

MECCANICA QUANTISTICA e TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Francesco Pepe

Università degli Studi di Bari - Dipartimento Interateneo di Fisica

PERCORSI DI FISICA

Orientamento consapevole 2023

FISICA CLASSICA

MECCANICA

**TERMODINAMICA e
MECCANICA STATISTICA**

**ELETTROMAGNETISMO e
OTTICA**

1600 → 1900

FISICA CLASSICA

MECCANICA

TERMODINAMICA e
MECCANICA STATISTICA

ELETTROMAGNETISMO e
OTTICA

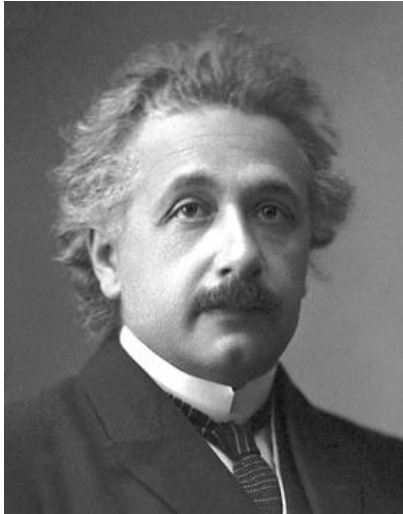
1600 → 1900

Nel **1878**, Philipp von Jolly suggerisce al suo allievo **Max Planck** di abbandonare la fisica, perché secondo lui era stato ormai scoperto quasi tutto

“FISICA MODERNA”

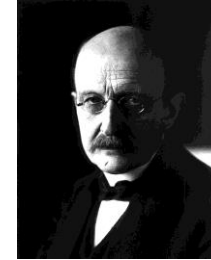
TEORIA DELLA RELATIVITÀ

(ristretta 1905, generale 1916)

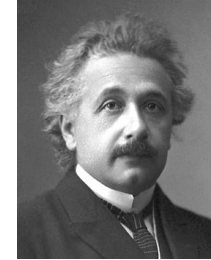


MECCANICA QUANTISTICA

(1901-1930 e oltre)



Planck



Einstein



Bohr



Schrödinger



Heisenberg

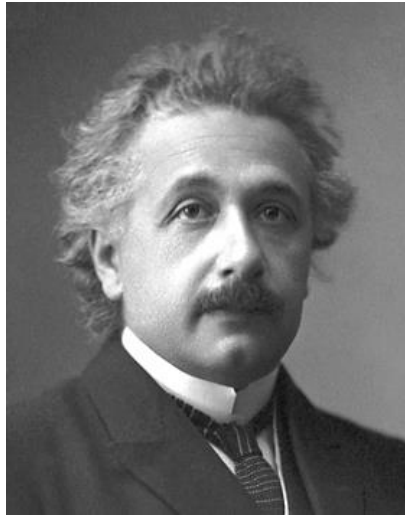


Dirac

“FISICA MODERNA”

TEORIA DELLA RELATIVITÀ

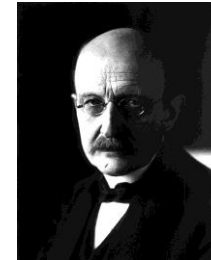
(ristretta 1905, generale 1916)



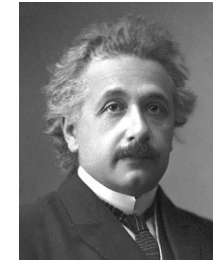
Cambia la legge fisica che determina il moto delle particelle, ma **non cambiano gli strumenti per descrivere** il moto (posizione e velocità)

MECCANICA QUANTISTICA

(1901-1930 e oltre)



Planck



Einstein



Bohr



Schrödinger



Heisenberg



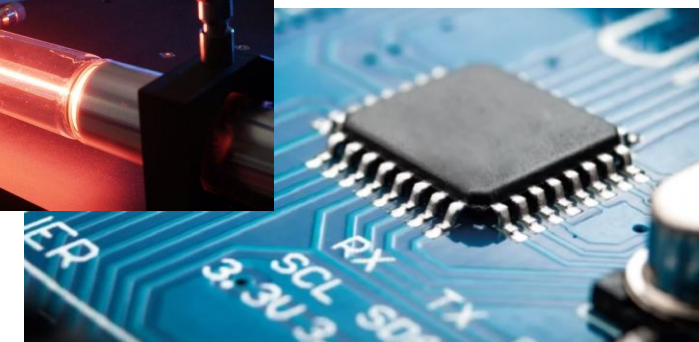
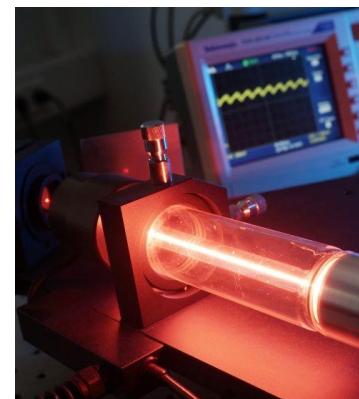
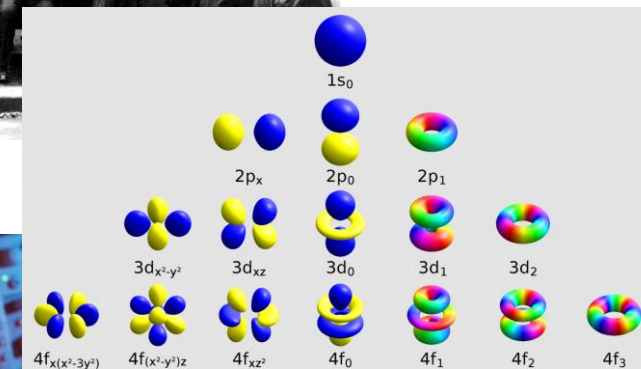
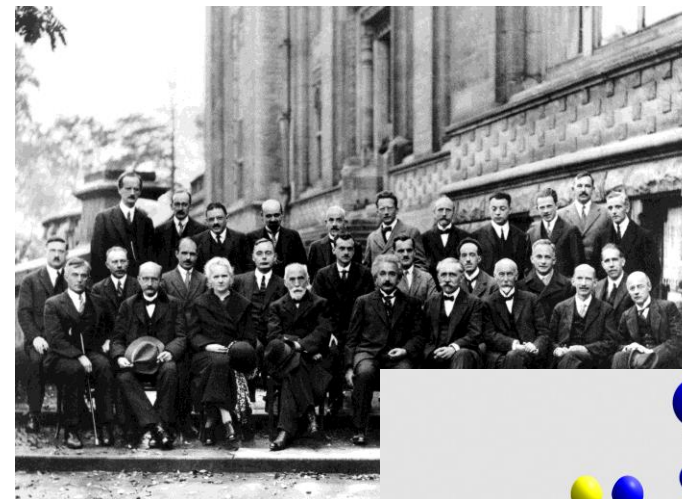
Dirac

Lo stesso **modo di descrivere la realtà fisica** viene messo radicalmente in discussione

MECCANICA QUANTISTICA? PUNTI DI VISTA...

Per gli addetti ai lavori:

- la teoria (o meglio, un insieme di teorie con una base concettuale comune) che *descrive la natura nella maniera più accurata possibile*
- la base della maggior parte dello **sviluppo tecnologico** dalla seconda metà del Novecento, *e di quello che avverrà nel prossimo futuro*



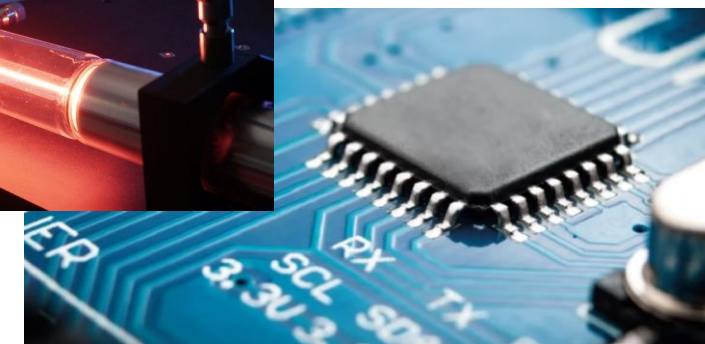
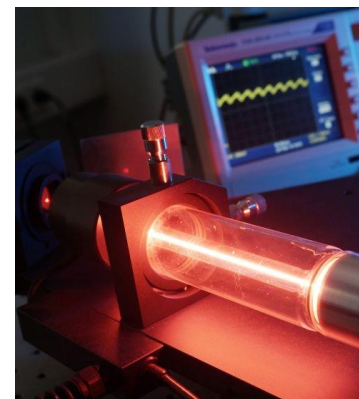
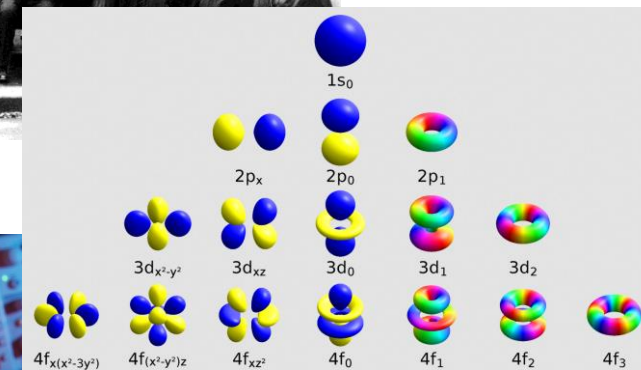
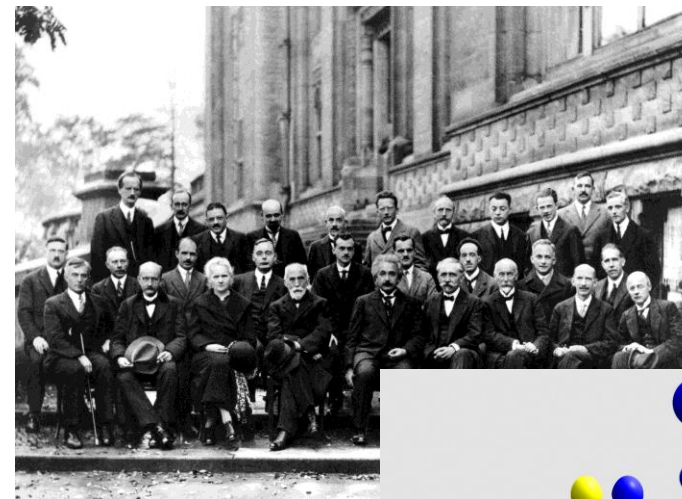
MECCANICA QUANTISTICA? PUNTI DI VISTA...

Per gli addetti ai lavori:

- la teoria (o meglio, un insieme di teorie con una base concettuale comune) che *descrive la natura nella maniera più accurata possibile*
- la base della maggior parte dello **sviluppo tecnologico** dalla seconda metà del Novecento, *e di quello che avverrà nel prossimo futuro*

Per il pubblico:

- sostanzialmente un oggetto misterioso



...MA QUALCOSA STA CAMBIANDO

TOP NEWS

LA STAMPA

Google ha raggiunto la supremazia quantistica, ma cos'è un quantum computer?

Per capire l'importanza del processore più potente del mondo, ci siamo fatti spiegare come funziona e che cosa potrà fare in futuro da Andrea Cavalli, ricercatore dell'Iit



EMANUELE CAPONE

PUBBLICATO IL 21 Novembre 2019

Tecnologia Le promesse del quantum computing: come i qubit cambiano il modo di fare banca

Le promesse del quantum computing: come i qubit cambiano il modo di fare banca

In vista una crescita esponenziale della capacità computazionale. Le banche si preparano: dal trading alla sicurezza al risk management benefici ovunque

di Pierangelo Soldavini

21 aprile 2022



ANSA.it > Scienza&Tecnica > Tecnologie > Corsa ai computer quantistici, dai governi 25 miliardi di dollari

Corsa ai computer quantistici, dai governi 25 miliardi di dollari

Scese in campo Amazon, Ibm e Google, accanto a tante startup



Leonardo De Cosmo

10 febbraio 2022 12:25

Scrivi alla redazione Stampa

News | Multimedia | RAGAZZI | OSSERVATORIO IA | ENGLISH

SPAZIO&ASTRONOMIA • BIOTECH • TECNOLOGIE • FISICA&MATEMATICA • ENERGIA • TERRA&POLI • RICERCA&ISTITUZIONI • LIBRI • SCIENZA&ARTE

ANSA.it > Scienza&Tecnica > Tecnologie > Il computer quantistico sa correggere i suoi errori VIDEO

Il computer quantistico sa correggere i suoi errori VIDEO

Aperta la strada alle applicazioni di queste macchine potentis:



Enrica B.

Vuoi saperne di più? Fai una domanda

INDIETRO | Ricerca scientifica



trappolati (fonte: Aws) - RIPRODUZIONE RISERVATA



I computer quantistici: cosa sono e cosa fanno

I computer quantistici: importante innovazione digitale che avrà un impatto in diversi ambiti scientifici.

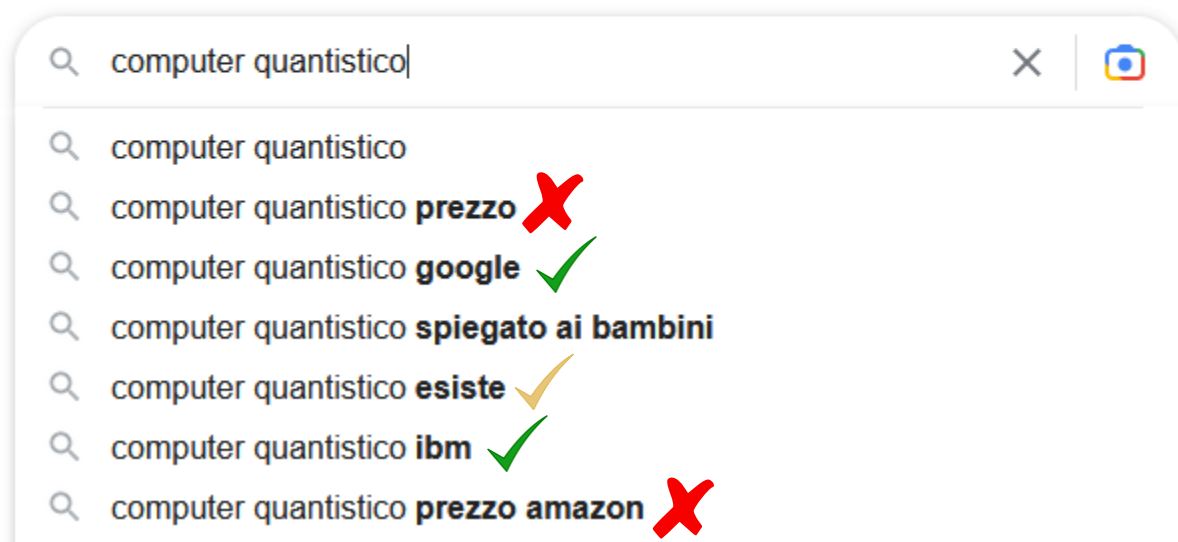
di Andrea Daniele Signorelli | 05 FEBBRAIO 2020 | 7 min di lettura



🔍 computer quantistico|



- 🔍 computer quantistico
- 🔍 computer quantistico **prezzo**
- 🔍 computer quantistico **google**
- 🔍 computer quantistico **spiegato ai bambini**
- 🔍 computer quantistico **esiste**
- 🔍 computer quantistico **ibm**
- 🔍 computer quantistico **prezzo amazon**



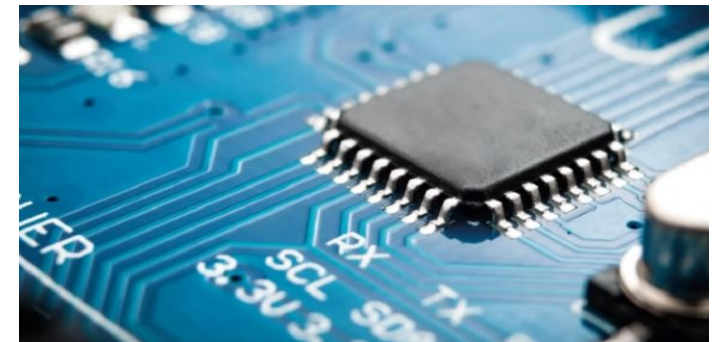
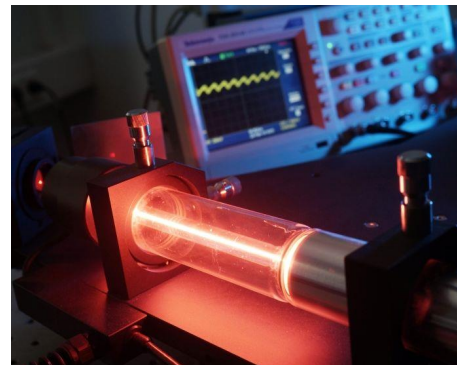
MECCANICA QUANTISTICA E VITA QUOTIDIANA

La meccanica quantistica è distante dalla nostra esperienza quotidiana, per cui basta conoscere una certa quantità di fisica classica

- un oggetto lasciato scivolare dalle nostre mani cade, toccando un oggetto incandescente potremmo ustionarci, la corrente elettrica può essere letale
- chi opera nell'ingegneria civile o edile deve applicare alla perfezione la seconda legge di Newton, ma può tranquillamente ignorare l'equazione di Schrödinger
- ...

Malgrado questo, la maggior parte dei dispositivi tecnologici che utilizziamo sono basati sulla fisica quantistica

- Transistor → circuiti integrati
- Laser
- LED
- ...



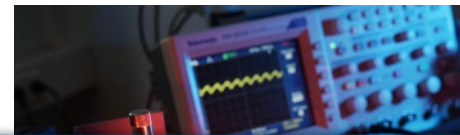
MECCANICA QUANTISTICA E VITA QUOTIDIANA

La meccanica quantistica è distante dalla nostra esperienza quotidiana, per cui basta conoscere una certa quantità di fisica classica

- un oggetto lasciato scivolare dalle nostre mani cade, toccando un oggetto incandescente potremmo ustionarci, la corrente elettrica può essere letale
- chi opera nell'ingegneria civile o edile deve applicare alla perfezione la seconda legge di Newton, ma può tranquillamente ignorare l'equazione di Schrödinger
- ...

Malgrado questo, la maggior parte dei dispositivi tecnologici che utilizziamo sono basati sulla fisica quantistica

- Transistor → circuiti integrati
- Laser
- Led
- ...



**Abbiamo già vissuto una “rivoluzione quantistica” tecnologica.
Perché oggi parliamo di **seconda rivoluzione quantistica**?**



DUE IDEE DI LUCE

Modello corpuscolare (Newton)

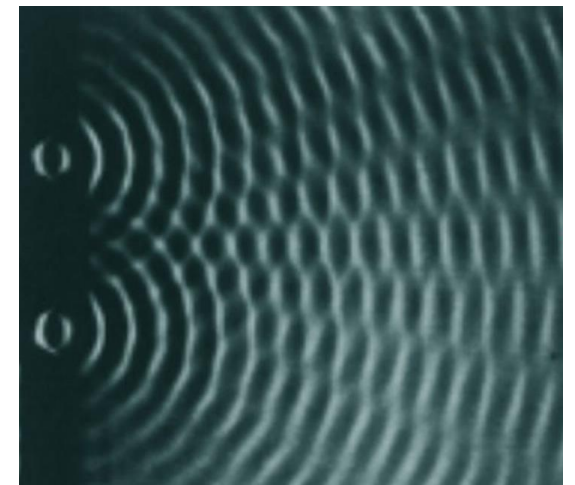
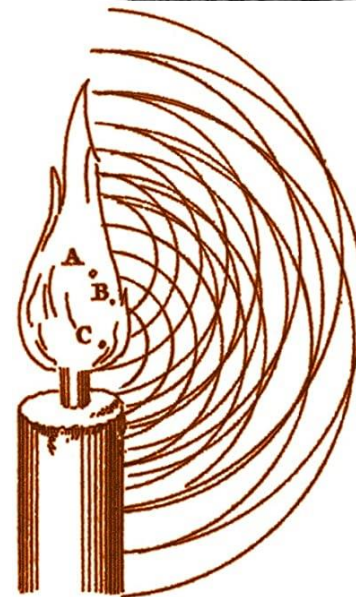
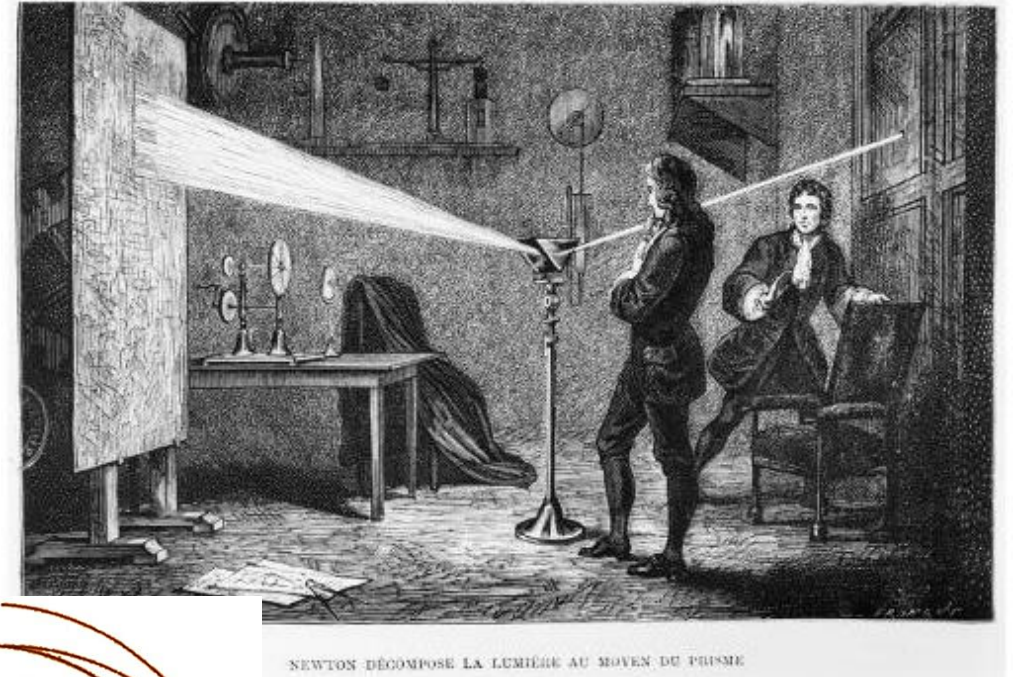
- la luce è formata da particelle che sono deviate, riflesse o bloccate da ostacoli

Modello ondulatorio (Huygens, Fresnel, Maxwell, Hertz...)

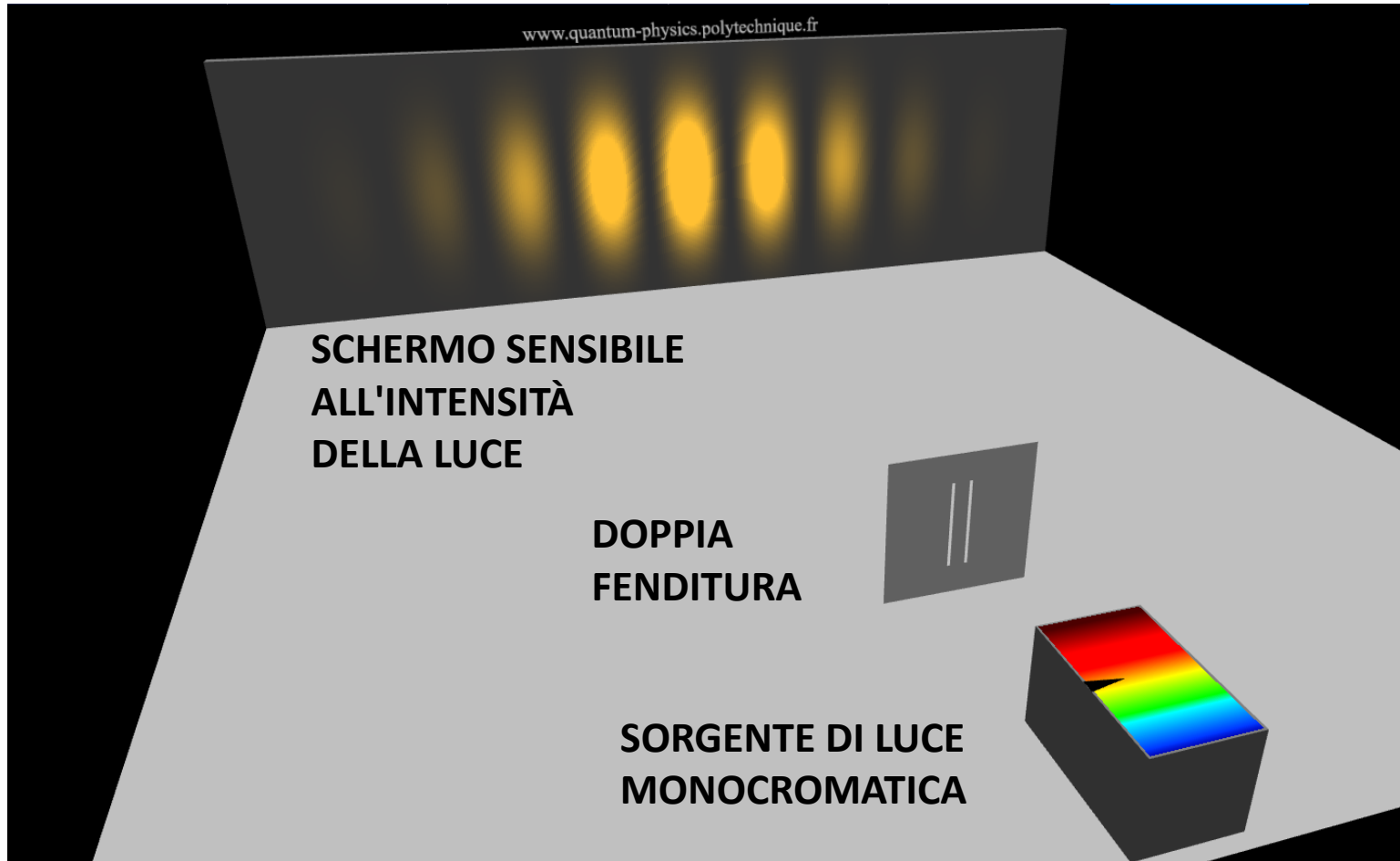
- la luce si propaga come un'onda, quindi i segnali luminosi sono soggetti ad effetti tipici dei fenomeni ondulatori → *interferenza*



EQUAZIONI DI MAXWELL → luce come onda elettromagnetica



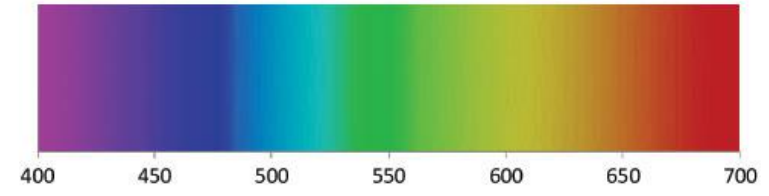
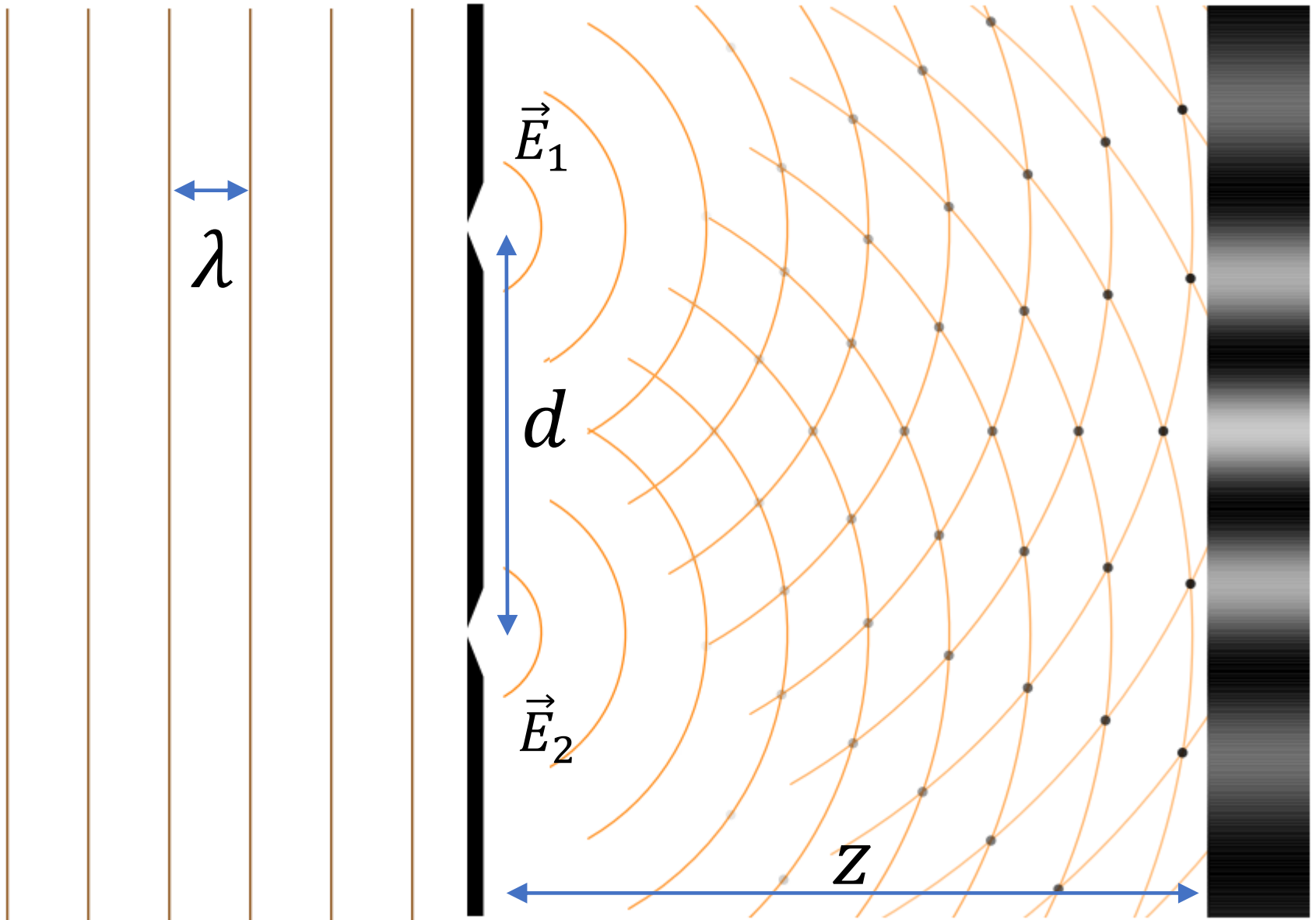
ESPERIMENTO DI YOUNG



L'esperimento della doppia fenditura di Young è stato una delle prove decisive a sostegno del modello ondulatorio

La luce *monocromatica* che illumina due fenditure produce una **figura di interferenza** su uno schermo distante

ESPERIMENTO DI YOUNG



Lunghezza d'onda λ della luce visibile
(in nanometri: 1 nm = 10^{-9} m)

$\lambda \frac{Z}{d}$ **DISTANZA TRA FRANGE LUMINOSE**

**INTENSITÀ MISURATA
SULLO SCHERMO**

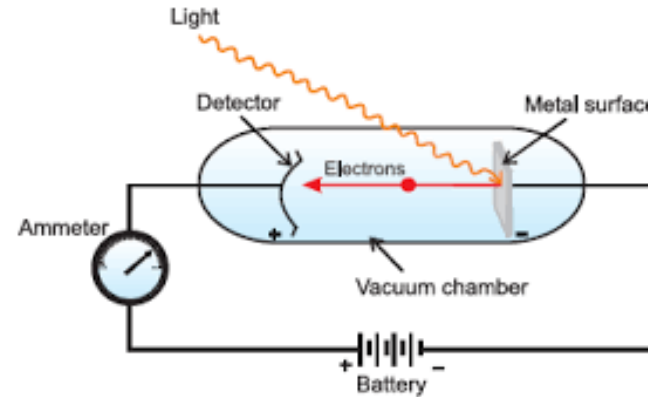
$$I = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2$$

↑ ↑
ampiezze dei campi elettrici che
si propagano dalle due fenditure

MODELLO ONDULATORIO IN CRISI?

Agli inizi del Novecento, il **modello ondulatorio della luce è messo in crisi** da

- radiazione di corpo nero
- effetto fotoelettrico
- effetto Compton



In determinate circostanze, la luce sembra comportarsi come se fosse formata da **particelle, dette fotoni**, di energia

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

λ = lunghezza d'onda della luce

$c = 3 * 10^8$ m/s **velocità della luce**

$h = 6.626 * 10^{-34}$ Kg * m * s **costante di Planck**

ESPERIMENTO DI YOUNG – VERSIONE AGGIORNATA

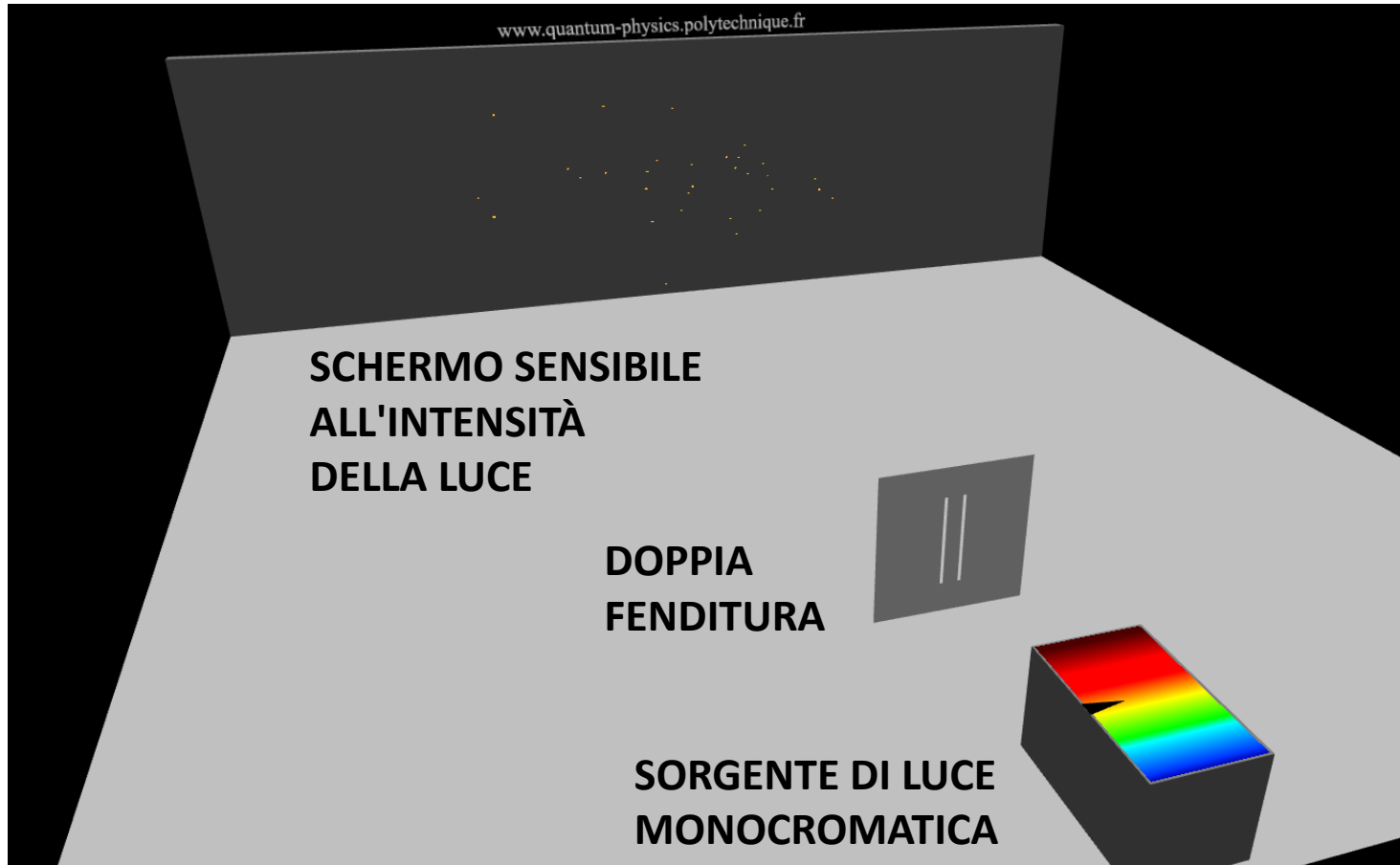


A differenza di Young,
abbiamo oggi a
disposizione **sorgenti a
bassa intensità**



Cosa succede sullo
schermo quando
nell'apparato si propagano
pochi fotoni per volta?

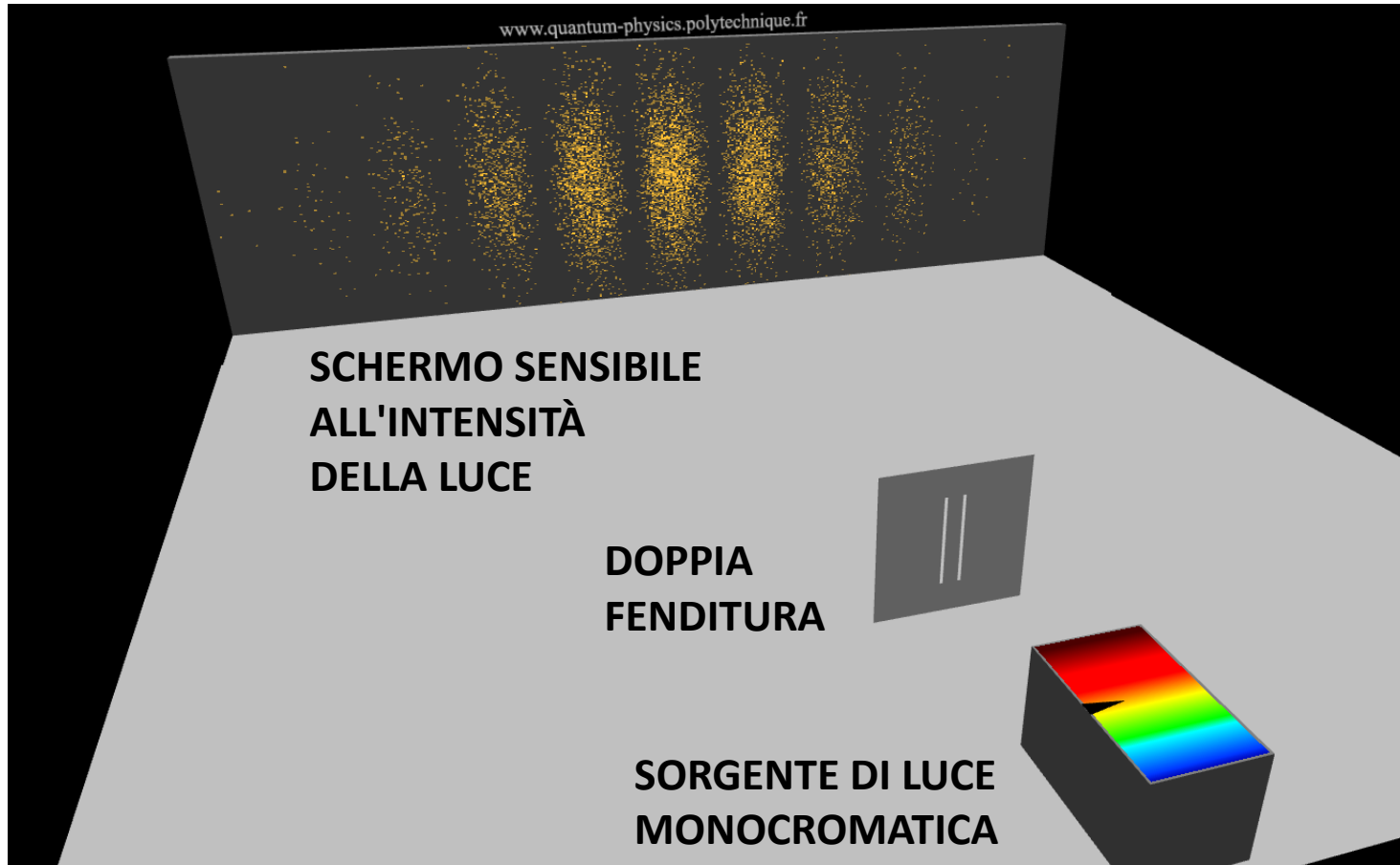
ESPERIMENTO DI YOUNG – VERSIONE AGGIORNATA



Inizialmente, sullo schermo si osservano *pochi punti sparsi*

La luce si manifesta sullo schermo come se fosse formata da particelle puntiformi!

ESPERIMENTO DI YOUNG – VERSIONE AGGIORNATA



Col passare del tempo, osservando i punti che si accumulano sullo schermo, si nota che **la loro distribuzione corrisponde esattamente alla figura di interferenza!**

La probabilità di rivelare un fotone dipende dall'intensità dell'onda elettromagnetica

LA NATURA DUALE DELLA LUCE

In definitiva, nell'esperimento considerato, la luce

- **si comporta in modo corpuscolare** quando viene rivelata dallo schermo → genera un segnale “localizzato” in una piccola regione di spazio
- **conserva una natura ondulatoria**, perché la distribuzione dei segnali rivelati dallo schermo è data dall'intensità dell'onda ad essa associata, che a sua volta è determinata dal **campo elettromagnetico**

I due aspetti sono complementari e non alternativi uno all'altro, *anche se questo va contro la nostra intuizione*

Quando l'**intensità della luce è alta**, possiamo **trascurare** gli aspetti corpuscolari

...E LE PARTICELLE MASSIVE?

Cosa succede se, nell'esperimento di Young, **sostituiamo alla luce** proveniente dalla sorgente un fascio di **particelle dotate di massa**?

- Atomi o molecole
- Costituenti elementari dell'atomo (protoni, neutroni, elettroni)
- Altre particelle subatomiche

In **fisica classica**, il moto di questi corpi è descritto dalla loro posizione \vec{x} e dalla loro velocità \vec{v} , in funzione del tempo $t \rightarrow$ **TRAIETTORIA**

$$(\vec{x}(t), \vec{v}(t))$$

Non ci aspettiamo che abbiano proprietà ondulatorie...

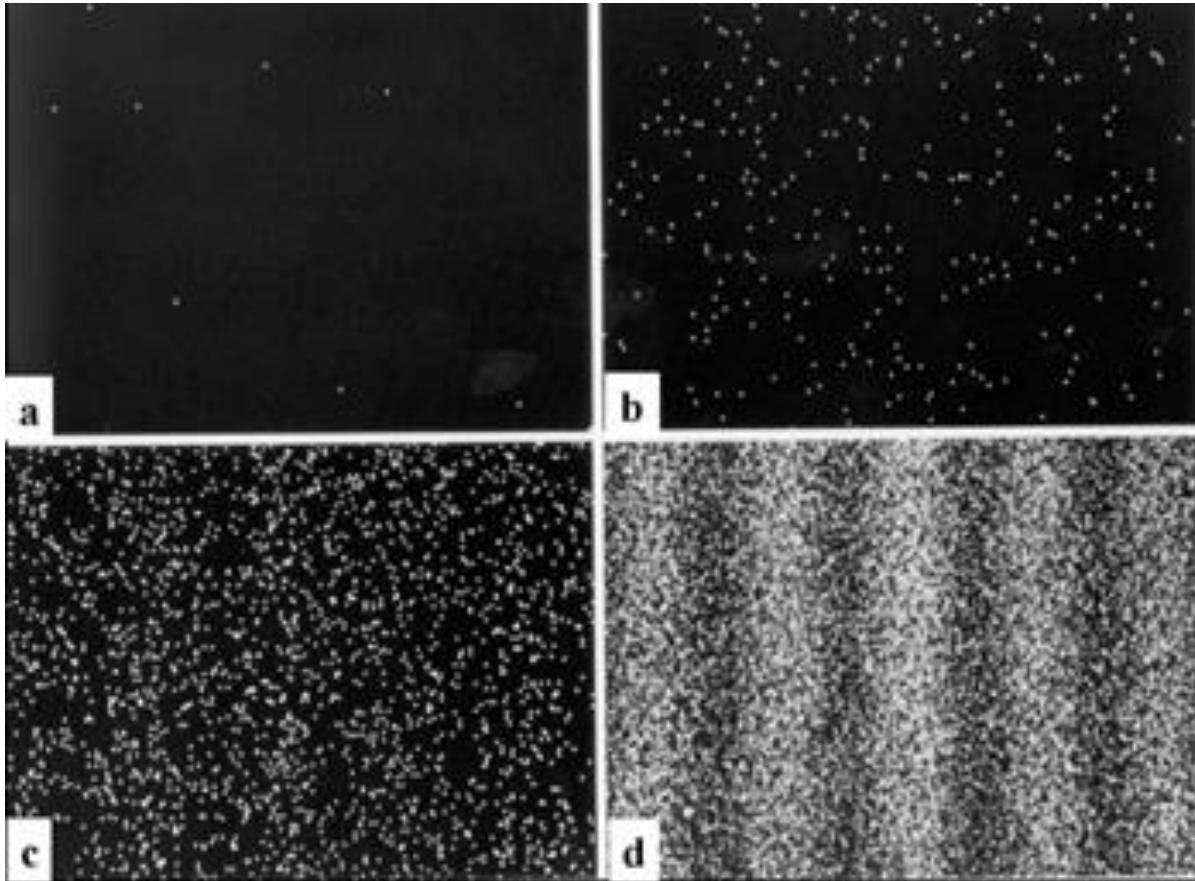
...E LE PARTICELLE MASSIVE?

... ma l'**esperimento della doppia fenditura**, ripetuto con **elettroni** al posto dei fotoni, ci smentisce:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZJ-0PBRuthc>

...E LE PARTICELLE MASSIVE?

... ma l'**esperimento della doppia fenditura**, ripetuto con **elettroni** al posto dei fotoni, ci smentisce:



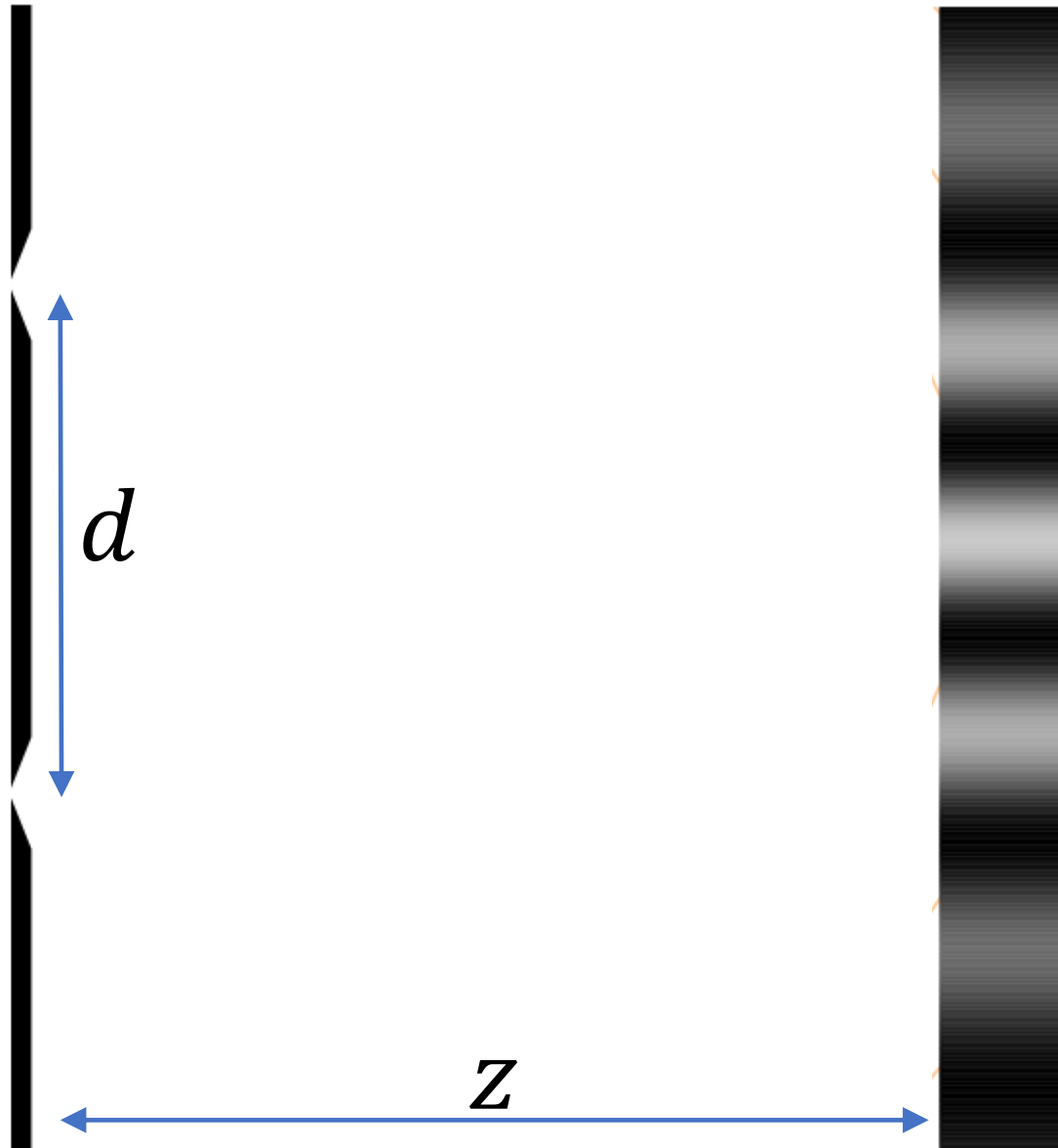
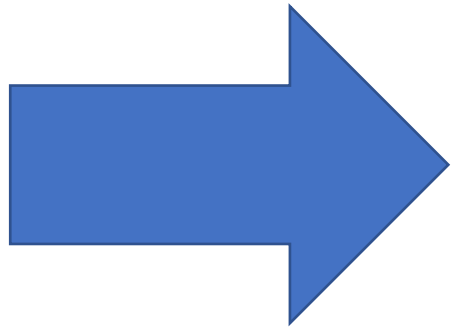
Esperimento di Tonomura → **un solo elettrone per volta** nell'apparato!



Col passare del tempo, gli elettroni si distribuiscono secondo una **figura di interferenza**, proprio come i fotoni

ESPERIMENTO DI YOUNG CON ELETTRONI

FASCIO DI ELETTRONI
CON VELOCITÀ v



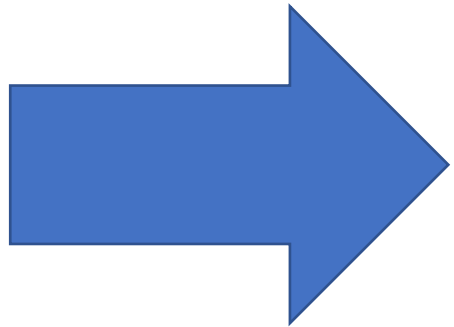
$\lambda_{dB} \frac{Z}{d}$ DISTANZA TRA
FRANGE
"LUMINOSE"

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$$

Lunghezza d'onda di
de Broglie

ESPERIMENTO DI YOUNG CON ELETTRONI

FASCIO DI ELETTRONI
CON VELOCITÀ v



d



???



$\lambda_{dB} \frac{z}{d}$



DISTANZA TRA
FRANGE
"LUMINOSE"

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$$

Lunghezza d'onda di
de Broglie

...DI QUALE
ONDA?

z



L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER



A risolvere il problema di identificare il fenomeno ondulatorio associato alla propagazione di particelle dotate di massa fu **Erwin Schrödinger**.

Schrödinger, basandosi su **analogie con la meccanica classica**, cercò di ottenere un'equazione simile a quella delle **onde elettromagnetiche**.

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

m = massa della particella

$\hbar = h/(2\pi)$ costante di Planck ridotta

$V(x)$ energia potenziale associata alla forza a cui è soggetta la particella

L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER



A risolvere il problema di identificare il fenomeno ondulatorio associato alla propagazione di particelle dotate di massa fu **Erwin Schrödinger**.

Schrödinger, basandosi su **analogie con la meccanica classica**, cercò di ottenere un'equazione simile a quella delle **onde elettromagnetiche**.

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

$\psi(x, t)$ **FUNZIONE D'ONDA**

(per una particella che si muove solo lungo l'asse x)

L'EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER



A risolvere il problema di identificare il fenomeno ondulatorio associato alla propagazione di particelle dotate di massa fu **Erwin Schrödinger**.

Schrödinger, basandosi su **analogie con la meccanica classica**, cercò di ottenere un'equazione simile a quella delle **onde elettromagnetiche**.

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

$\psi(x, t)$ **FUNZIONE D'ONDA**

i “unità immaginaria”: $i^2 = -1 \rightarrow$ la funzione d'onda è **un numero complesso**

NUMERI COMPLESSI

$Z = X + iY$, con X e Y numeri reali,
 i unità immaginaria

$$|Z|^2 = X^2 + Y^2$$

modulo quadrato del numero
complesso \rightarrow quantità reale

INTERPRETAZIONE FISICA DELLA FUNZIONE D'ONDA

Fotoni \rightarrow campo elettrico \vec{E}


Particelle massive \rightarrow funzione d'onda ψ

Tuttavia, **la funzione d'onda** è un numero complesso, quindi **non può essere identificata con nessuna quantità fisicamente misurabile**, a differenza del campo elettrico!

Ma **l'analogia con il caso dei fotoni viene comunque in aiuto**: l'intensità

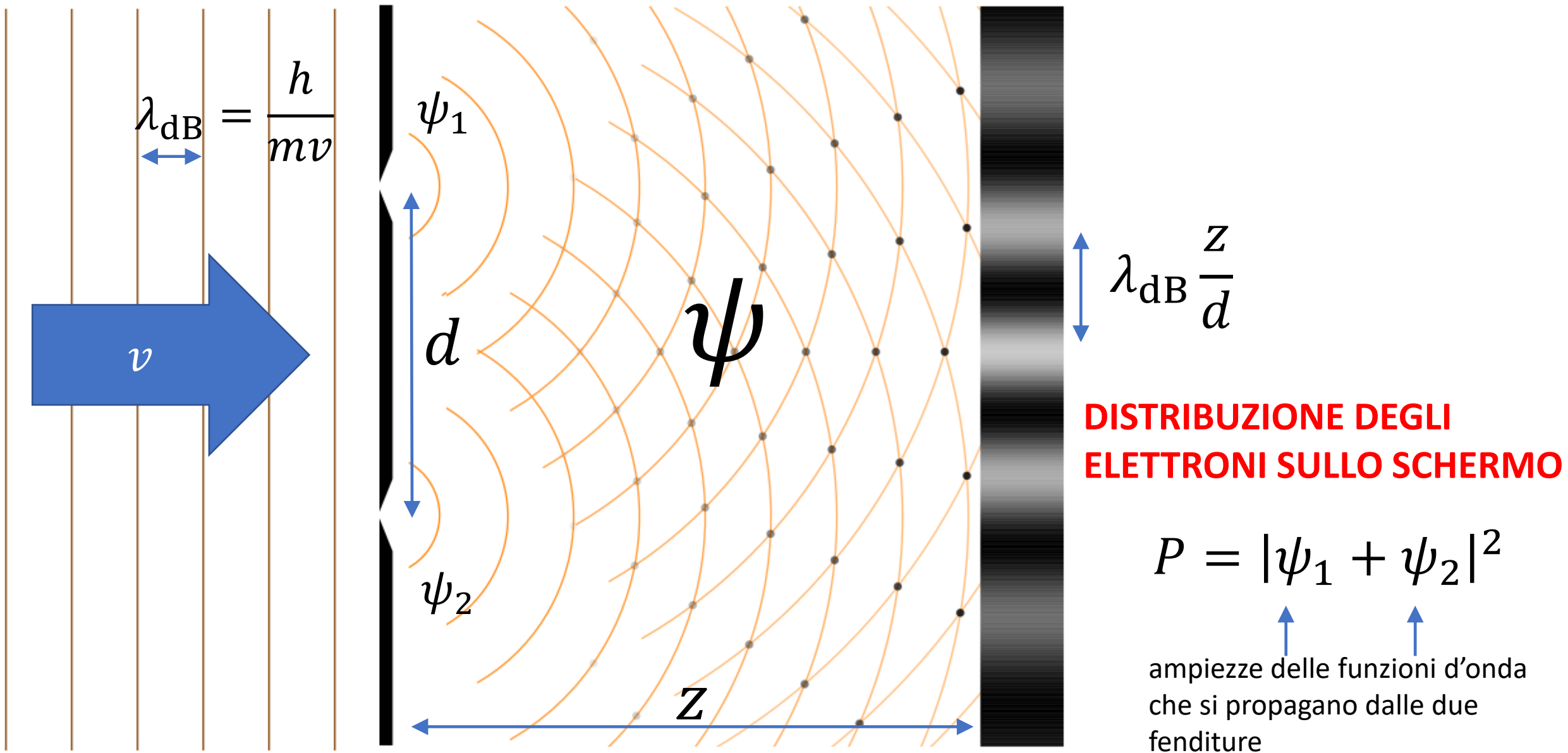
$$I = |\vec{E}|^2$$

dell'onda elettromagnetica determina la distribuzione dei fotoni sullo schermo.


$$P = |\psi|^2$$

determina la **probabilità di trovare la particella** in una certa regione di spazio

ESPERIMENTO DI YOUNG CON ELETTRONI



PROBLEMA DELL'INTERPRETAZIONE DELLA FUNZIONE D'ONDA

Come abbiamo osservato, ψ non è associabile ad alcuna quantità fisica \rightarrow non è un'onda di materia, di pressione, di densità, di campo elettrico o magnetico, come quelle che conosciamo, ma **un'onda di probabilità**

Prima di rivelare l'elettrone come un punto sullo schermo, **non possiamo conoscere la sua posizione**, ma **solo la probabilità** di trovarlo in una data regione

PROBLEMA DELL'INTERPRETAZIONE DELLA FUNZIONE D'ONDA

Come abbiamo osservato, ψ non è associabile ad alcuna quantità fisica \rightarrow non è un'onda di materia, di pressione, di densità, di campo elettrico o magnetico, come quelle che conosciamo, ma **un'onda di probabilità**

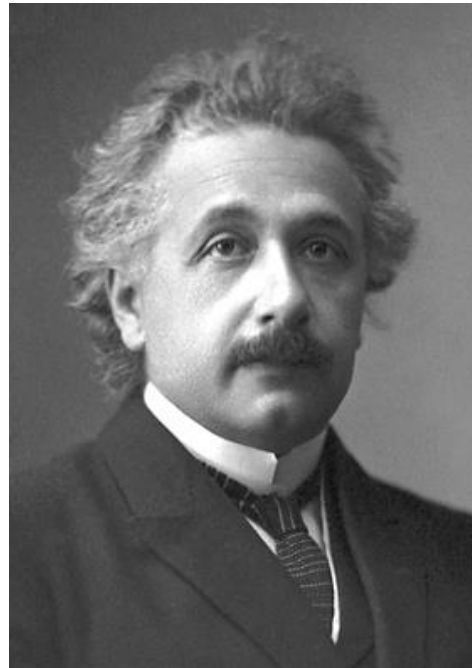
Prima di rivelare l'elettrone come un punto sullo schermo, **non possiamo conoscere la sua posizione**, ma **solo la probabilità** di trovarlo in una data regione

Due posizioni scientifico-filosofiche opposte:

- **Posizione “realistica” (Einstein):** la meccanica quantistica è **incompleta**, perché non è in grado di dire **dove si trova l'elettrone prima della misura**
- **Posizione della scuola di Copenhagen (Bohr, Heisenberg, Pauli):** la funzione d'onda contiene **tutta l'informazione a nostra disposizione sull'elettrone**; l'atto della misura fa **collassare la funzione d'onda** in un punto

PROBLEMA DELL'INTERPRETAZIONE DELLA FUNZIONE D'ONDA

“Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo”
(Albert Einstein)



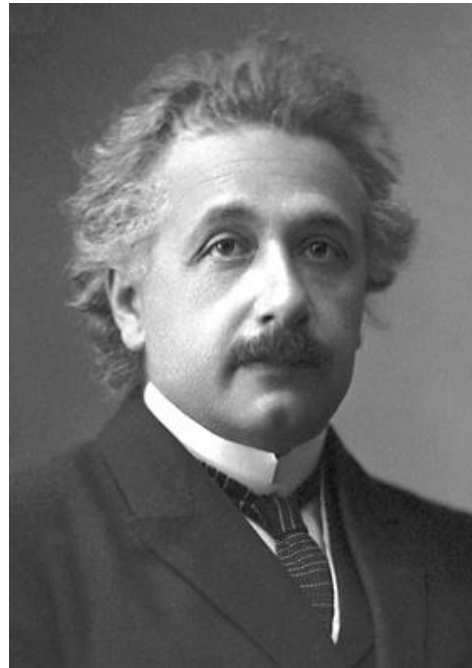
“Non tocca a noi dirgli cosa fare”
(Niels Bohr)



PROBLEMA DELL'INTERPRETAZIONE DELLA FUNZIONE D'ONDA

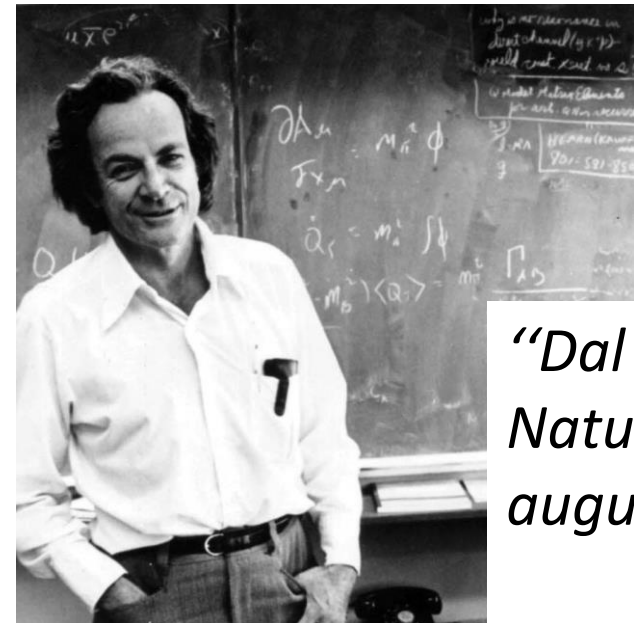
“Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo”
(Albert Einstein)

“Non tocca a noi dirgli cosa fare”
(Niels Bohr)



*“Dal punto di vista del buon senso l'elettrodinamica quantistica descrive una Natura assurda. Tuttavia è in **perfetto accordo con i dati sperimentali**. Mi auguro quindi che riusciate ad accettare la Natura per quello che è: assurda.”*

(Richard Feynman)



IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

Se le particelle che costituiscono la materia hanno, così come la luce, una **natura ondulatoria**, devono soddisfare alcuni **principi di indeterminazione**

- Un'onda con **lunghezza d'onda ben definita** ha anche un'**estensione spaziale infinita** (ricordiamo che $\lambda_{dB} = \frac{h}{mv}$)
- Un'onda **concentrata in un solo punto** tende immediatamente a **espandersi con velocità arbitrariamente grande**

$$\Delta x \Delta v \geq \frac{\hbar}{2m}$$

Δx = incertezza sulla posizione della particella

Δv = incertezza sulla velocità della particella

m = massa della particella

$\hbar = h/(2\pi)$ costante di Planck ridotta

INDETERMINAZIONE ED ESPERIENZA QUOTIDIANA

"Arriverò presto, siamo in autostrada e **viaggiamo a 120 km/ora.**
Adesso ti mando la posizione!"

$$\Delta v = \frac{1 \text{ km}}{\text{ora}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0.28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = 1200 \text{ kg}$$

$$\hbar = 1.055 * 10^{-34} \text{ kg} * \text{m} * \text{s}$$

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2m\Delta v} = 1.57 * 10^{-37} \text{ m}$$

INDETERMINAZIONE ED ESPERIENZA QUOTIDIANA

"Arriverò presto, siamo in autostrada e **viaggiamo a 120 km/ora.**
Adesso ti mando la posizione!"

$$\Delta v = \frac{1 \text{ km}}{\text{ora}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0.28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m = 1200 \text{ kg}$$

$$\hbar = 1.055 * 10^{-34} \text{ kg} * \text{m} * \text{s}$$

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2m\Delta v} = 1.57 * 10^{-37} \text{ m}$$

Dimensioni dell'auto circa 3 m
Dimensioni di un atomo leggero 10^{-10} m
Dimensioni di un protone 10^{-15} m

MONDI LONTANISSIMI?

**FISICA
QUANTISTICA**



**FISICA
CLASSICA**

Mondo microscopico

Mondo macroscopico

MONDI LONTANISSIMI?

**FISICA
QUANTISTICA**



**FISICA
CLASSICA**

Mondo microscopico

Mondo macroscopico

MONDI LONTANISSIMI?

**FISICA
QUANTISTICA**

COMPLESSITÀ

**FISICA
CLASSICA**

Il numero di parametri
che descrive un sistema
aumenta linearmente
con il numero delle parti
che lo compongono

Mondo microscopico

Mondo macroscopico

MONDI LONTANISSIMI?

**FISICA
QUANTISTICA**

Il numero di parametri che
descrive un sistema
aumenta esponenzialmente
con il numero delle parti
che lo compongono

COMPLESSITÀ

**FISICA
CLASSICA**

Il numero di parametri
che descrive un sistema
aumenta linearmente
con il numero delle parti
che lo compongono

Mondo microscopico

Mondo macroscopico

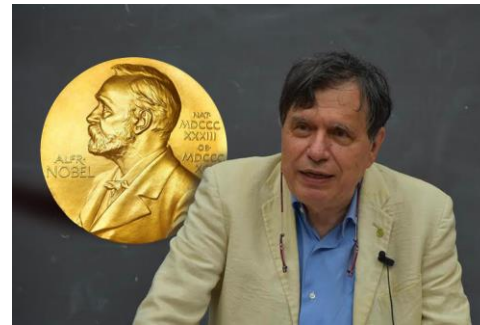
MONDI LONTANISSIMI?

**FISICA
QUANTISTICA**

COMPLESSITÀ

**FISICA
CLASSICA**

Il numero di parametri che
descrive un sistema
aumenta esponenzialmente
con il numero delle parti
che lo compongono



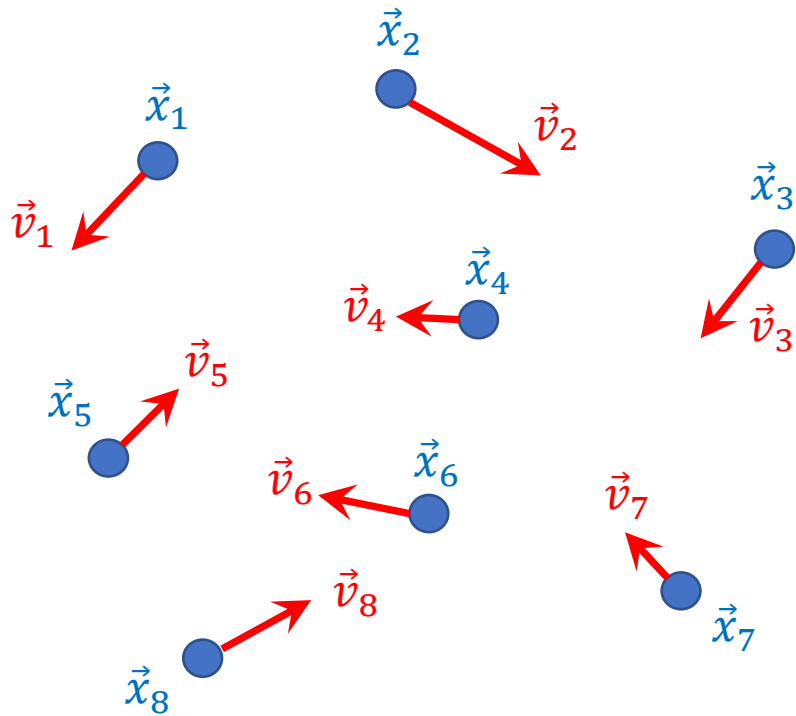
Giorgio Parisi, premio Nobel 2021
per i suoi studi sui sistemi complessi

Il numero di parametri
che descrive un sistema
aumenta linearmente
con il numero delle parti
che lo compongono

Mondo microscopico

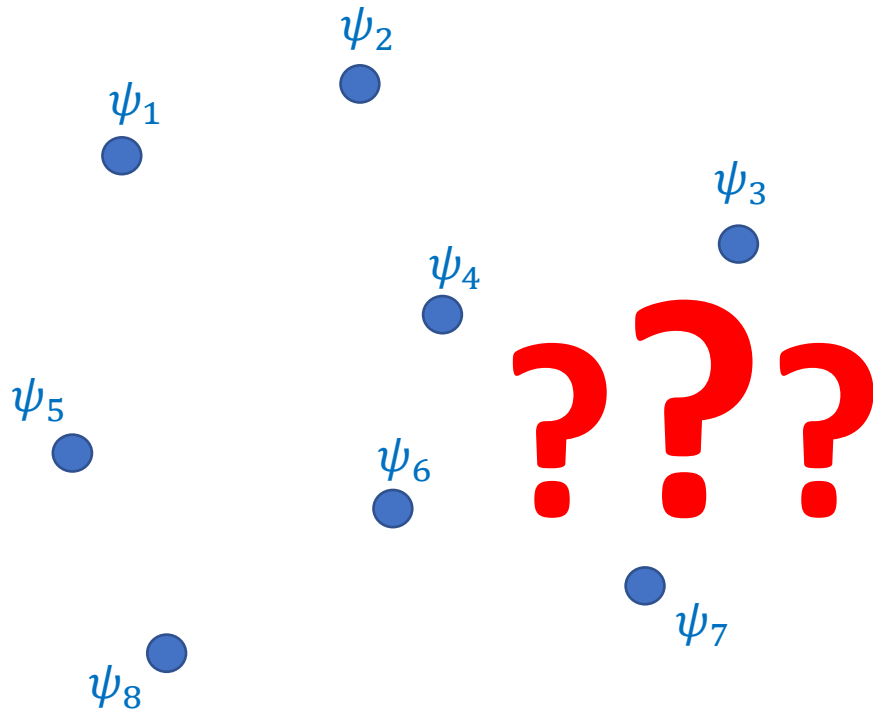
Mondo macroscopico

STATO DI UN SISTEMA CLASSICO E DI UN SISTEMA QUANTISTICO



Lo stato di un sistema classico di N particelle al tempo t è completamente definito dalle loro posizioni \vec{x}_i e dalle loro velocità \vec{v}_i

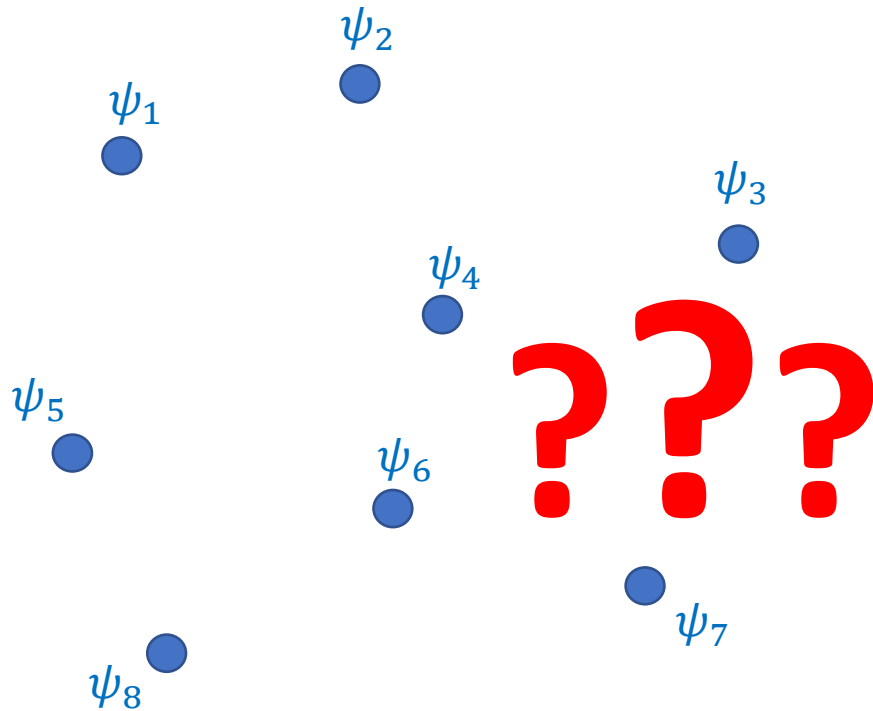
STATO DI UN SISTEMA CLASSICO E DI UN SISTEMA QUANTISTICO



Lo **stato di un sistema classico** di N particelle al tempo t è completamente definito dalle loro posizioni \vec{x}_i e dalle loro velocità \vec{v}_i

Lo **stato di un sistema quantistico** di N particelle al tempo t ...

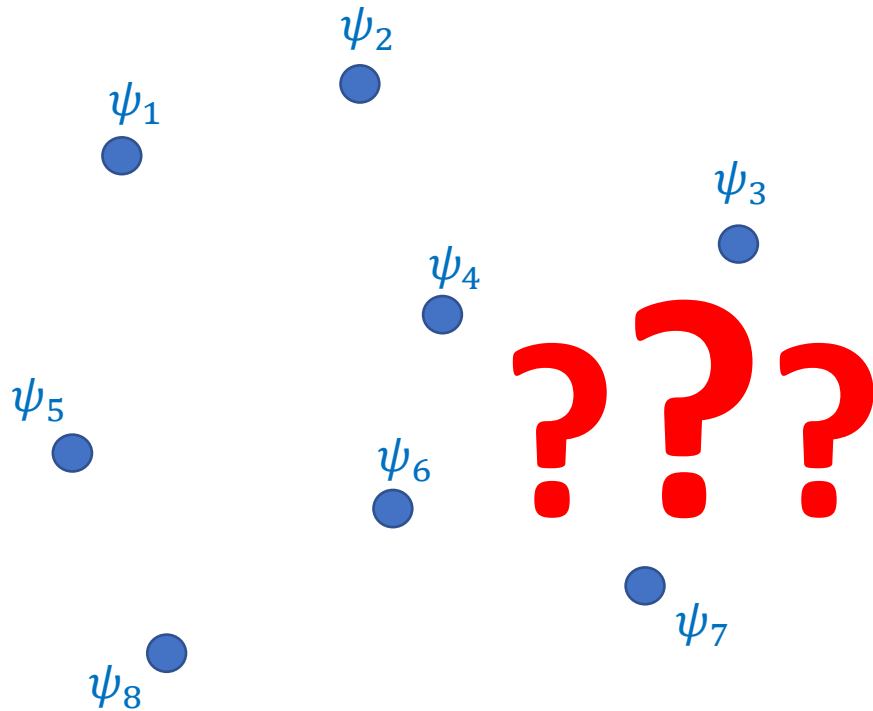
STATO DI UN SISTEMA CLASSICO E DI UN SISTEMA QUANTISTICO



Lo **stato di un sistema classico** di N particelle al tempo t è completamente definito dalle loro posizioni \vec{x}_i e dalle loro velocità \vec{v}_i

Lo **stato di un sistema quantistico** di N particelle al tempo t **non può** essere descritto da singole funzioni d'onda ψ_i

STATO DI UN SISTEMA CLASSICO E DI UN SISTEMA QUANTISTICO

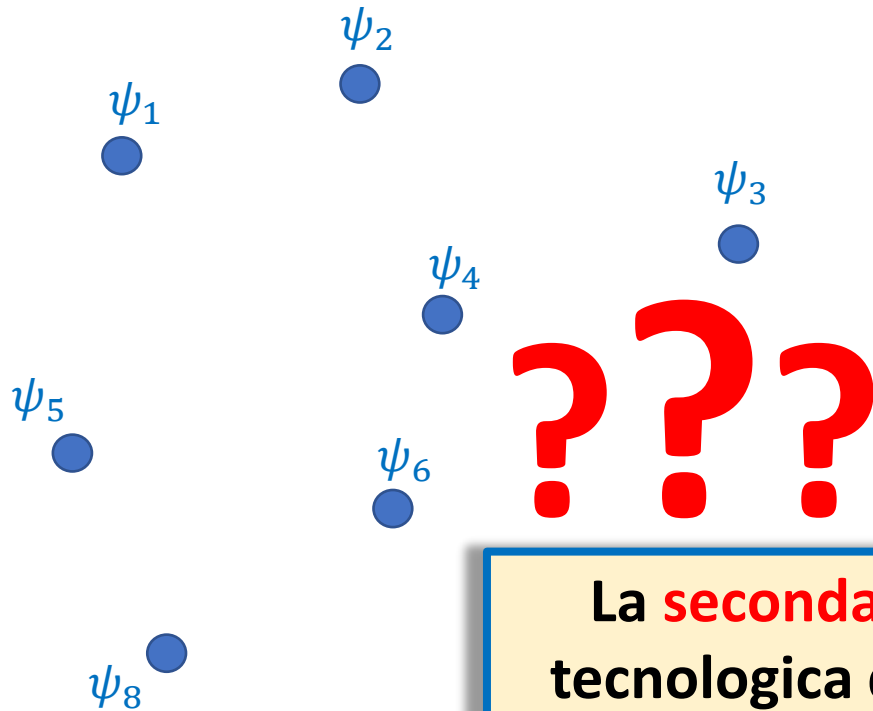


Lo **stato di un sistema classico** di N particelle al tempo t è completamente definito dalle loro posizioni \vec{x}_i e dalle loro velocità \vec{v}_i

Lo **stato di un sistema quantistico** di N particelle al tempo t **non può** essere descritto da singole funzioni d'onda ψ_i

QUANTUM ENTANGLEMENT → in generale, esistono **proprietà di uno stato quantistico** che possono essere dedotte **solo osservando il sistema nel suo insieme**, e non le sue singole parti

STATO DI UN SISTEMA CLASSICO E DI UN SISTEMA QUANTISTICO



Lo **stato di un sistema classico** di N particelle al tempo t è completamente definito dalle loro posizioni \vec{x}_i e dalle loro velocità \vec{v}_i

Lo **stato di un sistema quantistico** di

La **seconda rivoluzione quantistica** consiste nella capacità tecnologica di sfruttare pienamente la complessità insita nei sistemi quantistici *composti da più parti*

QUANTUM ENTANGLEMENT → in generale, esistono **proprietà di uno stato quantistico** che possono essere dedotte **solo osservando il sistema nel suo insieme**, e non le sue singole parti

TECNOLOGIE QUANTISTICHE

- **Computazione quantistica** → algoritmi basati sulle trasformazioni di un sistema quantistico per risolvere problemi computazionali *difficili*
- **Comunicazione quantistica** → utilizzo delle proprietà dei sistemi quantistici per il trasferimento efficace e sicuro di messaggi
- **Simulazione quantistica** → sistemi quantistici utilizzati per simulare altri sistemi fisici complessi (anche classici)
- **Imaging quantistico** → utilizzo delle proprietà dei sistemi quantistici per migliorare l'acquisizione di immagini
- **Metrologia quantistica** → utilizzo delle proprietà dei sistemi quantistici per le misure di precisione

SCOMPOSIZIONE IN FATTORI PRIMI

Scomporre (*fattorizzare*) un numero in fattori primi non è facile come sommare o moltiplicare due numeri, ma finché si tratta di poche cifre, è *fattibile* in poco tempo (qualche minuto, con carta e penna)

$$1961 = 37 * 53$$

Un **computer** portatile può fattorizzare in **frazioni di secondo** numeri fino ad una decina di cifre ...

SCOMPOSIZIONE IN FATTORI PRIMI

Scomporre (*fattorizzare*) un numero in fattori primi non è facile come sommare o moltiplicare due numeri, ma finché si tratta di poche cifre, è *fattibile* in poco tempo (qualche minuto, con carta e penna)

Un **computer** portatile può fattorizzare in **frazioni di secondo** numeri fino ad una decina di cifre ... ma *la difficoltà aumenta rapidamente (esponenzialmente)*:

- per un numero di una settantina di cifre, possono volerci diverse decine di minuti
- un numero di **232 cifre** è stato fattorizzato nel 2009, in **due anni**, da una **rete di supercomputer** → un portatile avrebbe impiegato 1500 anni

SCOMPOSIZIONE IN FATTORI PRIMI *SU UN COMPUTER QUANTISTICO*

La *difficoltà* della scomposizione in fattori primi di numeri molto grandi *su un computer classico* è alla base di protocolli di sicurezza e comunicazione cifrata

Tuttavia, un **computer quantistico** sarebbe in grado di risolvere il problema in un tempo *enormemente inferiore* → il numero-record di 232 cifre potrebbe essere scomposto in tempi dell'ordine del minuto, e **il vantaggio aumenterebbe aumentando il numero di cifre!**

L'esistenza di algoritmi che consentono di risolvere problemi classicamente difficili è la *motivazione principale* per lo studio delle tecnologie quantistiche, *ma non è tutto ...*

“LEGGE DI MOORE”



Gordon Moore
co-fondatore Intel

«La capacità di calcolo di un circuito integrato tende a raddoppiare in un tempo di circa 2 anni»

Non è una legge “naturale”, ma una linea-guida per lo sviluppo tecnologico

“LEGGE DI MOORE”



Gordon Moore
co-fondatore Intel

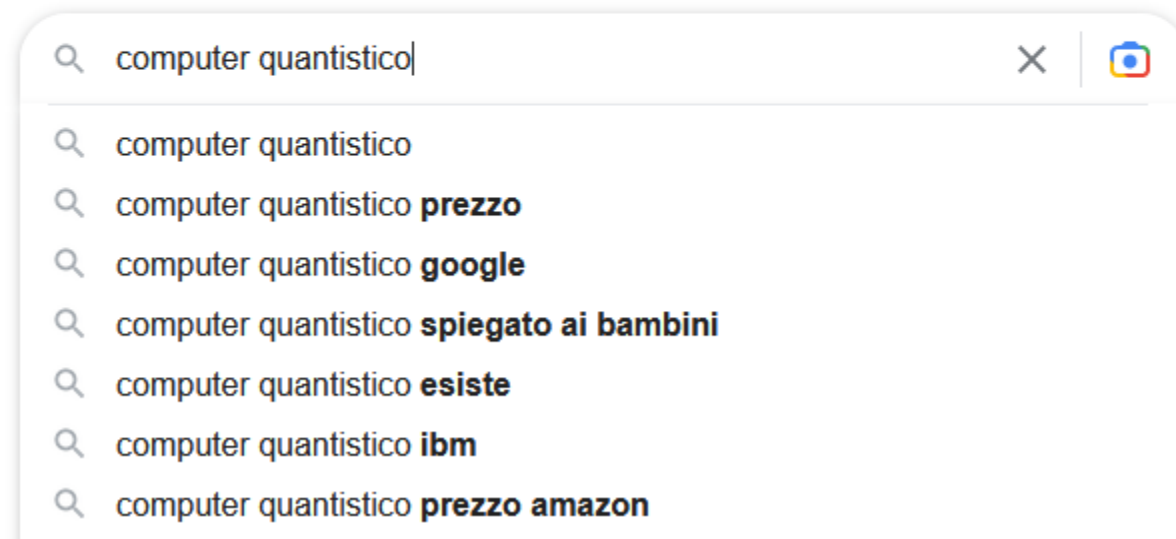
«La capacità di calcolo di un circuito integrato tende a raddoppiare in un tempo di circa 2 anni»

Non è una legge “naturale”, ma una linea-guida per lo sviluppo tecnologico

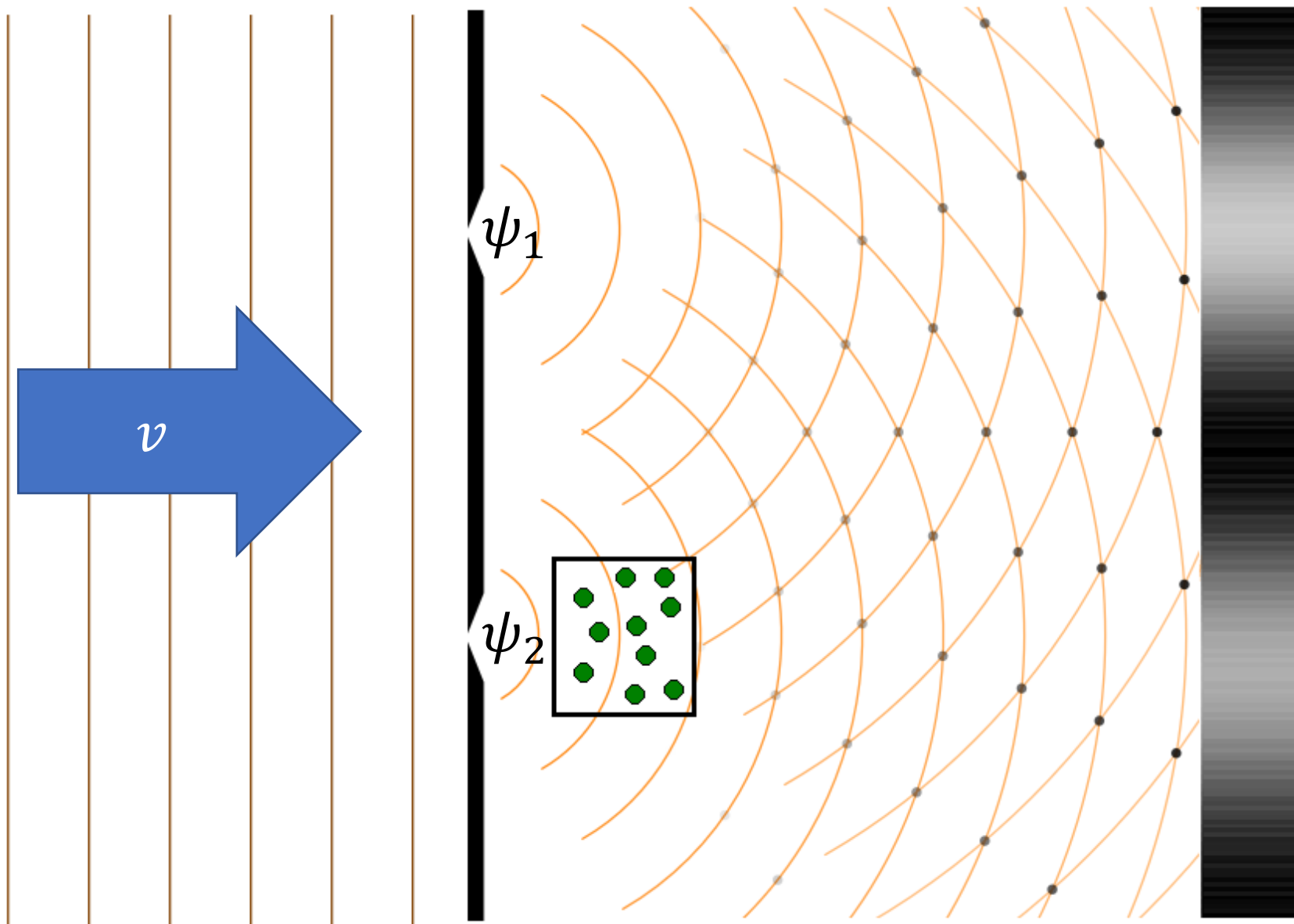
Negli ultimi decenni è diventato sempre più difficile “tenersi al passo” con la legge di Moore

→ ricerca di nuove soluzioni, **una delle quali potrebbe essere il computer quantistico**

...MA ALLORA COSA CI IMPEDISCE DI POTER COMPRARE
UN COMPUTER QUANTISTICO DA UN VENDITORE ONLINE?

The Google logo is centered on the page, rendered in its characteristic multi-colored font.

LA COERENZA È (QUASI) TUTTO



Se l'elettrone, oltre una fenditura, incontra un disturbo (per esempio, un gas in agitazione termica), le frange di interferenza spariscono e la distribuzione di elettroni sullo schermo diventa "classica"



Il disturbo fa perdere coerenza all'onda di probabilità

LA COERENZA È (QUASI) TUTTO

Un **computer quantistico** promette vantaggi enormi rispetto ad un calcolatore classico, ma è indispensabile che **la funzione d'onda “collettiva” che descrive tutti i bit quantistici (qubit)** si mantenga **coerente**

In caso di **perdita di coerenza**, un sistema quantistico (quindi anche il computer) tende a **comportarsi come un sistema classico**, facendo perdere tutti i vantaggi

→ **sviluppo scientifico-tecnologico** orientato a mantenere la coerenza e limitare gli errori



Quantum



Quantum AI



XANADU



The Quantum Computing Company™