

**WANTED**  
**SCHRODINGER'S CAT**



**DEAD AND ALIVE**

# Omaggio alla Fisica Meccanica Quantistica

Ettore Budassi  
07/12/2018

# La MQ tratta sistemi microscopici e lenti



Meccanica  
Newtoniana



Relatività



Meccanica  
Quantistica



Teorie di Campo  
Quantistiche  
Relativistiche  
(QED)



# Cronologia





# Nuova rivoluzione copernicana

Tra il 1924 e il 1928 i fisici di tutto il mondo hanno avuto delle intuizioni per *costruire* nuova fisica.  
Sono stati introdotti nuovi concetti.



# Novità Concettuali

- Dualismo onda-particella
- Leggi probabilistiche governano la natura
- Indeterminazione
- Spin
- Antiparticelle
- Principio di Pauli



# Stato dell'arte fisico

Meccanica classica relativistica  
Relatività Speciale e Generale



# Stato dell'arte fisico

And God said,

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

and there was light.

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

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

Elettromagnetismo

Elettrodinamica classica relativistica



# Stato dell'arte fisico



Termodinamica classica



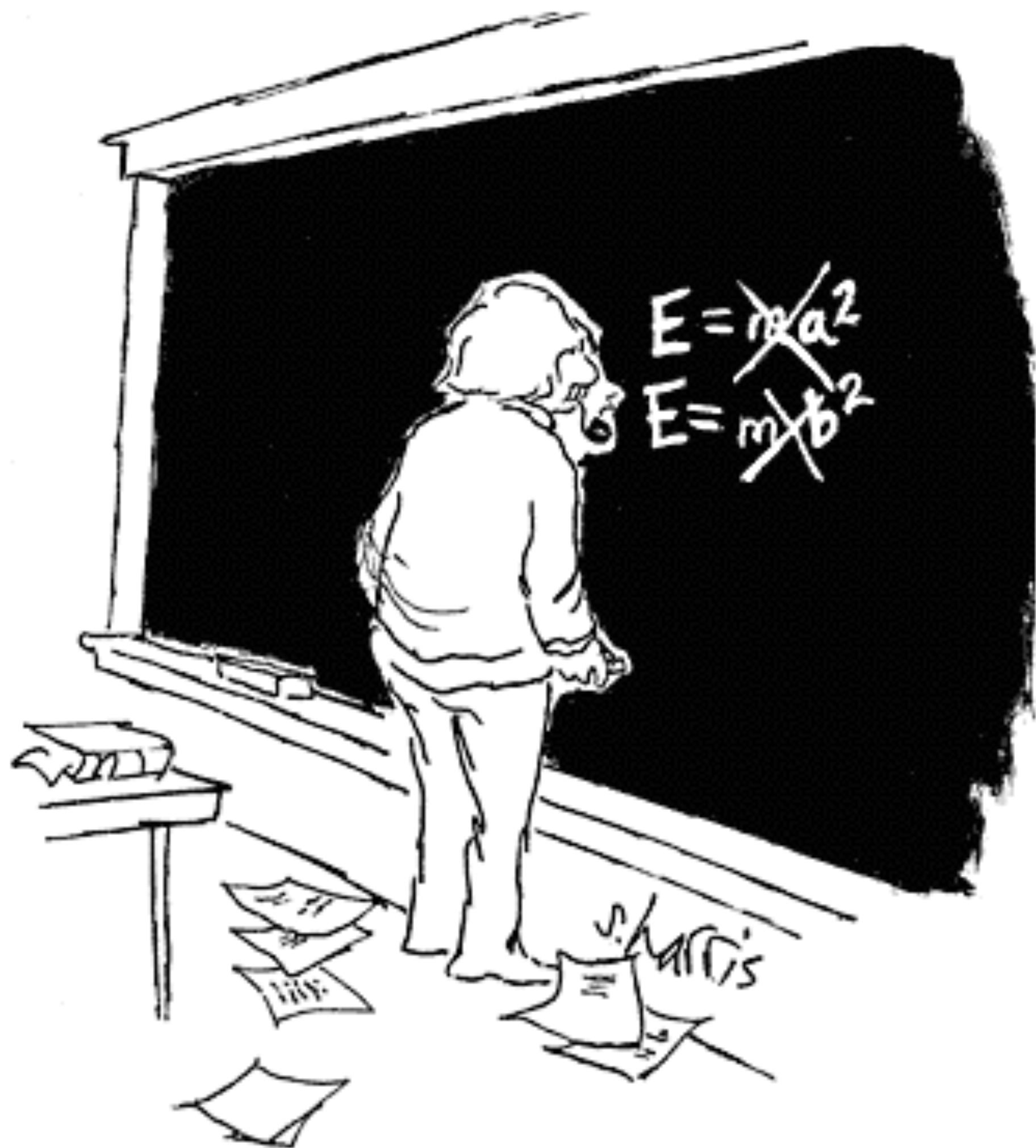
Perché è stato  
necessario rivoluzionare il  
panorama della fisica?





# Problemi

Sono sorti  
problemi sia  
teorici che  
sperimentali...



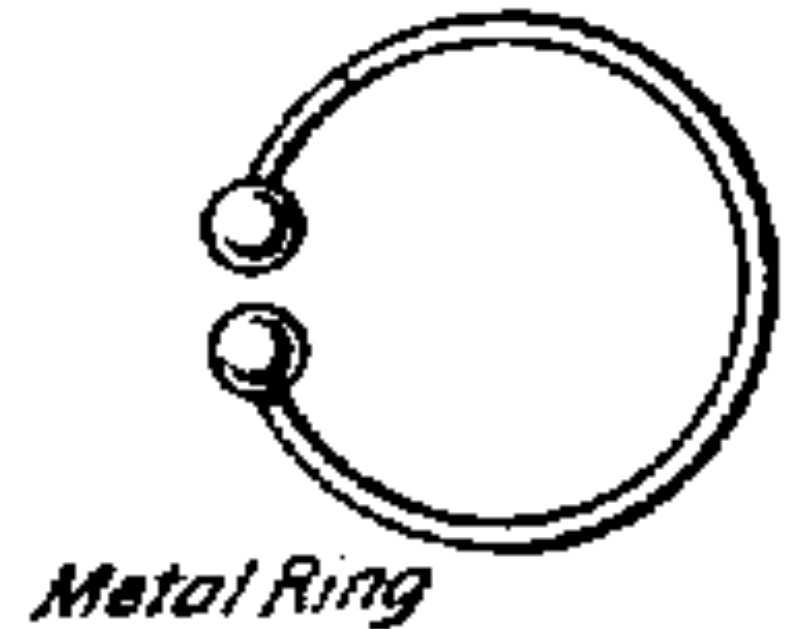
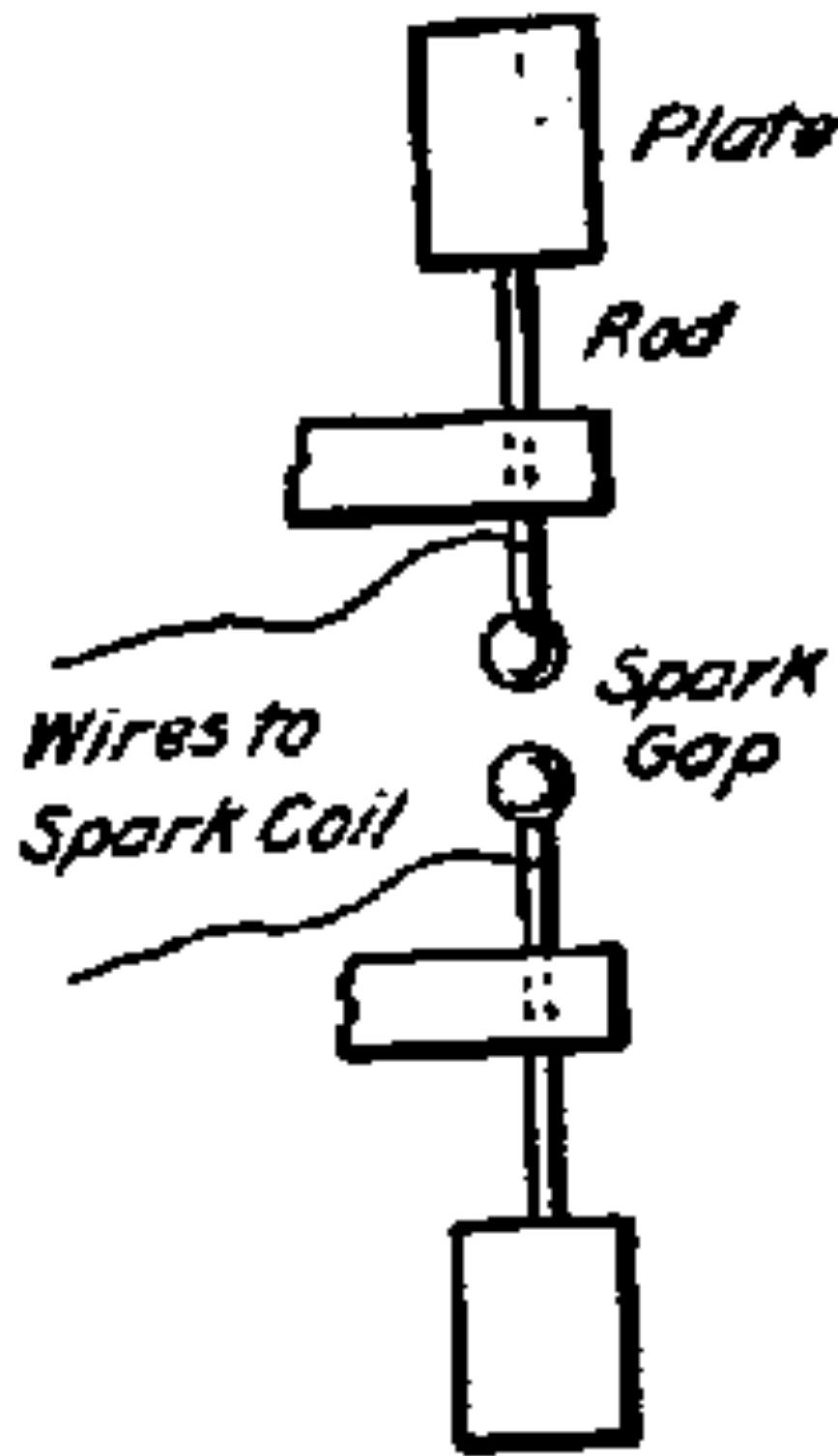




# Esempi di problemi teorici



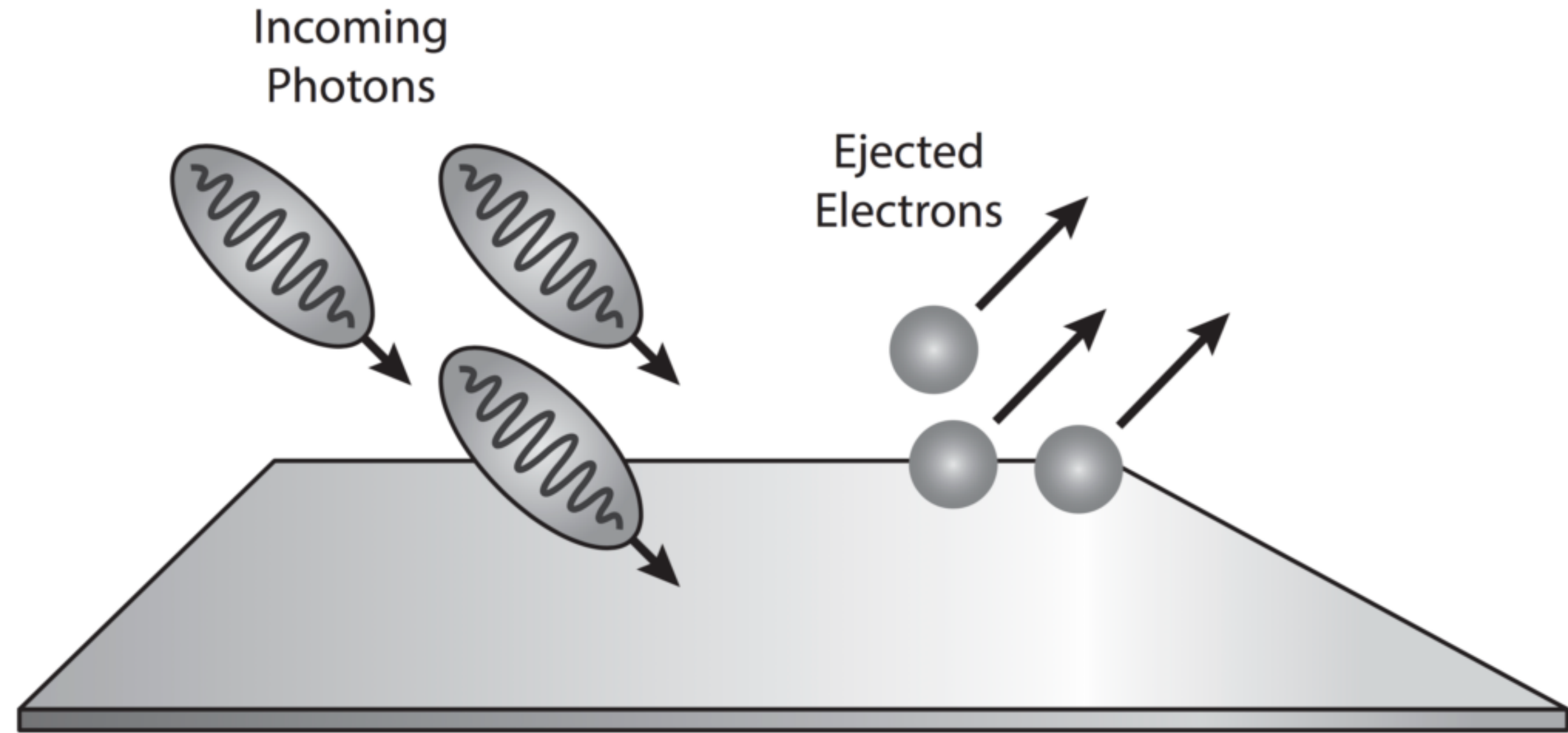
# Hertz



1887: Hertz verifica l'effetto fotoelettrico. Scopre che l'effetto, per ogni intensità radiativa, non si presenta se la radiazione incidente ha frequenza inferiore ad un valore di soglia.



# Effetto Fotoelettrico



L'effetto fotoelettrico si presenta quando un fotone di luce incide su una lastra metallica. In questo caso, sotto opportune condizioni, si liberano elettroni nel metallo, generando una corrente elettrica.

# Atomo di Thomson

J.J. Thomson

His  
model of  
the atom

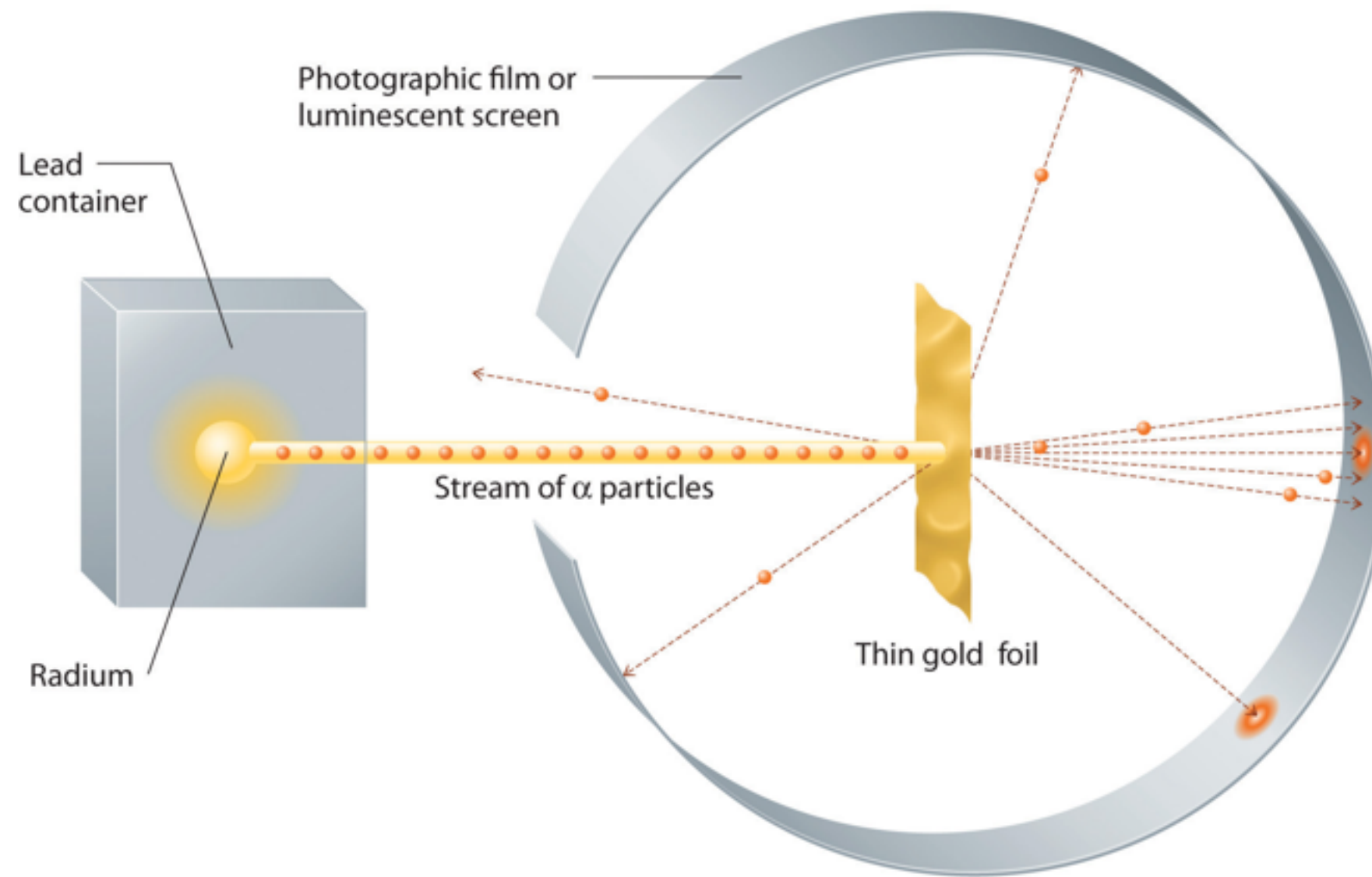


© 2008 Welch & Partner, Tübingen  
scientific multimedia

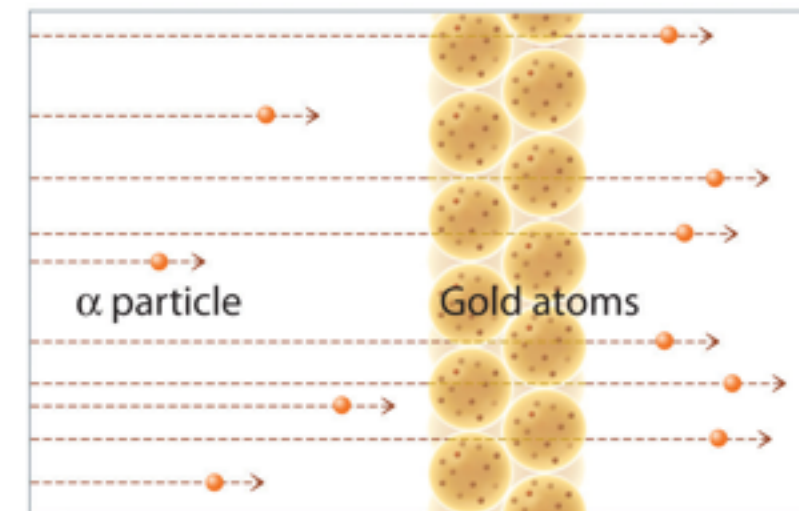
Carica complessivamente  
positiva con le cariche  
negative inserite come  
l'uvetta nel panettone.



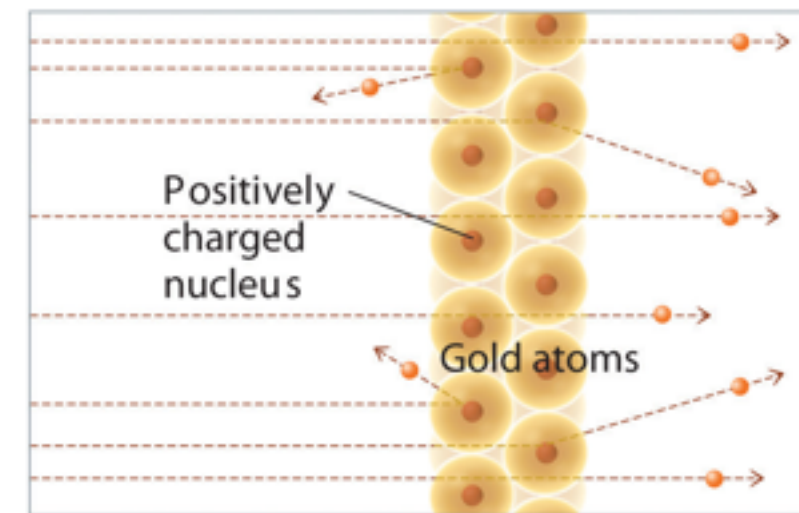
# Esperimento di Rutherford



(a) Rutherford's experiment



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

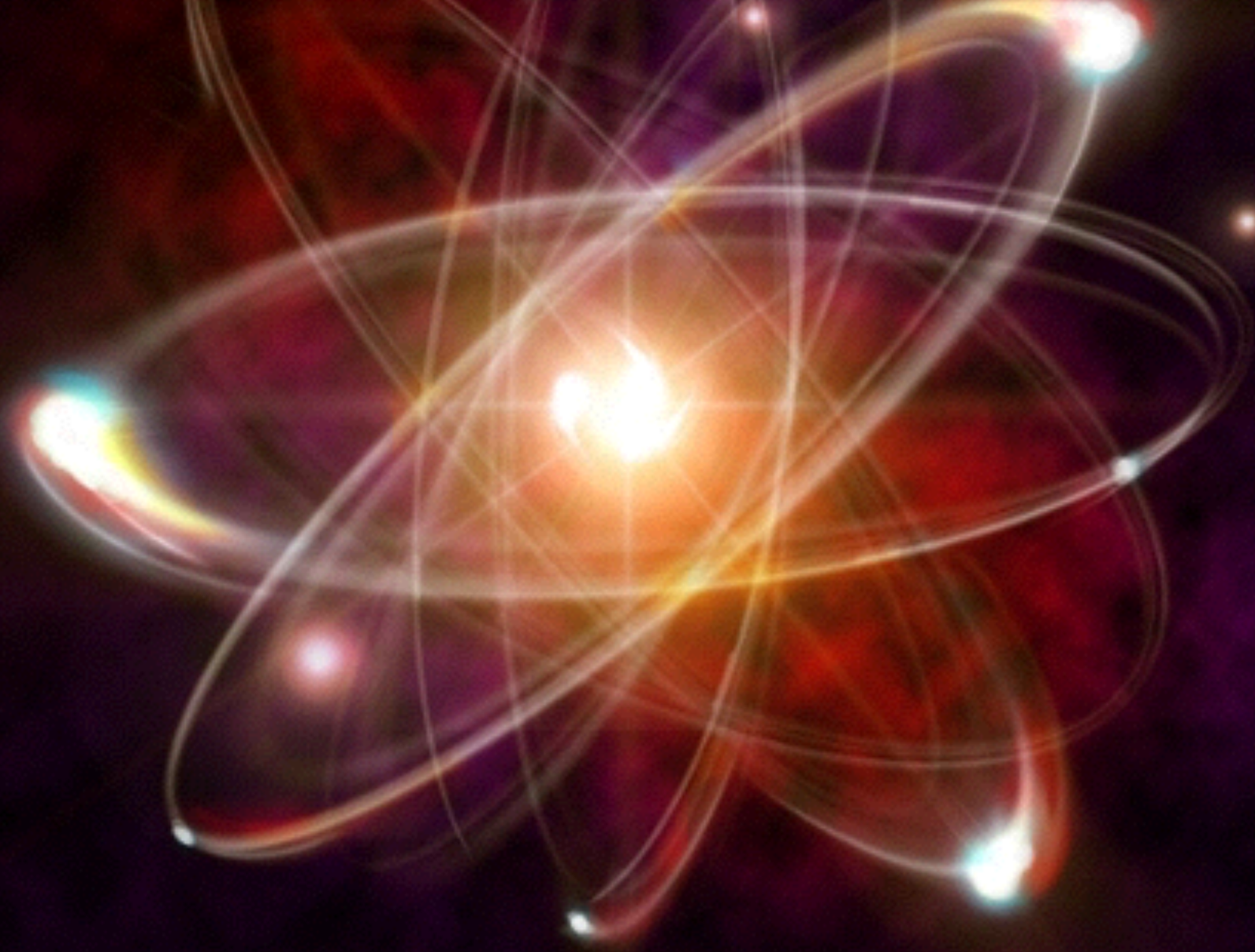


(c) What Rutherford actually observed

Sono stati lanciati atomi di elio contro una piccola lamina d'oro, e si è capito che il nucleo positivo e le cariche negative sono ben separati spazialmente



# Atomo di Rutherford



Modello planetario

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



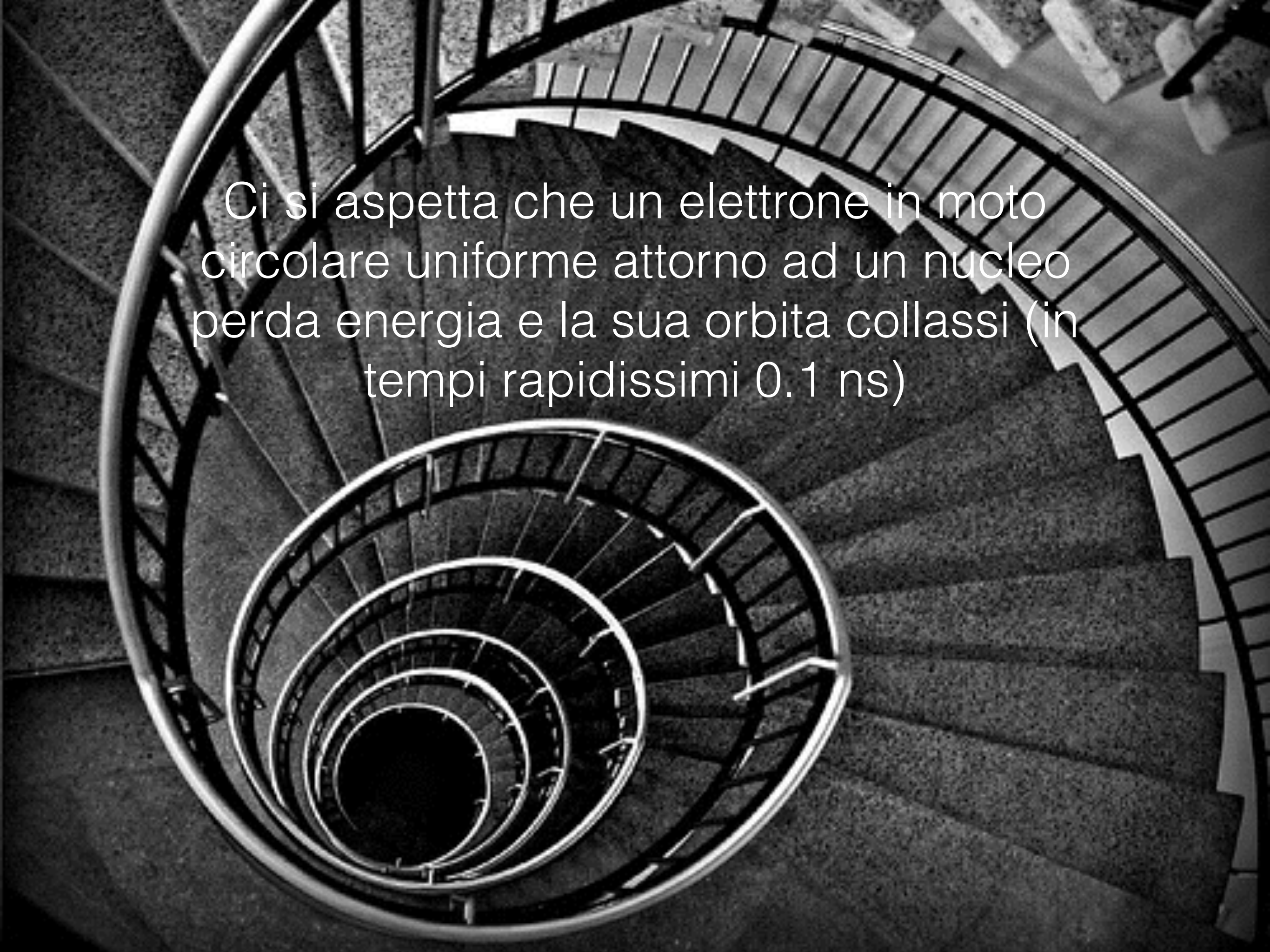
# Primi problemi...

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

Viene violata la legge di Larmor

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

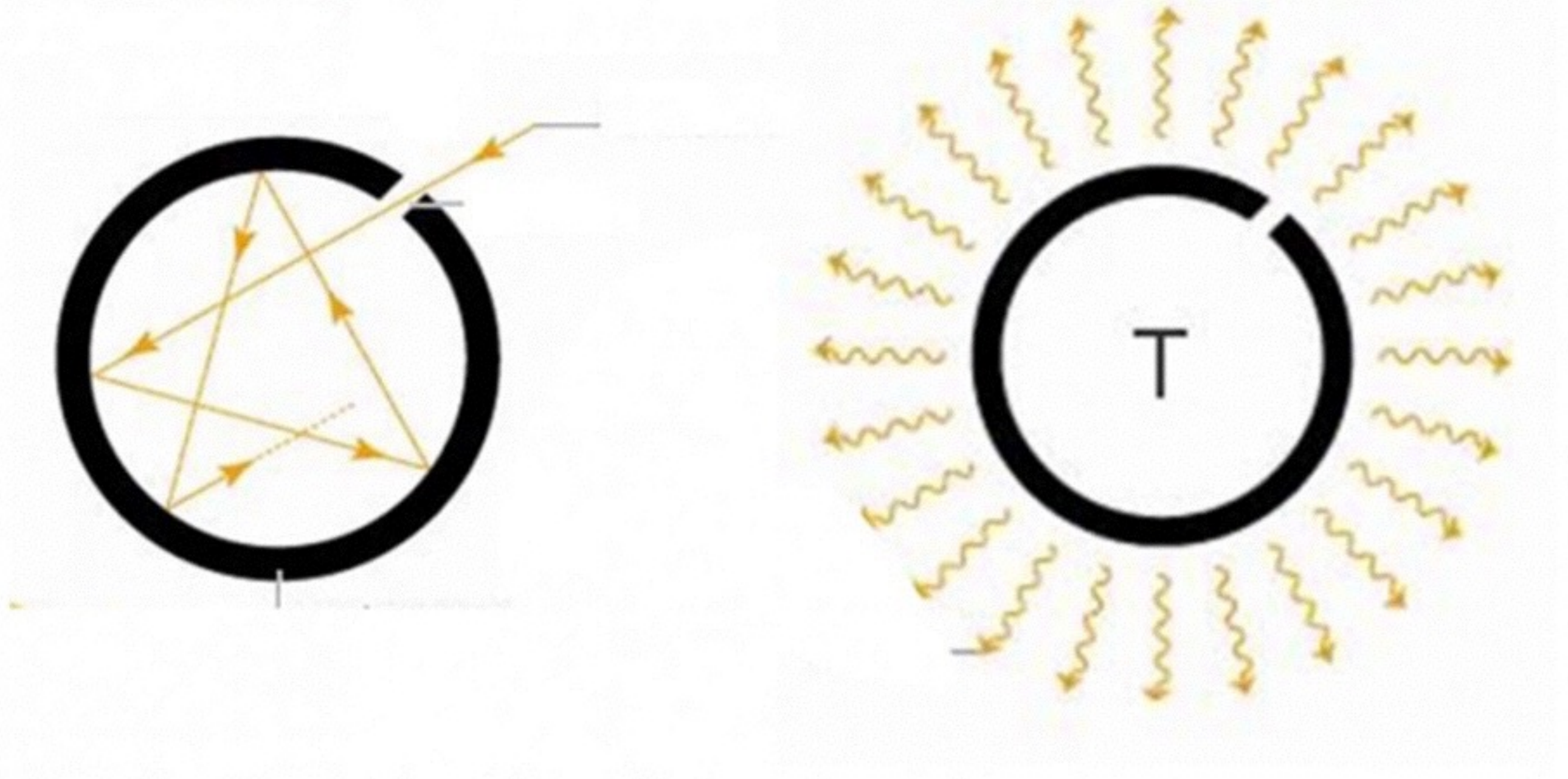


A high-contrast, black and white photograph of a spiral staircase, viewed from directly above. The staircase winds inward, creating a series of concentric, overlapping curves that lead towards a dark, circular center. The steps are dark, and the metal railings and balusters are light, creating a rhythmic pattern of light and dark. The perspective is looking down the length of the stairs, emphasizing the depth and the spiral motion.

Ci si aspetta che un elettrone in moto  
circolare uniforme attorno ad un nucleo  
perda energia e la sua orbita collassi (in  
tempi rapidissimi 0.1 ns)



# Corpo nero



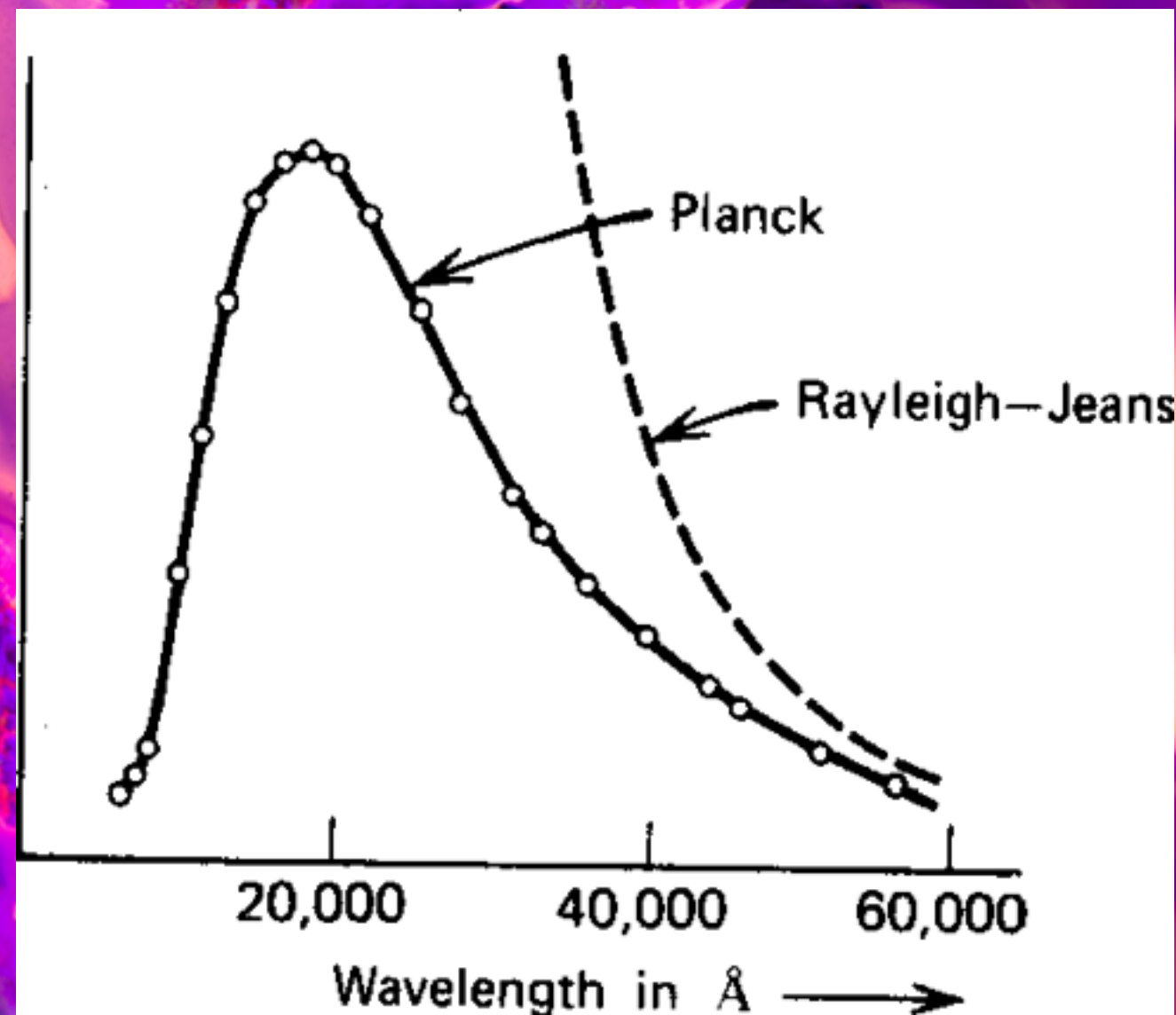
Per il principio di conservazione dell'energia,  
un corpo nero, essendo un perfetto assorbitore deve essere  
anche un perfetto emettitore.  
In particolare emette calore




# Problemi: catastrofe ultravioletta

Un corpo nero ideale in equilibrio termico con l'ambiente emetterebbe radiazione ad ogni frequenza. L'energia emessa aumenta al crescere della frequenza.

Si può verificare che un corpo nero ideale emetterebbe un'infinita quantità di energia







# Principale problema sperimentale



# Calore specifico

Definiamo il calore specifico.

Esso indica la quantità di energia (calore) che serve per alzare o abbassare la temperatura di una sostanza di 1 grado K (o anche °C)





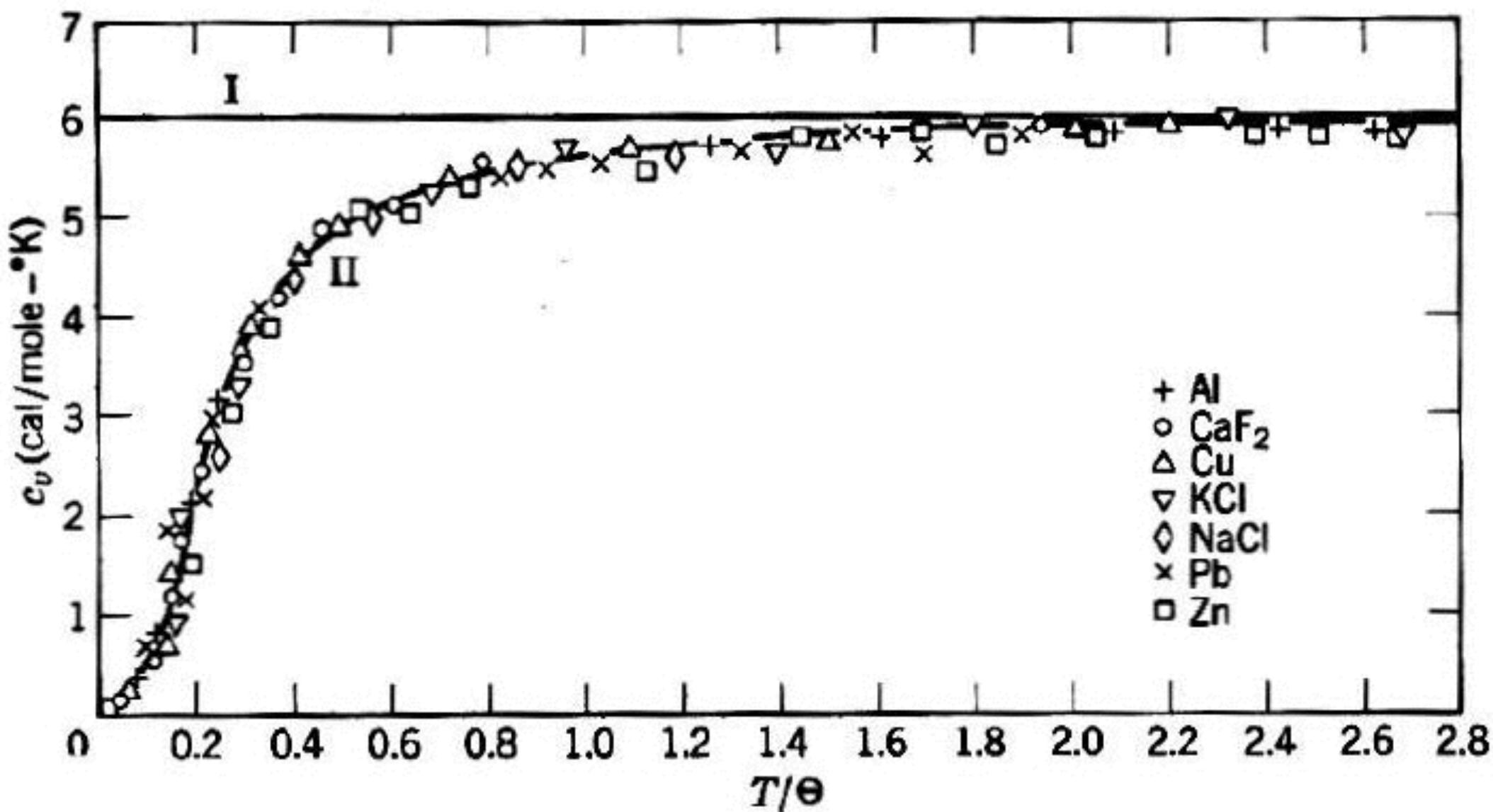
# Legge di Dulong-Petit

In fisica classica  
vale la legge di  
Dulong-Petit: il  
calore specifico  
è costante per  
ogni temperatura

$$C_V = 3R$$



# Ma...

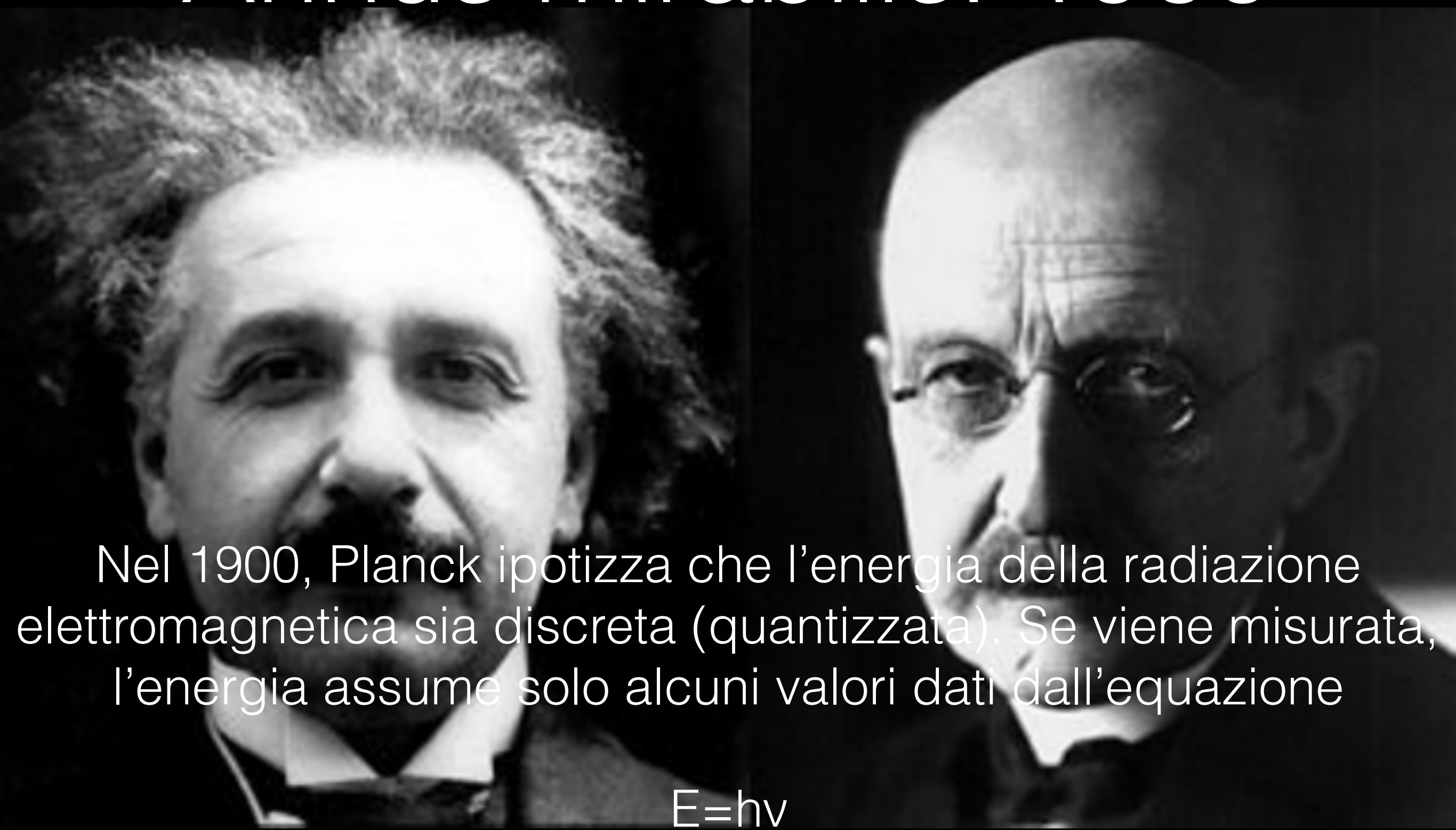


**Figure 11-5** The measured specific heat at constant volume, as a function of temperature, for several materials. Horizontal line I represents the Dulong-Petit law, and curve II represents the predictions of the Debye theory.

Sperimentalmente si ottengono risultati differenti. Il calore specifico, a basse temperature, non è costante, anzi tende ad annullarsi.



# Annus mirabilis: 1900



Nel 1900, Planck ipotizza che l'energia della radiazione elettromagnetica sia discreta (quantizzata). Se viene misurata, l'energia assume solo alcuni valori dati dall'equazione

$$E=h\nu$$

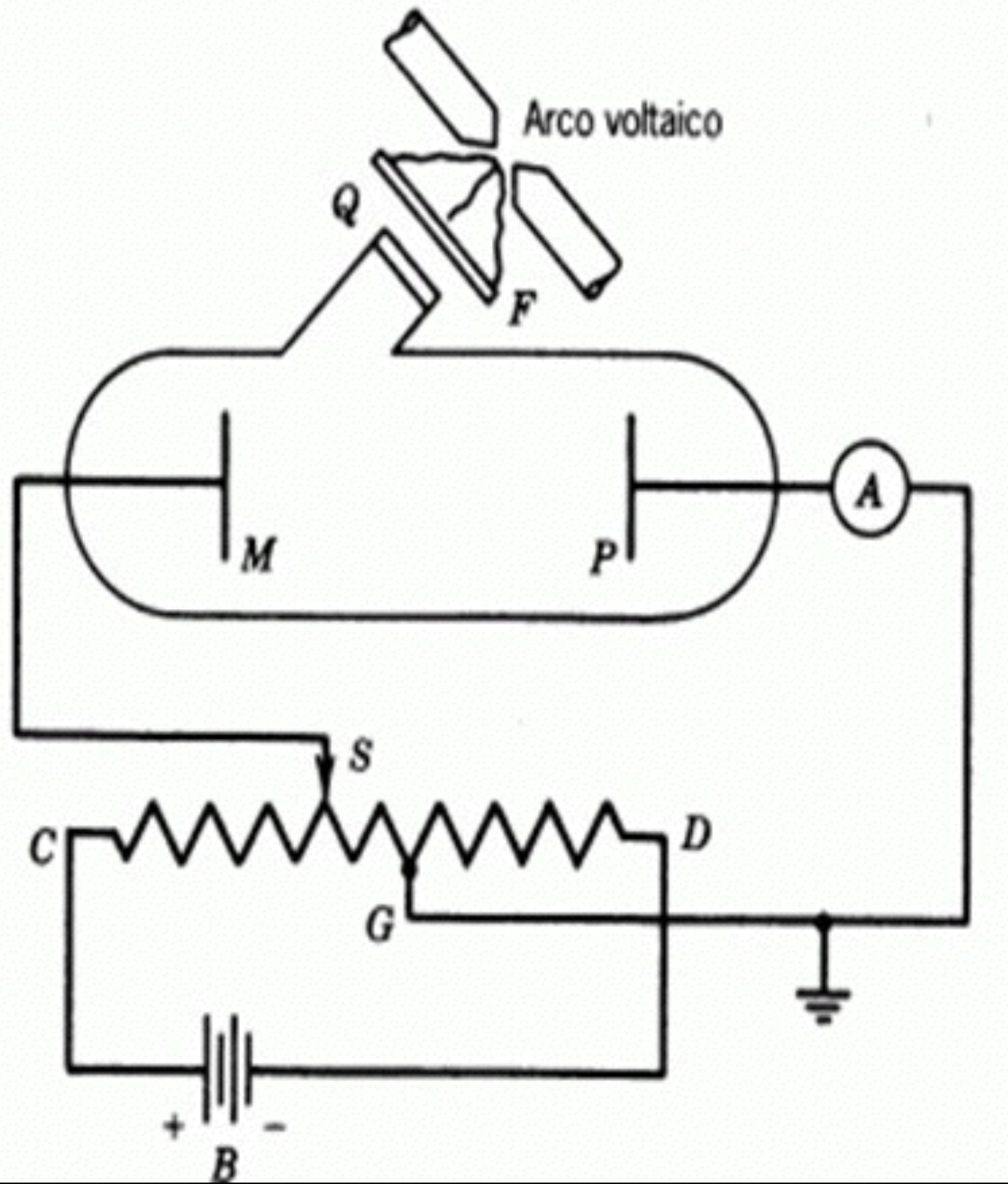
ove  $\nu$  è la frequenza di oscillazione.



# Risoluzione dei problemi



# Fotoelettrico



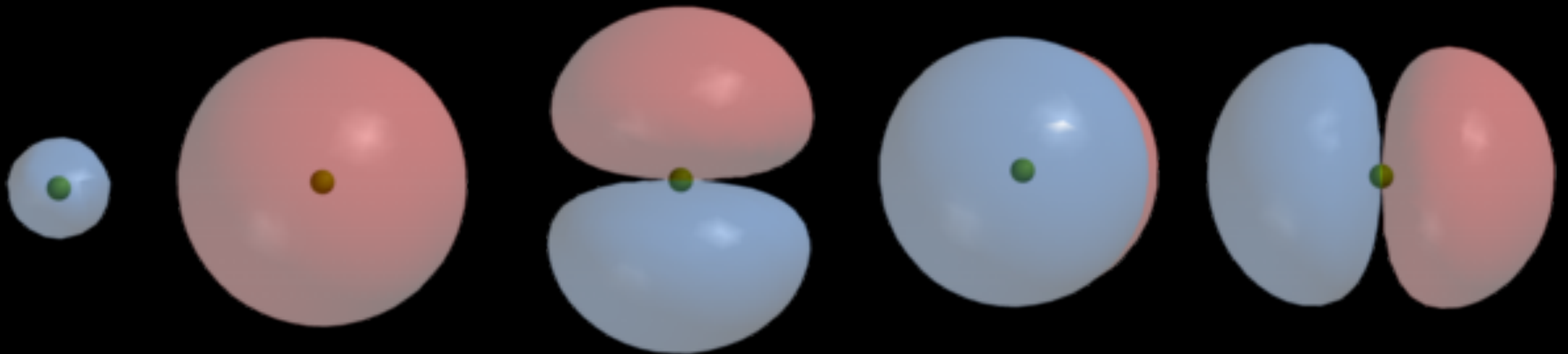
Einstein, nel 1905, pubblica un articolo sull'effetto fotoelettrico in cui riesce a spiegare il motivo per cui non si osserva l'effetto sotto ad una soglia di frequenza incidente. Inserendo la formula di quantizzazione di Planck torna tutto.



# Atomo di Bohr

Nel 1913 Bohr ipotizza che gli elettroni non siano 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.

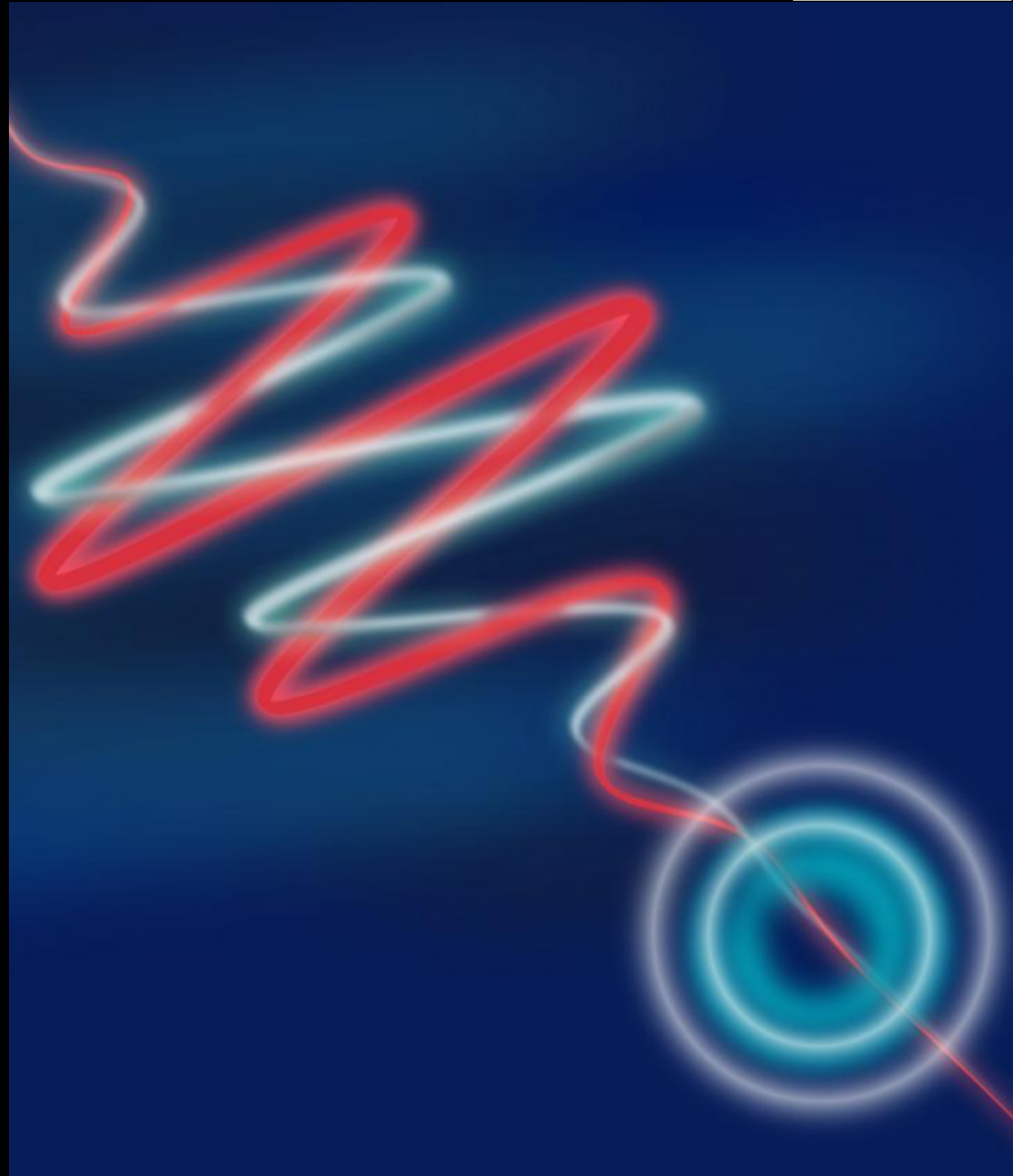




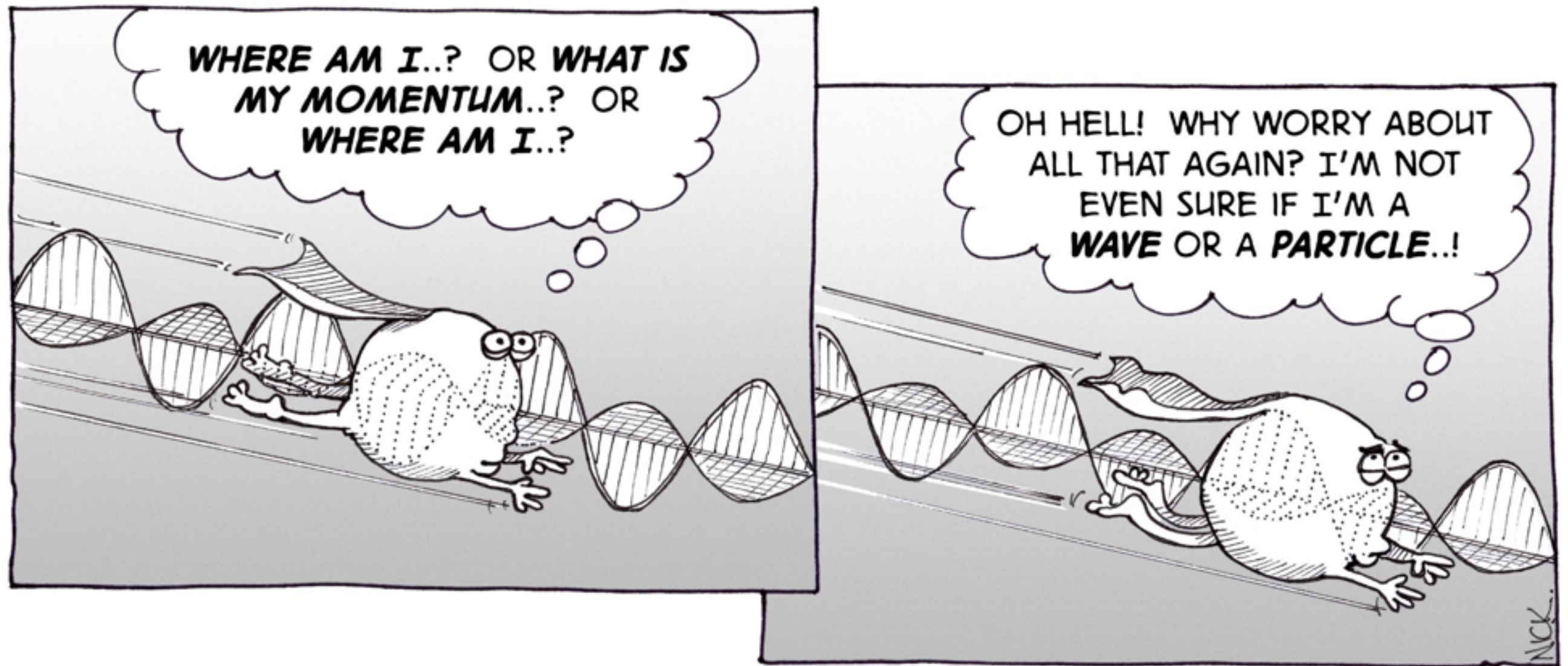
# De Broglie

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

Nel 1924, Louis De Broglie ha un'intuizione che stravolge le idee classiche: ad ogni corpo fisico può essere associata una lunghezza d'onda. Le onde di De Broglie vengono tradizionalmente chiamate "onde di materia".







Photon self-identity issues

Viene introdotto un dualismo tra il concetto di particella e quello di onda che, per la prima volta, non si riferisce solo al caso luminoso (radiazione elettromagnetica/fotone) ma coinvolge anche le particelle dotate di massa.



# Schrödinger

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



Schrödinger prende l'idea di De Broglie e la migliora.  
Si chiede come evolvono le onde di materia nel tempo.  
In tal modo ricava la famosa equazione.



# Equazione di Schrödinger

La soluzione di questa equazione (se non si considerano interazioni esterne) è data da una funzione d'onda, della stessa forma delle onde elettromagnetiche nel vuoto (onde piane).

$$\Psi(x,t) = Ae^{i(kx - \omega t)} = A[\cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)]$$

La soluzione cambia forma se si inseriscono termini ulteriori nell'equazione (i termini con  $V$ ).



# Formulazione Standard

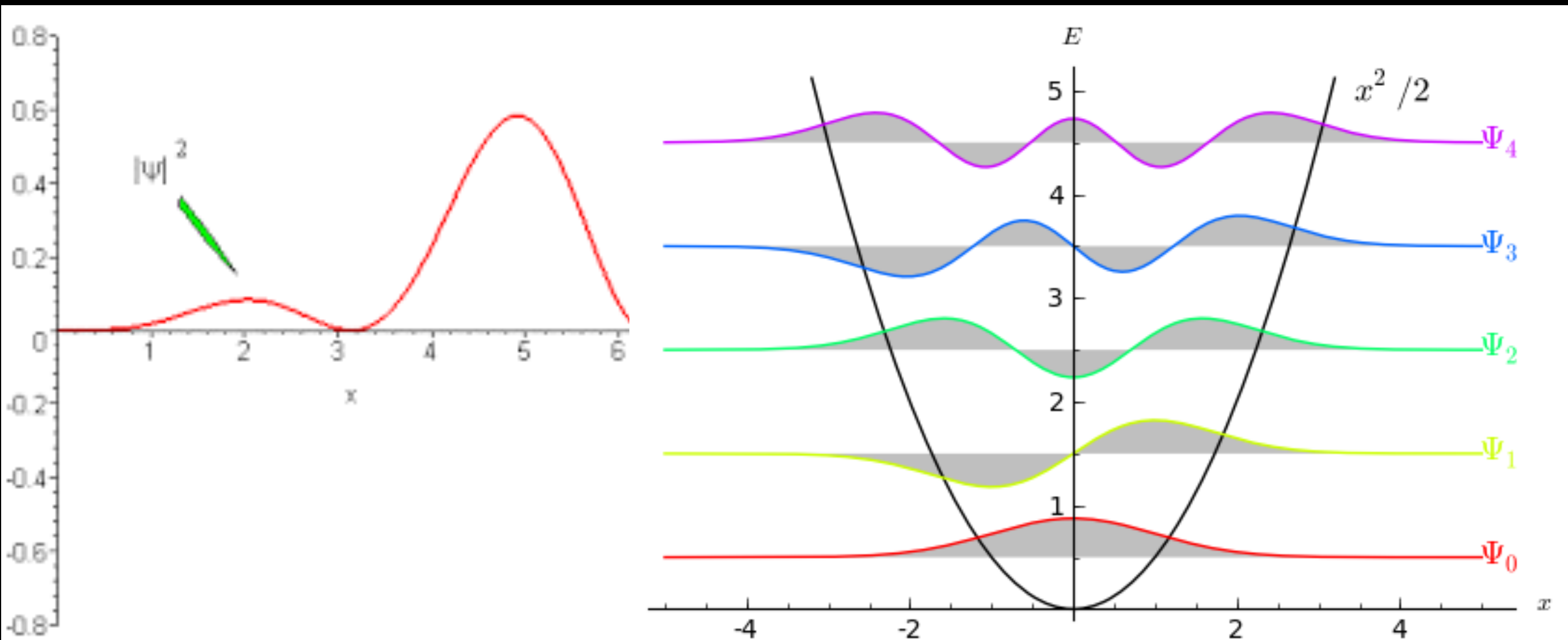
Per distinguere la soluzione dell'equazione di Schrödinger da qualsiasi soluzione di equazioni di onde, è necessario interpretarla opportunamente.

Una delle possibili interpretazioni è data dalla formulazione standard (Copenaghen).

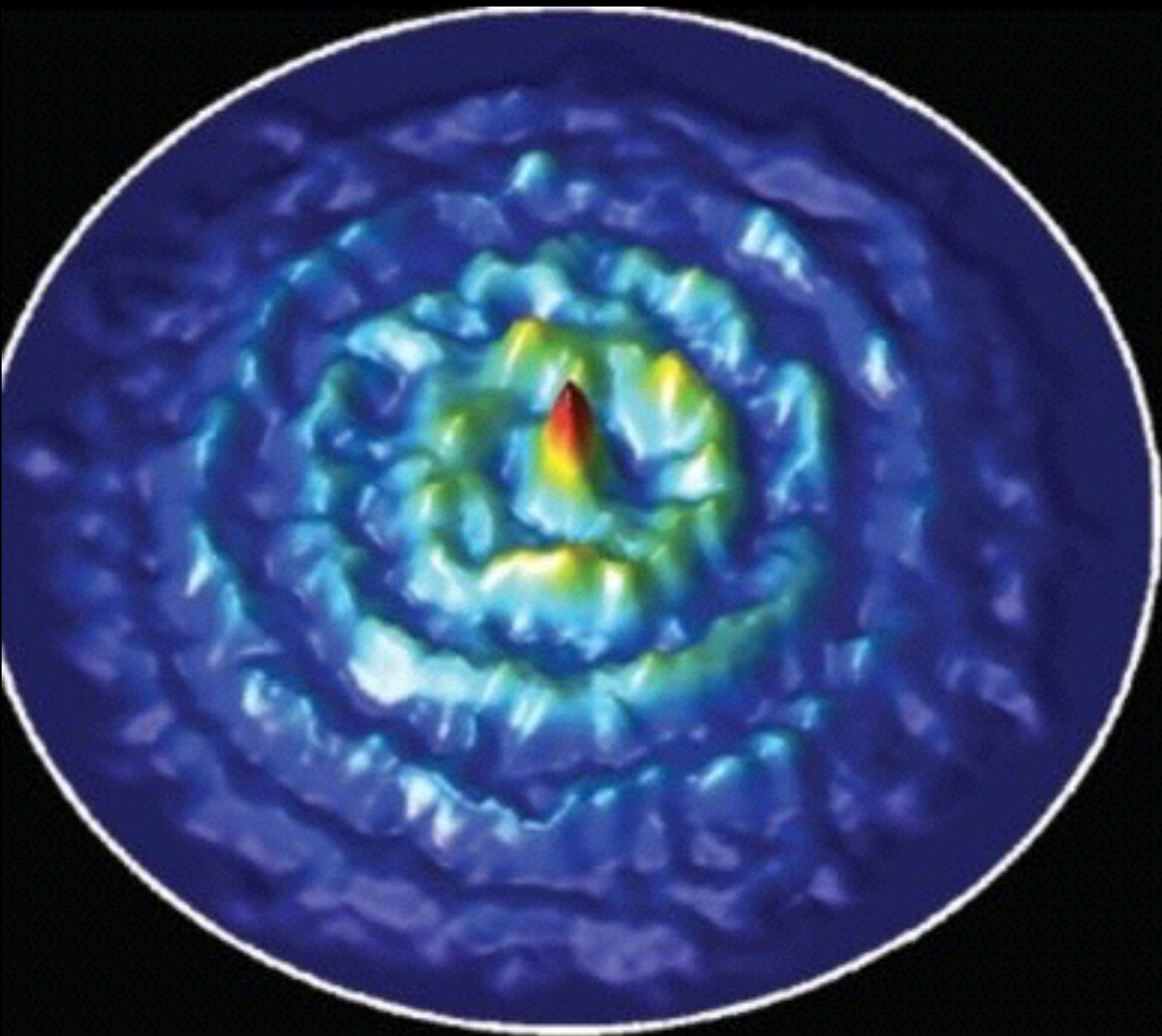


# Formulazione Standard

La funzione d'onda  $\psi$  viene interpretata in senso probabilistico: data una soluzione dell'equazione di Schrödinger, la probabilità di trovare una particella in una determinata posizione è data dalla  $\psi$ .



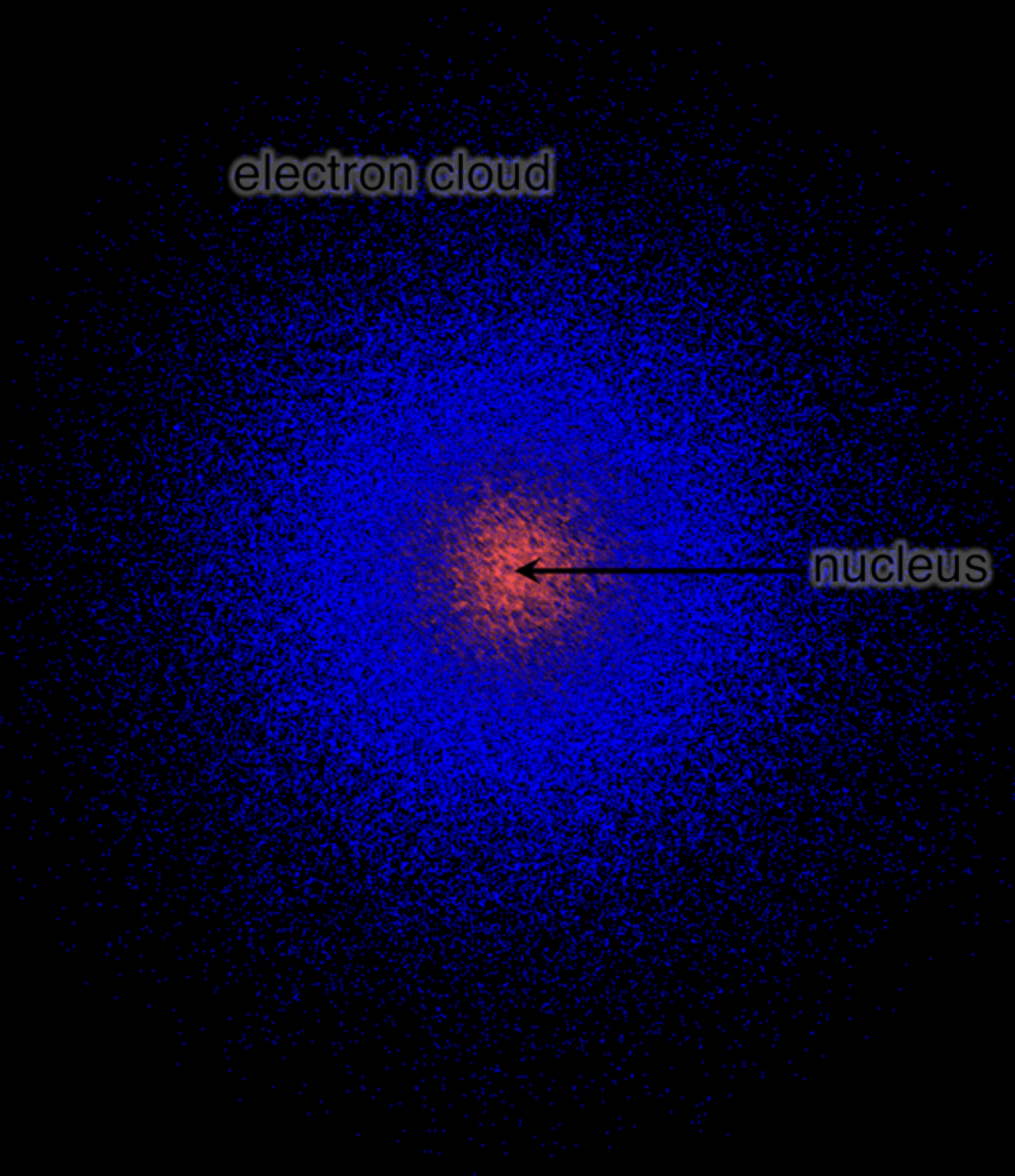




Le “onde di materia”  
che aveva introdotto  
De Broglie  
sono ora interpretate  
come “onde di  
probabilità”, e sono  
associate  
direttamente ai  
sistemi fisici.

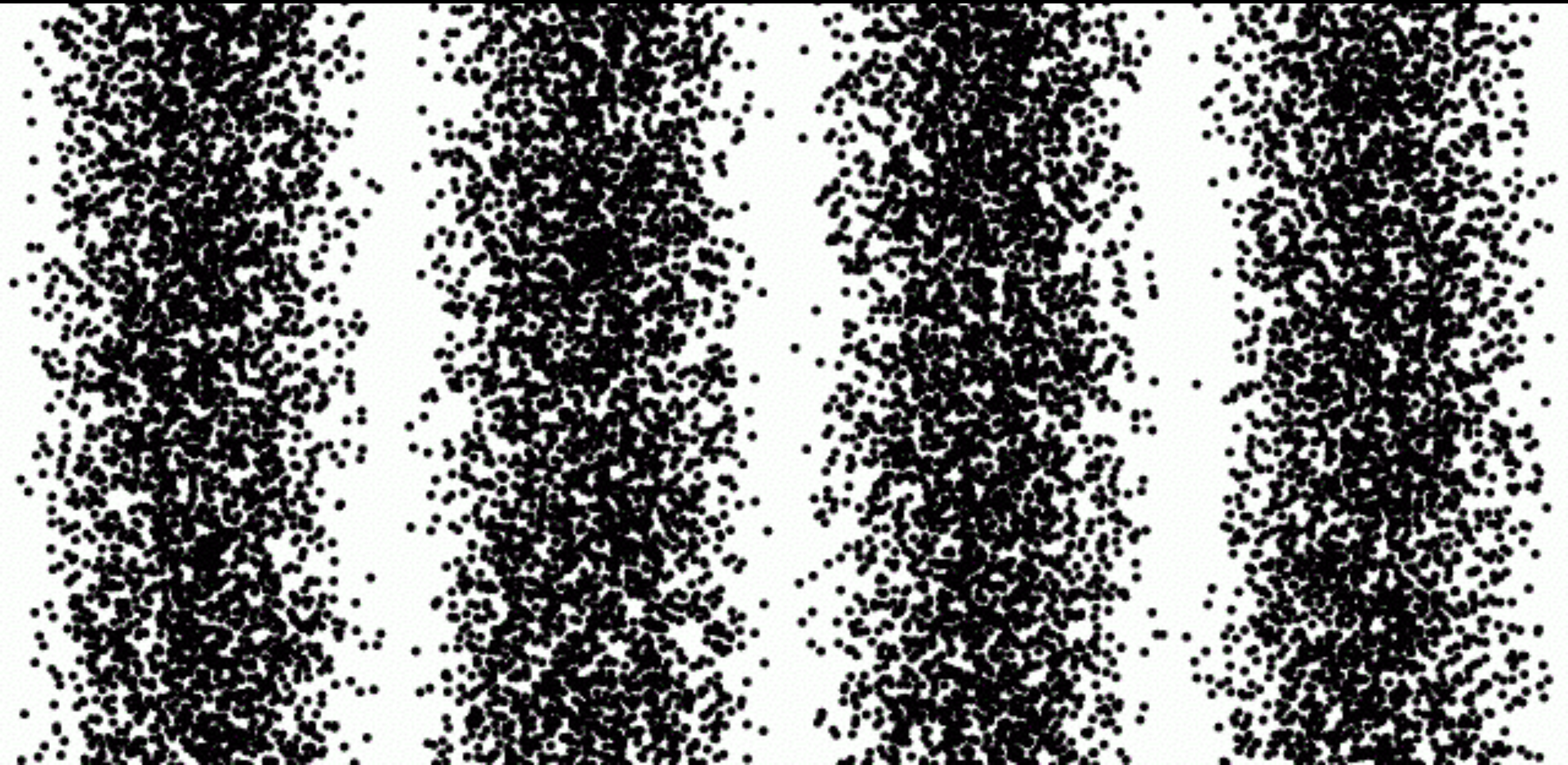


Per esempio,  
considero il primo  
orbitale  
dell'idrogeno (1s).  
Esso è di forma  
sferica: cioè  
l'elettrone vive con  
una certa  
probabilità in una  
sfera di un certo  
raggio attorno al  
nucleo.





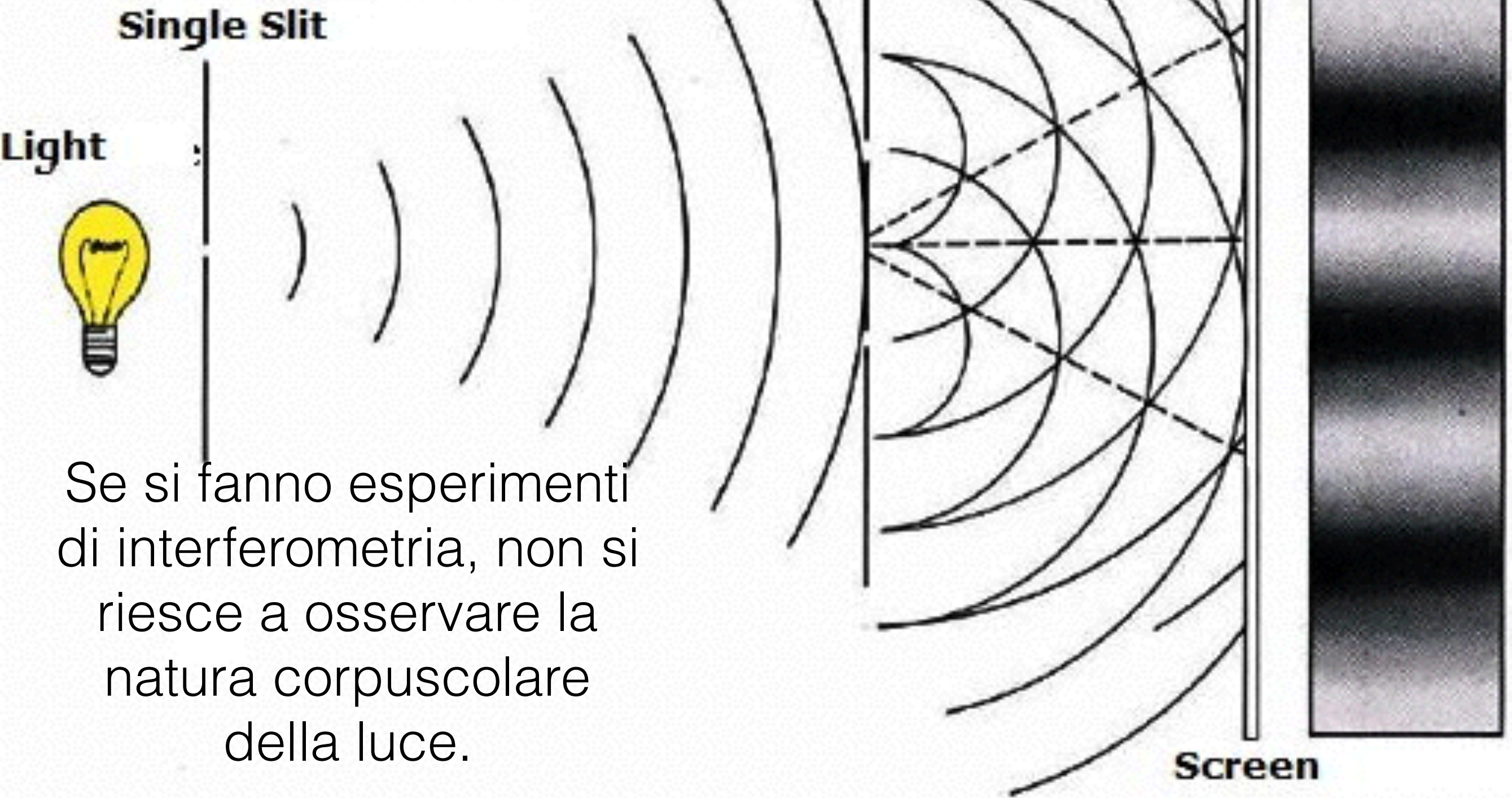
# Complementarità



Il principio di complementarità dice che due diverse nature di un sistema fisico non possono essere rivelate contemporaneamente.



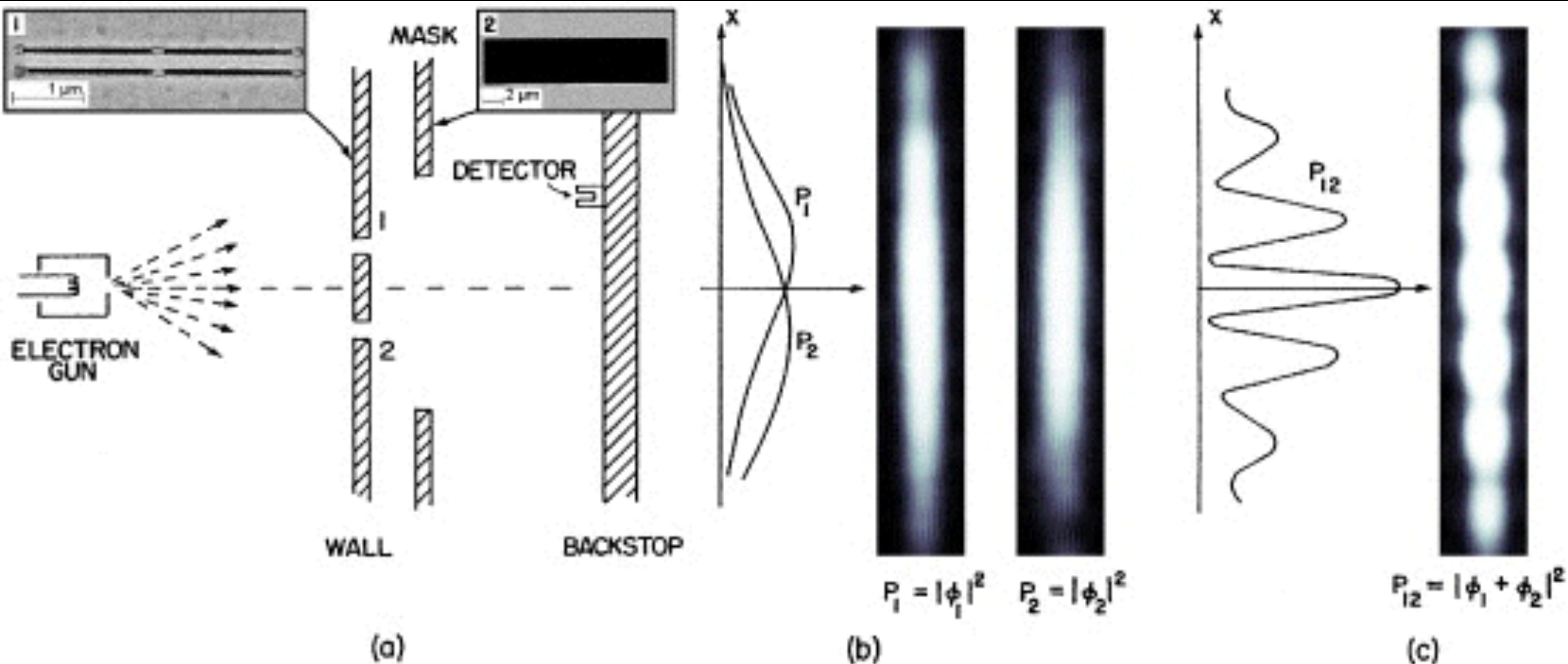
La luce, per esempio,  
ha un duplice  
comportamento: onda  
e corpuscolo.



Se si fanno esperimenti  
di interferometria, non si  
riesce a osservare la  
natura corpuscolare  
della luce.



Se si fanno esperimenti del tipo Tonomura, non si riesce ad osservare il comportamento ondulatorio.





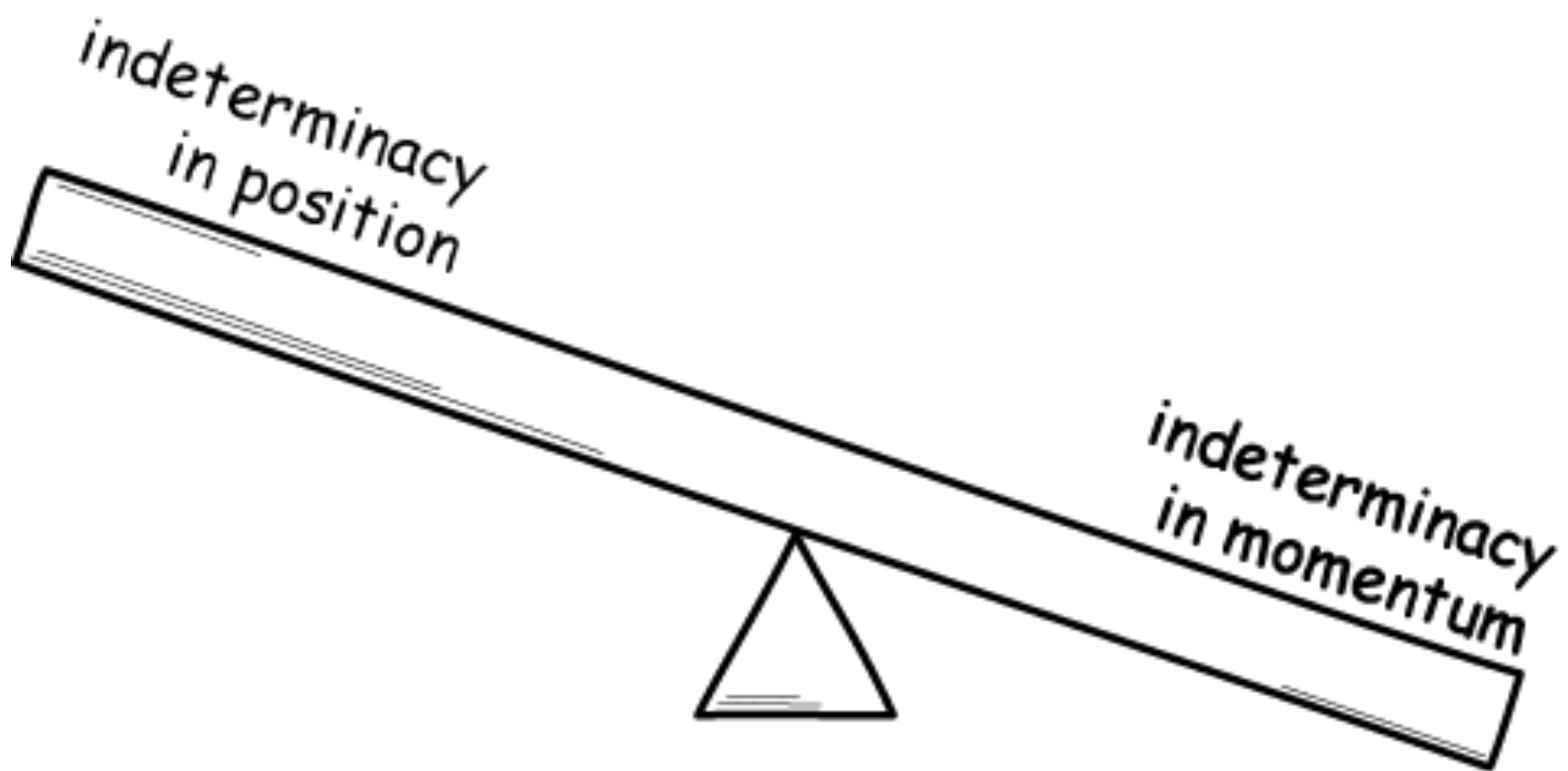
# Principio di Indeterminazione



Il principio di indeterminazione associa coppie di grandezze fisiche, dette “coniugate”. In particolare, dice che il prodotto delle precisioni di misurazione delle due grandezze è limitato.

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





Esempio: posizione e velocità di una particella.

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



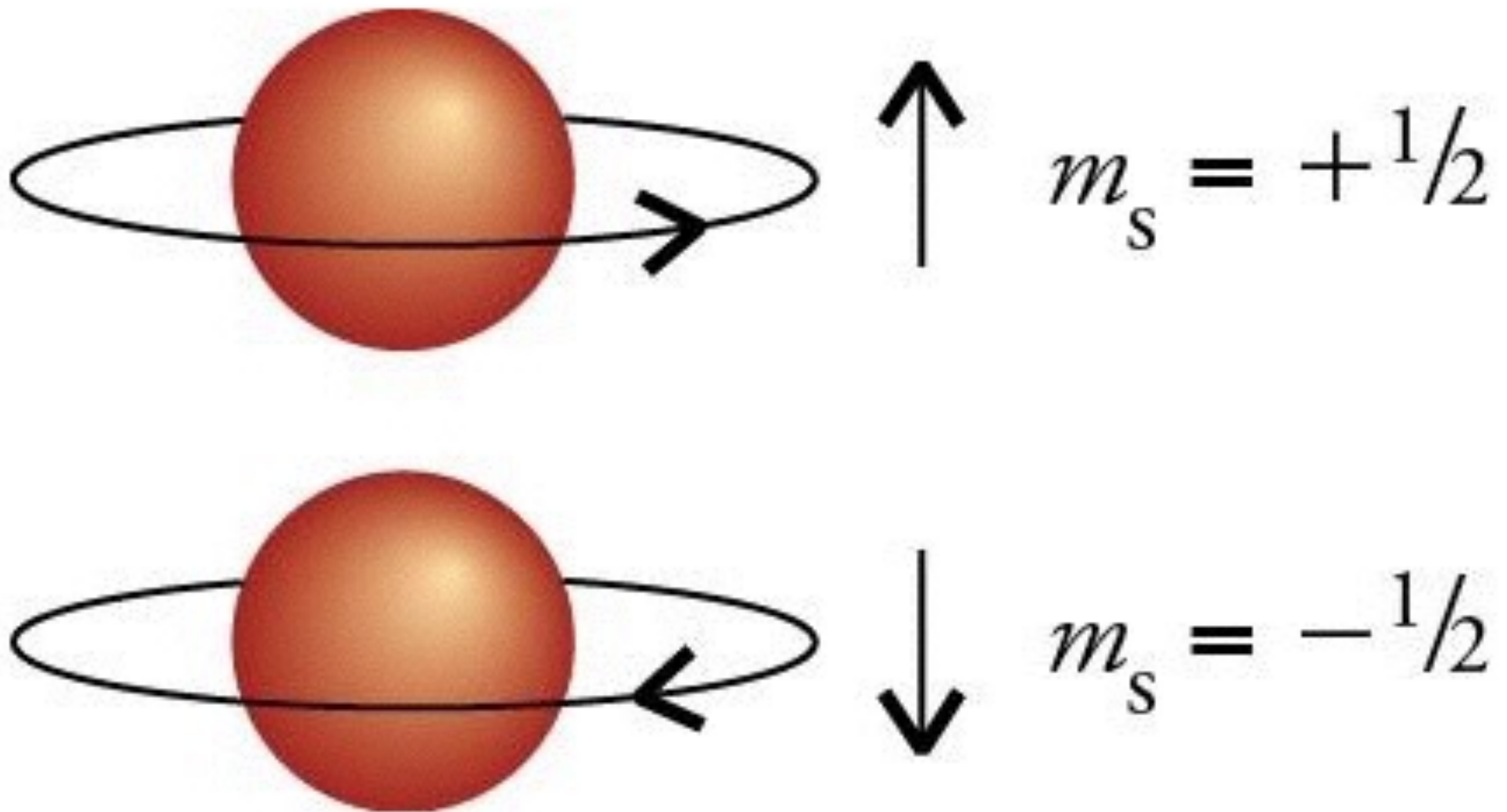
# Spin

Lo spin è una grandezza fisica (come posizione e velocità) inventata apposta per la Meccanica Quantistica. Nella fisica classica precedente non esisteva nulla di simile.





Cos'è? Consideriamo una particella come una pallina. Lo spin della particella è un tipo di momento angolare. Cioè una particella con un certo spin si comporta come se “ruotasse” attorno ad un certo asse fisso.





Se nella fisica classica una pallina che ruota è dotata di un certo momento angolare perché è dotata di massa, nel caso dello spin esistono particelle che non hanno massa (come i fotoni) ma che sono dotate di spin (vale 1).





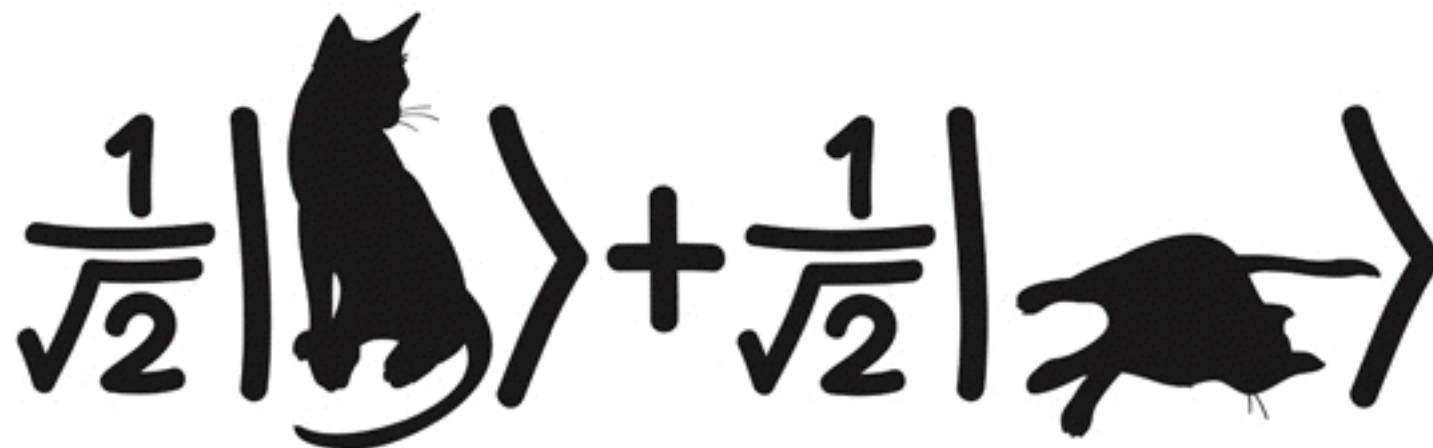
# Sistemi fisici

Viene detto sistema fisico quantistico una porzione dell'universo che può essere studiata tramite equazioni del tipo di Schrödinger



# Stati

In fisica, lo stato fisico di un sistema è un termine matematico descritto dalle equazioni che governano il movimento del sistema (in MQ l'equazione è quella di Schrödinger).

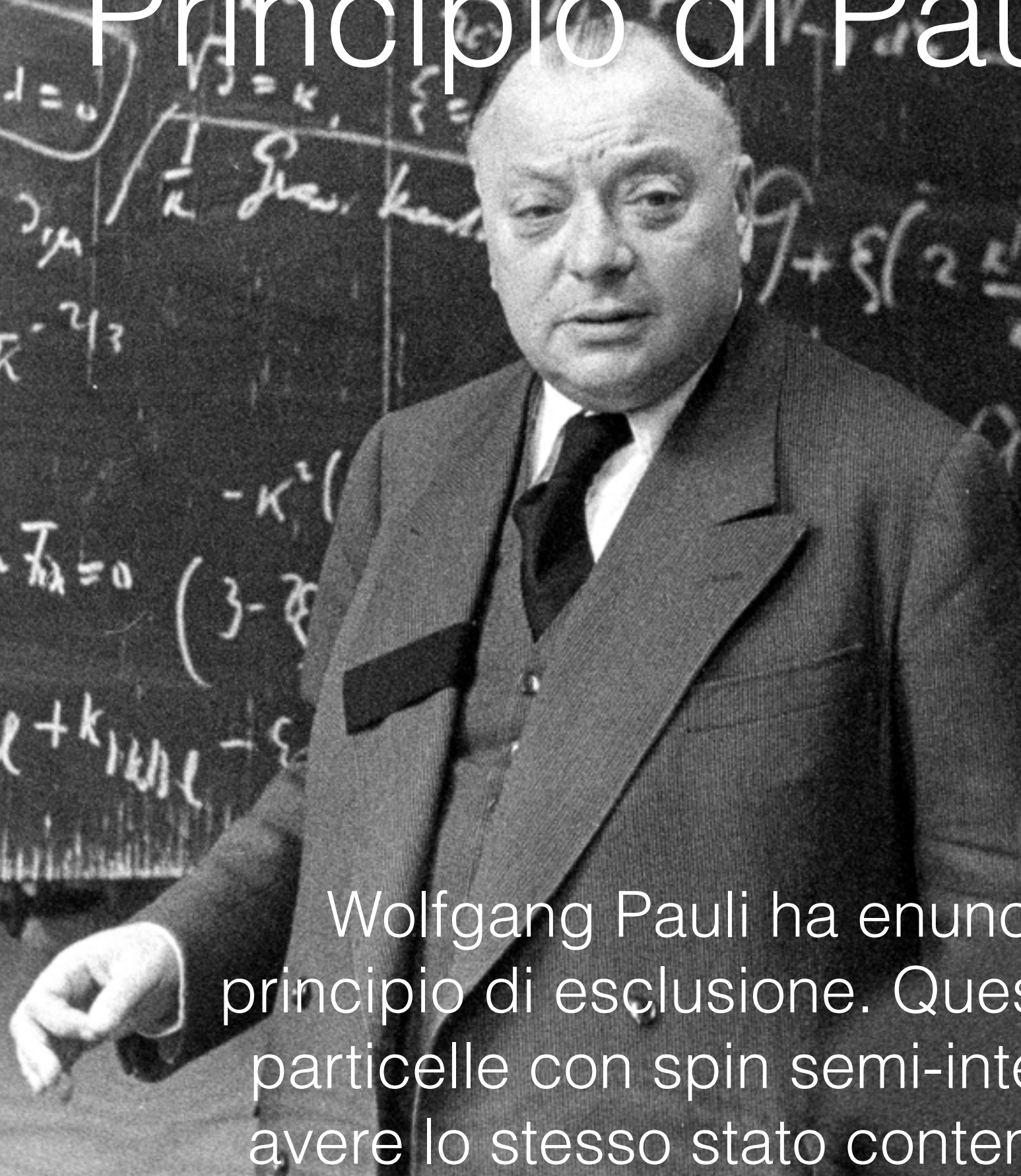


A diagram illustrating the concept of quantum superposition using the famous Schrödinger's cat thought experiment. It features a white rectangular box containing a black equation. The equation is  $\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat sitting}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat lying down}\rangle$ . The text "cat sitting" is replaced by a silhouette of a cat sitting upright, and "cat lying down" is replaced by a silhouette of a cat lying on its side. The entire expression is rendered in a stylized, hand-drawn font.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat sitting}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat lying down}\rangle$$



# Principio di Pauli



Wolfgang Pauli ha enunciato il famoso principio di esclusione. Questo dice che delle particelle con spin semi-intero non possono avere lo stesso stato contemporaneamente.

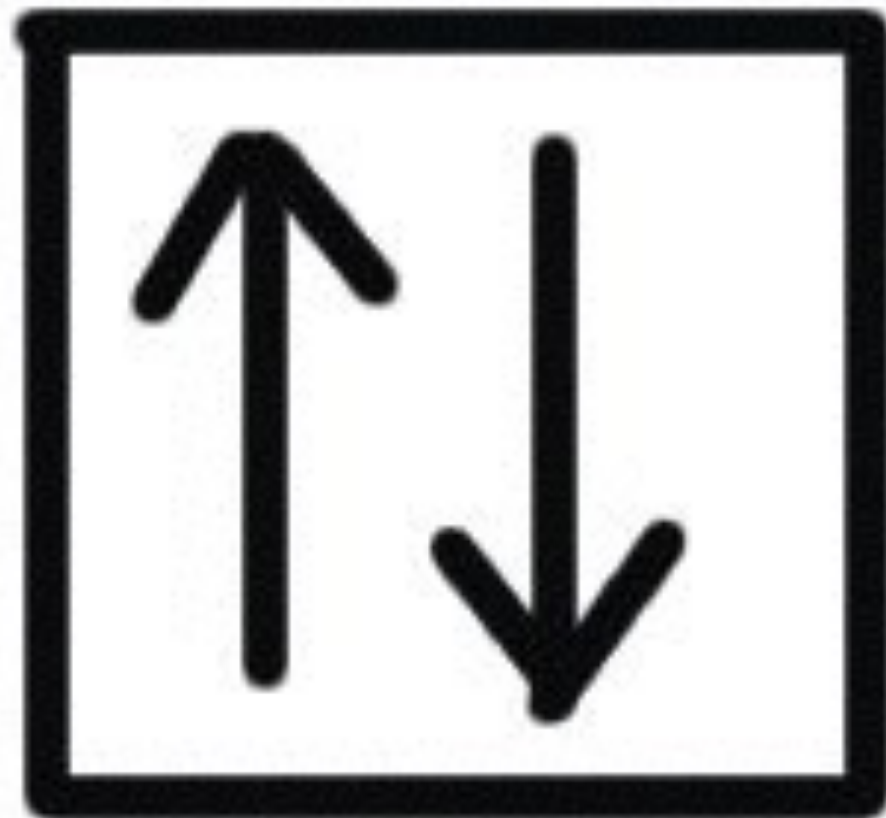


# Esempio He

## 1s Orbital



**H**



**He**

Nel caso dell'elio, ci sono due elettroni che vivono attorno al nucleo. I due elettroni non possono avere lo stesso valore di spin contemporaneamente, per il principio di Pauli.



# Entanglement

L'entanglement (intreccio) è un fenomeno fisico esclusivamente quantistico. Non esisteva in fisica classica.



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



# Esempio

La magia delle monete che “comunicano”



# Moneta 1





# Moneta 2



Dopo l'estrazione della prima moneta, riesco a prevedere  
l'estrazione della seconda senza errore.

Esistono motivazioni profonde e molto complesse di questo  
comportamento.





# Sovrapposizione



Esistono stati composti dati dalla sovrapposizione di due stati semplici.

Natasha Hanacek/NIST

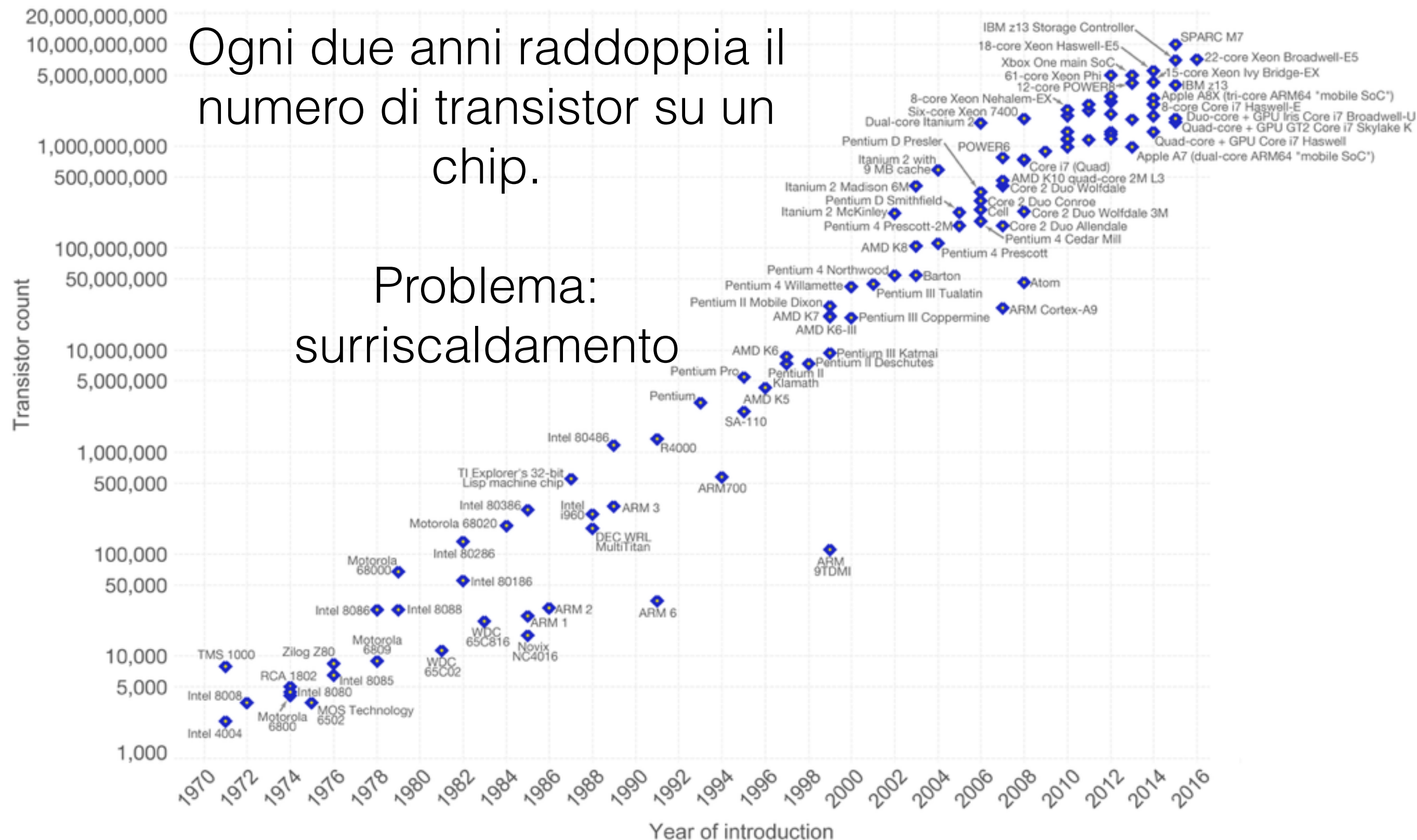
Se si considera la posizione di una particella, la sovrapposizione significa che la particella è nella posizione 1 con una certa probabilità oppure è nella posizione 2 con una certa altra probabilità (e così via...)



# Legge di Moore

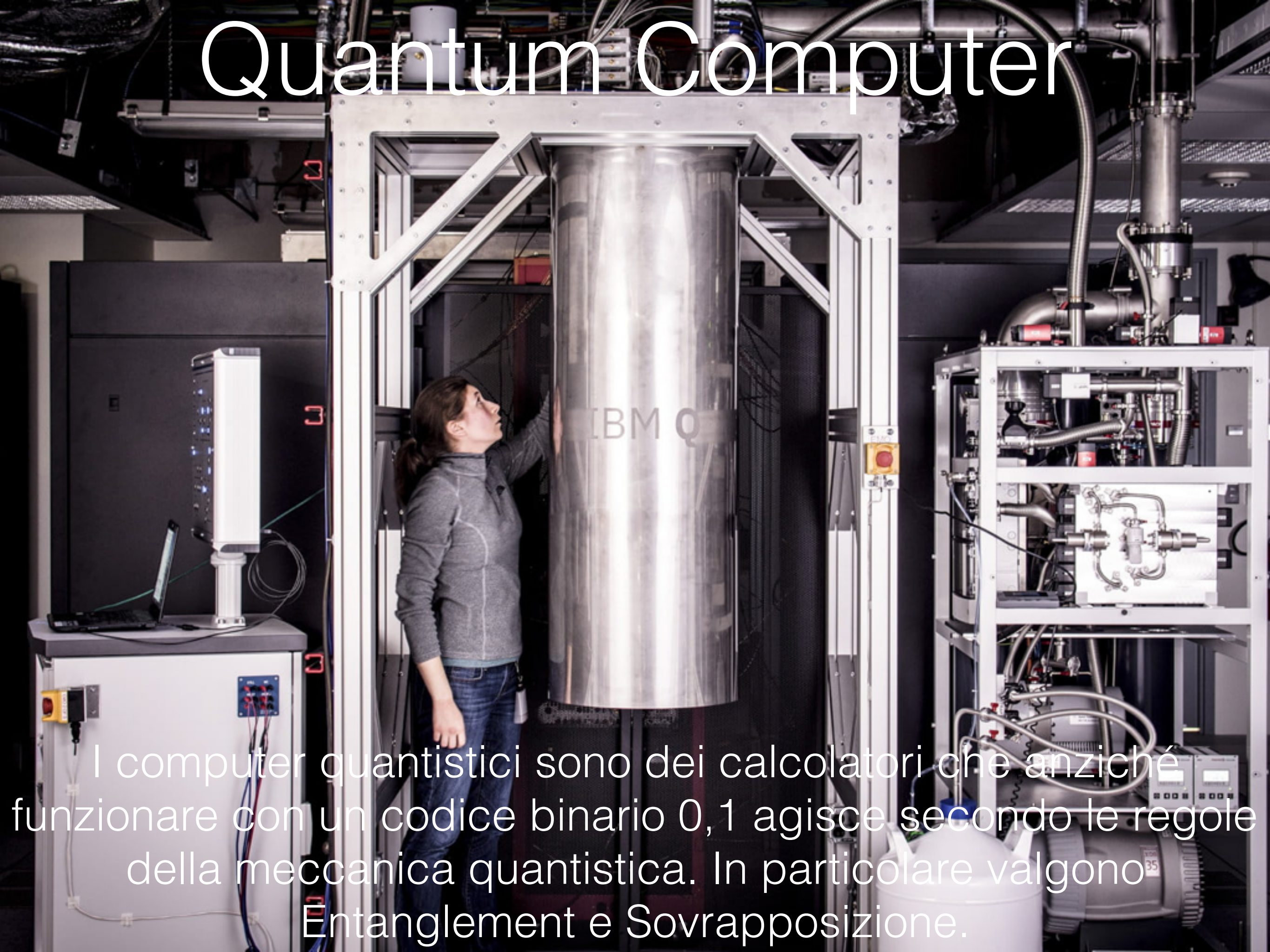
Ogni due anni raddoppia il numero di transistor su un chip.

Problema:  
surriscaldamento





# Quantum Computer

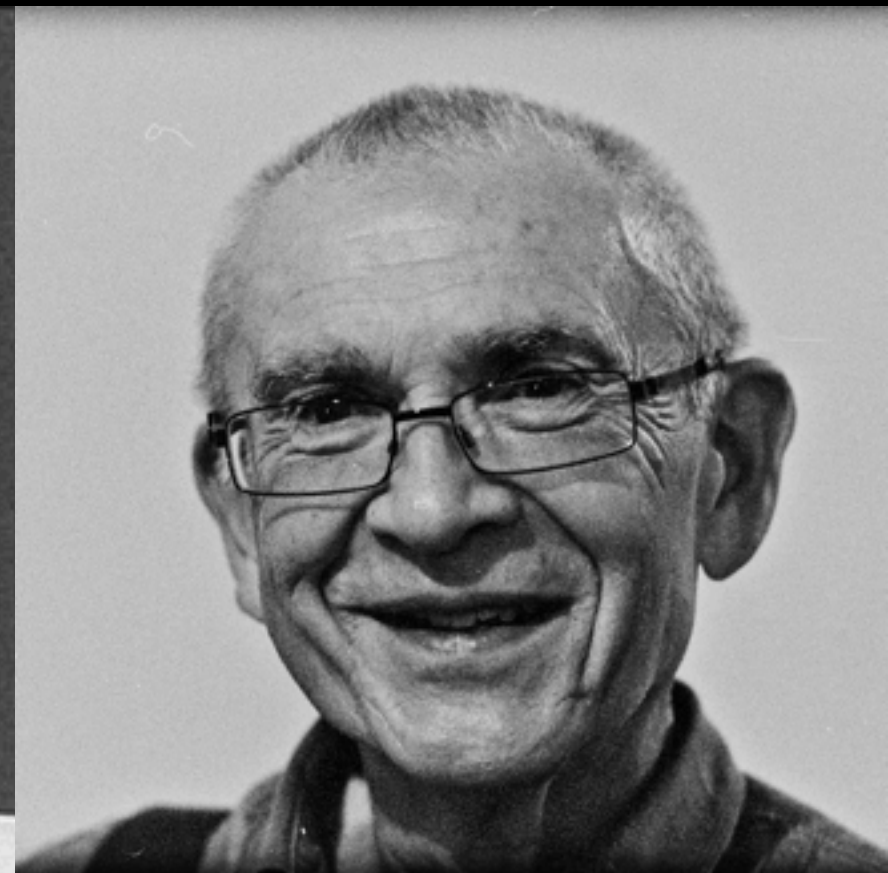


I computer quantistici sono dei calcolatori che anziché funzionare con un codice binario 0,1 agisce secondo le regole della meccanica quantistica. In particolare valgono Entanglement e Sovrapposizione.



# Storia

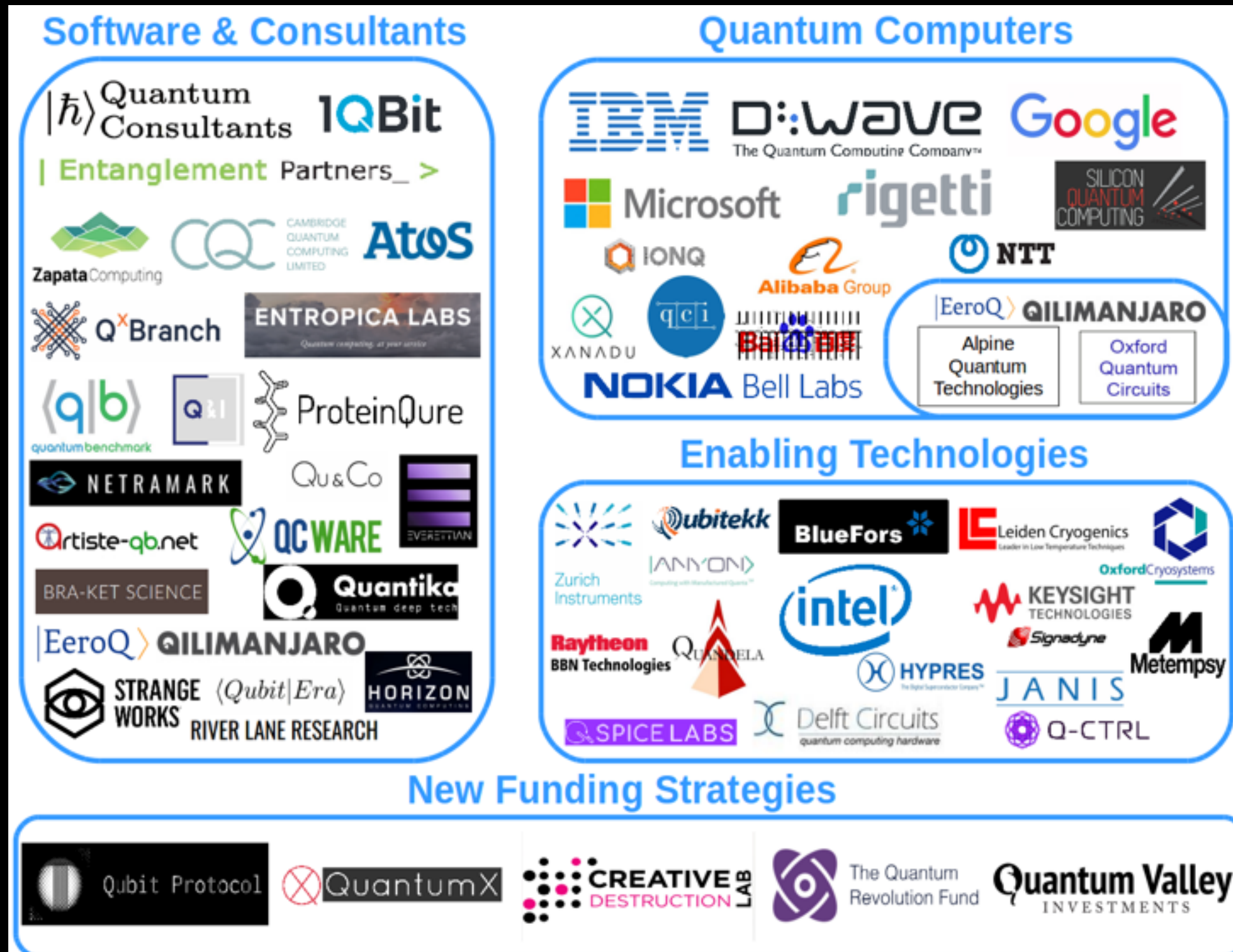
Negli anni '80 degli ingegneri e dei fisici tra gli USA (Benioff, Feynman) e la Russia (Manin) hanno avuto l'intuizione di sfruttare le regole della MQ per la computazione.





Dagli anni '90 e soprattutto dopo il 2000 le grandi aziende di consulenza si sono mosse per sviluppare questa tecnologia.

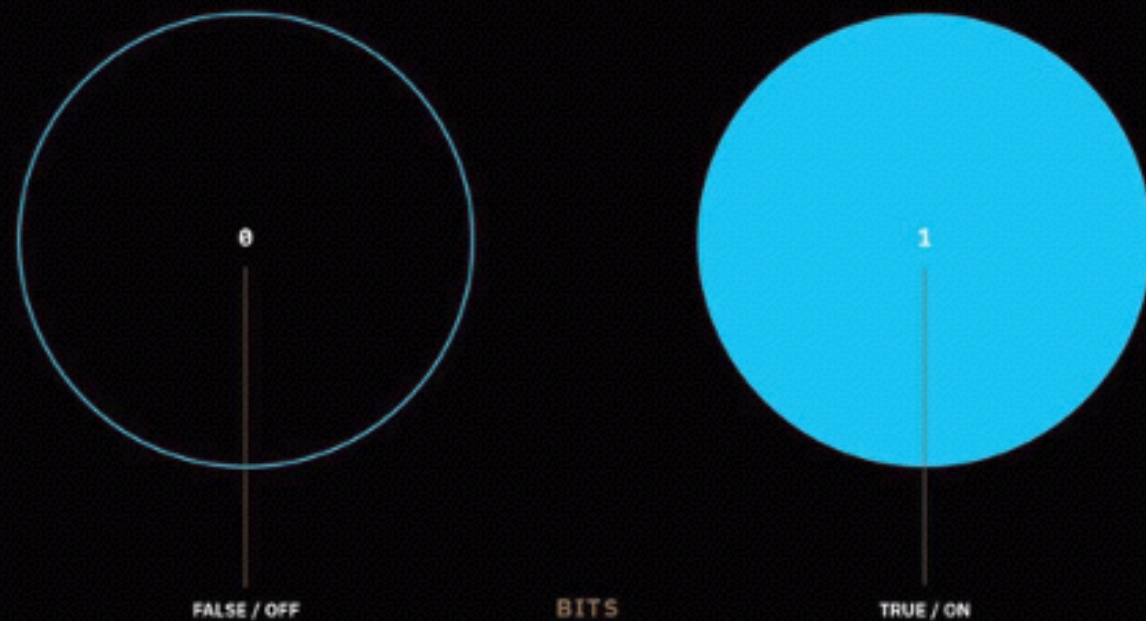
Tra i più grandi gruppi ci sono IBM, Google, Intel, Microsoft, hp ed altri...



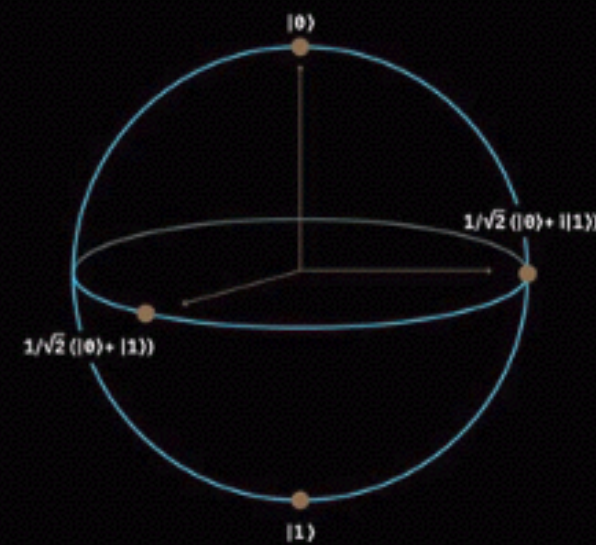
L'idea generale è di estendere il concetto di bit ai “qubit”.  
Facendo ciò si ricava una potenza di calcolo esponenzialmente maggiore rispetto ai computer classici (“2 alla N” se ho N qubit)

## Why is quantum different?

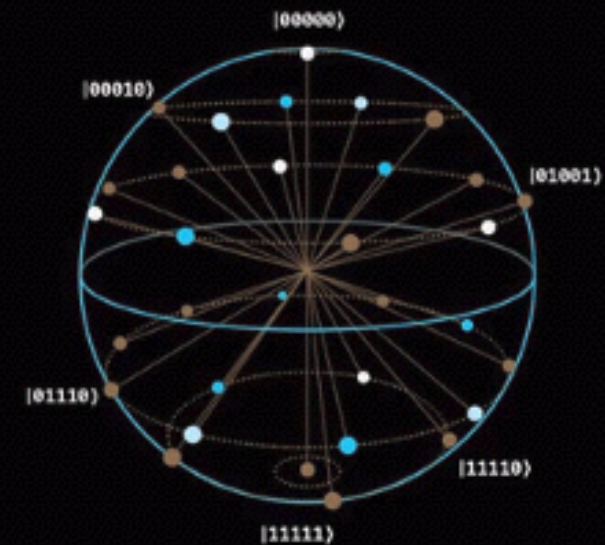
### 1. Superposition



Classical states

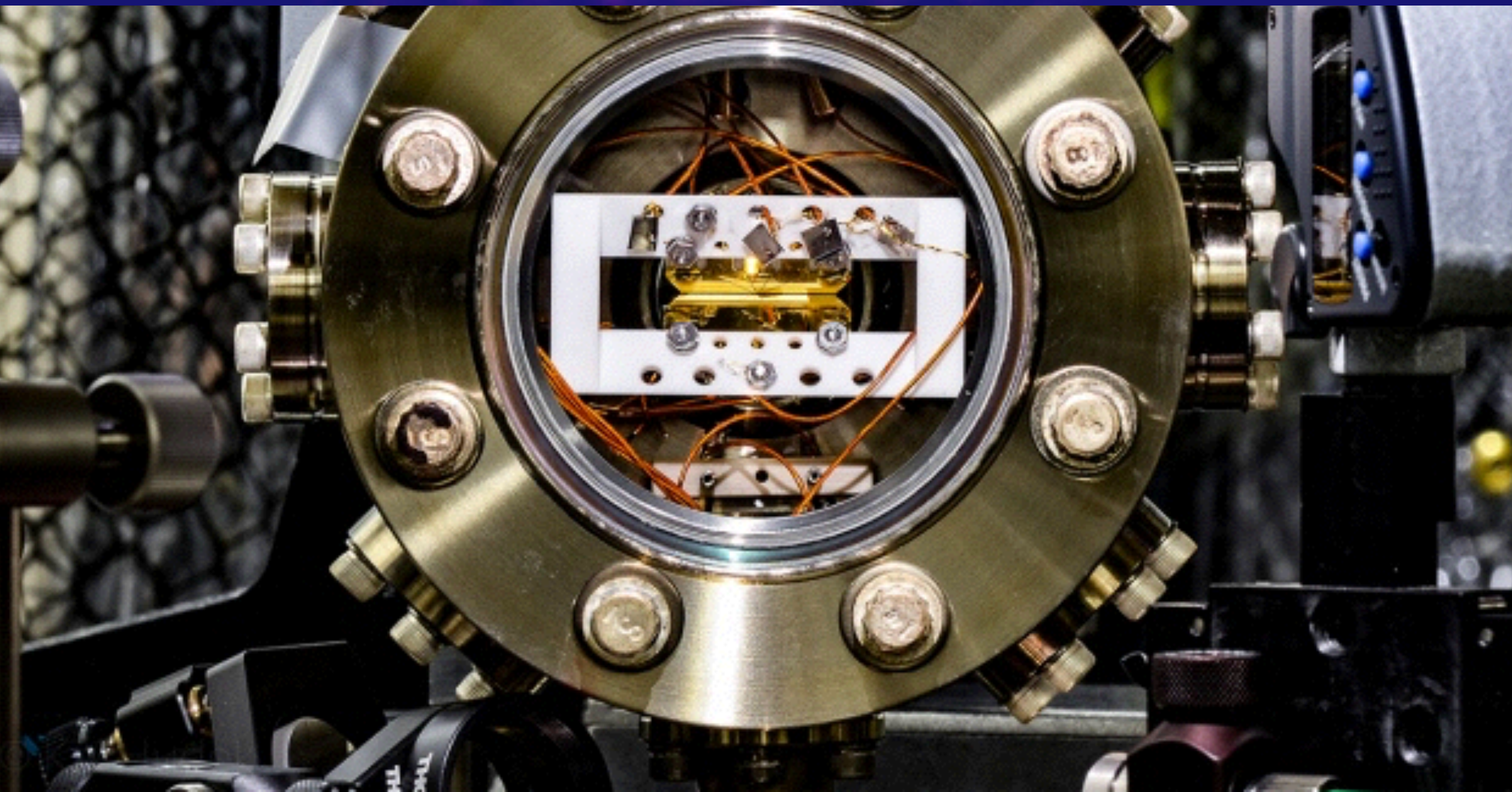
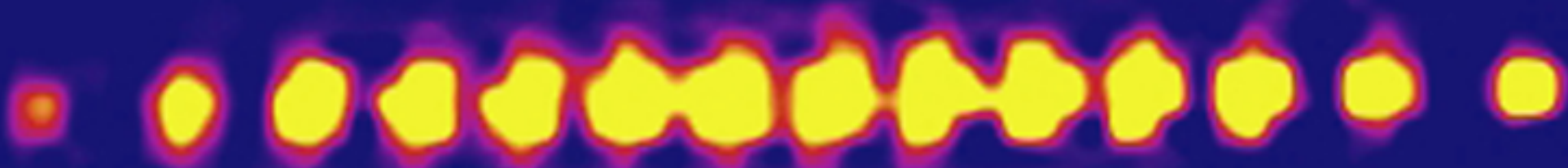


Quantum states



N qubits  
 $2^N$  paths





Generalmente si sfruttano ioni, oppure atomi localizzati e messi in entanglement per avere un certo numero di qubit. C'è ancora da lavorare... Ci sono ancora problemi di rumore.



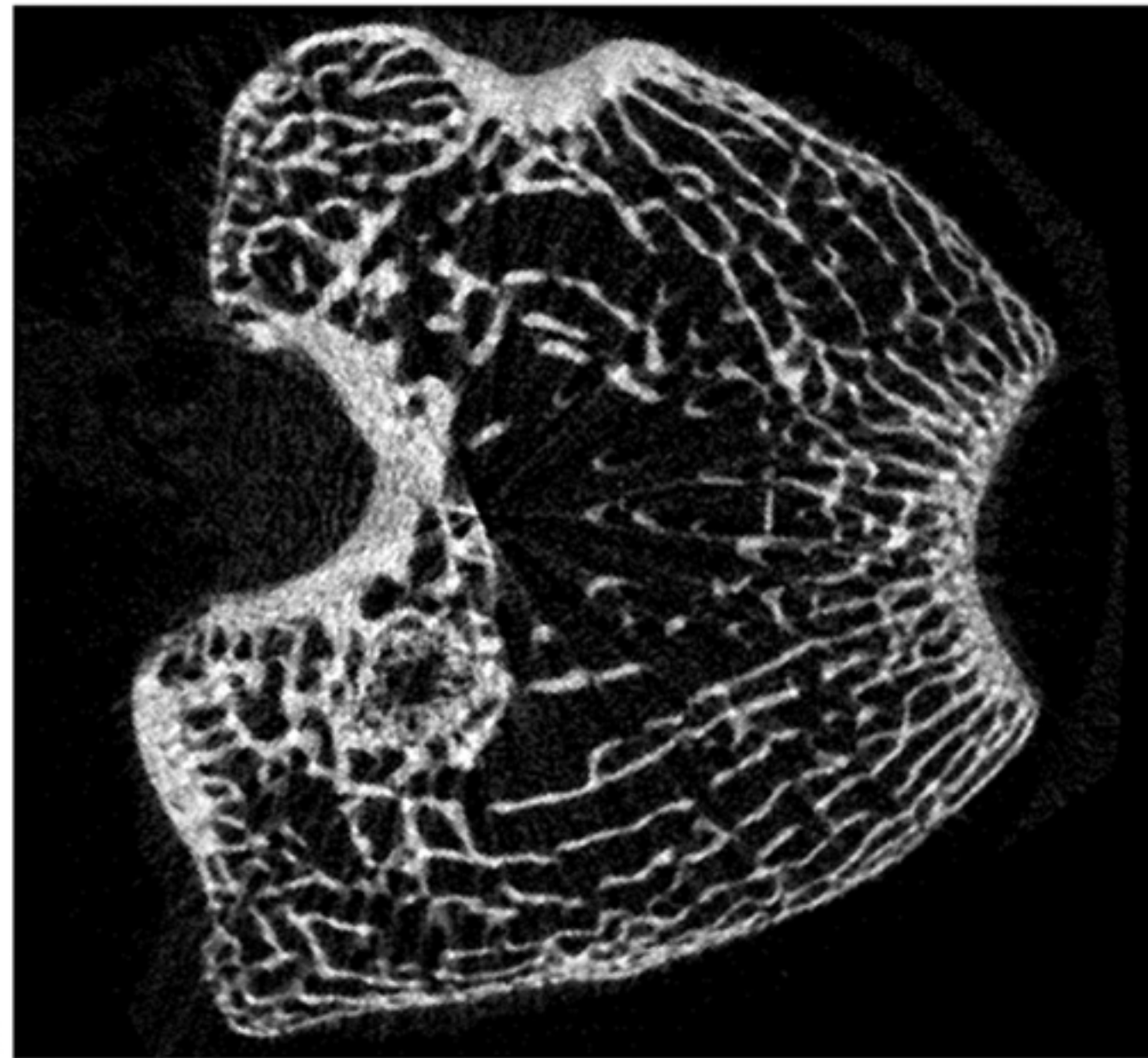
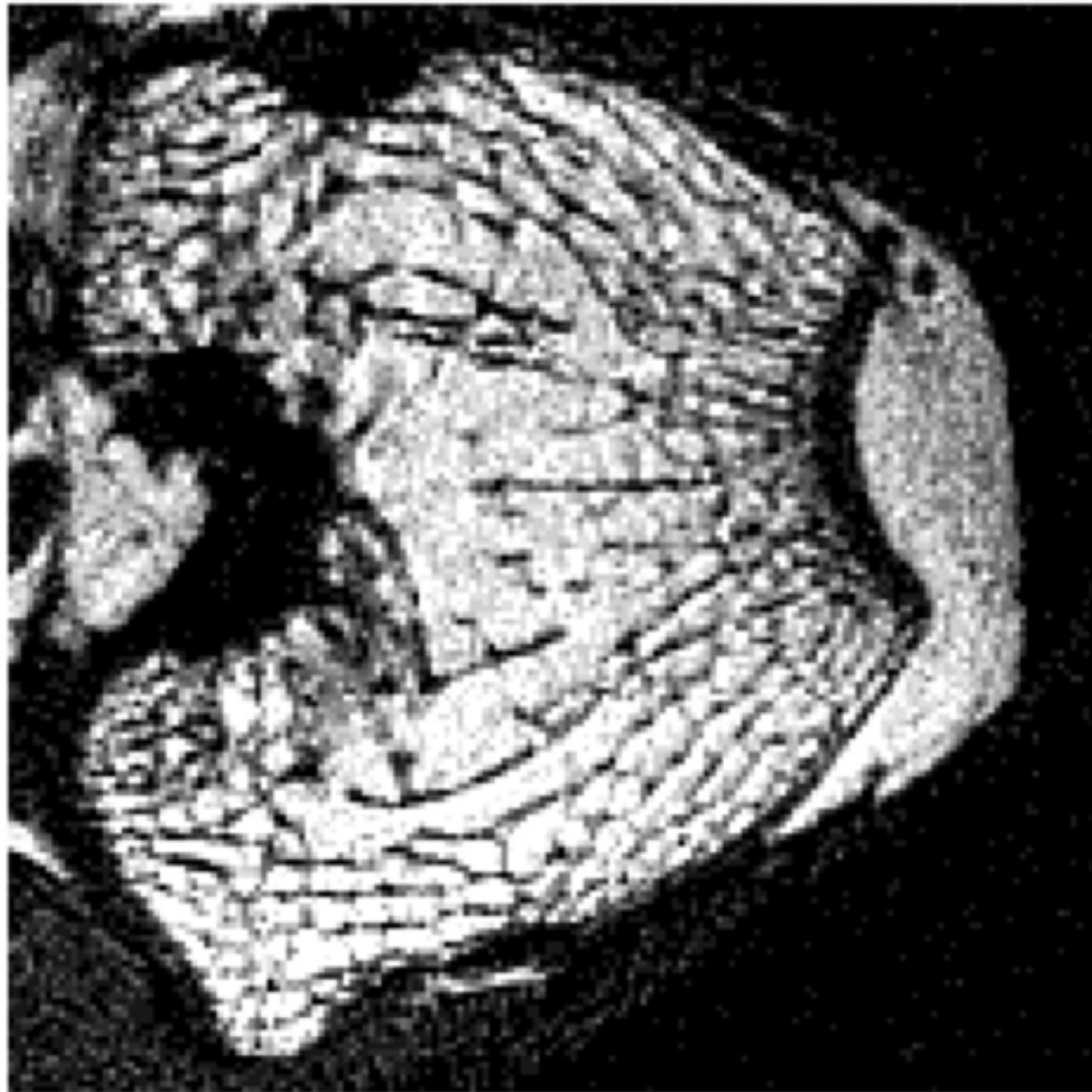
# Applicazioni pratiche

- Microelettronica
- LASER

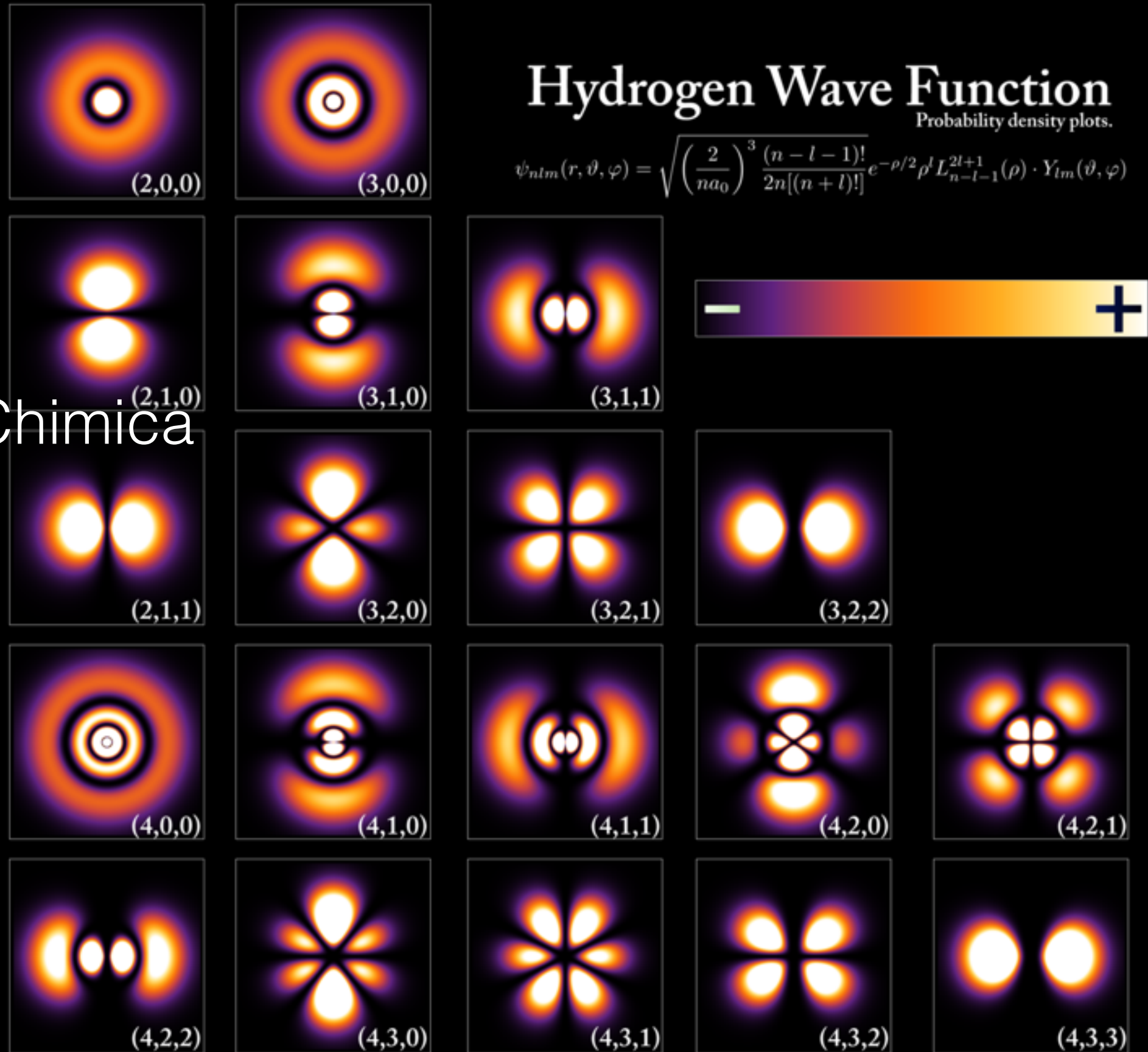


# Applicazioni pratiche

- Tecniche diagnostiche (RMN)
- Microscopia



# Applicazioni pratiche



- Chimica



# Applicazioni pratiche

- Crittografia (quantistica, in futuro...)





# Grazie





# Bibliografia Essenziale

- L. Susskind, A. Friedmann, *Il minimo teorico*
- M. Kumar, *Quantum*
- K. Ford, *Il mondo dei quanti*
- D. J. Griffiths, *Introduction to quantum mechanics*