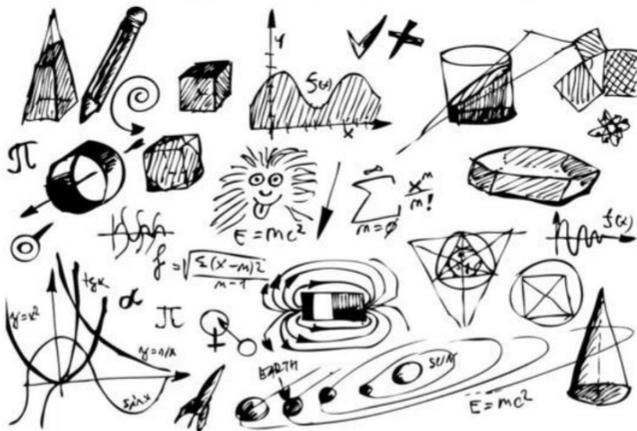




UNIVERSITÀ DI PAVIA  
Dipartimento di Fisica



***Incontri di Fisica Moderna 2022/23***

**Gianluca Introzzi**

***Una proposta per  
l'insegnamento della  
Meccanica Quantistica***

**Martedì 20 dicembre 2022  
Ore 15.00 – Aula 102**



Università di Pavia

**UNA PROPOSTA PER L'INSEGNAMENTO  
DELLA MECCANICA QUANTISTICA  
NELLA SCUOLA SECONDARIA DI SECONDO GRADO**

**Gianluca Introzzi**

Incontri di Fisica Moderna 2022/2023

*«Un'indagine storica sulla scienza è indispensabile, se non si vuole che i principi che la scienza abbraccia degenerino a poco a poco in un sistema di prescrizioni capite solo a metà, o addirittura in un sistema di dogmi. L'indagine storica non solo fa comprendere meglio lo stato attuale della scienza, ma, mostrando come essa sia in larga misura convenzionale e accidentale, apre la strada al nuovo. Da un punto di vista più elevato, in cui convergono diverse correnti di pensiero, possiamo guardare con una visuale più ampia e scoprire strade non ancora percorse.»*

Ernst Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* (1883)

**1**

**Storia ed evoluzione  
dell'insegnamento della  
meccanica quantistica**

# L'utilizzo della Storia nella Didattica della Fisica

## Programma di alfabetizzazione scientifica (USA, anni '60):

1. Critica all'approccio positivista di stampo ottocentesco
2. Messa in discussione dell'esistenza di leggi e principi apodittici
3. Revisione dei manuali ritenuti atemporali e di stampo ipotetico-deduttivo
4. Rifiuto dell'insegnamento tradizionale a favore di un insegnamento più interattivo

**La scienza come attività umana in evoluzione ↔ Studio dei *cas* storici**

Gerald Holton – Physical Science Study Committee (PSSC) MIT (1956)

Harvard Project Physics (1962-1972)

Richard P. Feynman – *Lectures on Physics* (1965)

# L'utilizzo della Storia nella Didattica della Fisica

Gruppi di ricerca in didattica (Italia, anni '80): elaborazione di proposte innovative per la scuola secondaria superiore, privilegiando l'evoluzione storica delle idee della Fisica

## Argomentazioni a favore del metodo storico:

1. Motivazioni culturali a largo spettro: *umanizzare la scienza*
2. Motivazioni epistemologiche: imparare *sulla* scienza
3. Motivazioni psicopedagogiche: regola di *ricapitolazione della filogenesi nell'ontogenesi*  
(*Piaget*)

# Come inserire la MQ nei programmi scolastici?

## LE INDICAZIONI MINISTERIALI

Fino al 2000	D.L. 211, 7 ottobre 2010	
<p>Studio della meccanica classica, della termodinamica, dell'ottica e dell'elettromagnetismo</p> <p><i>Cenni di Fisica moderna (licei scientifici)</i></p>	<p>Indirizzi non scientifici:</p> <p>percorsi relativi al microcosmo e/o al macrocosmo</p>	<p>Licei scientifici:</p> <p>corpo nero, effetto fotoelettrico e spettri atomici discreti come evidenze del quanto di luce</p> <p>natura ondulatoria della materia (de Broglie) e principio d'indeterminazione</p>

# Come inserire la MQ nei programmi scolastici?

## **Problemi e difficoltà:**

1. Carattere controintuitivo della teoria
2. Questioni epistemologiche e filosofiche
3. Quando e come introdurre gli argomenti
4. Come gestire la transizione dalla FC alla MQ
5. Scelta del formalismo matematico
6. Riuscire ad attivare riflessioni e ragionamenti

**2**

**Proposte per  
l'insegnamento della  
meccanica quantistica**

**No** ad un approccio storico

**Si** Trasmissione diretta di concetti quantistici coerentemente organizzati

**Elio Fabri**  
1996, *Pisa*

1. Risultati sperimentali che hanno portato ai primi modelli quantistici

Quantizzazione dei livelli atomici  
(Esperimento di Franck-Hertz)

Quantizzazione della radiazione EM  
(Effetto fotoelettrico – Celle fotovoltaiche)

2. Ruolo della probabilità e sviluppi della fisica statistica

Distribuzione di Boltzmann per sistemi a livelli discreti  
(Simulazione al computer)

3. Calcolo delle ampiezze di probabilità

Complementarità, principio di sovrapposizione, relazioni d'indeterminazione, interpretazione probabilistica  
(Young - esperimenti ideali con elettroni)

- Giuseppina Rinaudo
- Marisa Michelini
- Malgieri, Onorato, De Ambrosis

## Continuità con la fisica classica - Approccio storico

Quantizzazione  $E = h \nu$  introdotta dalla costante di Planck  $h$  cruciale nel passaggio alla teoria quantistica

Esperimenti di ottica (*doppia fenditura*) per creare un ponte tra FC e MQ

Abbandonare l'idea classica di traiettoria

L'oggetto quantistico si muove su tutti i possibili cammini di Feynman

• Elio Fabri

**Giuseppina  
Rinaudo**  
1997-2001, *Torino*

• Marisa Michelini

• Malgieri, Onorato,  
De Ambrosis

# Significato degli enti fisici - Impostazione di Dirac

## Stato quantico e principio di sovrapposizione

la polarizzazione come proprietà quantistica

esperimenti ideali con fotoni, polaroid e cristalli birifrangenti

## Generalizzazione dei risultati:

**FC**: stato di un fotone polarizzato linearmente  $\leftrightarrow$

**MQ**: vettore in uno spazio di Hilbert 2D

**FC**: variabili dinamiche  $\leftrightarrow$

**MQ**: operatori quantistici

*Incompatibilità = non commutatività di operatori lineari*

*Relazioni d'indeterminazione di Heisenberg*

• Elio Fabri

• Giuseppina Rinaudo

**Marisa  
Michelini**  
2000, Udine

• Malgieri, Onorato,  
De Ambrosis

# Percorso con i cammini di Feynman

ESPERIMENTO CON DUE CAMMINI (doppia fenditura)	
FISICA CLASSICA	FISICA QUANTISTICA
$P_c(E) = P(A) + P(B)$	$P(A) =  \psi(A) ^2$ $P(B) =  \psi(B) ^2$ $P_q(E) =  \psi(A) + \psi(B) ^2$

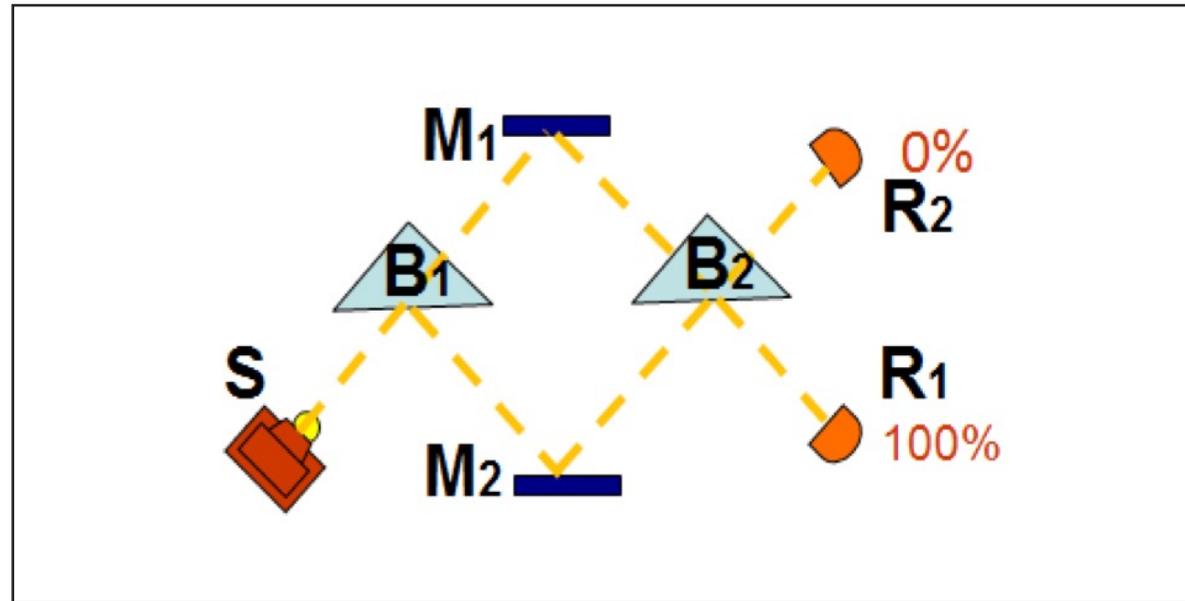
Per chiarire le proprietà del fotone:

1. Effetto fotoelettrico, Effetto Compton, Doppia fenditura ➤ *esistenza del fotone*
2. Esperimento di Grangier, Roger, Aspect ➤ *indivisibilità del fotone*
3. Interferometro Mach-Zehnder ➤ *termini d'interferenza*

- Elio Fabri
- Giuseppina Rinaudo
- Marisa Michelini

**Malgieri,  
Onorato, De  
Ambrosis**  
2014, *Pavia*

# Evidenza di una nuova struttura teorica (MQ)



## Cammini rivelati da $R_1$

- $SB_1M_1B_2R_1$  sfasamento  $\pi$
- $SB_1M_2B_2R_1$  sfasamento  $3\pi$

**PROBABILITÀ MASSIMA**

## Cammini rivelati da $R_2$

- $SB_1M_1B_2R_2$  sfasamento  $\pi$
- $SB_1M_2B_2R_2$  sfasamento  $2\pi$

**PROBABILITÀ NULLA**

- Elio Fabri
- Giuseppina Rinaudo
- Marisa Michelini

**Malgieri,  
Onorato, De  
Ambrosis**  
2014, *Pavia*

**3**

# **La proposta didattica di Gianluca Introzzi**



# Premesse filosofiche

# Scelte metafisiche minimali

Per poter formulare delle teorie scientifiche si devono compiere almeno **3 scelte metafisiche**:

## 1. **Realismo** (scientifico o strutturale)

**Scientifico** se credo all'esistenza degli enti fisici postulati dalla teoria

**Strutturale** se credo alle relazioni del formalismo, sospendendo il giudizio sulla realtà degli enti

## 2. **Struttura dello spaziotempo** (assoluta o relazionale)

## 3. **Ontologia primitiva** (campi – particelle – campi e particelle)

# L'ontologia primitiva delle teorie fisiche

Teoria fisica	Spazio e Tempo	Ontologia primitiva
Meccanica newtoniana	Spazio - Tempo	Forze - Particelle
Meccanica classica	Spazio - Tempo	Onde - Particelle
Meccanica quantistica non relativistica	Spazio - Tempo	Dualismo onda/particella (Bosoni - Fermioni)
Elettromagnetismo	Spazio - Tempo	Campi - Particelle
Meccanica quantistica relativistica	Spaziotempo	Campi - Particelle
Teoria quantistica dei campi	Spaziotempo	Campi - Particelle
Relatività speciale	Spaziotempo	Campi - Particelle
Relatività generale	Campi	Particelle

# L'ontologia primitiva della meccanica quantistica: dualismo onda/particella

**Einstein (1909): dualismo onda/particella**

$$\sigma^2 = \langle n \rangle + \langle n \rangle^2$$

**De Broglie (1924): onde e particelle**

$$\lambda = h/p$$

**Heisenberg, Born, Jordan (1925): né onde, né particelle**

Ritirata nel formalismo matriciale

**Schrödinger (1926): solo onde, senza particelle**

Meccanica ondulatoria

**Born (1926): solo particelle, senza onde**

Funzione d'onda come ente matematico

**Bohr (1927): onde o particelle**

Principio di complementarità

**Feynman (1965): né onde, né particelle**

Esperimento mentale della doppia fenditura

**Merli, Missiroli, Pozzi (1976): interferenza d'elettroni singoli**

# Formalismo e interpretazione

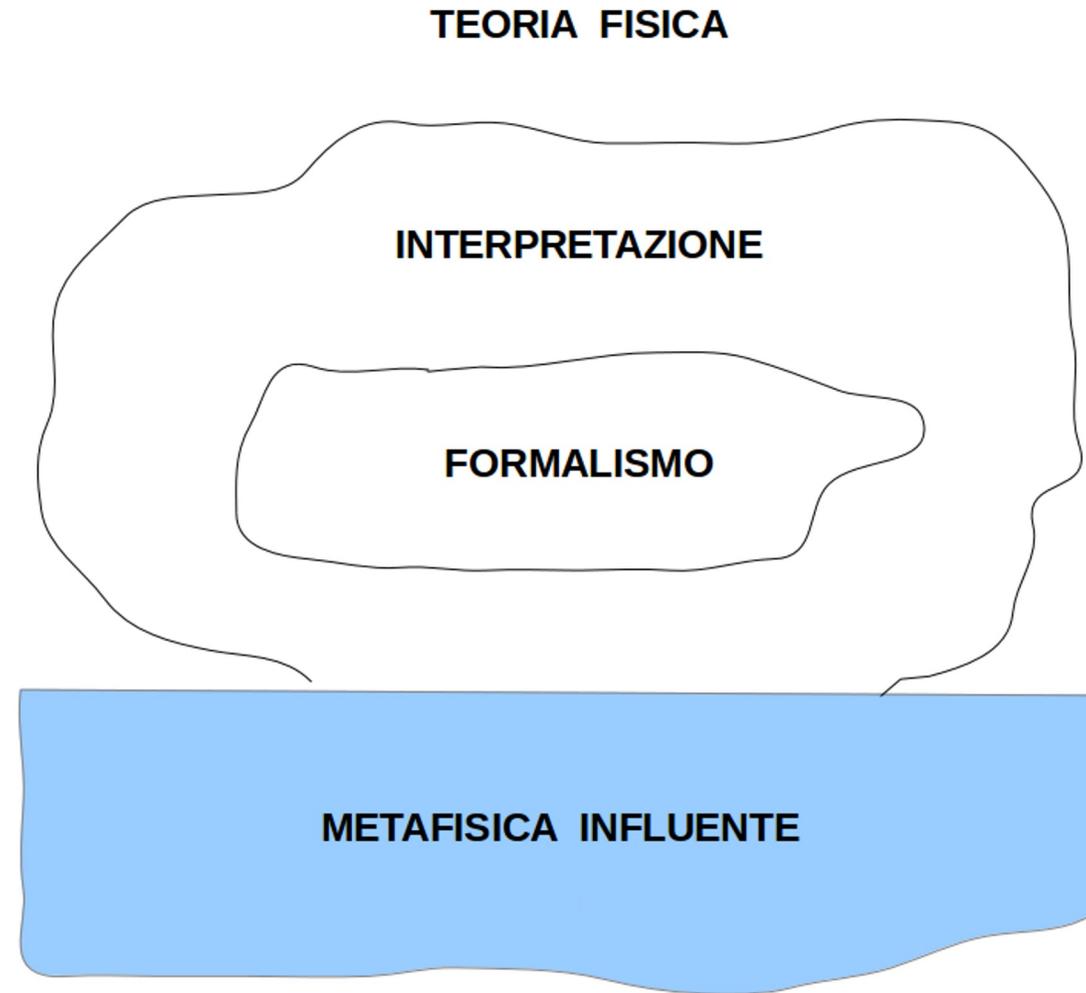
La matematica (**formalismo**) è in sé un linguaggio autoevidente. Ma i suoi simboli ( **$F = ma$** ) vanno dotati di un significato (**interpretati**), perché la teoria abbia un **senso fisico**: ci volle dal 1687 (**Newton**) al 1883 (**Mach**) per capire il significato della seconda legge della dinamica.

L'interpretazione del formalismo è quindi parte essenziale di ogni teoria formalizzata:

*«La formulazione e comprensione di una teoria fisica necessita sia del **formalismo matematico**, sia dell'**interpretazione epistemologica**»*

Max Jammer – *The Philosophy of Quantum Mechanics* (1974)

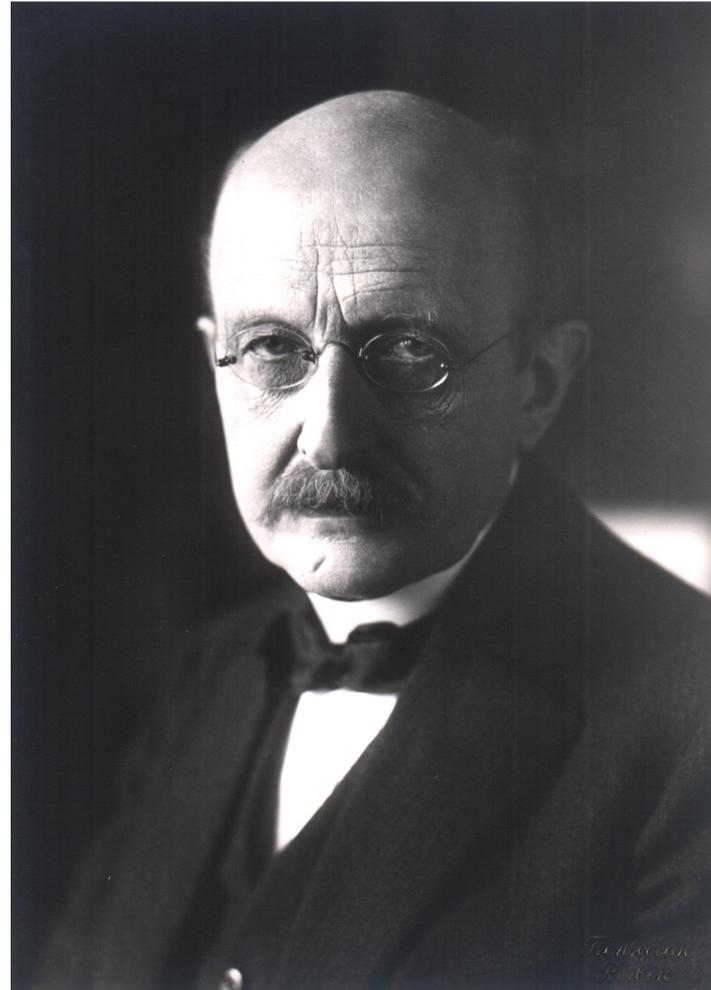
# Struttura delle teorie fisiche



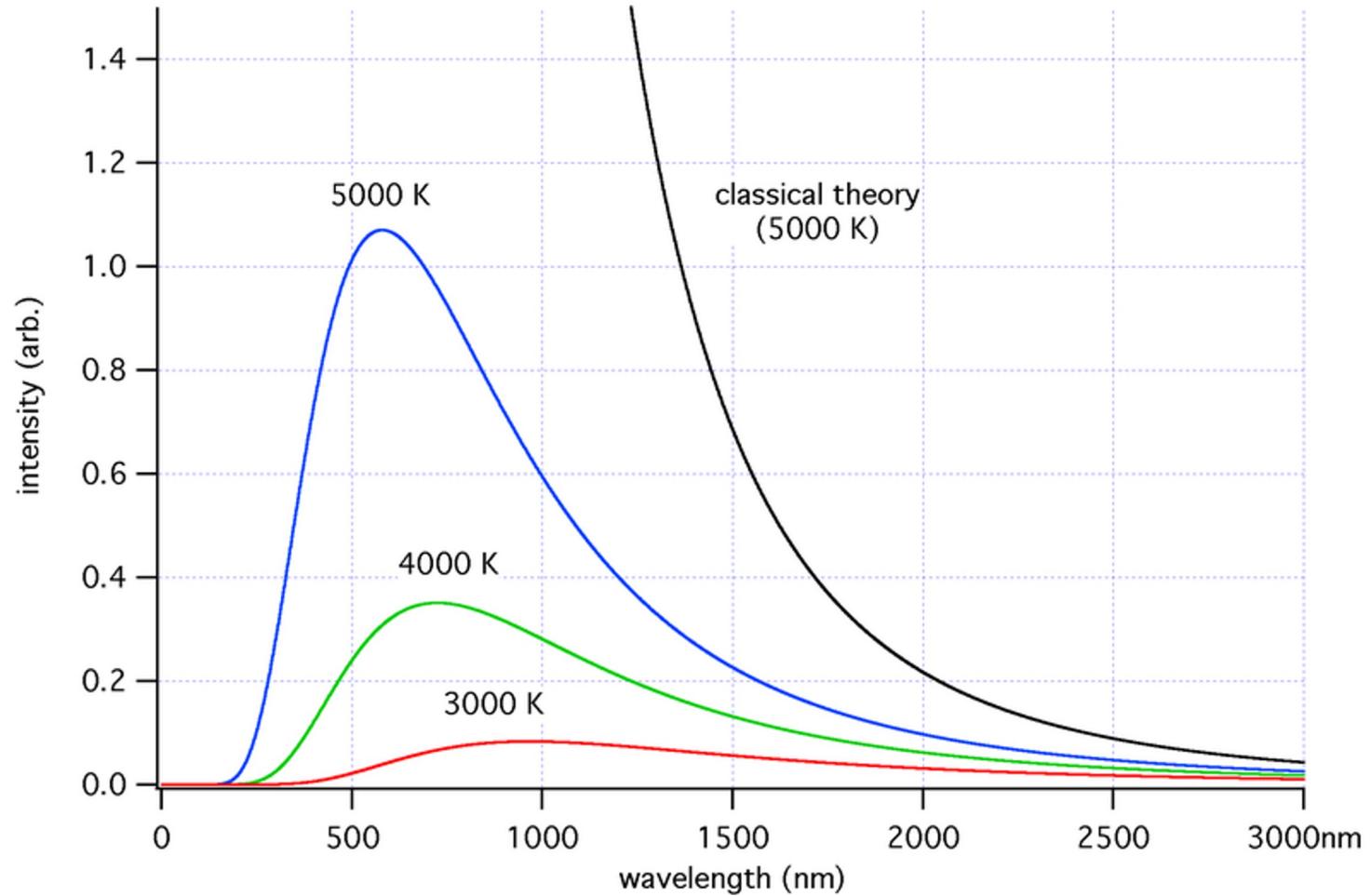


# Fisica dei quanti

# Max Planck (1858-1947)



# Spettro emissivo del corpo nero



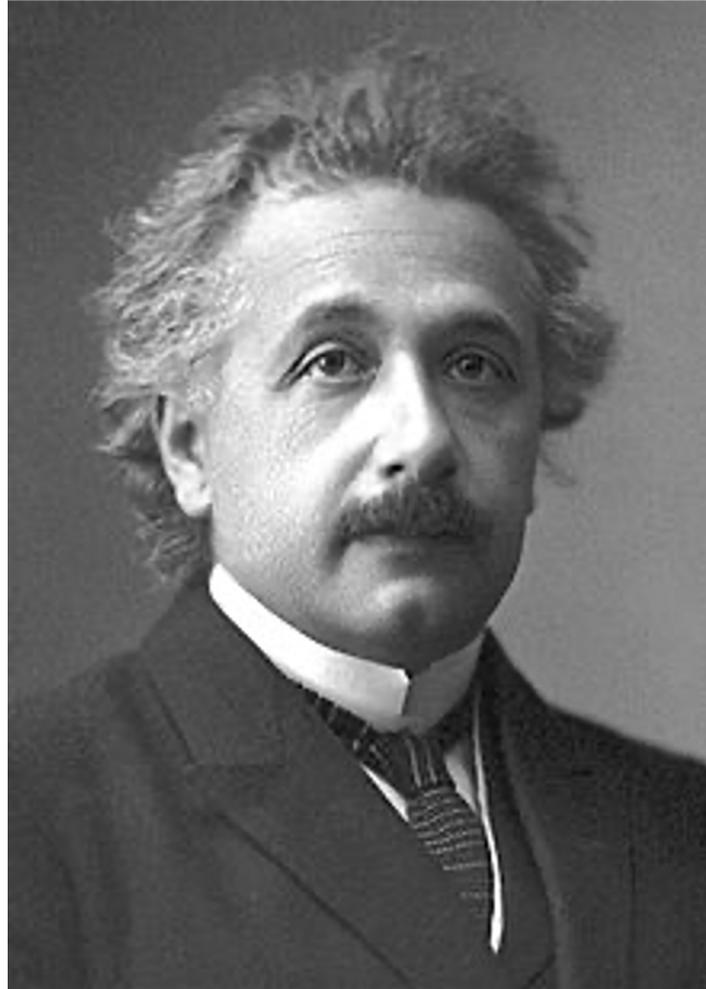
# I quanti di Planck ed Einstein

Max Planck introdusse nel 1900 il concetto di **quanto d'energia** ( $E = n h \nu$ ), l'energia minima emessa da un corpo nero ad una certa temperatura  $T$  che quindi **irraggia onde e.m.** (UV - visibile - IR) di frequenza  $\nu$ . Si trattava, secondo Planck, di un **artificio matematico** al quale non corrispondeva alcuna reale situazione fisica.

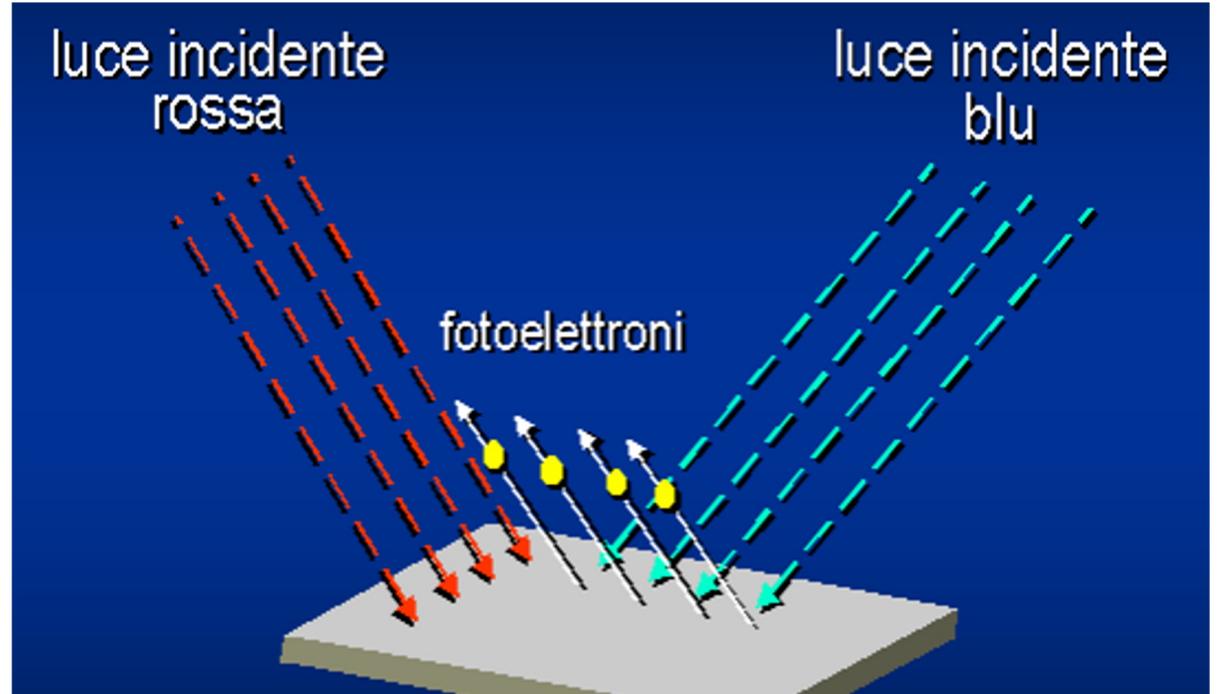
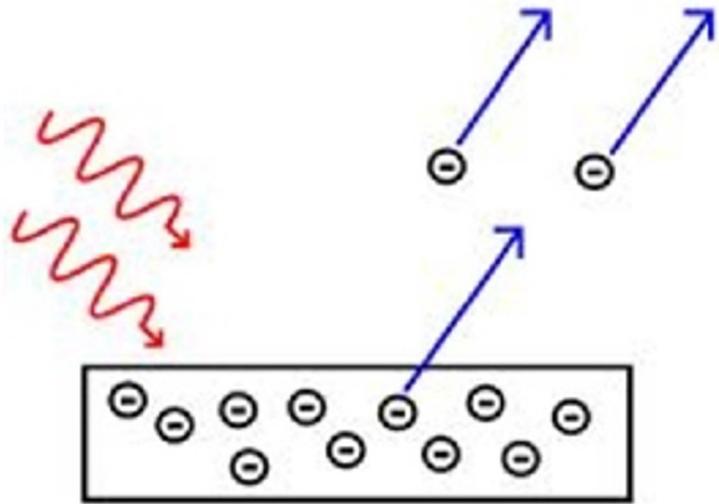
Albert Einstein ipotizzò nel 1905 che la **luce**, a livello microscopico, fosse costituita non da onde, ma **da particelle**, che chiamò **quanti di luce** (ora **fotoni**). Se  $\nu$  è la frequenza della luce, l'energia di quei fotoni è data da  $E = h \nu$ , con  $h$  costante di Planck:  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Grazie a tale ipotesi riuscì a spiegare **l'effetto fotoelettrico**, per il quale vinse il premio Nobel nel 1921.

# Albert Einstein (1879-1955)



# Effetto fotoelettrico e fotoni



Metallo illuminato dalla luce

Fotoni:  $E = h\nu < E = h\nu$

# Louis de Broglie (1892-1987)



# Onde e particelle

Louis De Broglie nel 1924 sostenne che a livello microscopico vi è una compresenza di onda e particella. Ogni particella è accompagnata da un'onda fisica (onda materiale), che guida la particella (onda pilota)

Ricavò la seconda forma del dualismo onda/particella

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

La lunghezza d'onda di de Broglie  $\lambda$  risulta associata a tutte le particelle massive con momento  $p = \gamma m v$

Come le onde EM hanno un aspetto particellare ( $E = h\nu$ ), le particelle hanno un comportamento ondulatorio

# La Fisica dei quanti

Planck (1900):  
il corpo nero e la  
quantizzazione  
dell'energia

$$E = h\nu$$

Einstein (1905):  
la spiegazione  
dell'effetto  
fotoelettrico

Quanto di luce come ente fisico

de Broglie (1924):  
l'ipotesi delle onde  
materiali

$$\lambda = h/p$$

Quanto di luce ( $E = h\nu$ ) e onde materiali ( $\lambda = h/p$ ) sono due aspetti del dualismo onda/particella che caratterizza, a livello di ontologia primitiva, la MQ non relativistica



# Meccanica quantistica

# Il modello atomico di Bohr

Il modello atomico di Bohr è ricavabile in modo semplice a partire dalla periodicità dell'onda di de Broglie associata all'elettrone, aggiungendovi il dualismo onda/particella  $\lambda = h/p$

Periodicità dell'onda di de Broglie

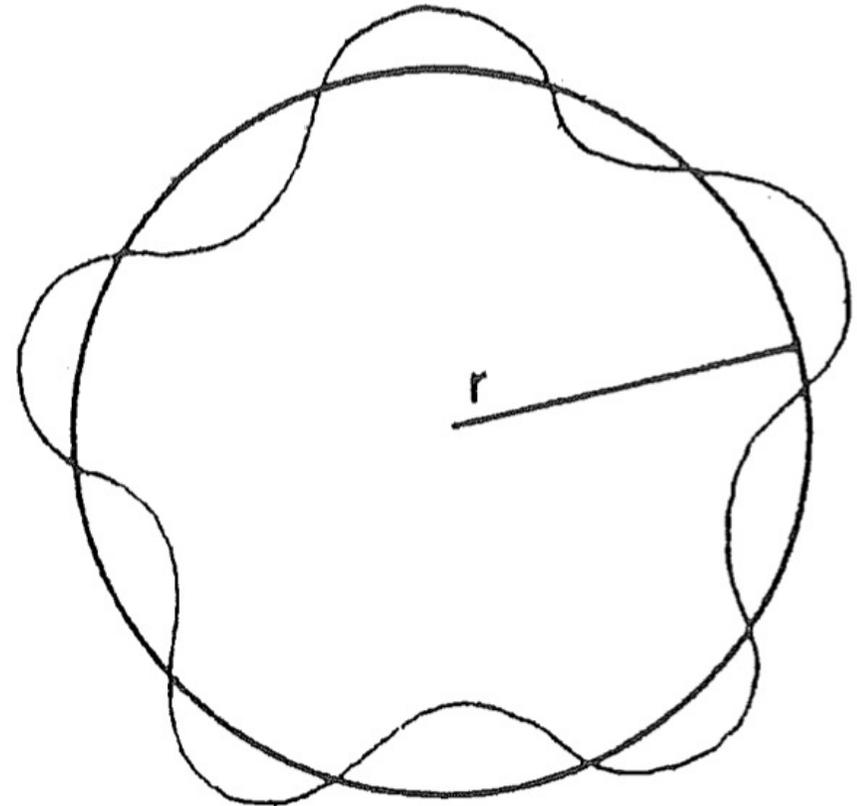
$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Dualismo onda/particella

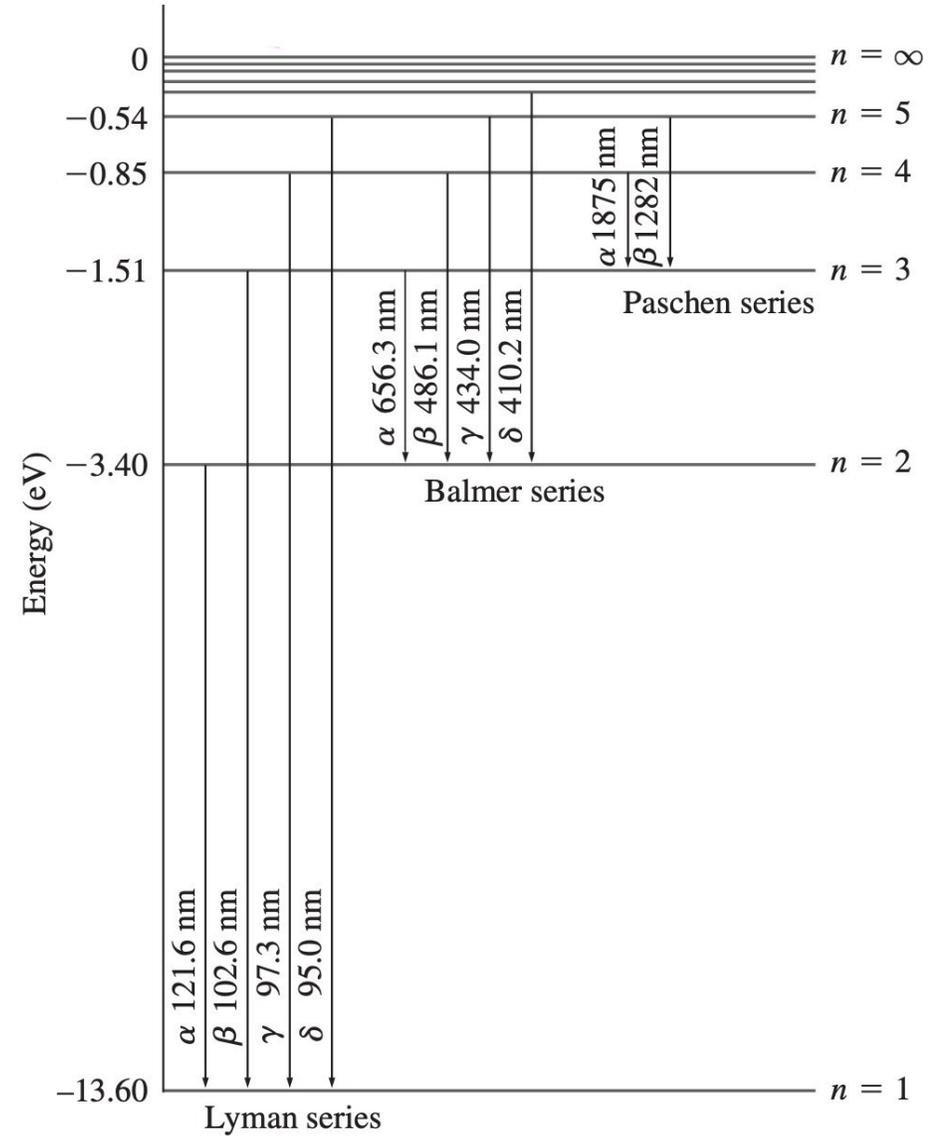
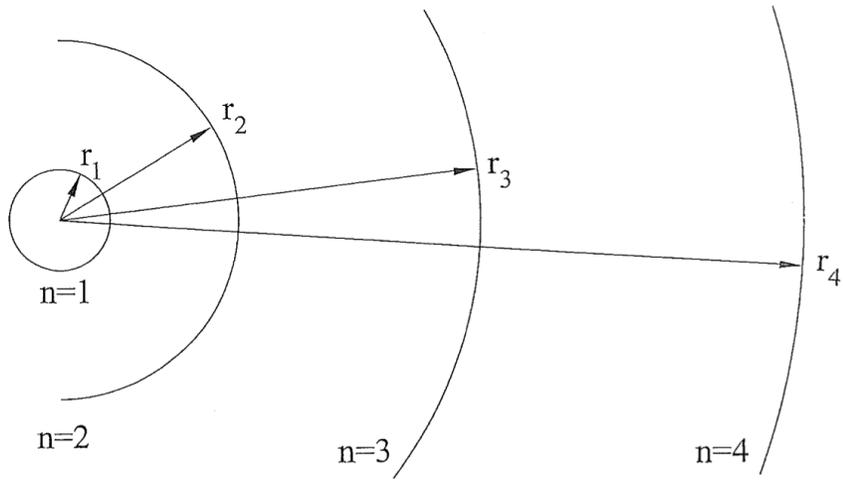
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v}$$

Condizione di quantizzazione

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar$$



# Il modello atomico di Bohr



# L'equazione di Schrödinger

L'equazione di Schrödinger è ricavabile in modo semplice a partire dall'equazione di d'Alembert delle onde, aggiungendovi il dualismo onda/particella  $\lambda = h/p$

Onda monocromatica

$$\psi(x, t) = A \sin[k(x - v_f t)]$$

Equazione d'onda classica di d'Alembert

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -k^2\psi = -\frac{4\pi^2}{\lambda^2}\psi$$

Dualismo onda/particella

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

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{8\pi^2 m_e}{h^2} K \psi$$

$$K = E - V$$

Equazione d'onda per un elettrone non relativistico

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{8\pi^2 m_e}{h^2} (E - V) \psi$$

# L'equazione di Schrödinger: il significato della funzione d'onda

Nell'equazione compare la **funzione d'onda**  $\psi$  che è un **numero complesso**. Quindi non ha un'interpretazione fisica: le quantità fisiche devono essere **numeri reali**

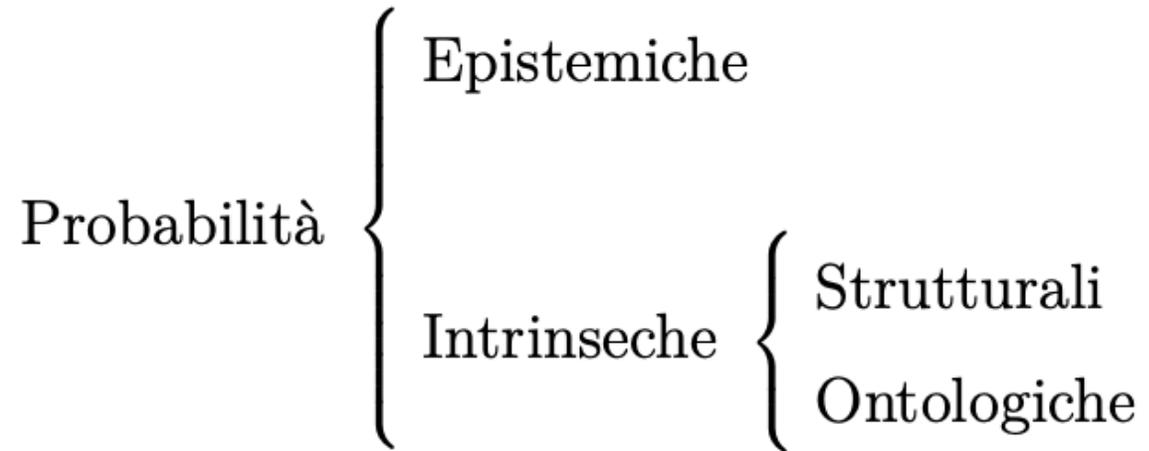
**Schrödinger**: considera le quantità reali  $\rho_m = m|\psi|^2$  e  $\rho_e = e|\psi|^2$  interpretandole rispettivamente come **densità di massa** e **densità di carica** associate all'elettrone. Tale ipotesi non funziona a causa della progressiva **dispersione del pacchetto d'onde**

**Born**: interpreta la funzione d'onda  $\psi$  come **onda di probabilità**.

La quantità  $\rho_p = |\psi|^2 = \psi^*\psi$  rappresenta la **densità di probabilità** di rinvenire l'elettrone entro un volume infinitesimo  $dV$  al tempo  $t$ . La  $\psi$  non è un ente fisico (è un numero complesso): è **un'ampiezza di probabilità**

# L'equazione di Schrödinger: probabilismo intrinseco

Le probabilità che compaiono in MQ non sono più epistemiche (FC) ma intrinseche



*La meccanica quantistica è una teoria intrinsecamente probabilistica*

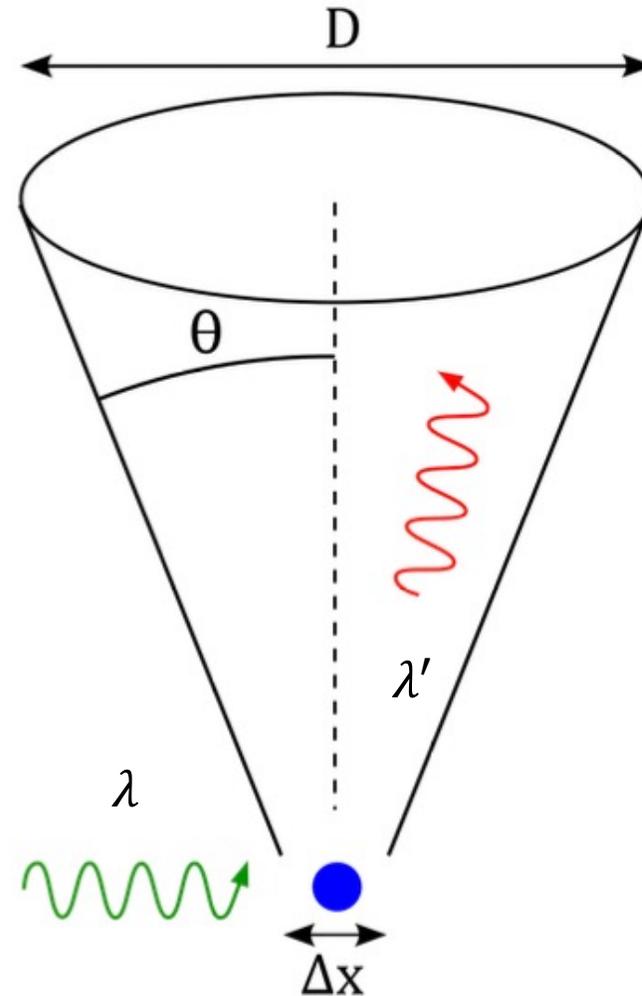
# Indeterminazione operativa di Heisenberg: l'esperimento mentale del microscopio

$$\Delta x \simeq \frac{\lambda'}{2 \sin \theta}$$

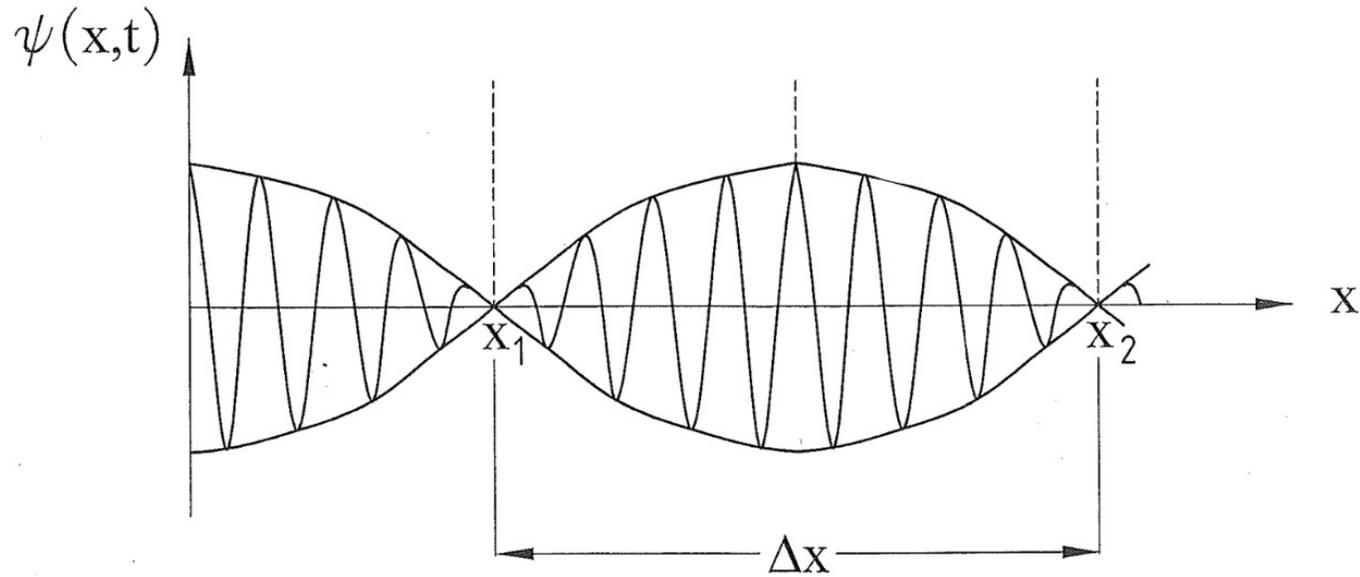
$$\Delta p_x \simeq \frac{h}{\lambda'} 2 \sin \theta$$

Relazione d'indeterminazione  
posizione/momento

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \simeq h$$



# Battimenti: relazioni di dispersione di Fourier



$$n = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{k}{2\pi} \Delta x$$

$$n + 1 \leq \frac{\Delta x}{\lambda'} = \frac{k'}{2\pi} \Delta x$$

$$1 \leq \frac{k' - k}{2\pi} \Delta x$$

$$\Delta x \cdot \Delta k \geq 2\pi$$

$$n = \frac{\Delta t}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \Delta t$$

$$n + 1 \leq \frac{\Delta t}{T'} = \frac{\omega'}{2\pi} \Delta t$$

$$1 \leq \frac{\omega' - \omega}{2\pi} \Delta t$$

$$\Delta \omega \cdot \Delta t \geq 2\pi$$

# Indeterminazione intrinseca di Bohr

L'indeterminazione di Bohr è ricavabile in modo semplice a partire dalle relazioni di dispersione di Fourier, aggiungendovi il dualismo onda particella

Relazioni di dispersione di Fourier per dei battimenti

$$\Delta x \cdot \Delta k \geq 2\pi$$

$$\Delta \omega \cdot \Delta t \geq 2\pi$$

Dualismo onda/particella

$$p_x = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

$$\Delta k = \frac{\Delta p_x}{\hbar}$$

$$\Delta \omega = \frac{\Delta E}{\hbar}$$

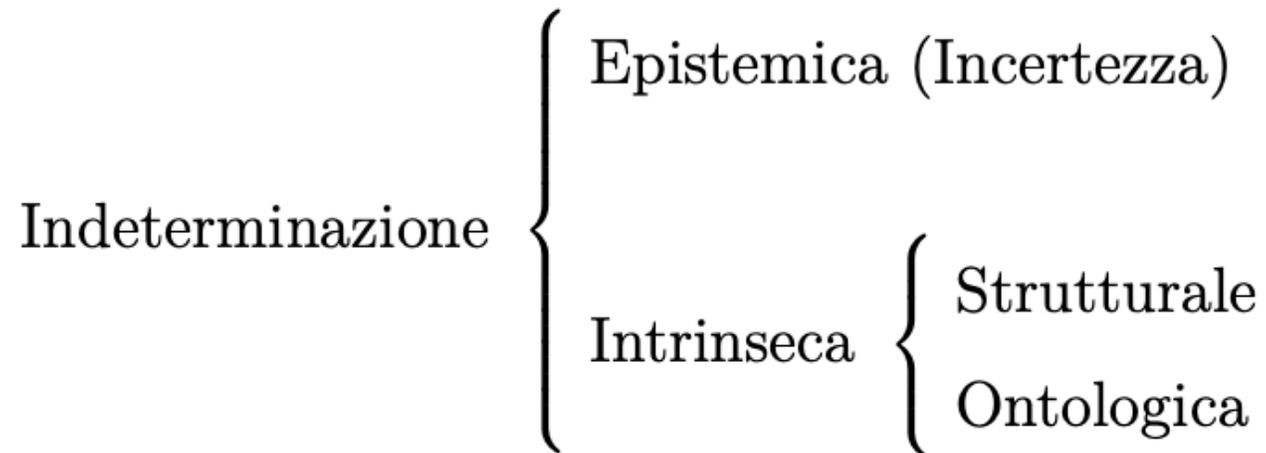
Relazioni d'indeterminazione

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

# Le relazioni d'indeterminazione: indeterminismo intrinseco

A differenza dell'incertezza classica (errore di misura) l'indeterminazione quantistica non è arbitrariamente riducibile

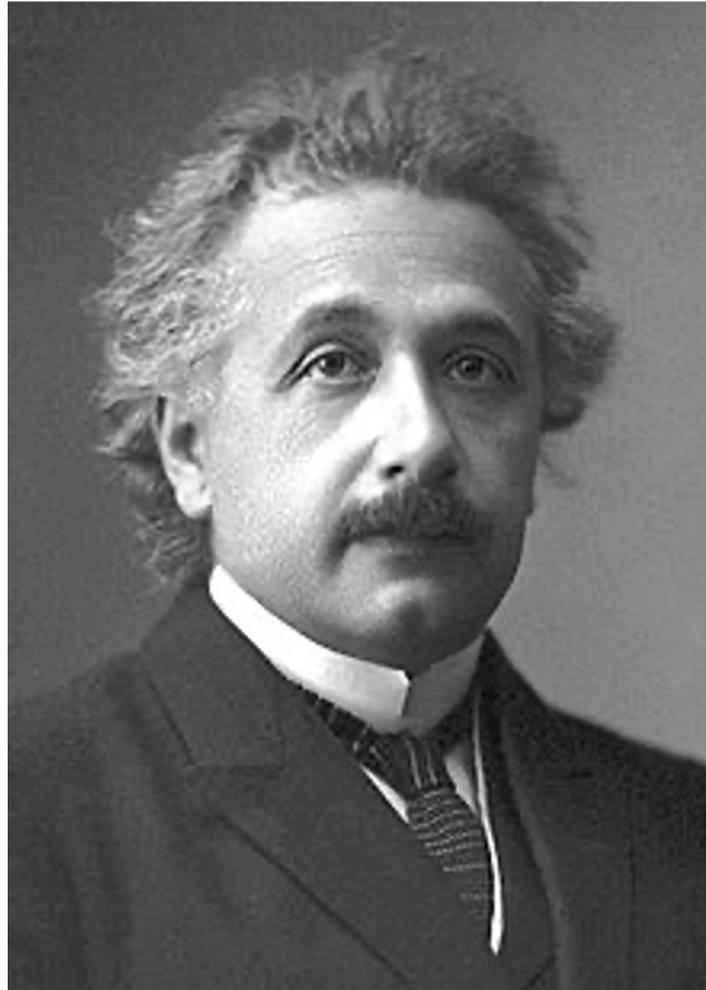


*La meccanica quantistica è una teoria intrinsecamente indeterministica*



# Dualismo onda/particella

# Albert Einstein (1879-1955)



## Dualismo onda/particella (1909)

Einstein, 1909. Analisi statistica della radiazione del corpo nero:  
varianza  $\sigma^2$  della media  $\langle n \rangle$

Fluttuazioni attorno al valor medio  $\langle n \rangle$  di quanti  $\sigma^2 = \langle n \rangle + \langle n \rangle^2$

- Sistemi di **particelle**  $\sigma^2 = \langle n \rangle$  (stat. Poisson)
- Sistemi di **onde**  $\sigma^2 = \langle n \rangle^2$  (interferenza)

Risultato **sconcertante**: il corpo nero mostra un **comportamento sia ondulatorio sia particellare**. Se non ci fossero entrambi, verrebbe meno la **conservazione dell'energia** (Einstein, 1911)

# Louis de Broglie (1892-1987)



## Onde e particelle (1924)

Louis De Broglie nel 1924 sostenne che a livello microscopico vi è una compresenza di onda e particella. Ogni particella è accompagnata da un'onda fisica (onda materiale), che guida la particella (onda pilota)

Ricavò la seconda forma del dualismo onda/particella

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

La lunghezza d'onda di de Broglie  $\lambda$  risulta associata a tutte le particelle massive con momento  $p = \gamma m v$

Come le onde EM hanno un aspetto particellare ( $E = h\nu$ ), le particelle hanno un comportamento ondulatorio

# Werner Heisenberg (1901-1976)



## Né onde, né particelle (1925)

Heisenberg propose nel 1925, assieme a Born e Jordan, la meccanica matriciale, prima formulazione della MQ. Si tratta del calcolo di quantità fisiche espresse mediante matrici

Vi era la rinuncia a qualsiasi tipo di visualizzazione del fenomeno fisico: né orbite, né elettroni. Si facevano solo dei calcoli: si trattava d'una «ritirata nel formalismo matematico»

Positivismo scientifico: nessuna ontologia, né *Weltanschauung*, nessun modello di realtà fisica. Filosofia ridotta a pura metodologia

# Erwin Schrödinger (1887-1961)



# Equazione di Schrödinger

Nel 1926 Erwin Schrödinger ricavò l'equazione d'onda per le onde materiali di de Broglie, che oggi porta il suo nome

Nell'equazione compare la funzione d'onda  $\psi$  che è un numero complesso. Quindi non ha un'interpretazione fisica: le quantità fisiche devono essere numeri reali

La densità dell'onda  $|\psi|^2 = \psi^*\psi$  è una quantità reale, che Schrödinger associò inizialmente alla densità di carica elettrica degli elettroni presenti nell'atomo

Ma tale densità si disperde nello spazio al passare del tempo. Non è quindi associabile alla densità di carica, che resta sempre confinata in una regione spaziale

## Solo onde, senza particelle (1926)

Erwin Schrödinger rimase tuttavia sempre convinto che la realtà essenziale del mondo quantistico fosse fatta di onde, non di particelle

L'idea di descrivere la realtà fisica solo mediante campi (EM) era stata introdotta a fine Ottocento dalla concezione EM della natura

Venne ripresa dagli anni '30 in poi da Einstein e de Broglie (teoria dell'onda pilota e della doppia soluzione), postulando un campo quantico al posto dell'EM

Negli anni '50 del Novecento Schrödinger ribadì più volte la sua tesi: «Le particelle sono semplici apparenze». Ma non fornì le equazioni del campo quantico

# Max Born (1882-1970)



## Solo particelle, senza onde (1926)

Max Born nel 1926 interpretò invece la densità  $|\psi|^2 = \psi^*\psi$  come densità di probabilità di rinvenire la particella in un volume infinitesimo

Per Born la funzione d'onda  $\psi$  non è un ente fisico (è un numero complesso): è un'ampiezza di probabilità. La MQ diventa una teoria intrinsecamente probabilistica (idea sempre avversata da Einstein: «Dio non gioca a dadi» )

Se la  $\psi$  è un ente matematico, la realtà quantistica risulta costituita solo da particelle

# Niels Bohr (1885-1962)



## Onde e particelle (1927)

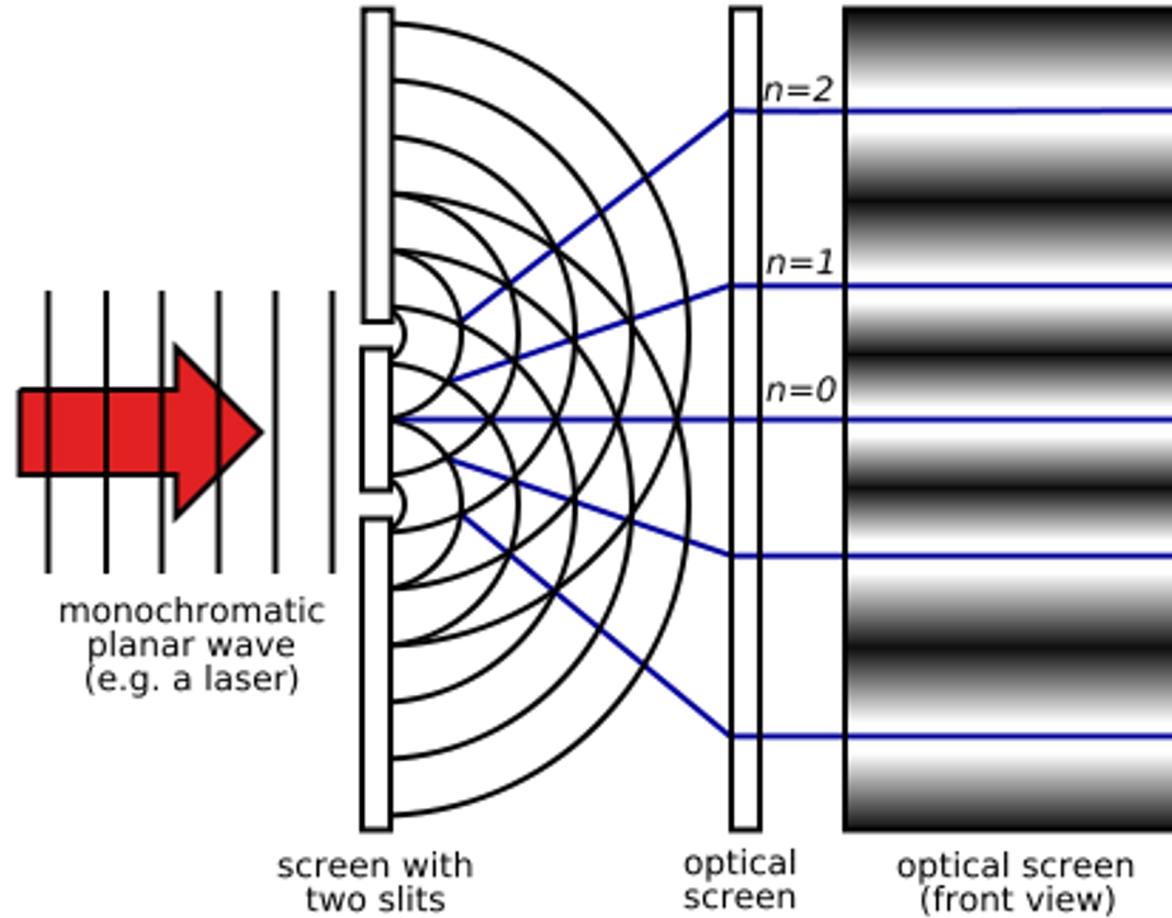
Niels Bohr nel 1927 enuncia il “*principio di complementarità*”, secondo il quale non è possibile, in linea di principio, attribuire in modo univoco agli enti quantistici proprietà di onda o di particella

Essi avrebbero **statuto ontologico non definito**, e si manifesterebbero **a livello epistemico come onde o come particelle** (facce della moneta), **a seconda dello strumento d'indagine che si utilizza negli esperimenti** (se uso un interferometro, onde se uso un contatore Geiger, particelle)

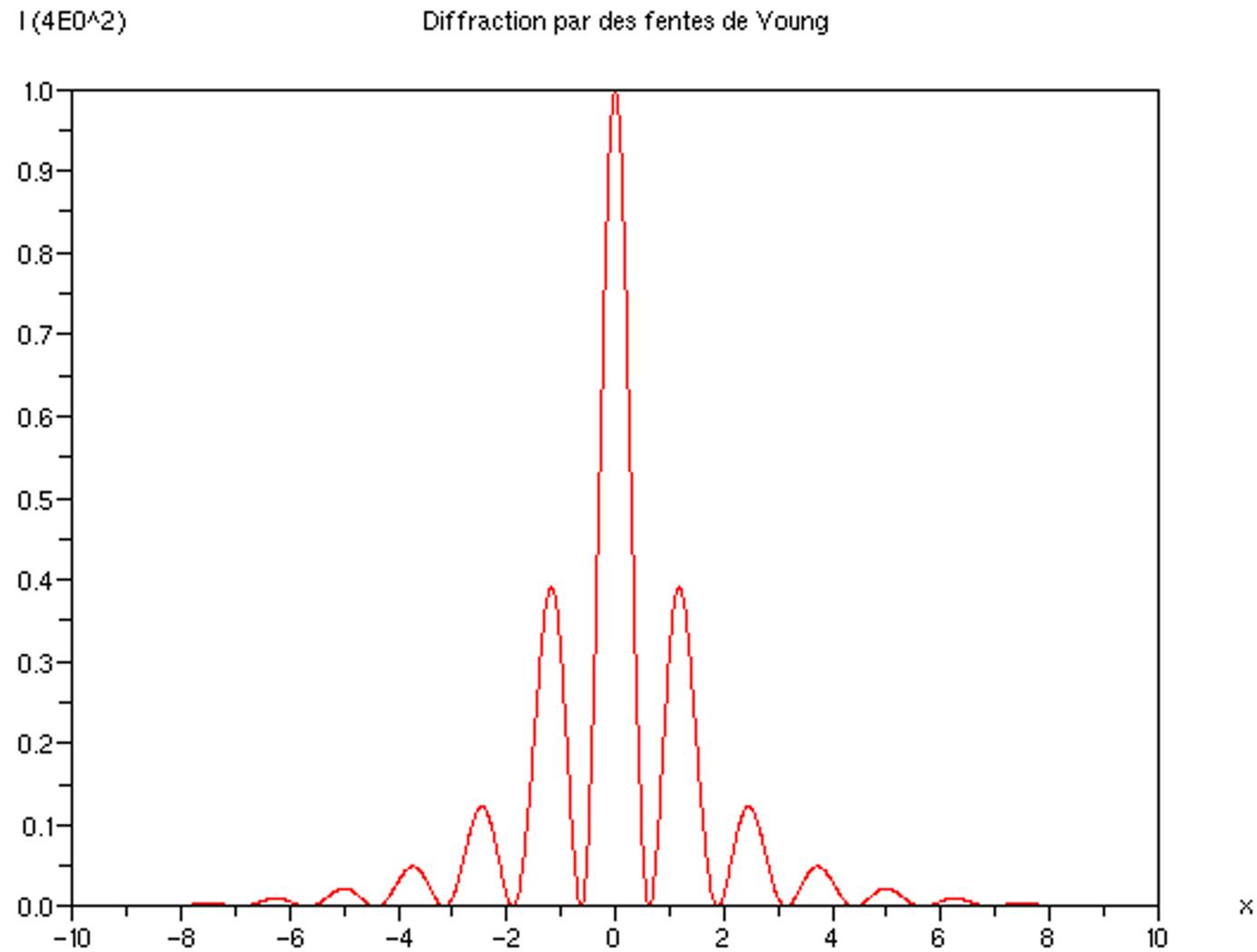
# Richard Feynman (1918-1988)



# Doppia fenditura con le onde: interferenza



# Intensità dei picchi d'interferenza



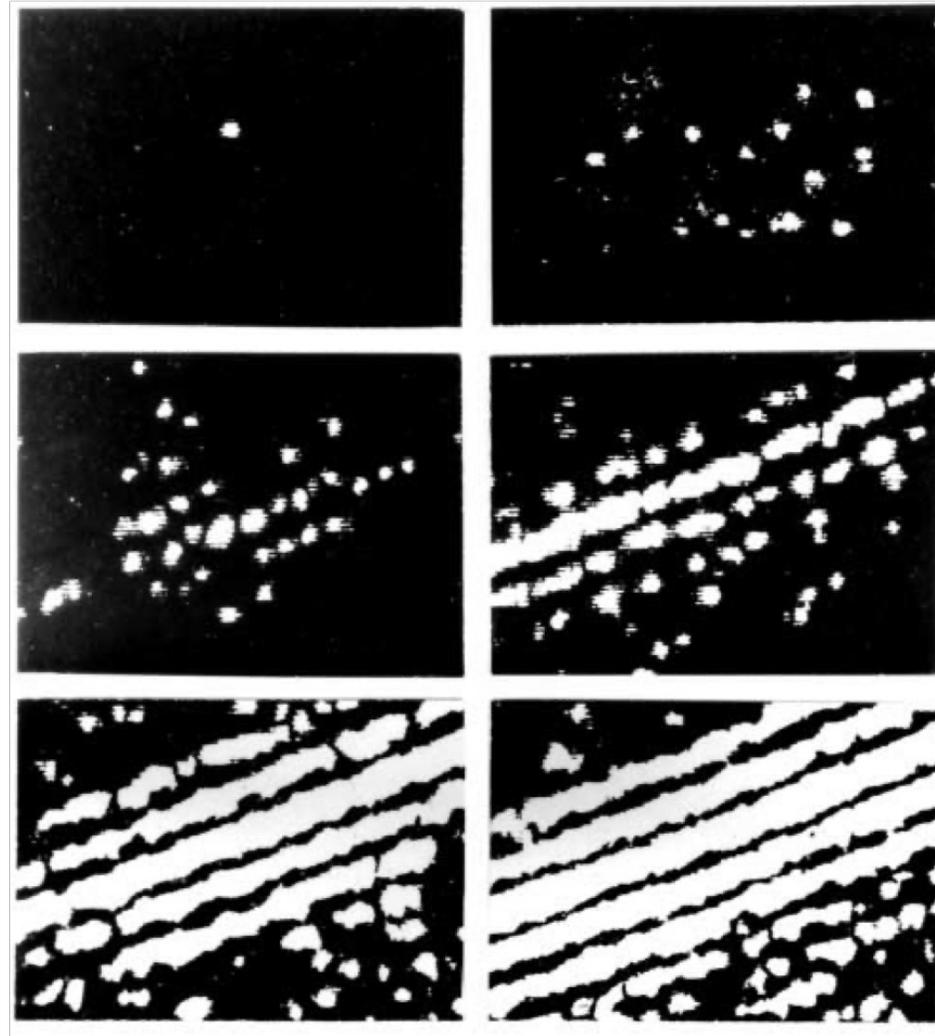
## L'esperimento mentale (1965)

L'esperimento della doppia fenditura con degli elettroni singoli:

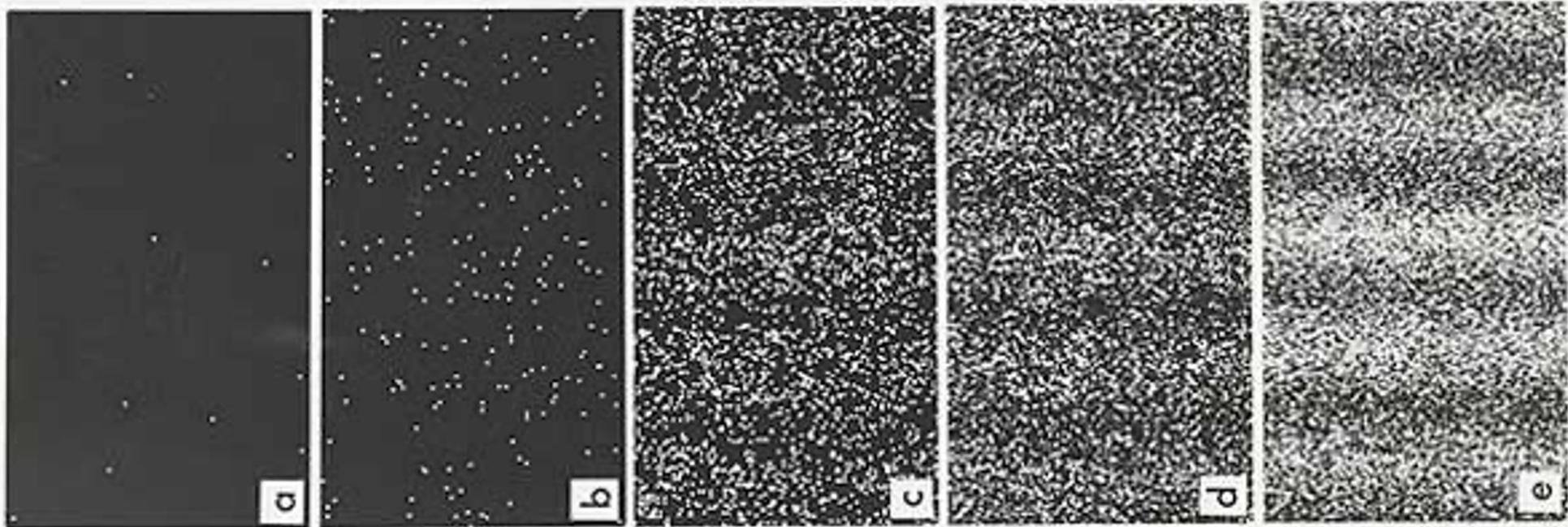
*«Prenderò questo solo esperimento che è stato formulato in modo da contenere tutti i misteri della meccanica quantistica, così da mettervi interamente di fronte ai misteri, ai paradossi e alle particolarità della natura. Qualsiasi altra situazione della meccanica quantistica può sempre essere spiegata dicendo: “Vi ricordate dell'esperimento delle due fenditure? È la stessa cosa”.»*

Feynman – *The Feynman Lectures on Physics* – vol.3 (1965)

# Merli, Missiroli, Pozzi (1976)



## Tonomura (1989)



10 – 200 – 6.000 – 40.000 – 140.000 elettroni

# L'esperimento di Young per elettroni

Come si comportano degli elettroni inviati, uno alla volta, attraverso una doppia fenditura? Si tratta di particelle dotate di massa. Ma la figura che si forma sullo schermo dopo che molti elettroni si sono accumulati sulla lastra è tipica delle onde: si vedono le frange d'interferenza!

Dove sta il mistero? Per avere la figura d'interferenza, il singolo elettrone dovrebbe essere passato contemporaneamente da entrambe le fenditure

Ma si tratta, per la fisica classica, di una particella dotata di massa, ovvero di un ente singolo

# Una spiegazione ad hoc

Usando le **categorie classiche** di **onda** e di **particella**, si dice talvolta che l'elettrone

- **Si propaga come un'onda** tra la sorgente e lo schermo
- **Interagisce come una particella** sullo schermo

Tuttavia in fisica classica **non esistono enti che abbiano un simile comportamento**: si tratta di **una spiegazione *ad hoc***, non soddisfacente

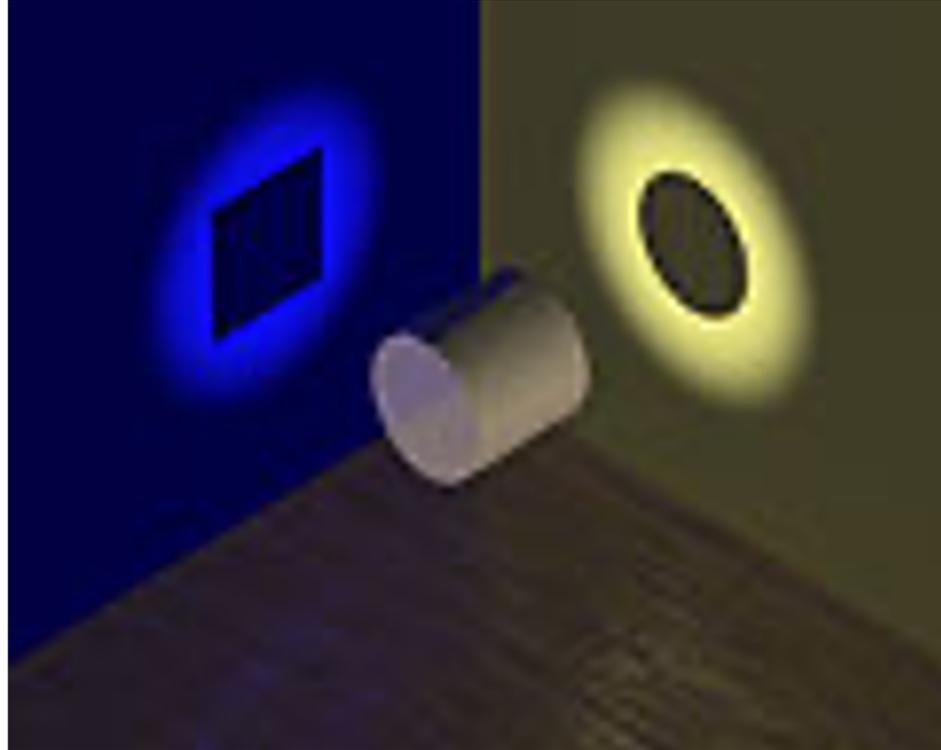
## Né onde, né particelle (1965)

*«Dobbiamo concludere che l'elettrone non si comporta in nessuno dei due modi ... **non è né l'una né l'altra cosa.** Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti “onde-particelle”, o qualunque altro nome vi piaccia dar loro.»*

Feynman – *The Feynman Lectures on Physics* – vol.3 (1965)

L'epistemologo **Mario Bunge** ha proposto nel **1967** il nome di **quantoni** per gli enti della MQ

# Come immaginare un quantone?



# Bosoni o fermioni

Il teorema di **connessione tra spin e statistica**, formulato da **Wolfgang Pauli** nel **1940**, identifica due tipi di enti quantici:

1. **Bosoni** con *spin* intero (0, 1, 2...)
2. **Fermioni** con *spin* semi-dispari ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ ...)

Tutti gli enti microfisici (**quantoni**) sono classificabili o come **bosoni** o come **fermioni**

**Bosoni** obbediscono alla **statistica di Bose/Einstein**

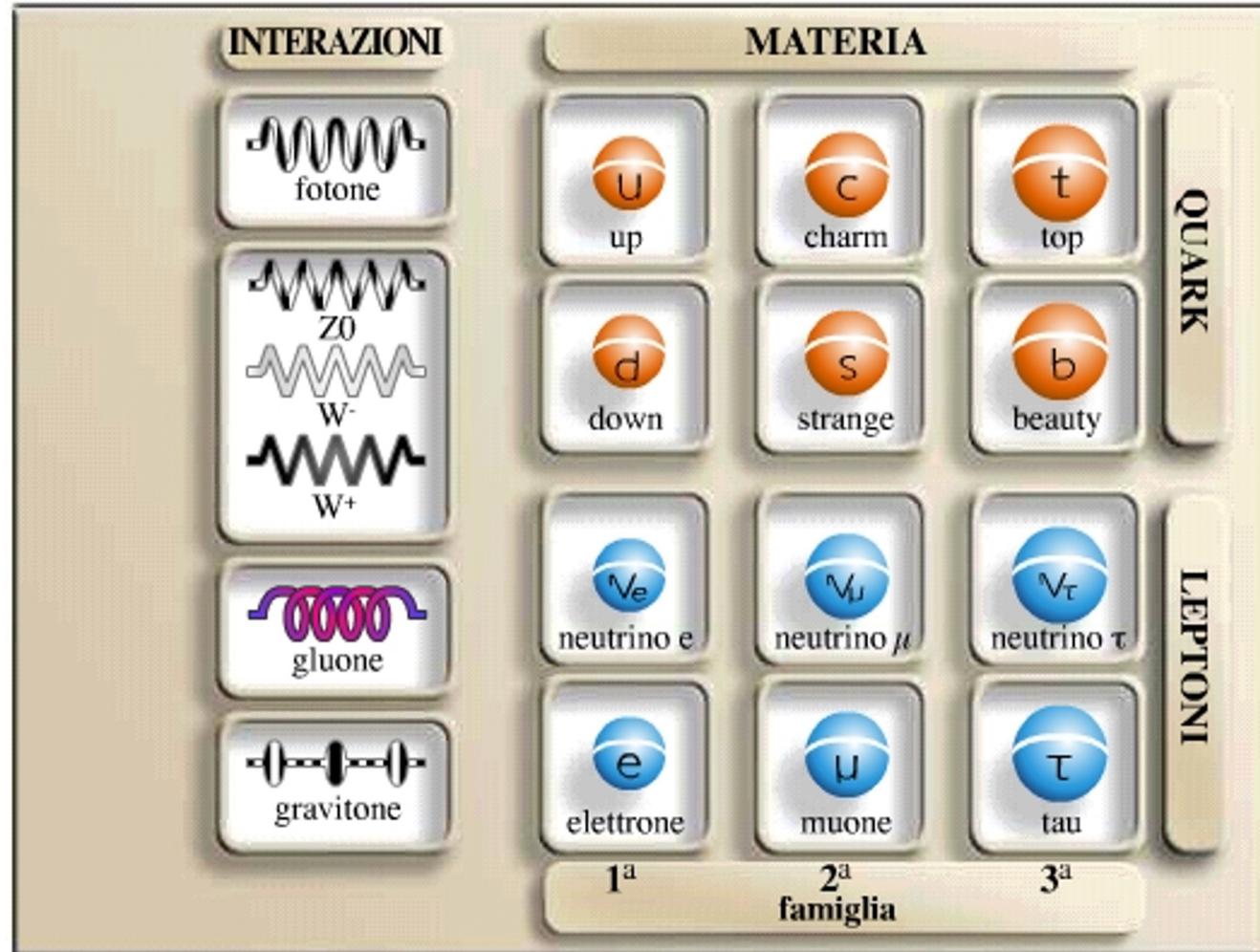
**Fermioni** seguono la **statistica di Fermi/Dirac**

La **struttura ontologica** della **realtà quantistica** è costituita non da onde e/o particelle (FC), ma da **bosoni o fermioni**, costituenti elementari della materia

# Proprietà dei quantoni

- Assenza di traiettoria
- Quantoni identici sono indistinguibili
- *Probabilismo intrinseco*
- *Indeterminismo intrinseco*
- Dotati di *spin*
- Sono *bosoni* o *fermioni*
- Statistica di *Bose/Einstein* o *Fermi/Dirac*

# Bosoni e fermioni elementari



# Conclusioni

Alla fine del percorso didattico gli studenti:

- 1.avranno capito come ricavare i principali risultati quantistici (atomo di Bohr, equazione di Schrödinger, disuguaglianze di Bohr) a partire da semplici concetti classici, integrati dal dualismo onda/particella
- 2.avranno compreso l'evoluzione storica avvenuta nell'ontologia primitiva della MQ: da onde/particelle a bosoni/fermioni
- 3.sapranno distinguere la struttura formale di una teoria dalle sue interpretazioni, come pure il realismo scientifico da quello strutturale
- 4.potranno trovare parallelismi tra Fisica e Filosofia, grazie al carattere fortemente interdisciplinare di questa proposta.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA  
DIPARTIMENTO DI FISICA  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE FISICHE

---

**Una proposta per l'insegnamento  
della meccanica quantistica nella  
scuola secondaria di secondo grado**

Tesi per la Laurea Magistrale di:  
Annamaria UCCI

Relatore:  
Prof. Gianluca INTROZZI

A.A. 2021 – 2022

**Grazie per l'attenzione**