

# *Elementi di Meccanica Quantistica*

---



**Art & Science**  
across Italy

13 Febbraio 2025

Prof. Marco Pallavicini

Università di Genova e INFN





## Perché “Meccanica” e perché “Quantistica” ?

- La “**Meccanica**” (in fisica) è la scienza del MOTO
  - Posizione, velocità, accelerazione, forza, massa e energia cinetica sono esempi di quantità utili a descrivere il moto dei corpi
- “**Quantistica**” è un neologismo (o meglio, lo era 100 anni fa....)
  - Non per nulla, la definizione da vocabolario è tautologica perché rimanda al “**quanto**”, un altro neologismo.

### quantistico

Enciclopedia on line

Crea un ebook con questa voce | Scaricalo ora (0)

Condividi   

quantistico In fisica e chimica, si dice di ciò che concerne la teoria dei quanti (→ [meccanica](#)).

*Il “Quanto” è un concetto NUOVO, profondamente contro-intuitivo, l’entità fondante del mondo microscopico, che ha caratteristiche e comportamenti affatto diversi (e a volte sconcertanti) rispetto alla nostra intuizione quotidiana.*

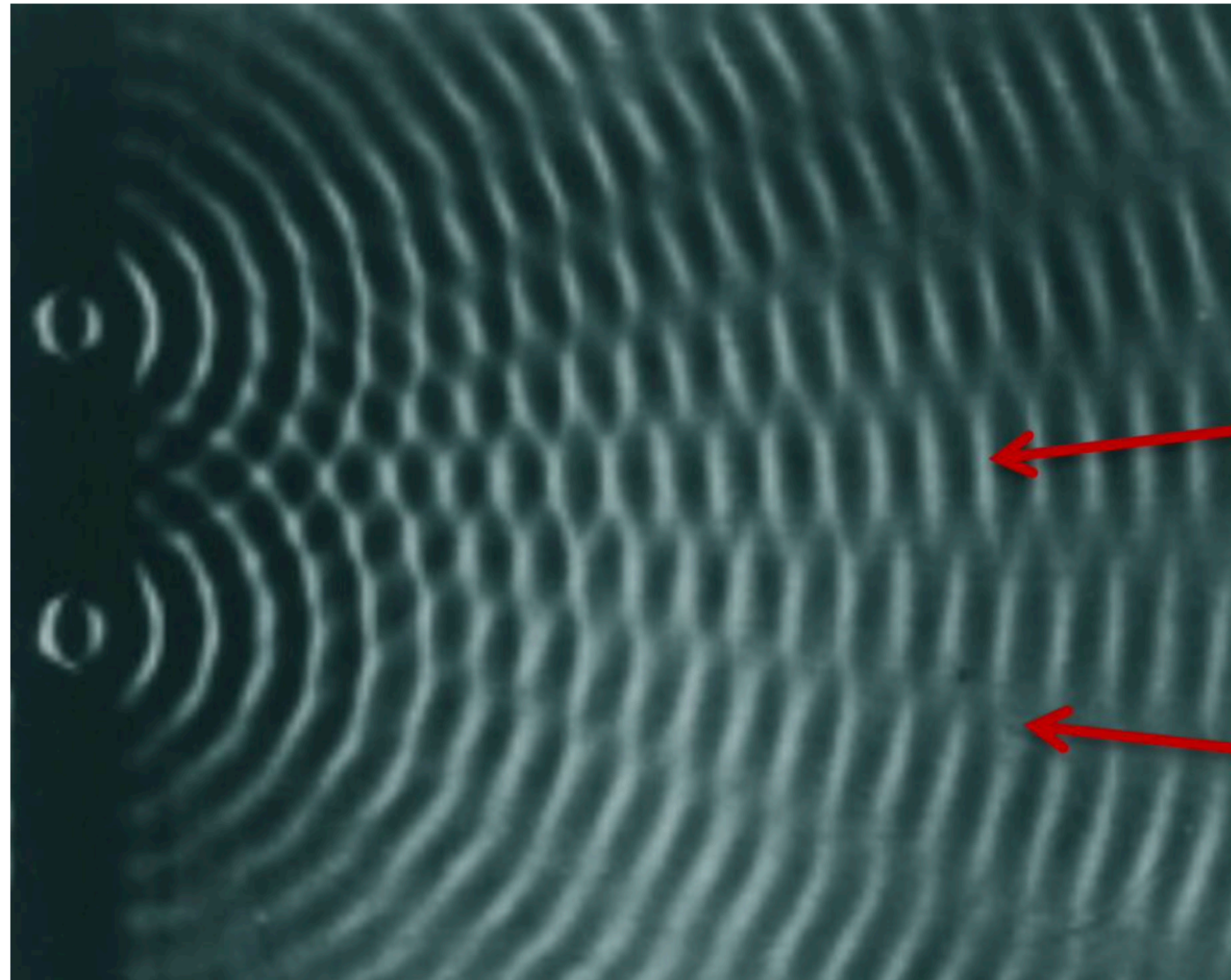
- Principio d'inerzia (Galileo), leggi della dinamica, la gravitazione universale (Newton)
  - I corpi seguono traiettorie determinate e calcolabili (se non sono troppi!)

Animation of Dawn's path  
through the solar system



## Onde continue: diffrazione e interferenza

- Distinguono le onde continue dai corpi dotati di massa



Interferenza costruttiva  
(le onde si sommano)

Interferenza distruttiva  
(le onde si sottraggono)



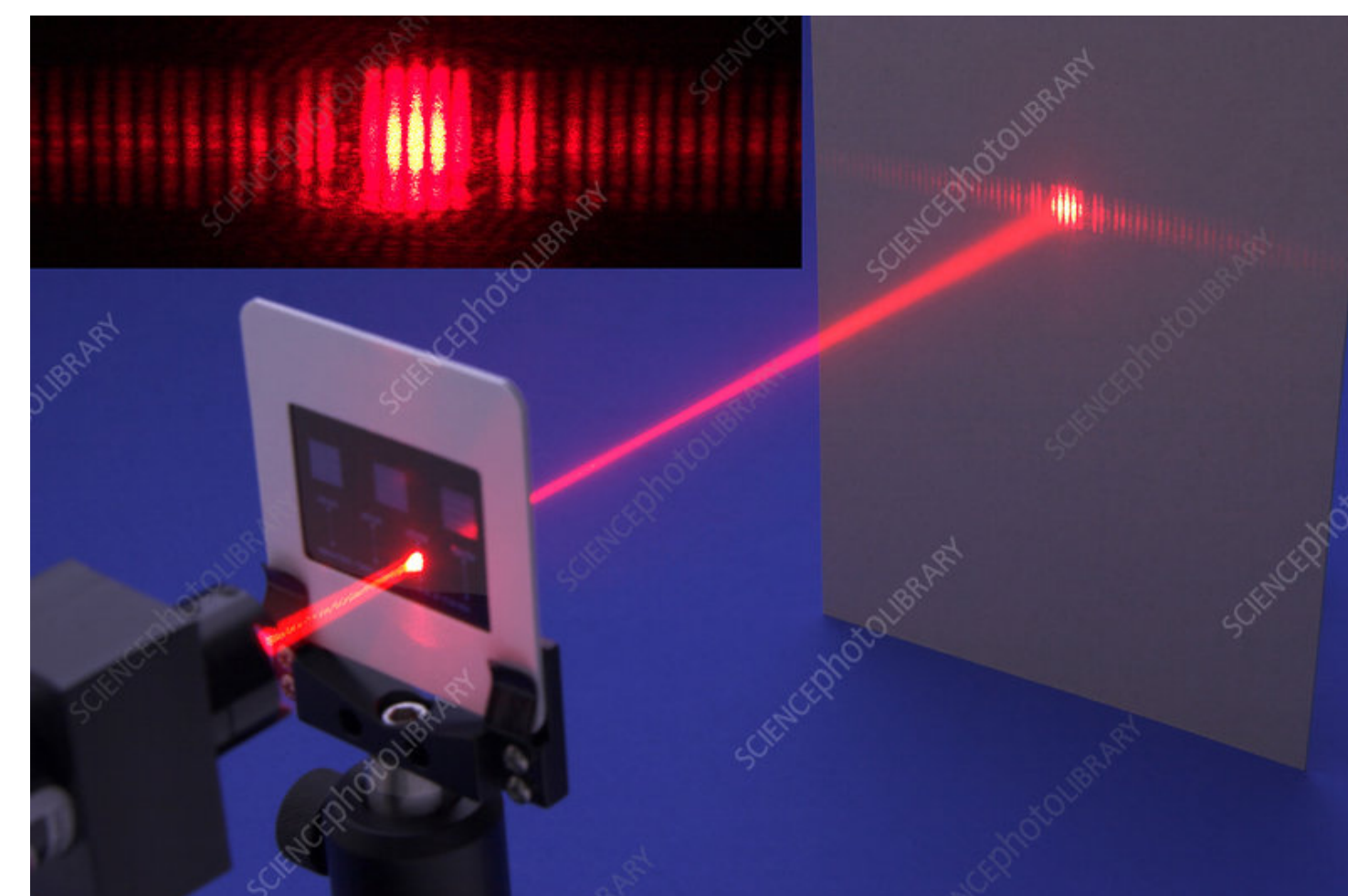
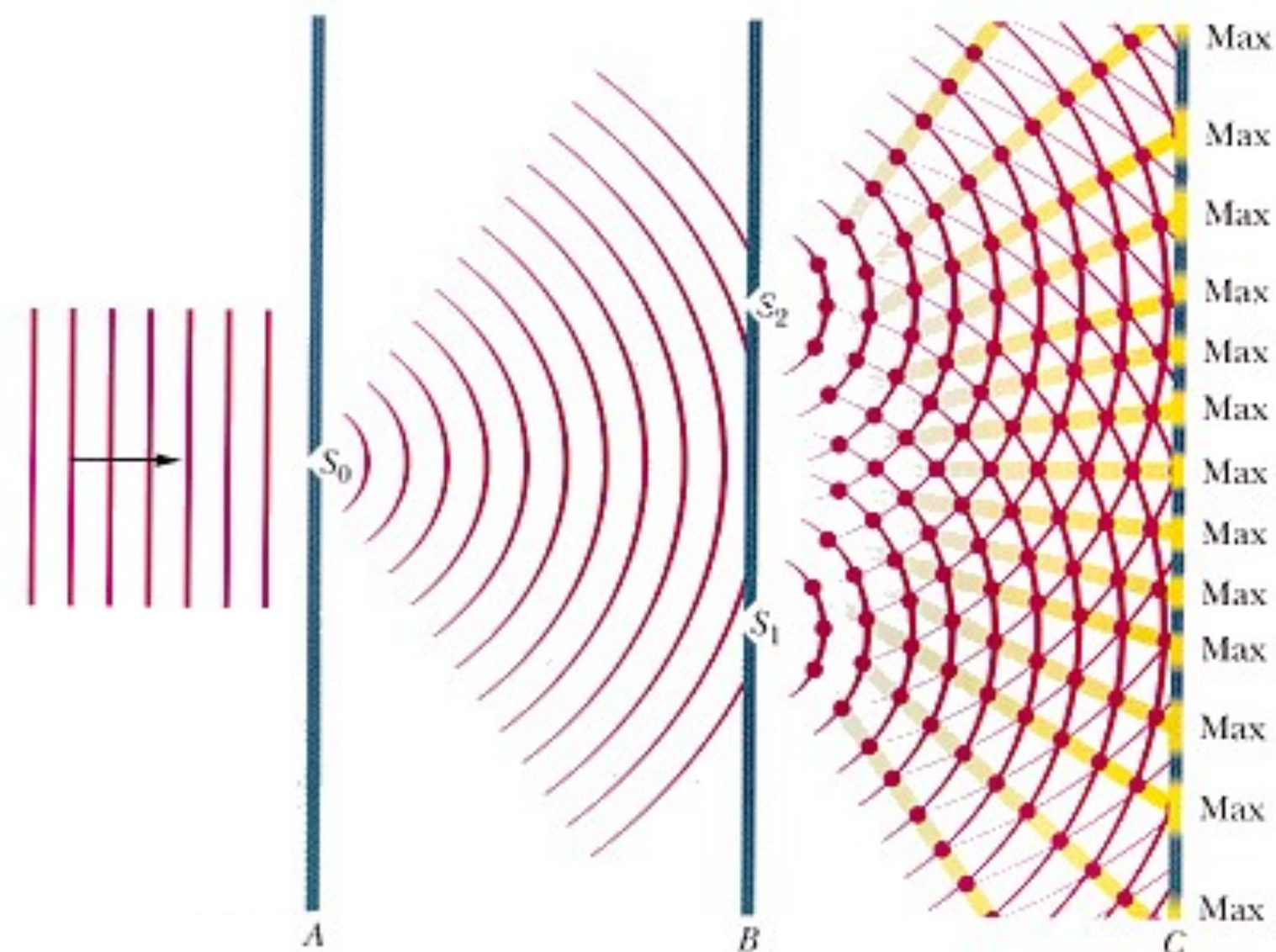
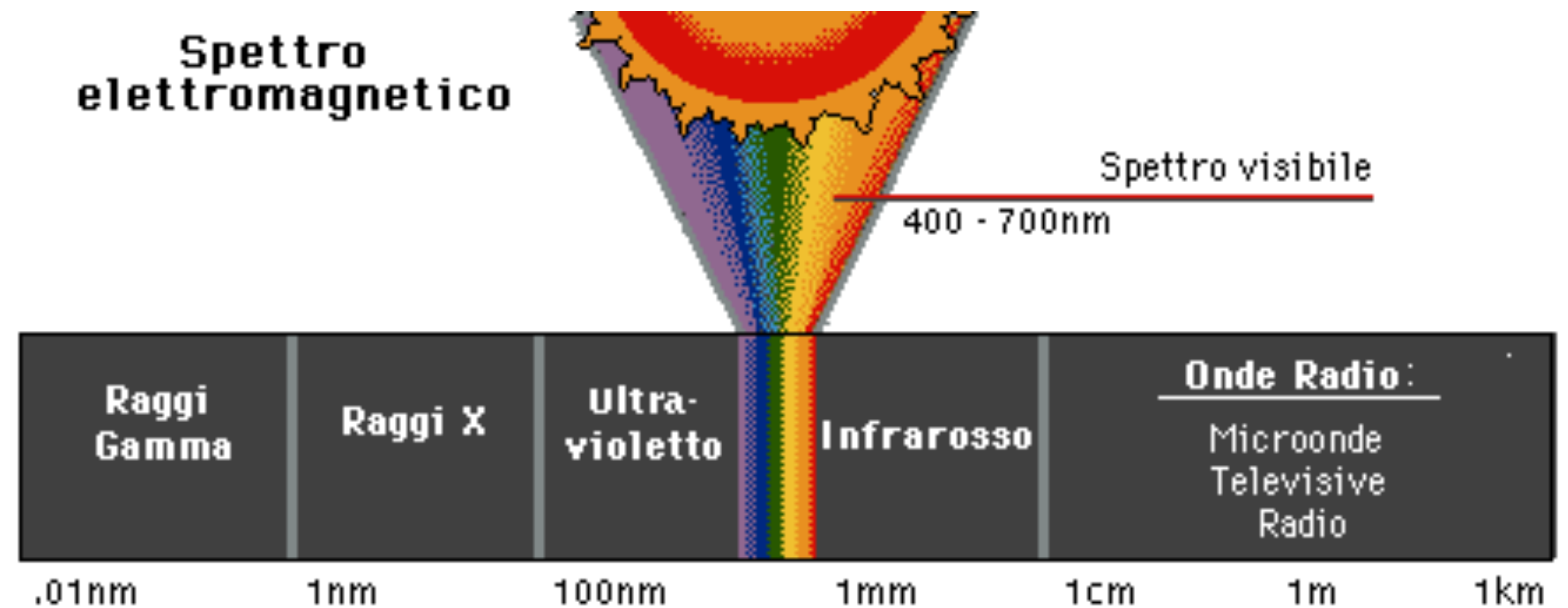
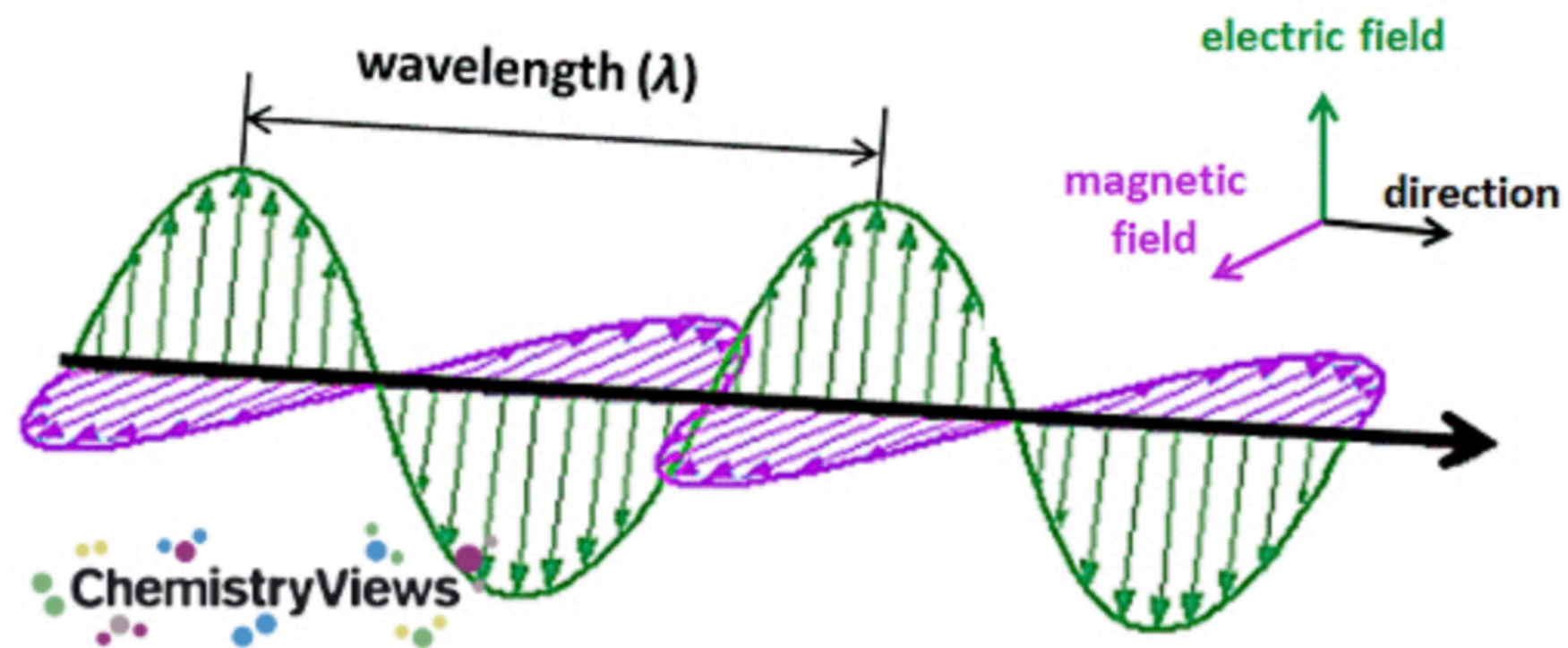
# Ottica: la luce è onda o corpuscolo?





# La luce è un'onda (Young 1801, Maxwell 1864)

- Come lo sono i segnali radio (Hertz, 1886), la luce infrarossa (Herschel, 1800) e ultravioletta (Ritter, 1801), i “raggi” X (Röntgen, 1894) e i “raggi” gamma (Villard 1900, Rutherford 1903)



CREDIT: GIPHOTOSTOCK / SCIENCE PHOTO LIBRARY



## La crisi delle idee classiche

- Nel secondo '800, una serie di evidenze sperimentali mettono in crisi il “**paradigma**” classico di un mondo fatto da corpuscoli che seguono le leggi di Newton e onde elettromagnetiche che obbediscono alle leggi di Maxwell.
- In ordine cronologico, senza elaborare:
  - La radiazione emessa da corpi caldi (onde elettromagnetiche) sembra essere fatta da “granuli” discreti di energia minima, in contraddizione con la teoria di Maxwell
    - La teoria del “corpo nero”, **Planck, 1900**
  - Anche quando la luce colpisce la superficie di un metallo, si comporta come fosse fatta di “granuli”
    - La teoria dell'effetto “fotoelettrico”, **Einstein, 1905**
  - La radiazione emessa o assorbita dagli atomi è emessa solo per particolarissimi colori o frequenze e queste frequenze obbediscono a una strana formula scoperta da Balmer
  - **Gli atomi sono fatti da elettroni che “orbitano” attorno a un piccolissimo nucleo atomico**
    - **Rutherford, 1909**





- Che cosa sono i “granuli di luce” ?
  - Non sono semplici corpuscoli, perché Young dice che sono anche onde
  - Non sono semplici onde, perché sono anche corpuscoli
- Sono QUANTI DI LUCE (verranno chiamati FOTONI), un concetto nuovo.
  - A volte **onde**, a volte **particelle**, in realtà nessuno dei due. Sono un **concetto nuovo** che obbedisce alle leggi nuove della **MECCANICA QUANTISTICA**



## Quanto è grande un “Quanto” ?

- Un fotone ha energia pari alla sua frequenza moltiplicato per una costante fondamentale della natura che verrà chiamata **COSTANTE DI PLANCK**

$$E = h\nu$$

- È straordinariamente piccola:  **$h = 10^{-34} \text{ J s}$** 
  - La luce visibile ha frequenza  **$\nu = 0.5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$**        **$E = 3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**
- Una lampadina da **30 W** emette  **$10^{20}$  fotoni/s**
  - Ecco perché mi sembra “continua”, i granuli sono talmente piccoli da essere inosservabili nel mondo microscopico
  - Normalmente non mi accorgo della natura “granulare” della luce, le onde quantistiche dei quanti diventano onde classiche

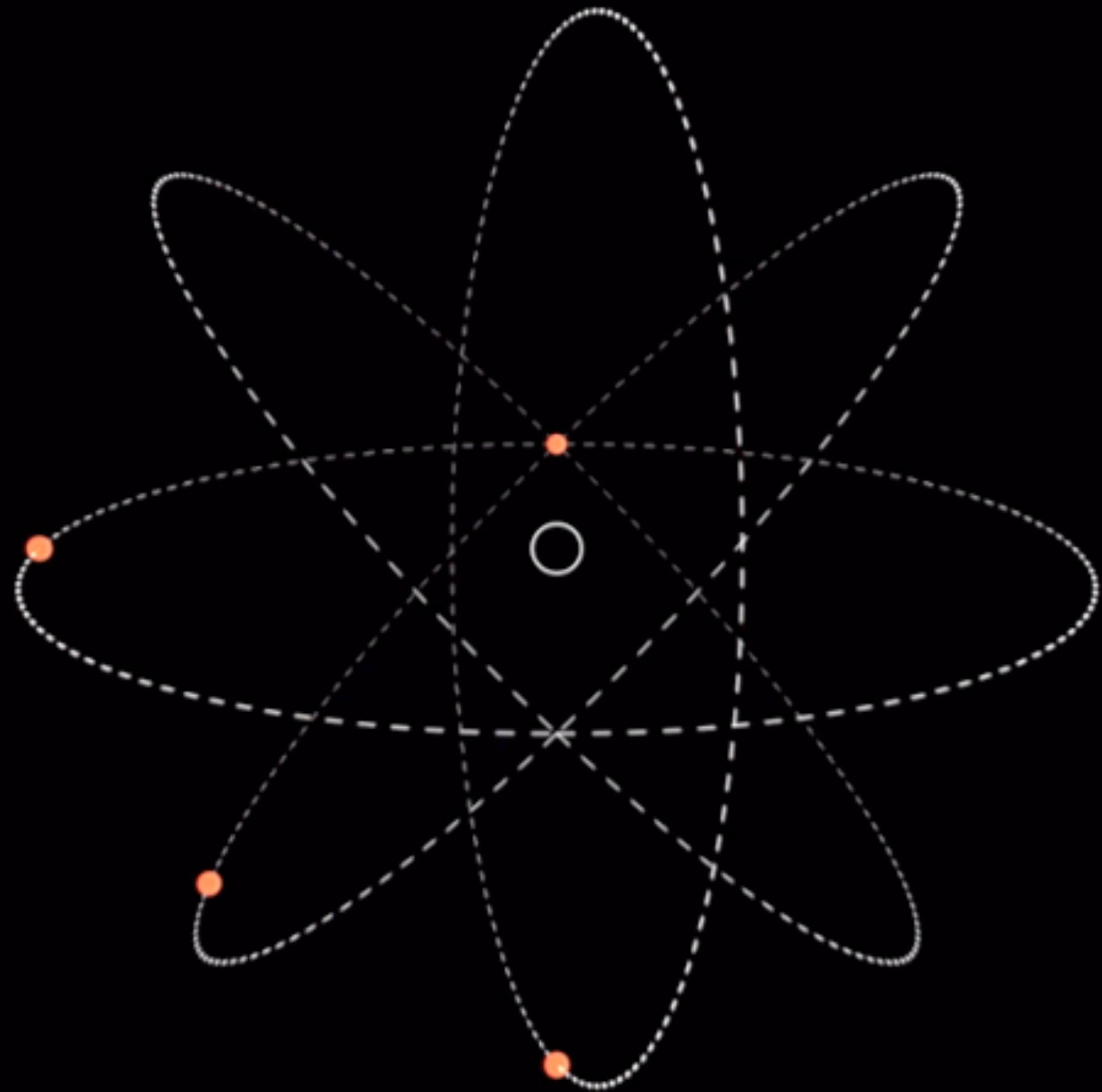




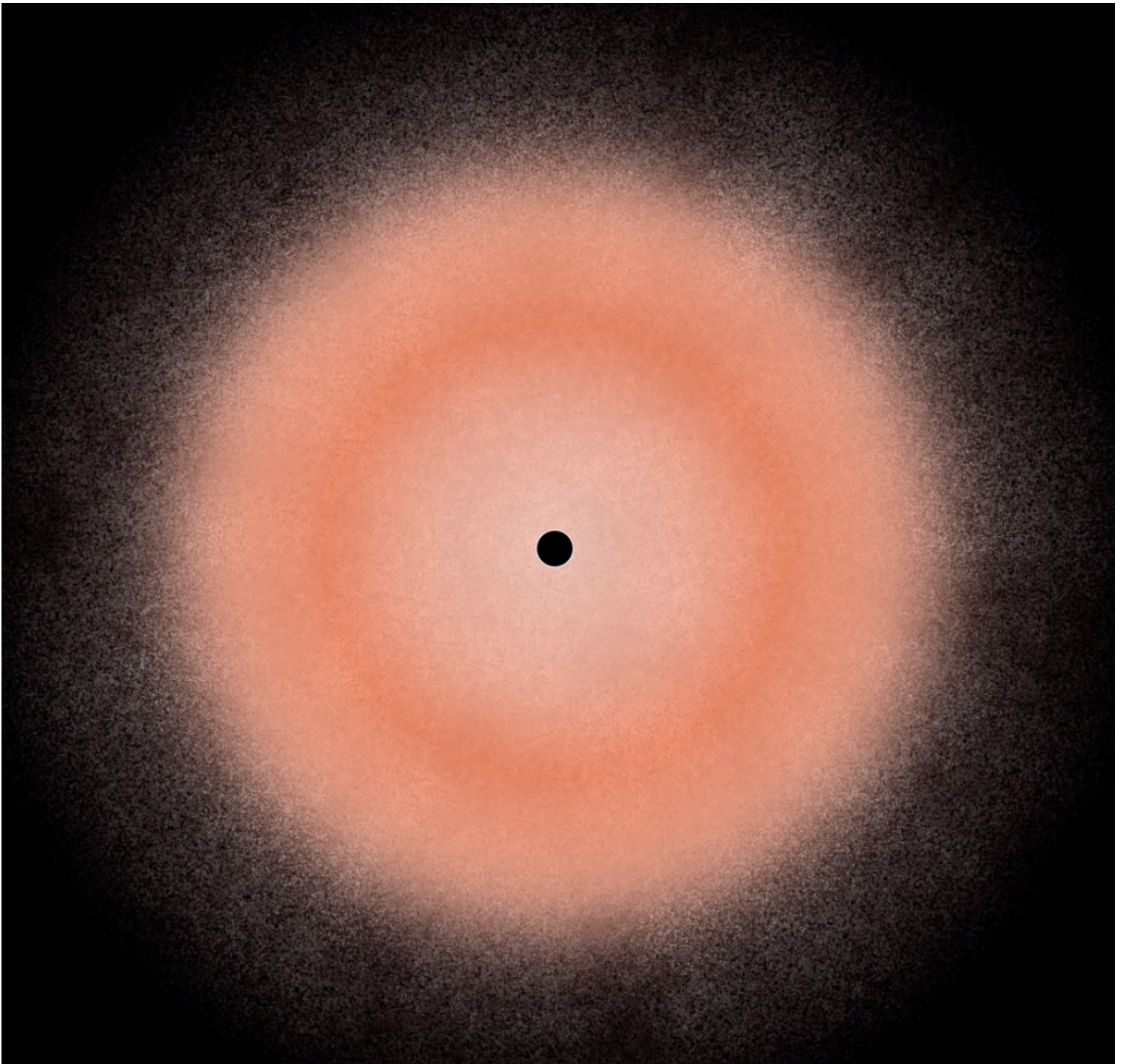


- La natura “quantistica” della luce non è specifica della luce.
- Anche le particelle come gli **elettroni** sono quanti, un po’ onde un po’ particelle.
  - La loro lunghezza d’onda è molto più piccola di quella della luce per cui è difficile mostrarne la natura ondulatoria ma quando un elettrone sta - per esempio - legato a un nucleo dentro un atomo, la sua natura ondulatoria diventa evidente
- **Tutte le particelle conosciute - quindi tutta la materia - ha un’intima natura “quantistica”**





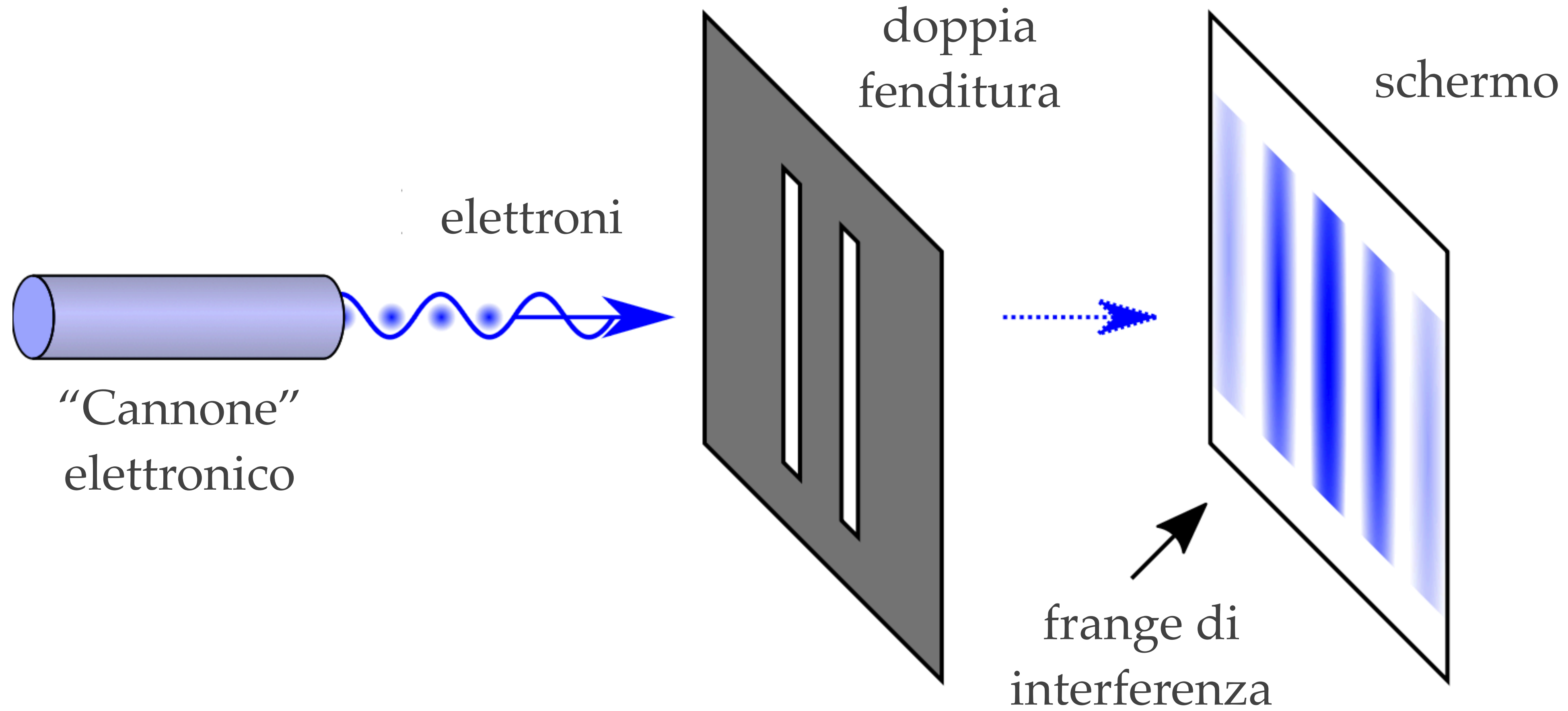
**IDEA CLASSICA:** gli elettroni sono **CORPUSCOLI** che **GIRANO** intorno al nucleo atomico



**IDEA QUANTISTICA:** gli elettroni sono **QUANTI** concentrati attorno al nucleo, un po' onde un po' corpuscoli, senza posizione o velocità definite

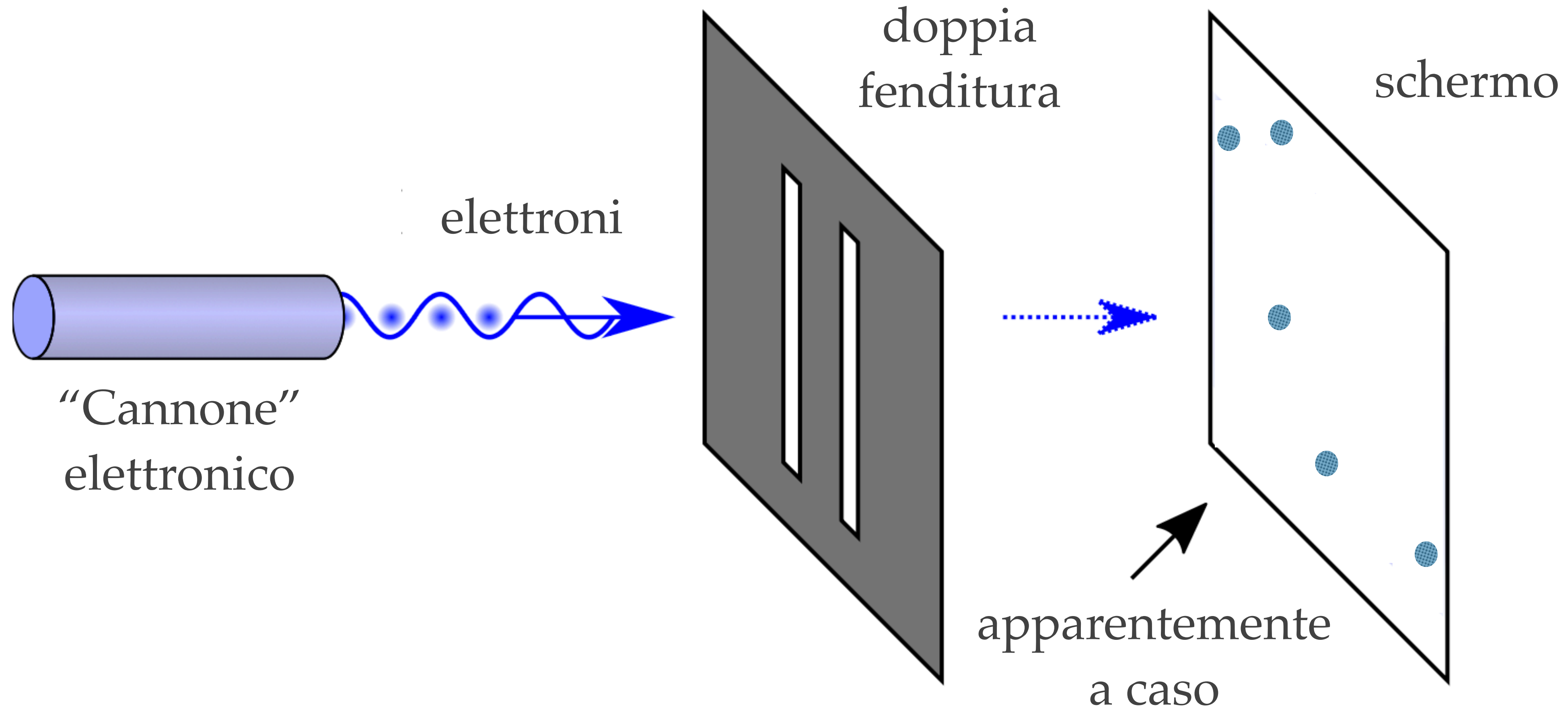


# Anche gli elettroni sono ONDE!



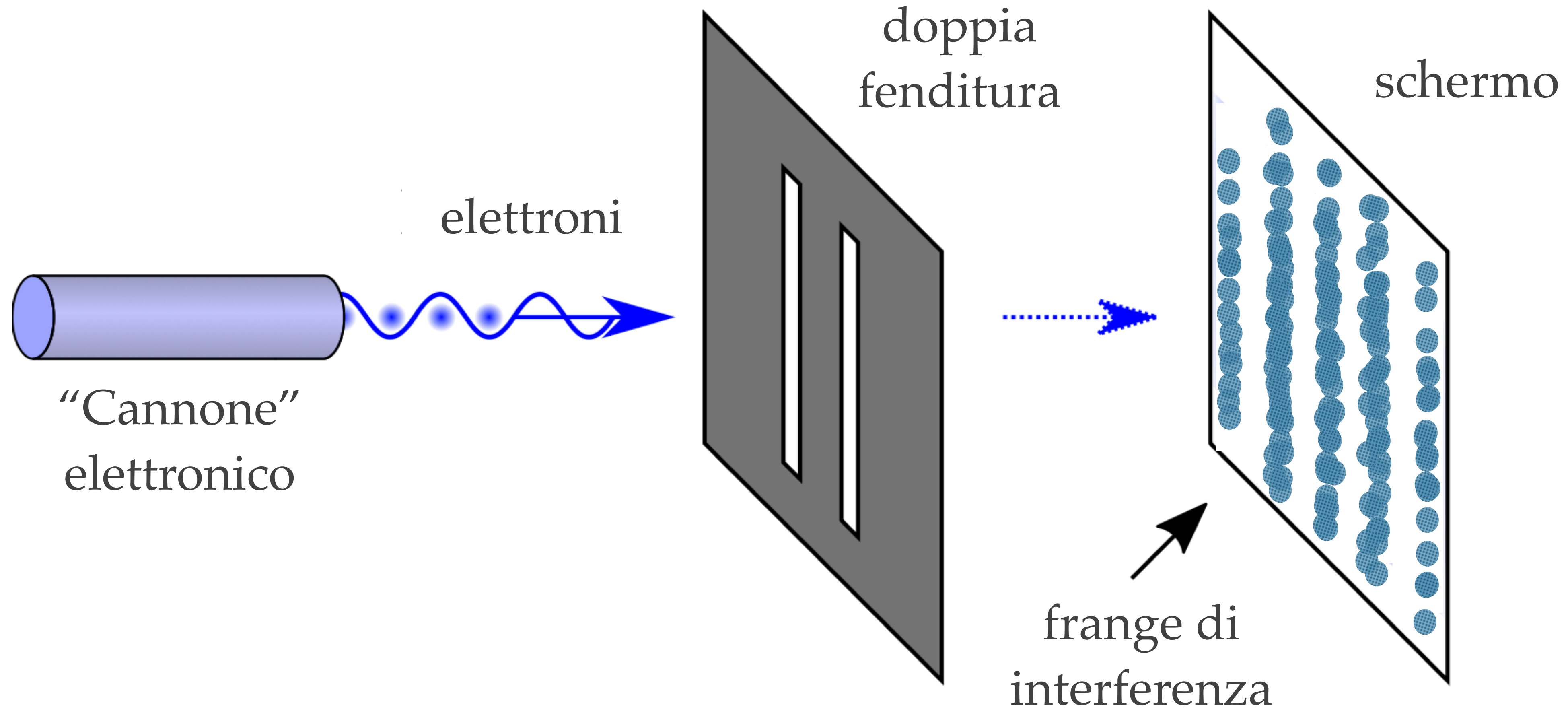


..... ma anche corpuscoli: se gli elettroni li spariamo uno alla volta ?





..... ma anche corpuscoli: se gli elettroni li spariamo uno alla volta ?



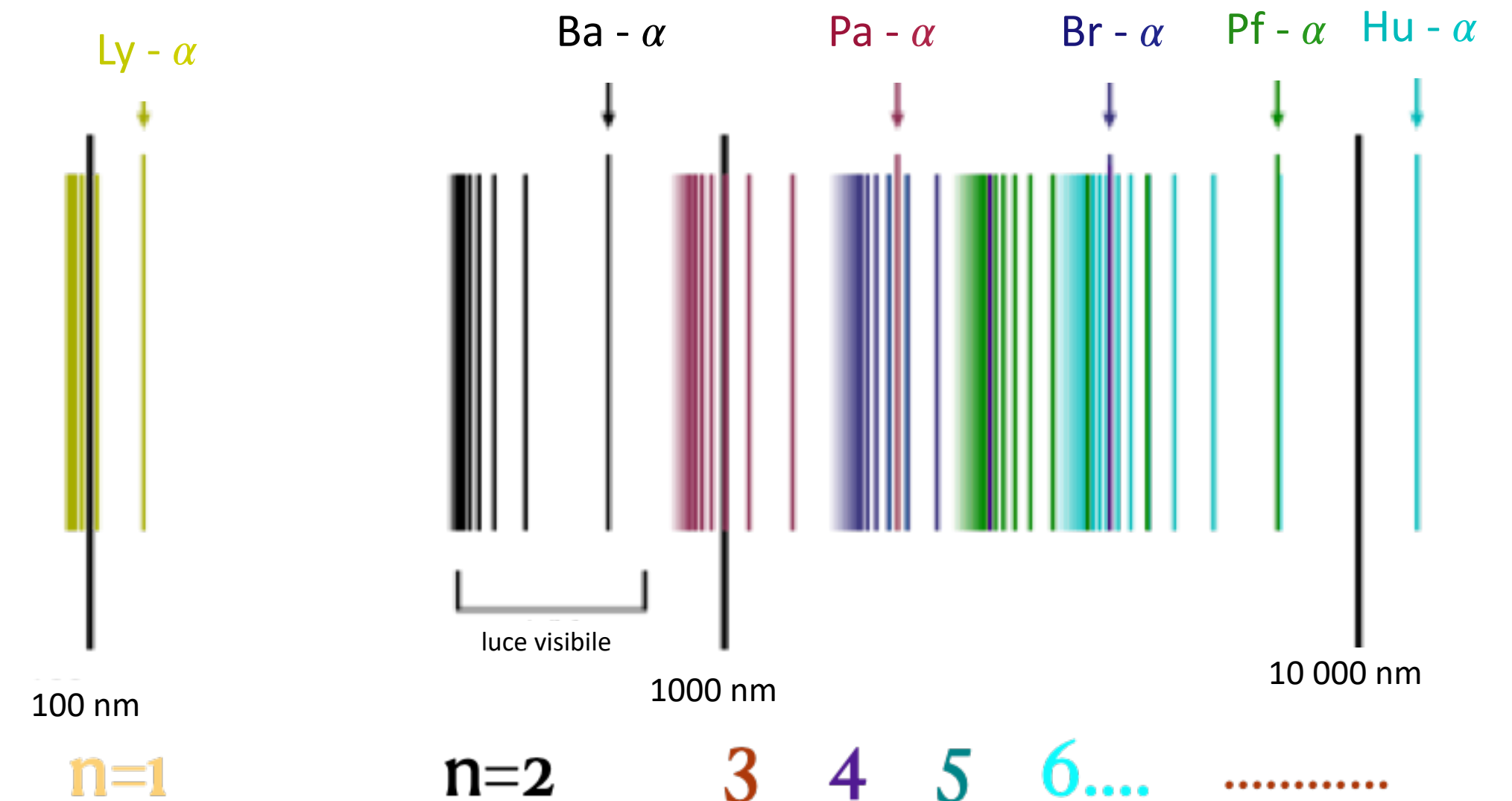


- I “Quanti” si muovono (Meccanica!) obbedendo a un’equazione matematica scoperta nel 1925 da **Erwin Schrödinger**
- Le onde si allargano, interferiscono, si diffrangono come le onde macroscopiche del mare o della luce ma **ciò che trasportano è la PROBABILITÀ di osservare il “Quanto” in un posto o in un altro**, con una certa velocità o energia o altro
- La meccanica quantistica **NON È DETERMINISTICA**
  - È impossibile predire l’esito di una misura specifica su scala atomica
  - Si può dire solo quale sia la probabilità di ogni possibile valore
    - Di solito i valori possibili sono molti, la grandezza fisica è **INDETERMINATA**



# Onde di probabilità e spettro degli atomi

- Uno dei misteri dell'atomo è la sua capacità di emettere e assorbire luce solo per valori precisi e discreti della lunghezza d'onda (o frequenza)
- La spaziatura delle “righe” obbedisce a una strana formula scoperta da Balmer (1885) e poi perfezionata da Rydberg (1889)

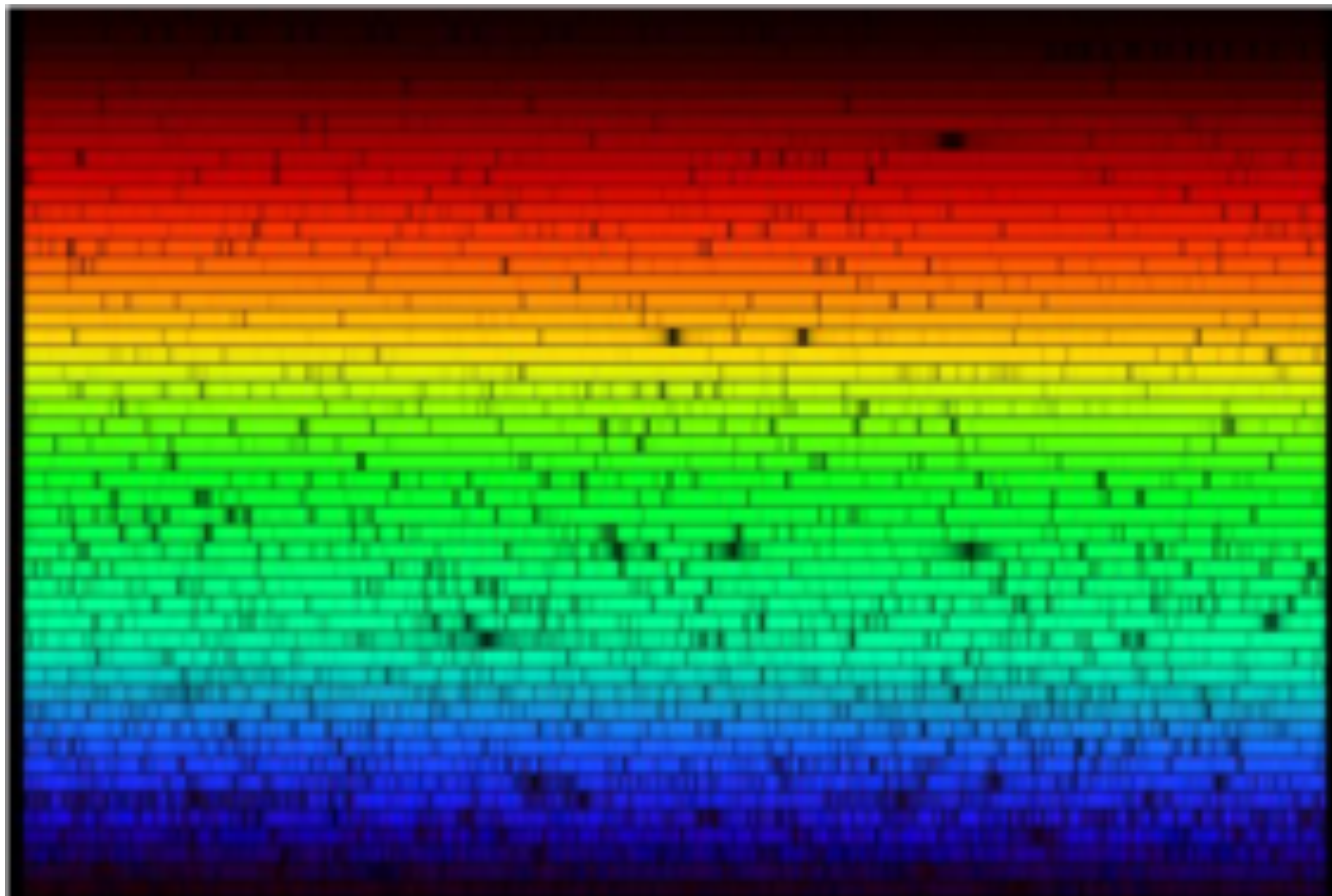


## L'equazione di Schrödinger spiega le righe:

- L'onda quantistica nell'atomo si comporta come una corda di violino
- **Vibra solo a certe frequenze**, per cui gli elettroni possono avere solo ben precise energie
- Quando un elettrone “salta” (probabilisticamente) da un livello a un altro emette un fotone di energia pari al salto se in discesa, o ne assorbe uno se in salita.
- Non è possibile calcolare esattamente quando lo farà ma solo **determinare la probabilità che accada in un certo intervallo di tempo**

$$\lambda = \frac{R_H}{m^2} - \frac{R_H}{n^2}$$











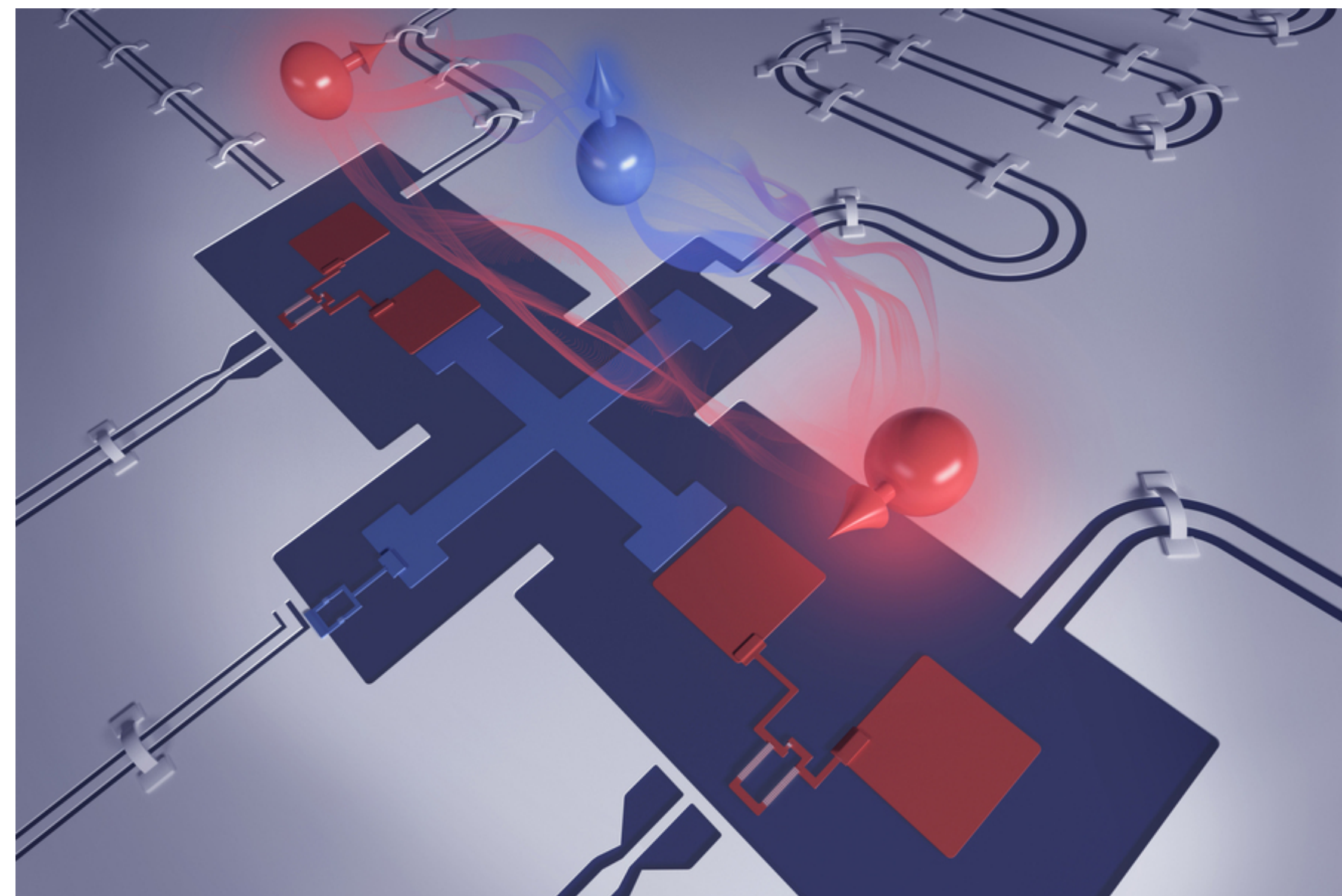


- La strana natura dei Quanti è legata a una proprietà fondamentale della Meccanica Quantistica
- Le grandezze non sono sempre definite
- Alcune coppie di grandezze, per esempio la posizione e la velocità, non sono mai definite contemporaneamente
- Il valore di una grandezza fisica può essere la SOVRAPPOSIZIONE di valori differenti, anche infiniti.



## Ma vorremmo costruire oggetti macroscopici quantistici !

- È oggi in atto lo sforzo di costruire un “quantum computer”.
- Aprirebbe la possibilità di superare i limiti della logica binaria
- In un byte classico, l'informazione è una sequenza determinata di 0 oppure 1
  - Il calcolo avviene manipolando uno alla volta moltissimi byte.
- In un q-bit, l'informazione è la sovrapposizione contemporanea di moltissimi valori, consentendo, in linea di principio, calcoli velocissimi impossibili con un computer ordinario.





## Vantaggio quantistico?

Nel 2019, **Google** annuncia **vantaggio quantistico** su un problema di campionamento: soluzione ottenuta in 200s sul computer quantistico “Sycamore” rispetto a un tempo stimato di 10000 anni sul supercomputer classico “Summit”  
 Nel 2020, ricercatori al **Hefei National Lab, Cina**, osservano **vantaggio** su un altro problema di campionamento usando un computer fotonico.

**Il concetto di supremazia quantistica si riferisce a computer quantistici che “.. Possono risolvere problemi irrisolvibili su computer classici, indipendentemente dal fatto che i problemi siano realistici o meno.”**  
**(John Preskill, Caltech)**

**Un vantaggio quantistico “pratico”**  
**”Risolvere un problema che sia utile al mondo scientifico o industriale meglio o piu’ velocemente di qualunque algoritmo classico conosciuto su hardware classico”**  
**(M. Troyer, Microsoft)**

arXiv:2005.06787v1 [quant-ph] 14 May 2020

### Classical Simulation of Quantum Supremacy Circuits

Cupjin Huang,<sup>1</sup> Fang Zhang,<sup>2</sup> Michael Newman,<sup>3</sup> Junjie Cai,<sup>4</sup>  
 Xun Gao,<sup>1</sup> Zhengxiong Tian,<sup>5</sup> Junyin Wu,<sup>4</sup> Haihong Xu,<sup>5</sup> Huanjun Yu,<sup>5</sup>  
 Bo Yuan,<sup>6</sup> Mario Szegedy,<sup>1</sup> Yaoyun Shi<sup>1</sup>, Jianxin Chen<sup>1</sup>

- <sup>1</sup>Alibaba Quantum Laboratory,  
Alibaba Group USA, Bellevue, WA 98004, USA
- <sup>2</sup>Department of Electrical Engineering and Computer Science,  
University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA
- <sup>3</sup>Departments of Physics and Electrical and Computer Engineering,  
Duke University, Durham, NC 27708, USA
- <sup>4</sup>Alibaba Cloud Intelligence,  
Alibaba Group USA, Bellevue, WA 98004, USA
- <sup>5</sup>Alibaba Cloud Intelligence,  
Alibaba Group, Hangzhou, Zhejiang 310000, China
- <sup>6</sup>Alibaba Infrastructure Service,  
Alibaba Group, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

#### Abstract

It is believed that random quantum circuits are difficult to simulate classically. These have been used to demonstrate quantum supremacy: the execution of a computational task on a quantum computer that is infeasible for any classical computer. The task underlying the assertion of quantum supremacy by Arute *et al.* (*Nature*, **574**, 505–510 (2019)) was initially estimated to require Summit, the world’s most powerful supercomputer today, approximately 10,000 years. The same task was performed on the Sycamore quantum

<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>



nature

Explore content Journal information Publish with us Subscribe

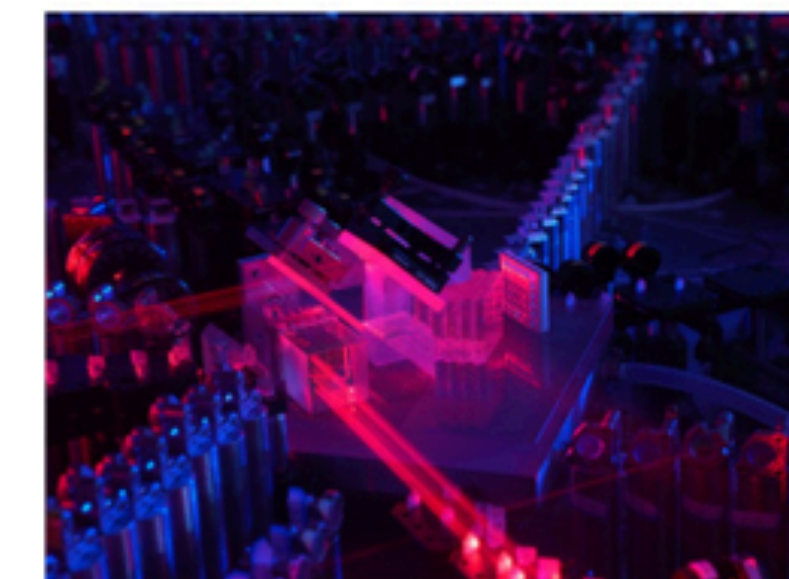
nature > news > article

NEWS | 03 December 2020

### Physicists in China challenge Google’s ‘quantum advantage’

Photon-based quantum computer does a calculation that ordinary computers might never be able to do.

Help Ball



This photonic computer performed in 200 seconds a calculation that on an ordinary supercomputer could take 2.5 billion years to complete. Credit: Hansen Zhong

<https://www.nature.com/articles/d41586-020-03434-7>





- **Realizzare q-bit affidabili è difficile**

- Essendo oggetti macroscopici, il loro comportamento quantistico tende a sparire.
  - Si chiama **decoerenza**.
    - La sfida è trovare tecnologie per cui il qbit funzioni bene abbastanza a lungo
- Non è facile connettere tra loro i qbit senza “disturbarli”

- Esistono comunque **prototipi interessanti e incoraggianti**

- Vale la pena di lavorarci !
  - Aiuterebbe a risolvere problemi oggi inattaccabili
  - Fornirebbe mezzi di crittografia sicuri
  - I qbit o tecnologie a essi collegate si potrebbero trasformare i sensori straordinariamente più sensibili di quelli oggi esistenti



- **La Meccanica Quantistica compie 100 anni**
  - È una teoria **solida**, molto **ben verificata**, che è stata capace, finora, di **spiegare TUTTI i fenomeni conosciuti del mondo microscopico**
    - È alla base di fenomeni straordinari con applicazioni fondamentali: i transistor, la superconduttività, il laser, sono solo alcuni esempi di dispositivi o fenomeni quantistici
  - La **prossima frontiera** è la sua comprensione (e applicazione) in contesti **macroscopici**
    - Il calcolo e la sensoristica quantistica, le telecomunicazioni quantistiche
  - Ancora forse più ambiziosa, la sua applicazione alla gravitazione e alla cosmologia, una frontiera che appena intravediamo ma che per ora **NON** comprendiamo

**GRAZIE PER L'ATTENZIONE**