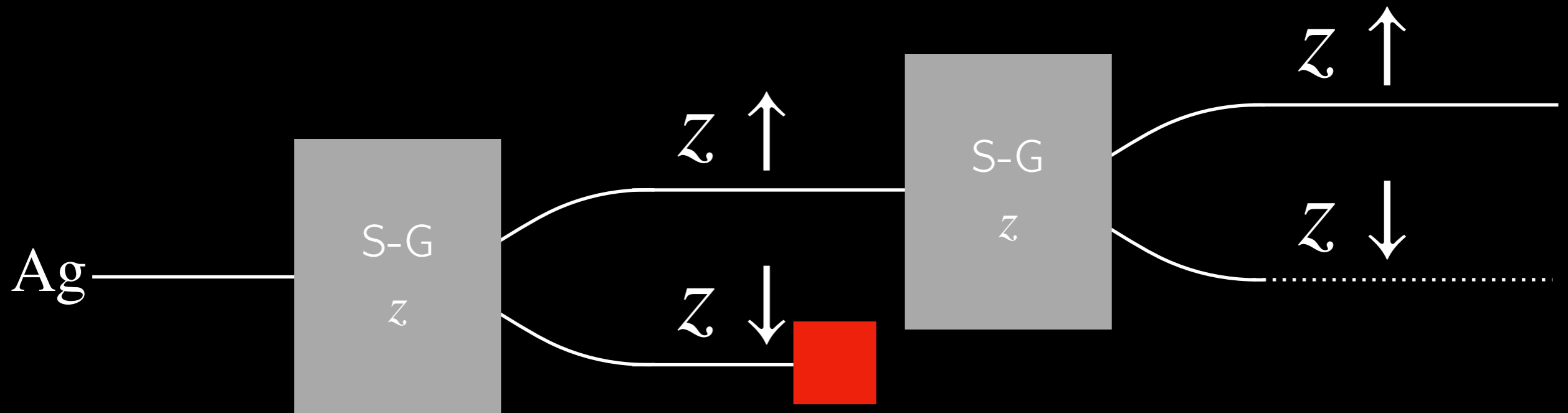
$L$  non è quantizzato e può assumere ogni possibile valore



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

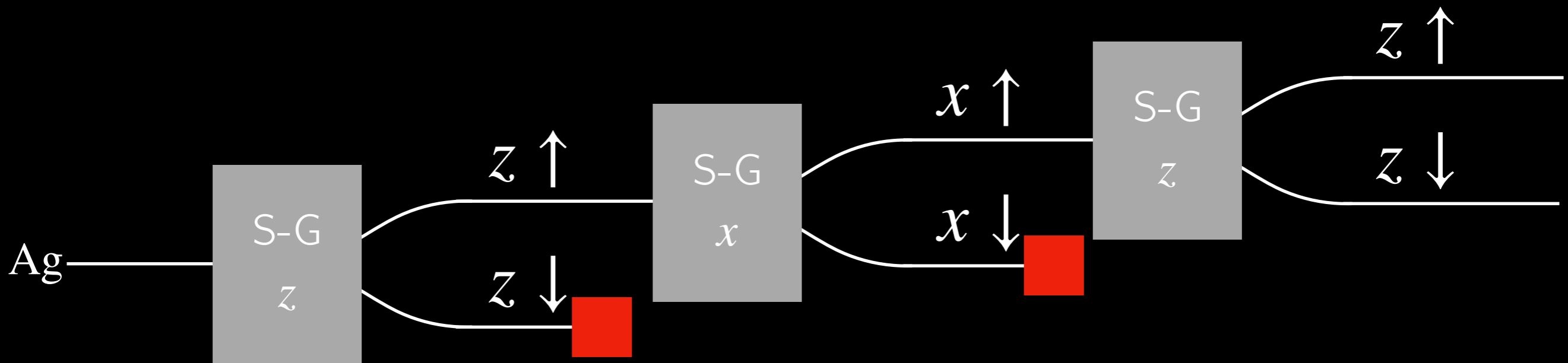


# Stern-Gerlach



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  $z$

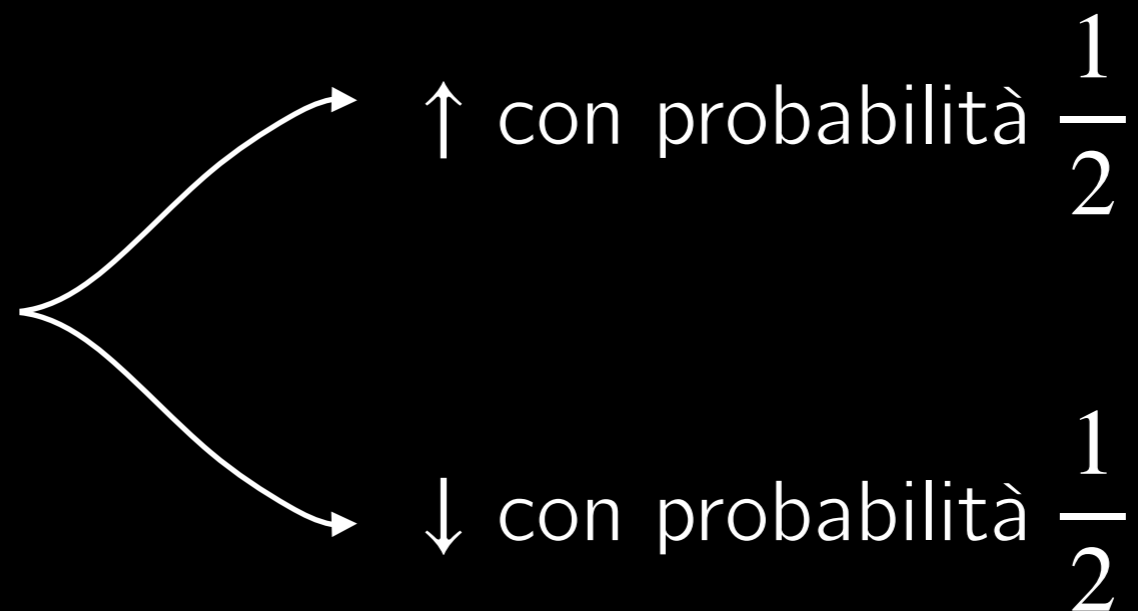
# Stern-Gerlach

Prototipo per una misurazione ideale quantistica

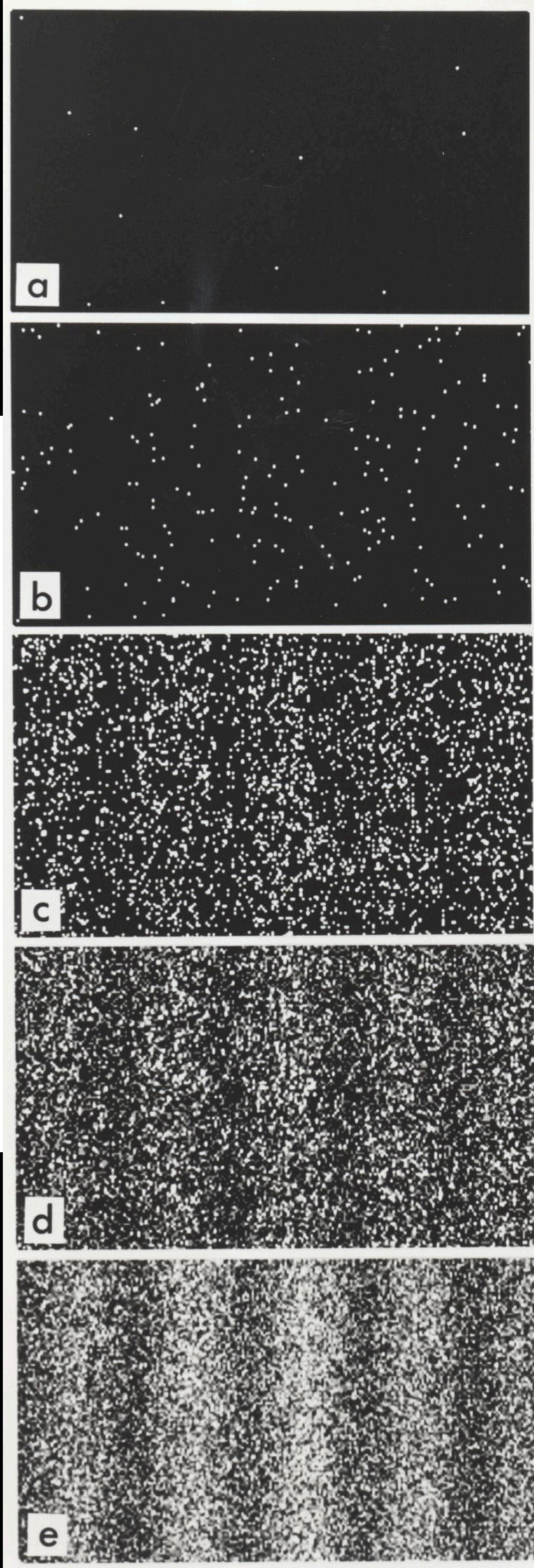
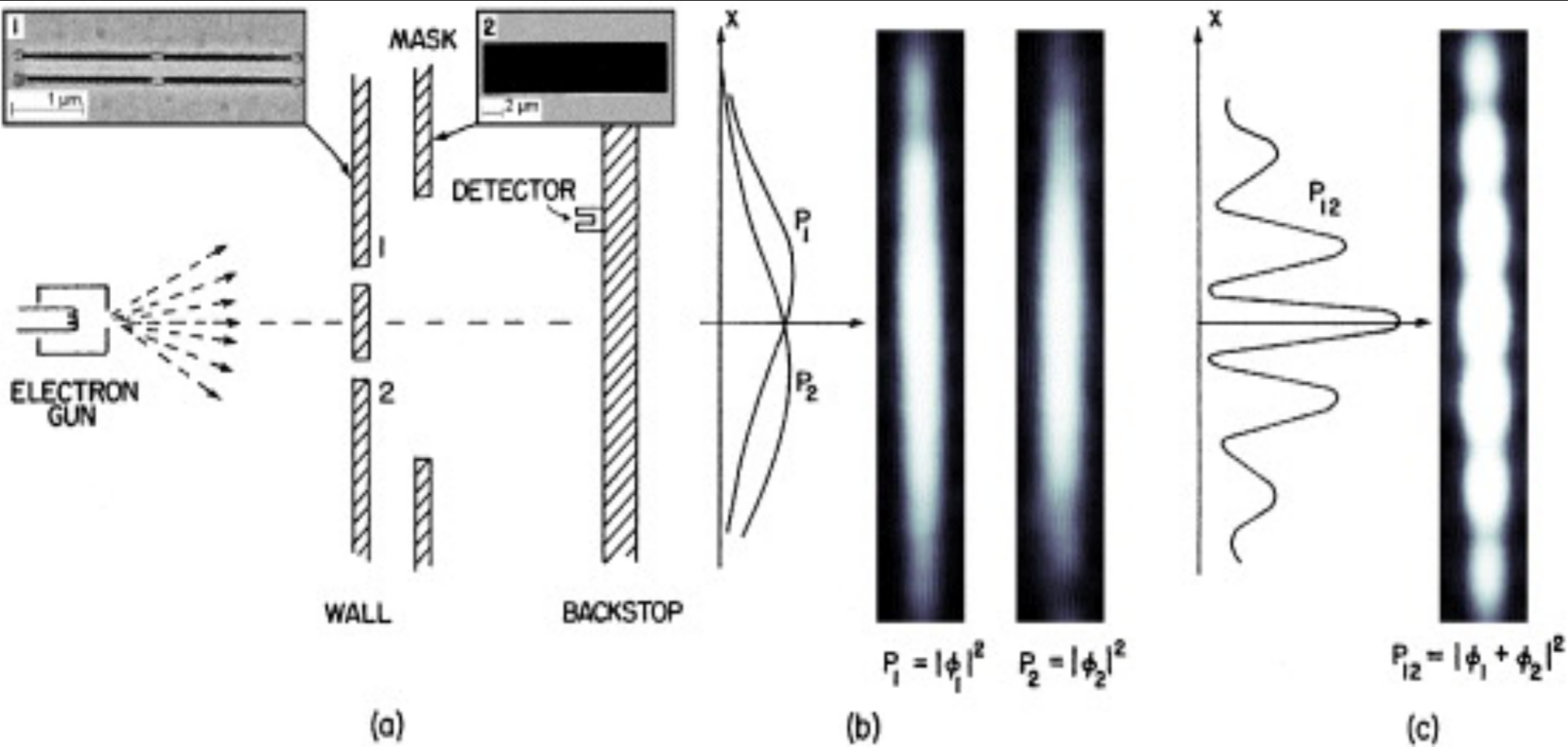
Un singolo atomo di Ag ha funzione d'onda in

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

Quando misurato, lo stato collassa in:

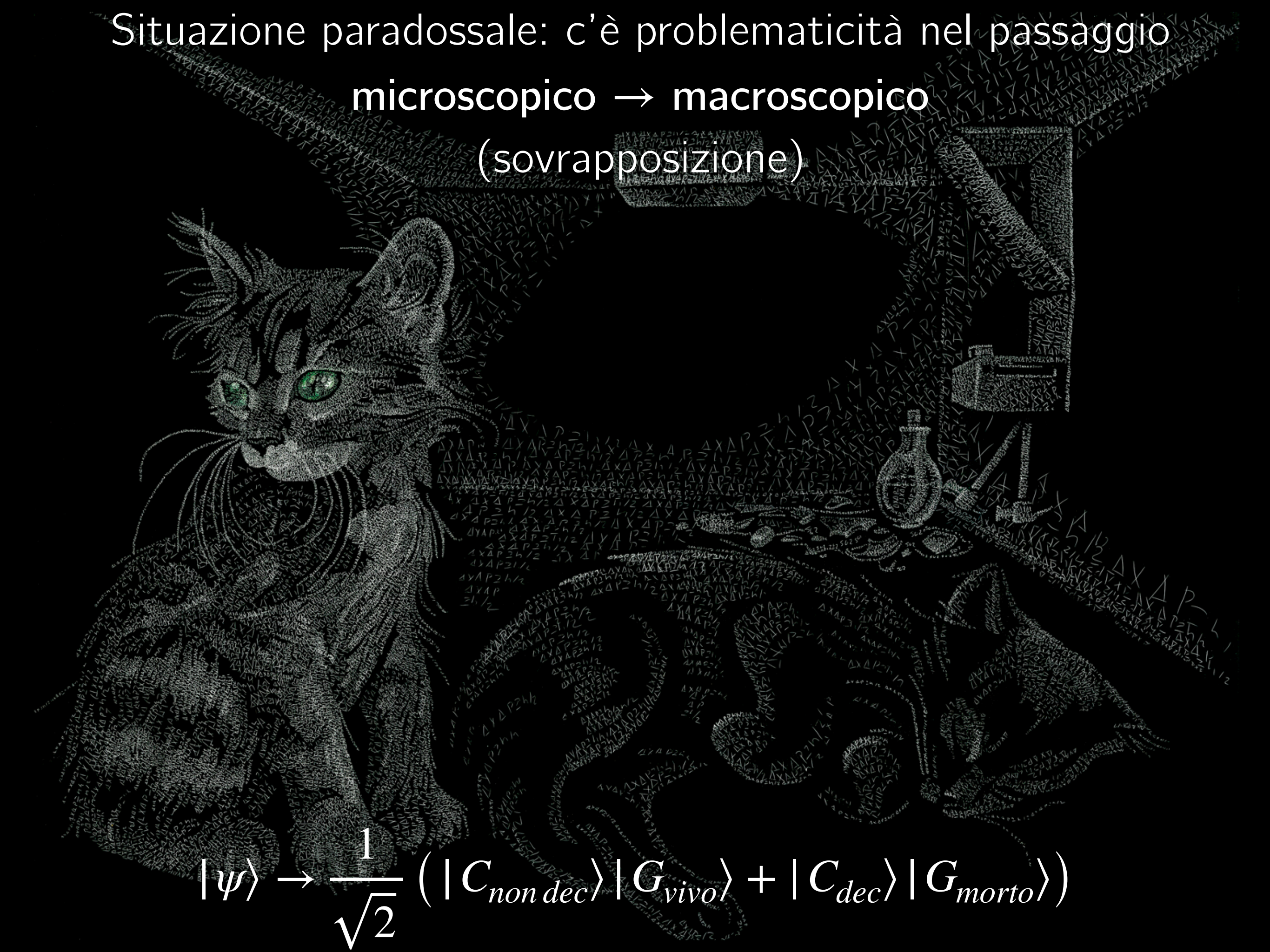


# Esperimento Young-Tonomura



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

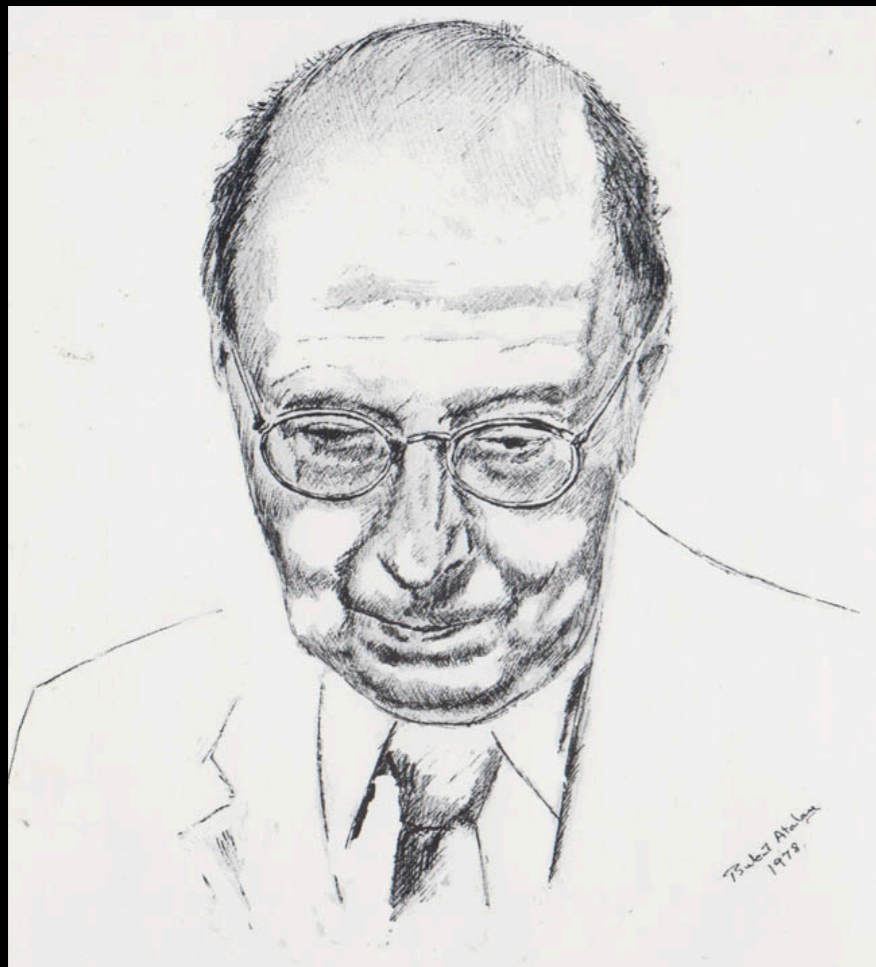
Situazione paradossale: c'è problematicità nel passaggio  
microscopico  $\rightarrow$  macroscopico  
(sovrapposizione)


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

# L'amico di Wigner

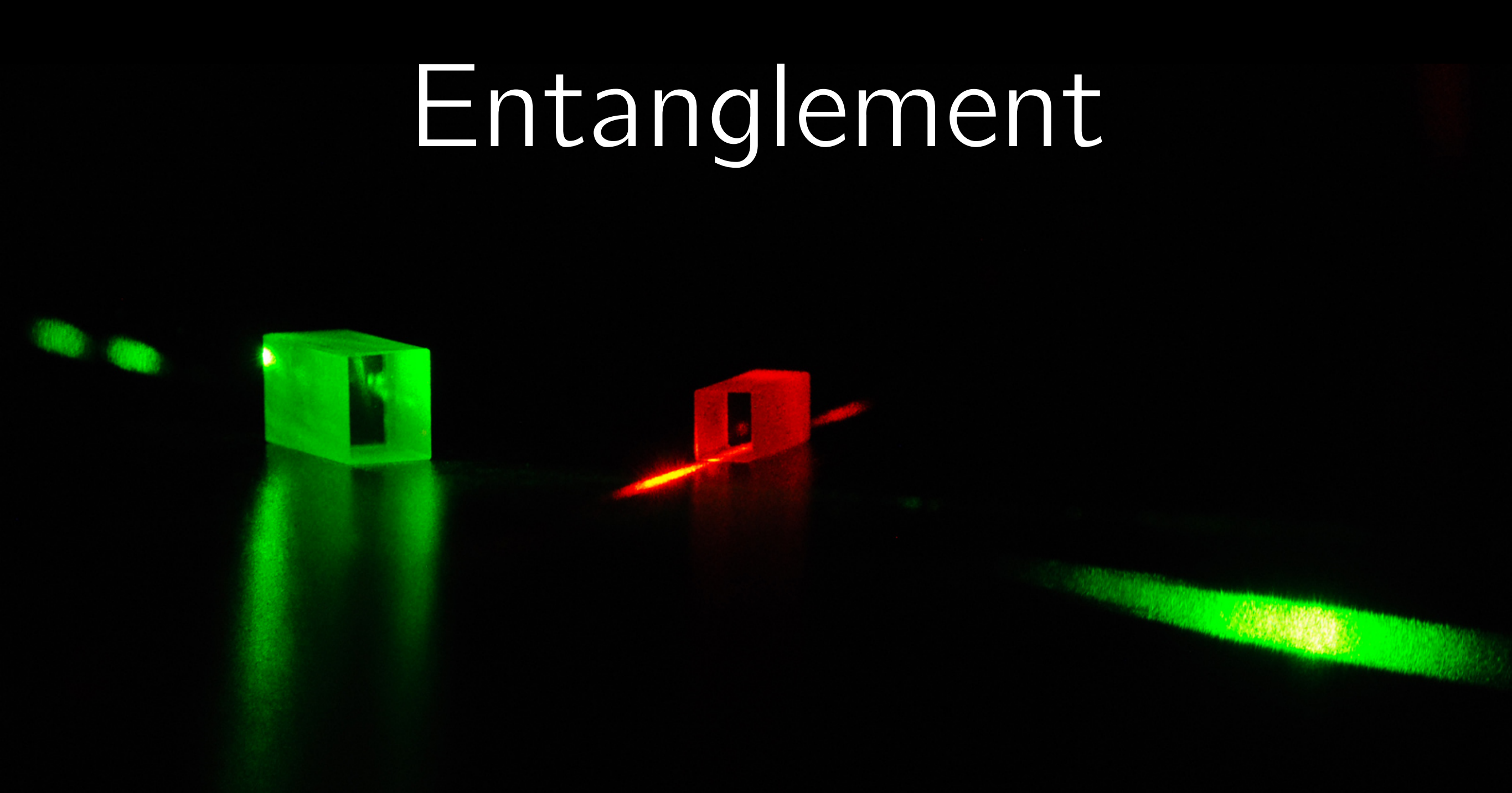
Un amico di Wigner fa l'esperimento del gatto nella scatola.

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**