

Introduzione ai fenomeni quantistici

Tratto da: *The Feynman lectures on physics, vol. 3*

Marco Bonvini
Nicodemo Magnoli

Fisica classica

Meccanica:

Keplero (1608-1619)

Galilei (1630)

Newton (1687)

Termodinamica:

Kelvin (1848)

Joule (1850)

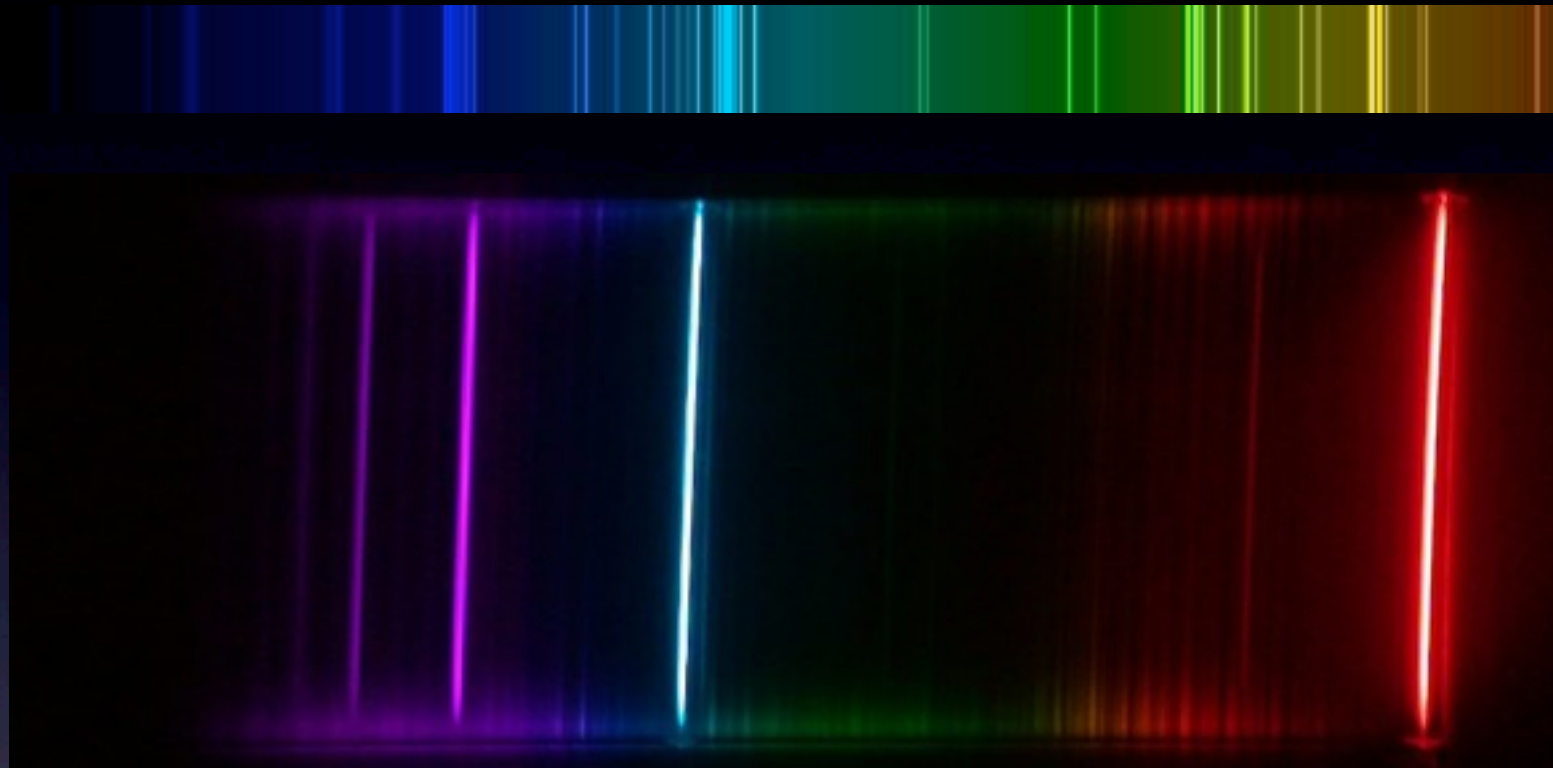
Elettro-Magnetismo:

Talete (-600)

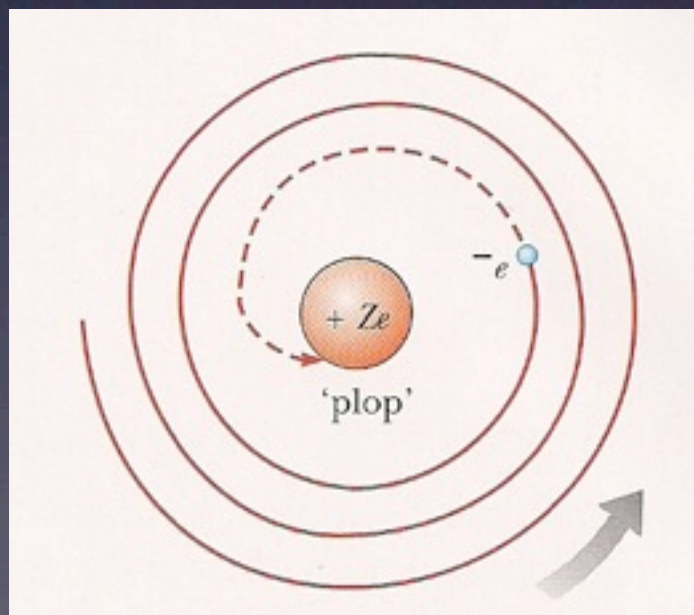
Maxwell (1864)

“Questa velocità è così vicina a quella della luce che ho ragione di supporre che la luce stessa sia un'onda elettromagnetica” (Maxwell)

Oltre la fisica classica



Azoto
Idrogeno

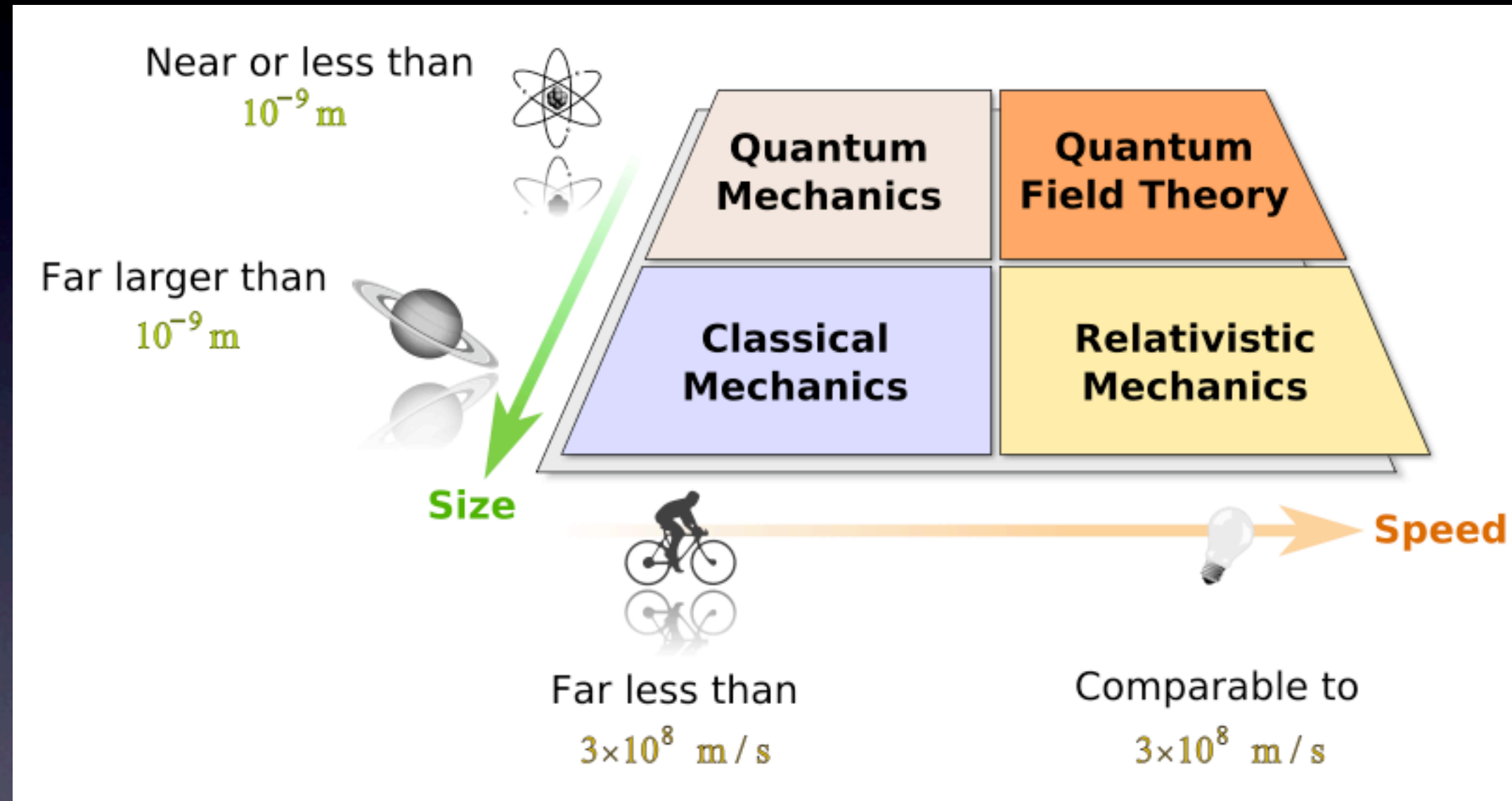


Rutherford, 1909



1887
Michelson e Morley

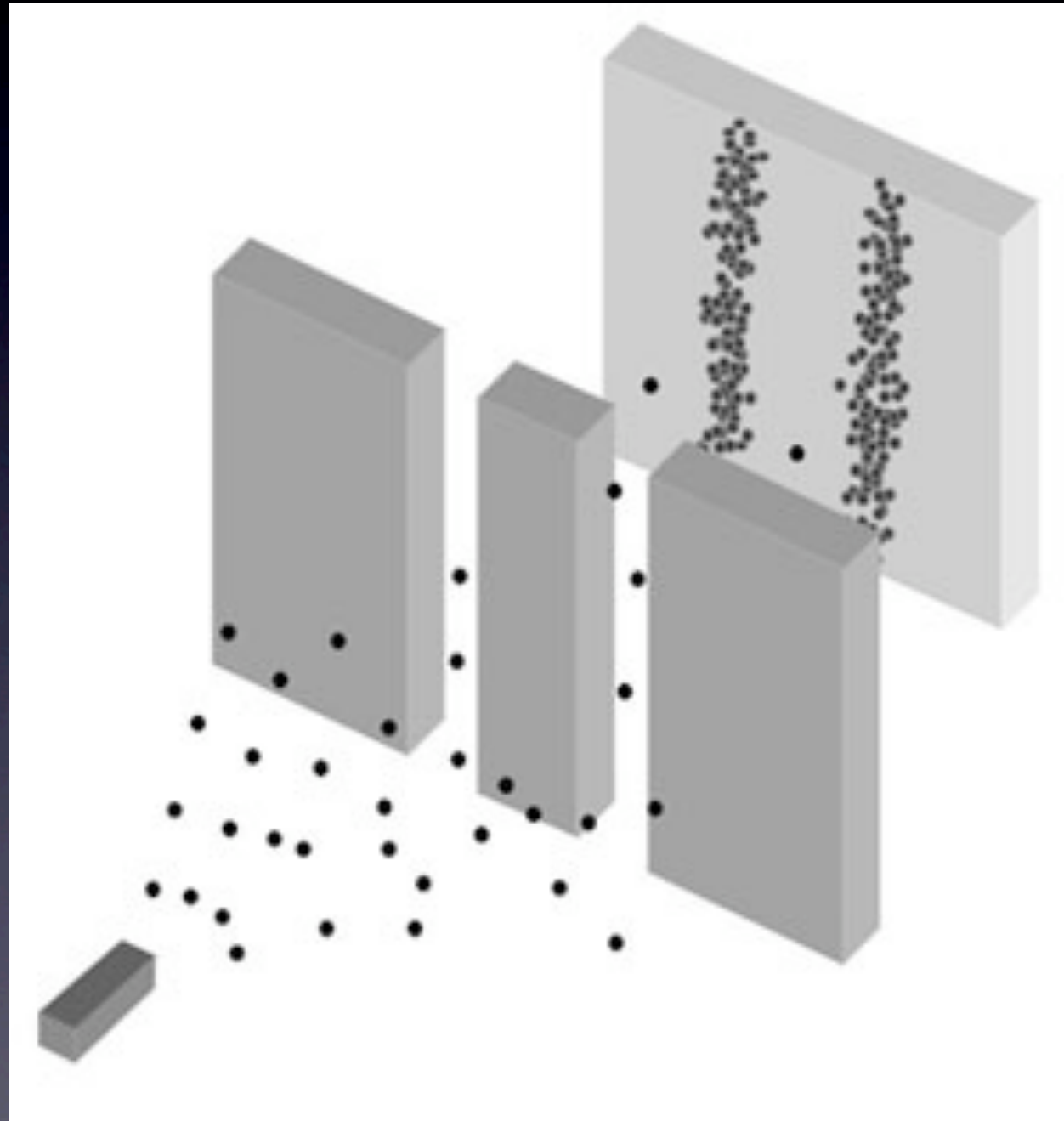
Domini della fisica



Relatività generale

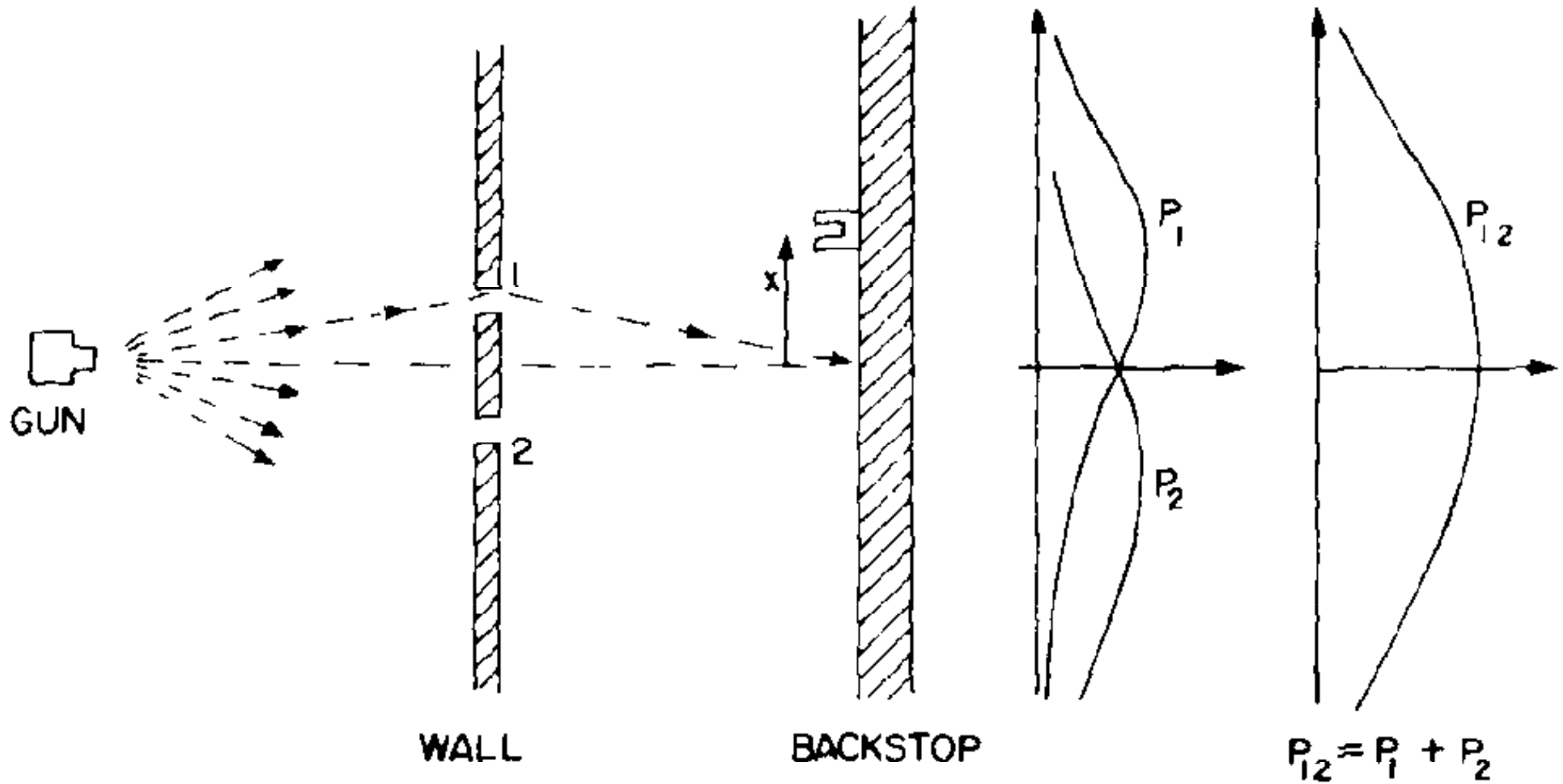
Teoria delle stringhe?

Le due fenditure

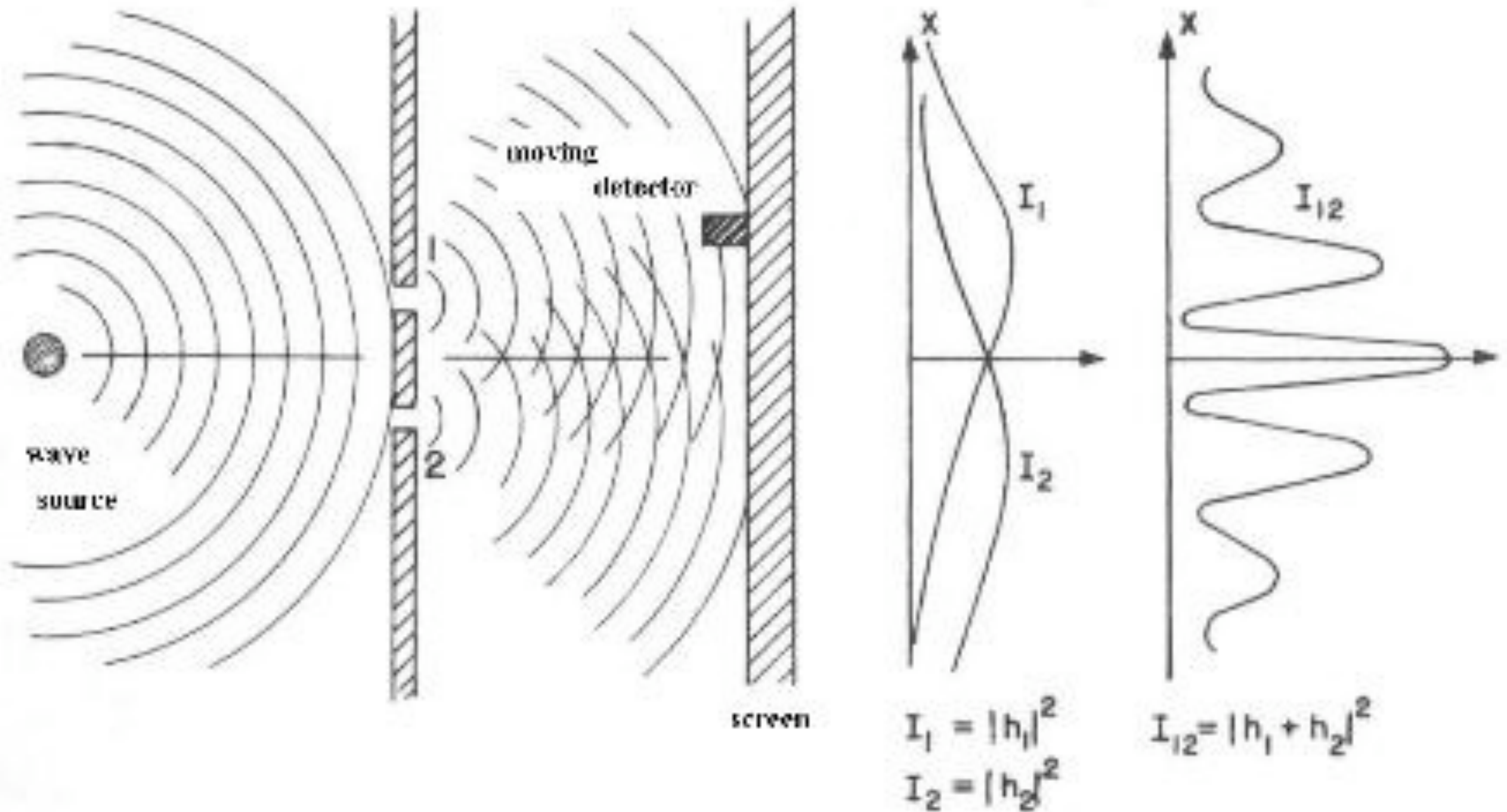


http://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment

Proiettili



Onde



Onde

Sulla parete si sovrappongono 2 onde:

$$A_1(t) = A \cos(\omega t)$$

$$A_2(t) = A \cos(\omega t + \delta)$$

(lo sfasamento δ dipende dalla posizione lungo x)

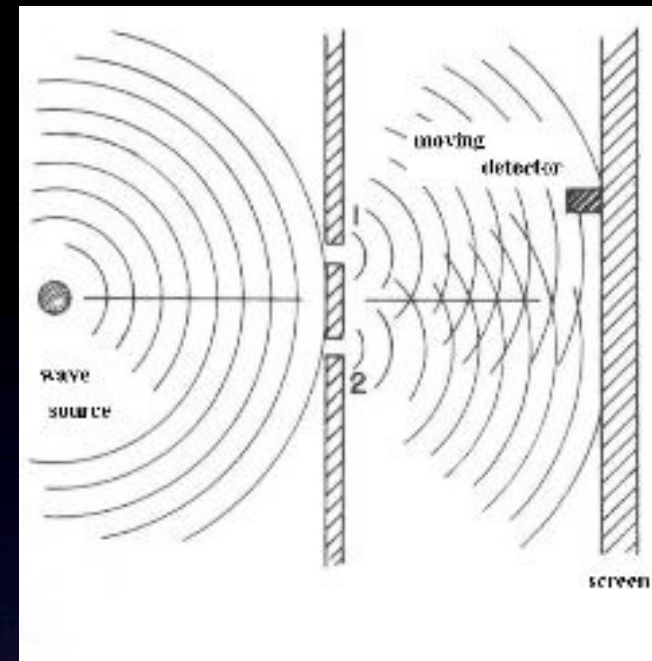
Usando le formule di prostaferesi

$$A_1(t) + A_2(t) = 2 A \cos(\delta/2) \cos(\omega t + \delta/2)$$

che è un segnale di ampiezza $2 A \cos(\delta/2)$.

L'intensità è

$$[2 A \cos(\delta/2)]^2 = A^2 + A^2 + 2A A \cos(\delta)$$

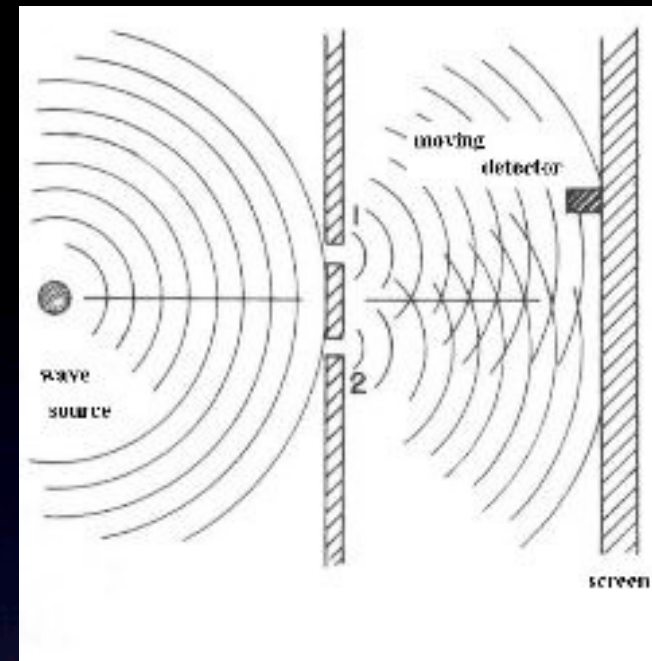


Onde

Sulla parete si sovrappongono 2 onde:

$$A_1(t) = A_1 \cos(\omega t)$$

$$A_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \delta)$$



(lo sfasamento δ dipende dalla posizione lungo x)

Usando le formule di prostaferesi

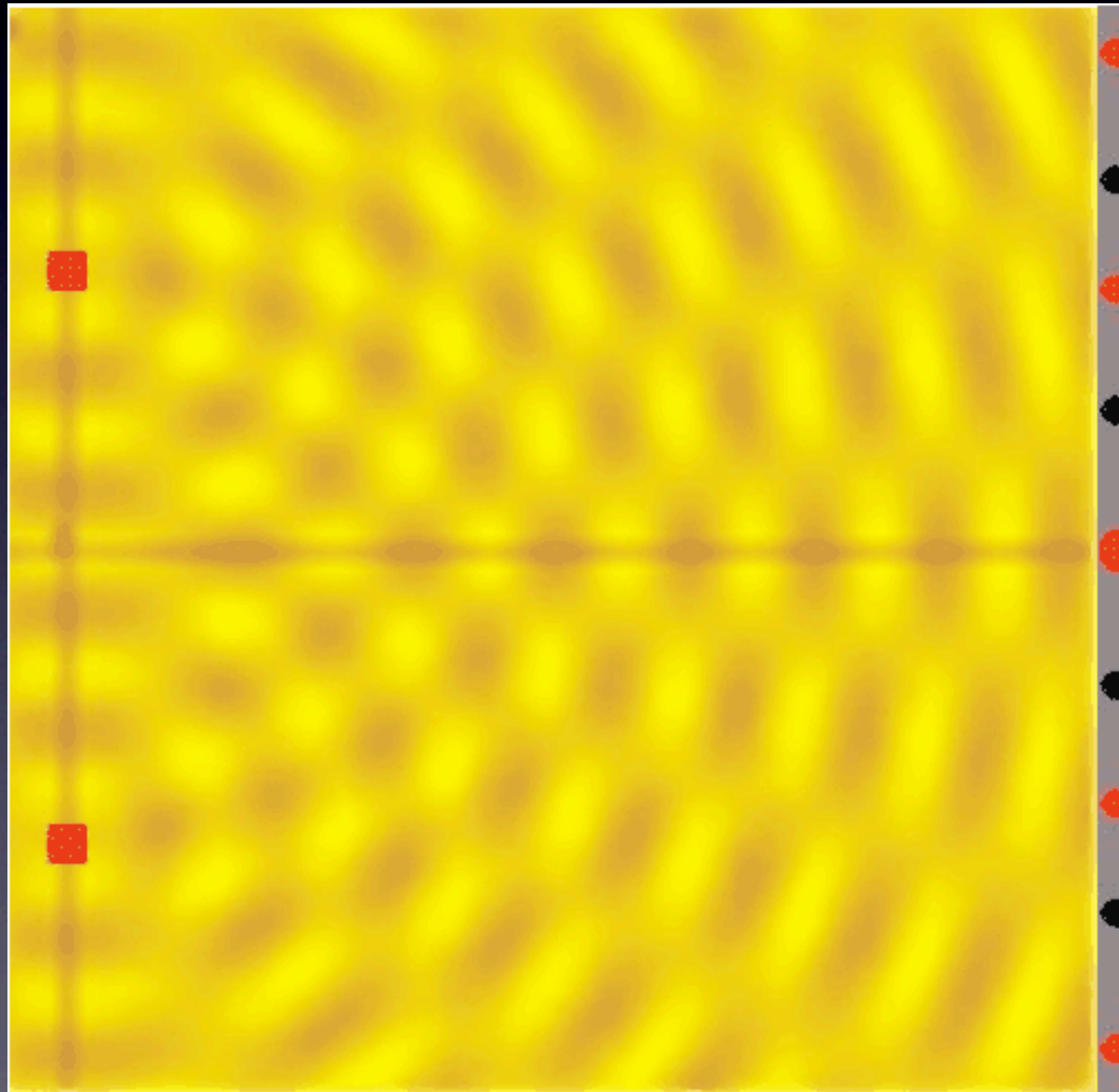
$$A_1(t) + A_2(t) = 2 A \cos(\delta/2) \cos(\omega t + \delta/2)$$

che è un segnale di ampiezza $2 A \cos(\delta/2)$.

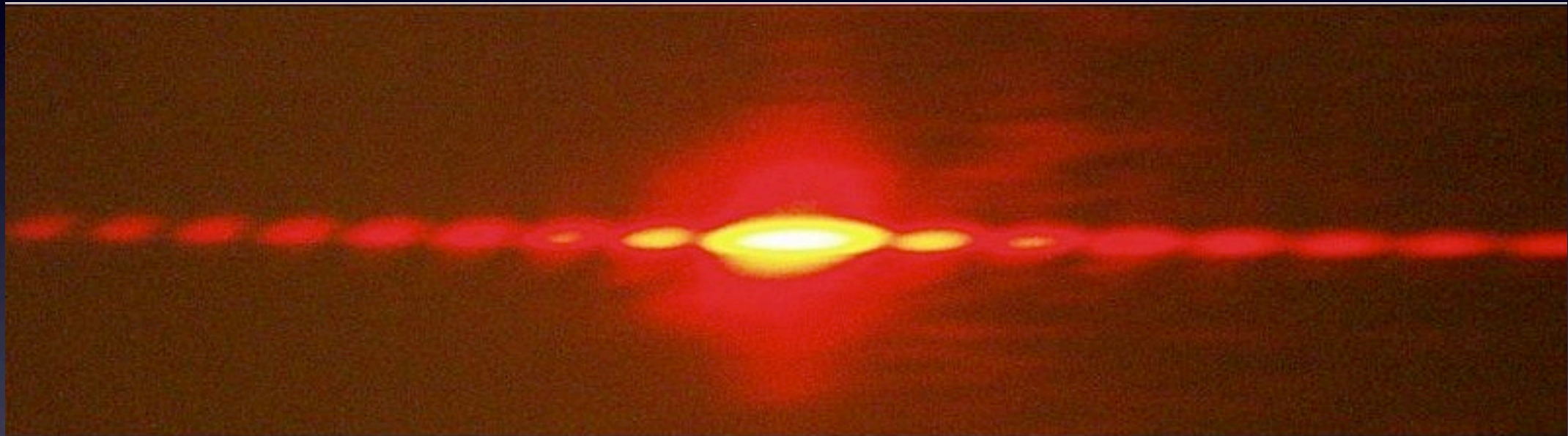
L'intensità è

$$[2 A \cos(\delta/2)]^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\delta)$$

Onde



Onde



Pattern produced from a double slit.

Riassumendo

- Proiettili: si sommano le distribuzioni

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

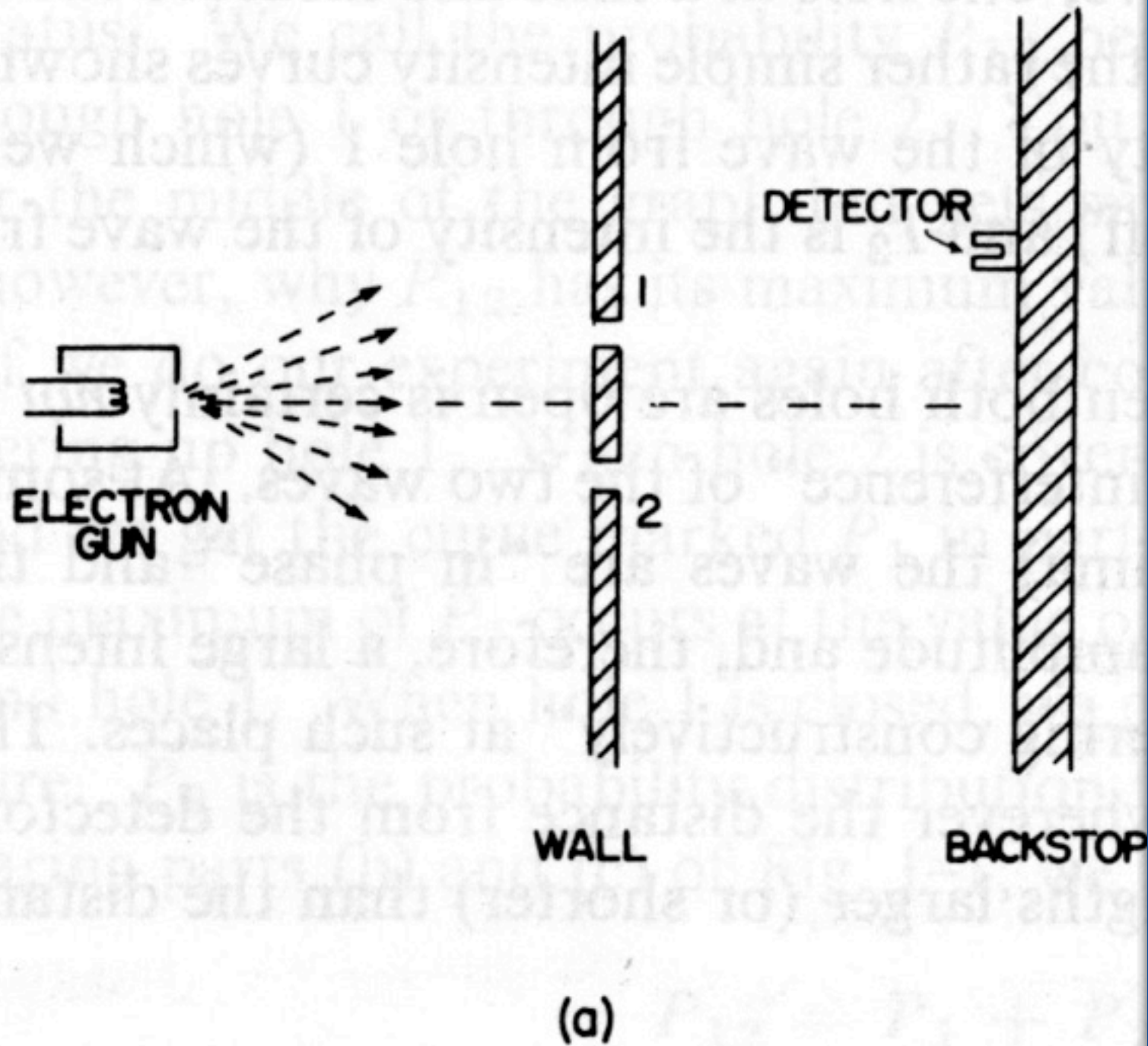
- Onde: si sommano le ampiezze

$$P_{12} = |A_1 + A_2|^2 = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2|A_1||A_2|\cos\delta$$

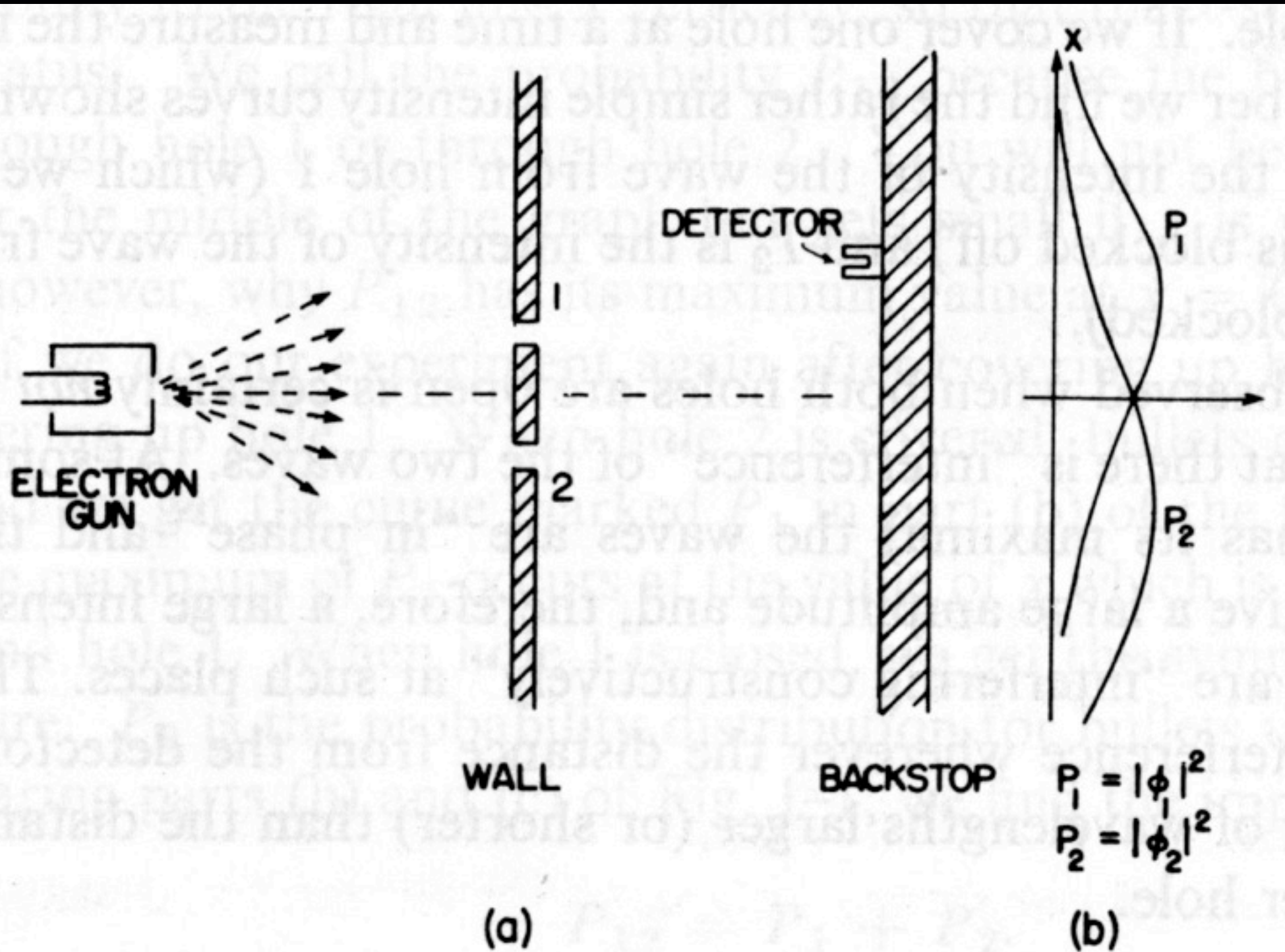
Interferenza

δ = sfasamento tra le onde

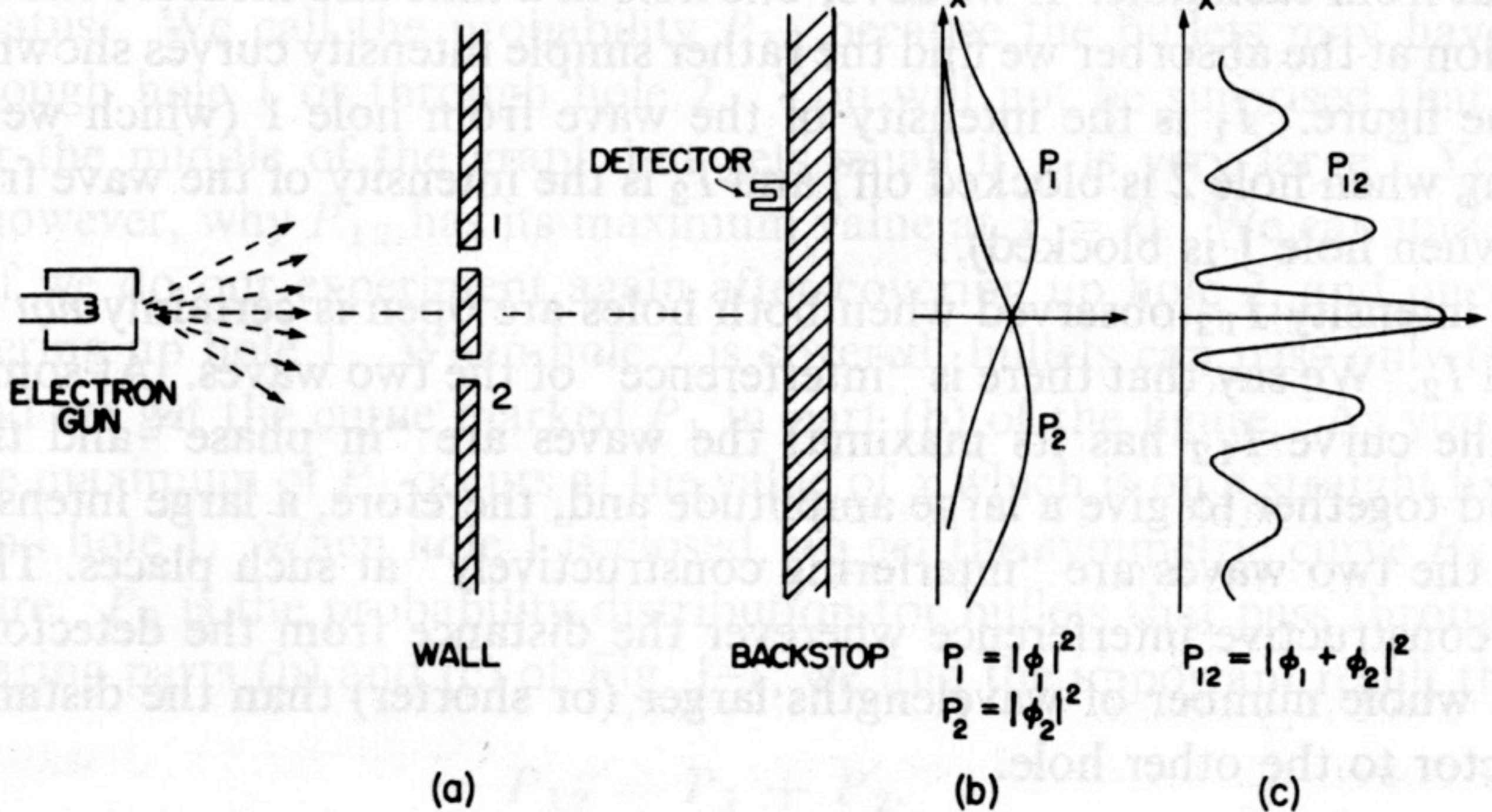
Elettroni



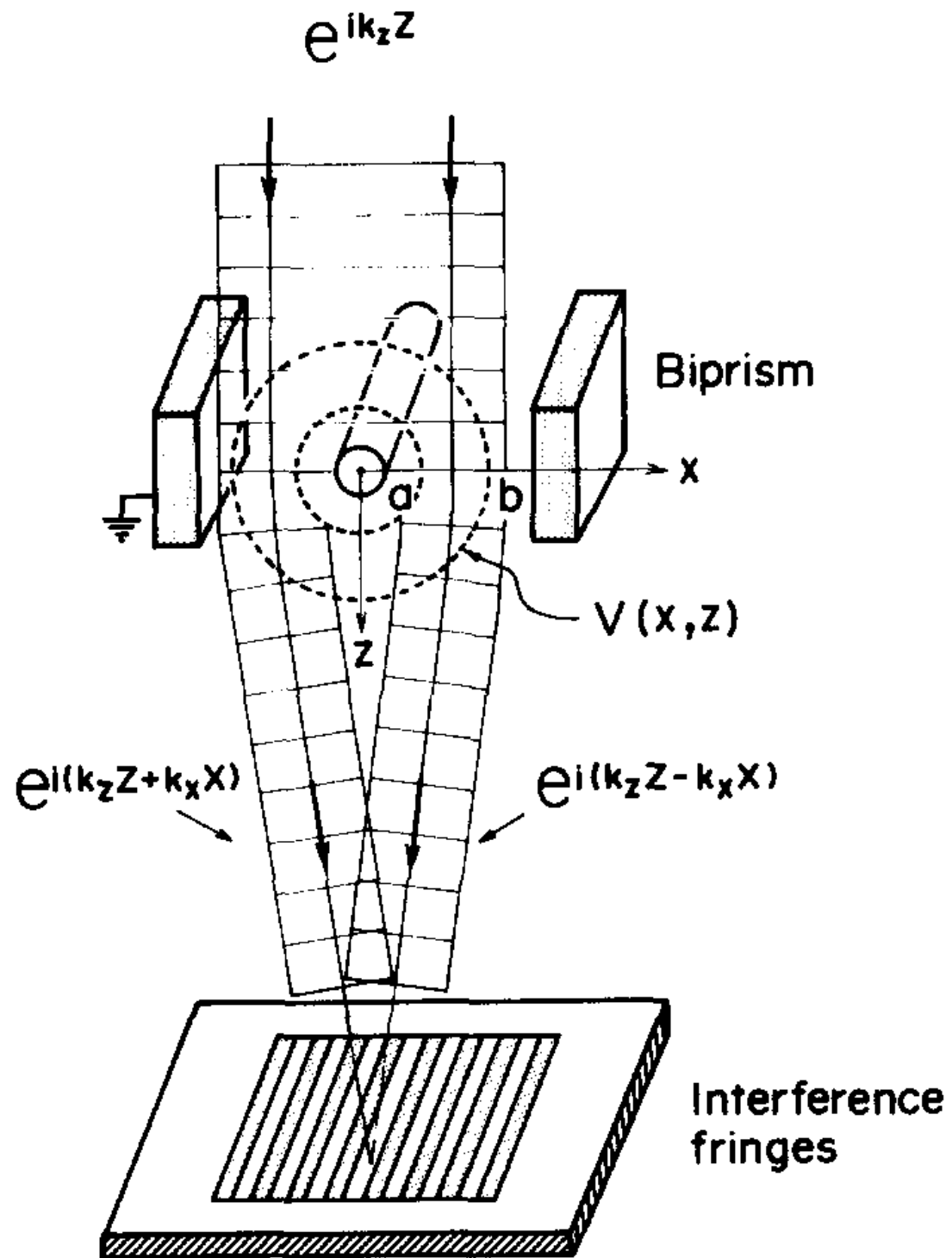
Elettroni



Elettroni



Elettroni



Tonomura utilizzò un apparato con un filo elettrico carico positivamente che deviava gli elettroni simulando le due fenditure.

1000 elettroni /s

$v \sim 10^8$ m/s

⇒ 100 km di distanza tra due elettroni !

Gli elettroni arrivano uno a uno sulla parete.

Since this experiment lasted for more than 30 minutes,
I have sped the movie up. Interference fringes are
now clearly visible.

Particella o Onda?

L'elettrone è una particella, ma si comporta come un'onda.

De Broglie: associare un'onda all'elettrone

lunghezza d'onda: $\lambda = h/mv$

$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ = costante di Planck

$m = 0.9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ = massa elettrone

v = velocità elettrone

Se $v \sim 10^8 \text{ m/s}$ allora $\lambda \sim 0.1 \text{ nm}$

Funzione d'onda

Schrödinger: funzione d'onda $\psi(x,t)$

ψ deve essere una funzione in campo complesso

$|\psi(x,t)|^2 =$ densità di probabilità

$|\psi(x,t)|^2 \Delta x =$ probabilità di trovare l'elettrone

tra $x - \Delta x/2$ e $x + \Delta x/2$ al tempo t

Interpretazione probabilistica

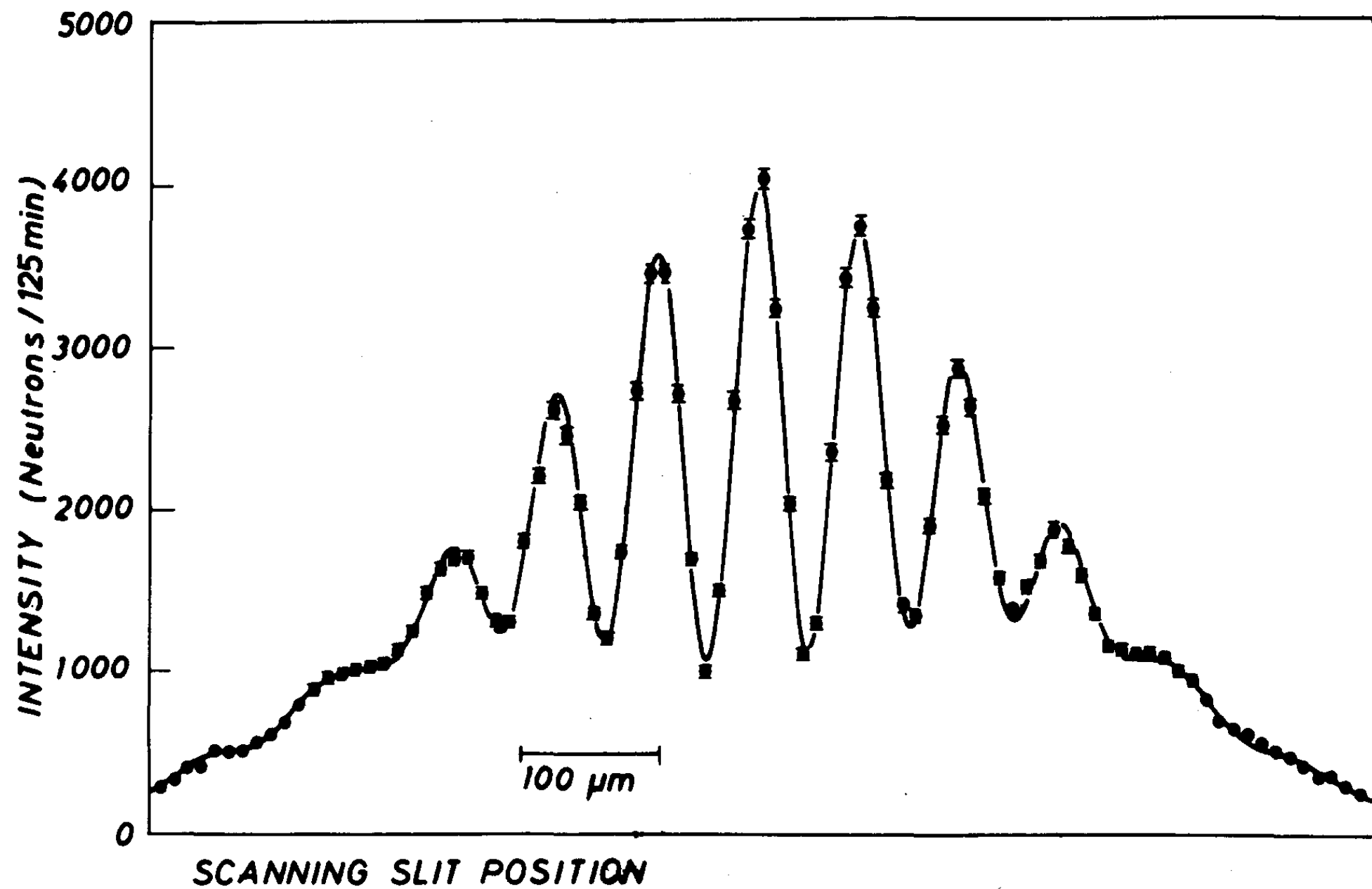
Neutroni

I neutroni hanno massa 2000 volte più grande degli elettroni

⇒ lunghezza d'onda di De Broglie più piccola

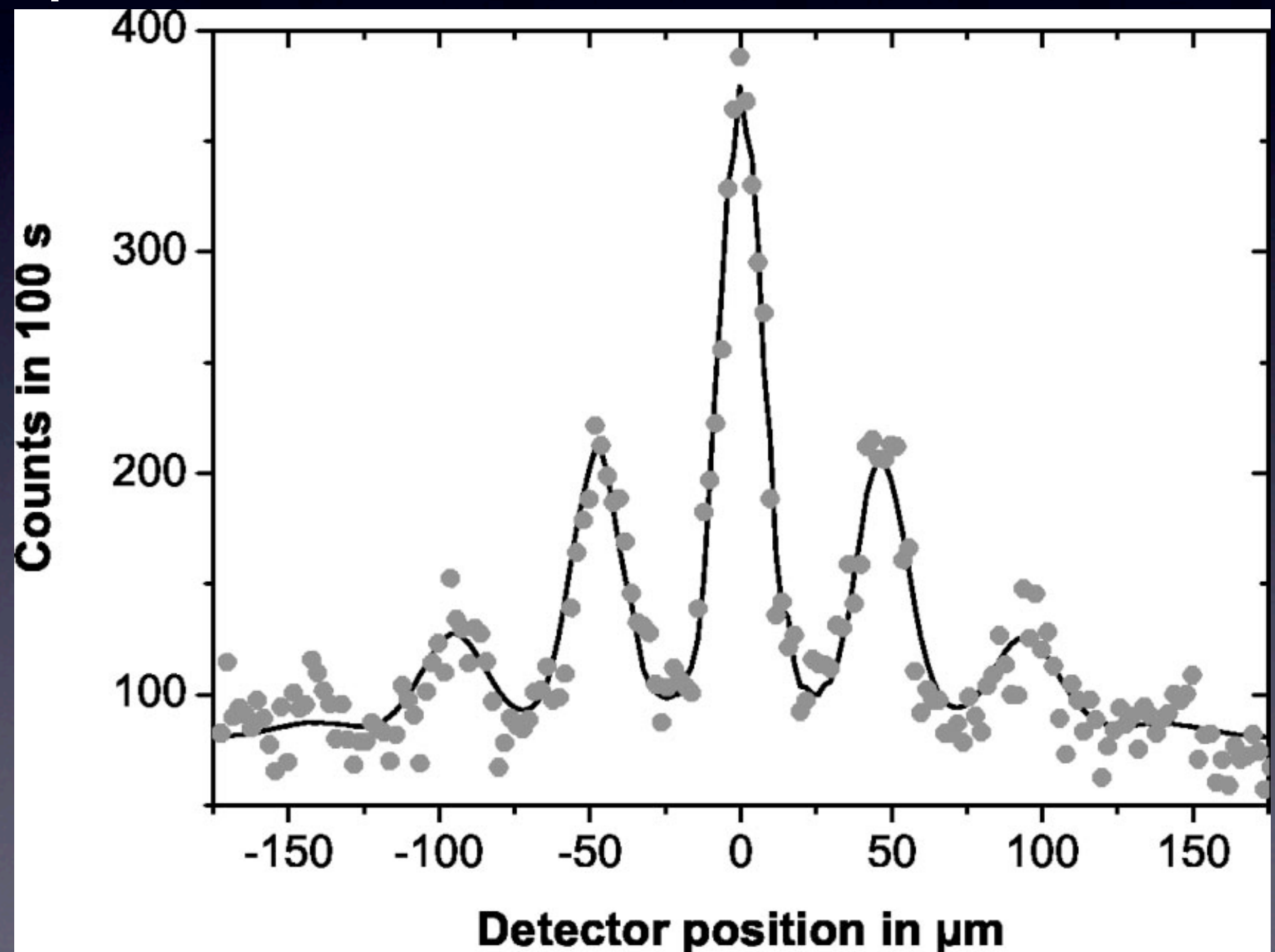
È più difficile vedere fenomeni di interferenza.

Neutroni



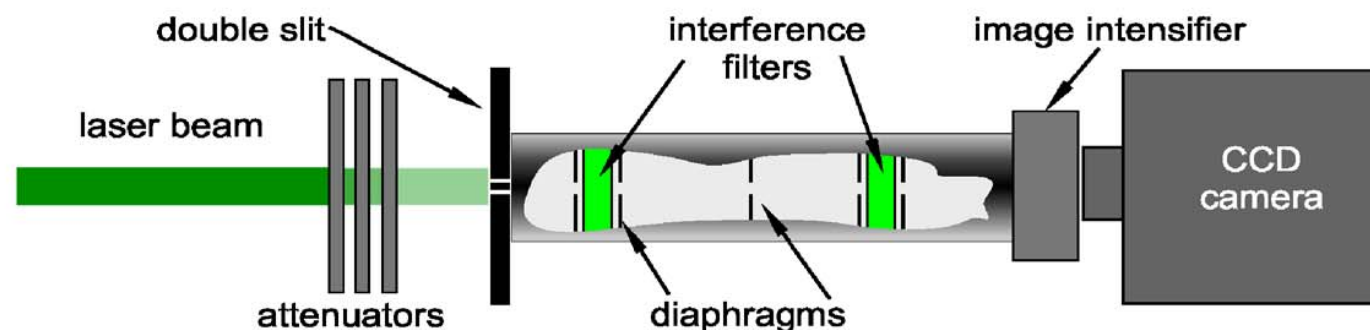
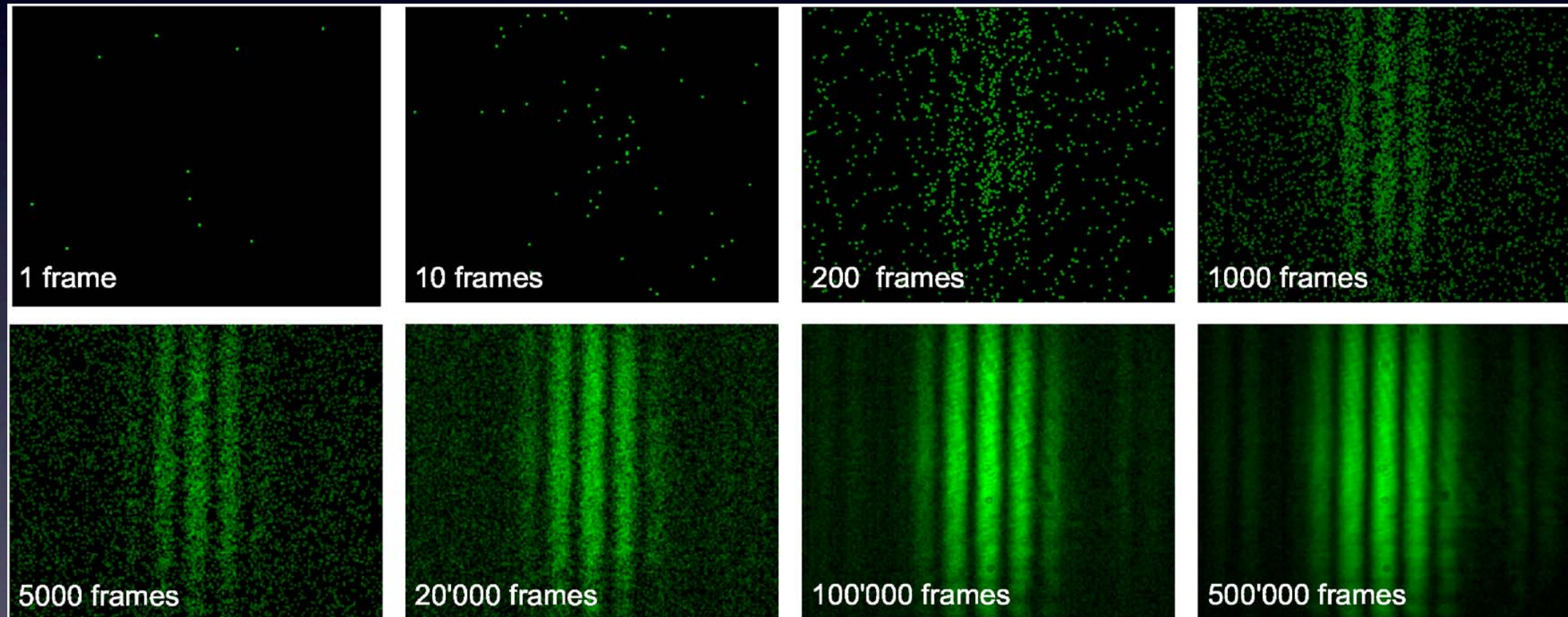
Atomi

Un esperimento con il Fullerene C_{60}



I Fotoni

Si può fare l'esperimento mandando un fotone alla volta (come con gli elettroni)



Un altro esperimento

Ipotezziamo che valga l'affermazione:

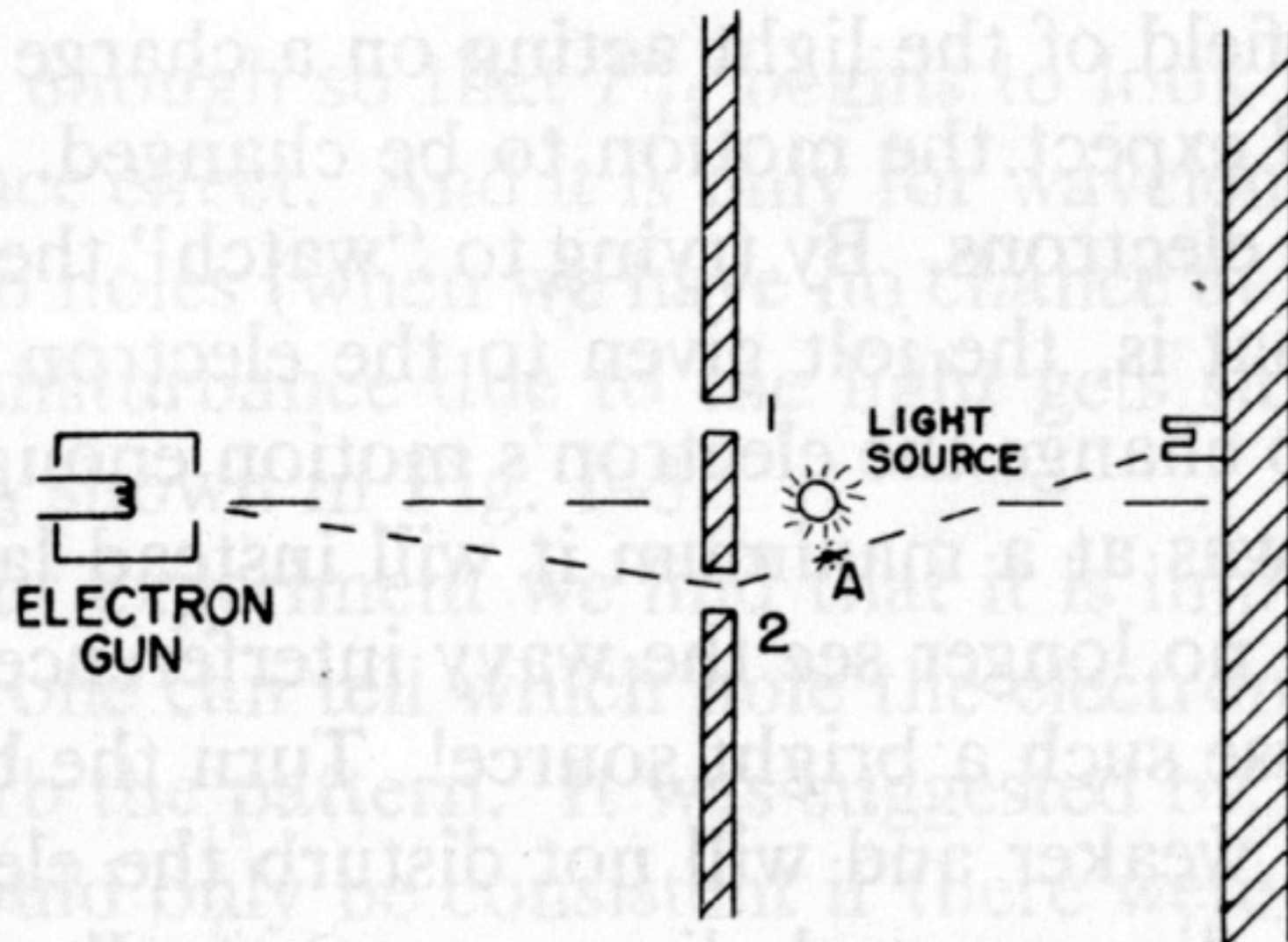
“L'elettrone passa per una fenditura o per l'altra”

Se fosse vera, si otterrebbe inevitabilmente che le probabilità si sommano:

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

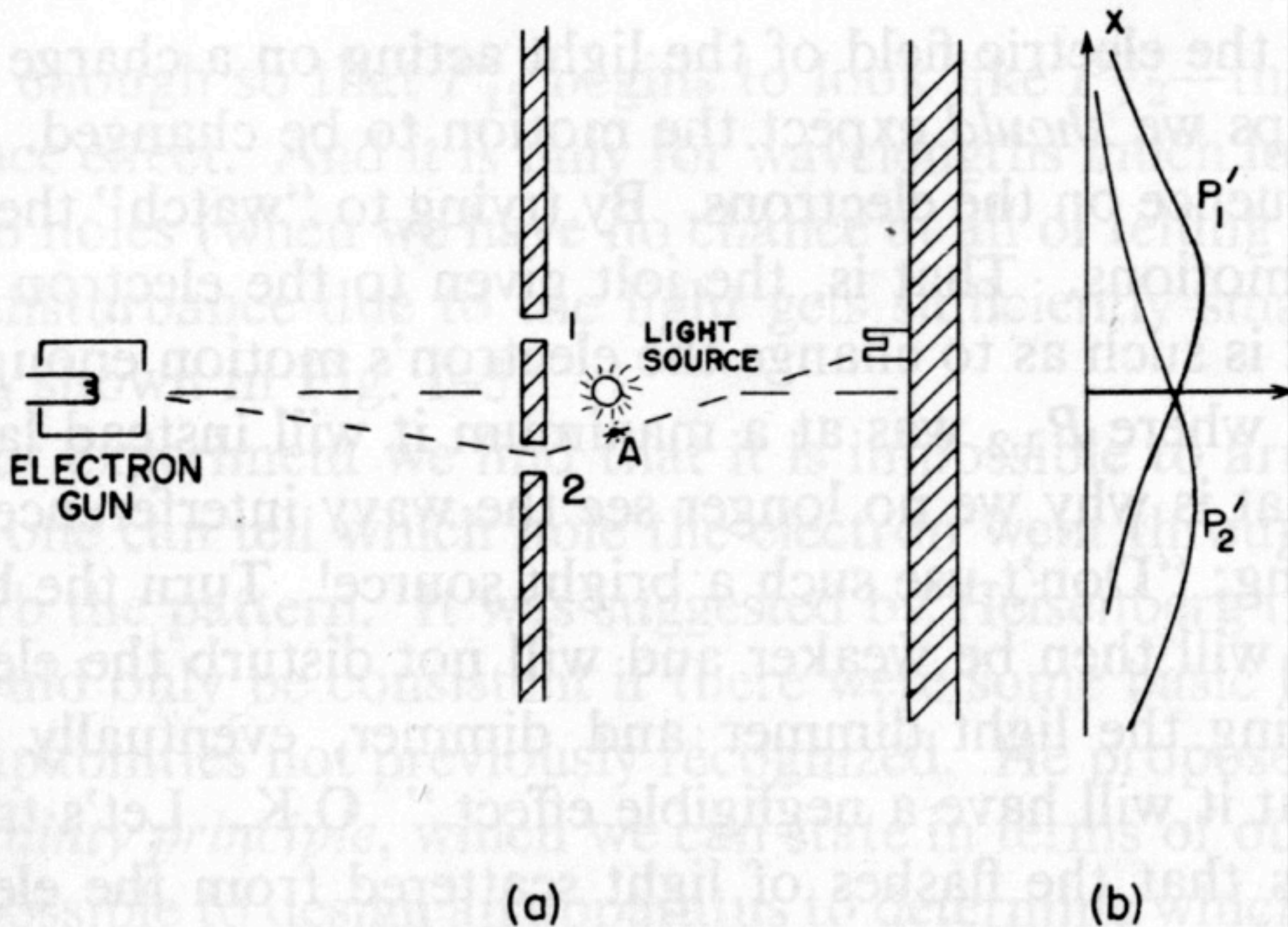
Se proviamo a guardare dove passano gli elettroni?

Guardare gli elettroni

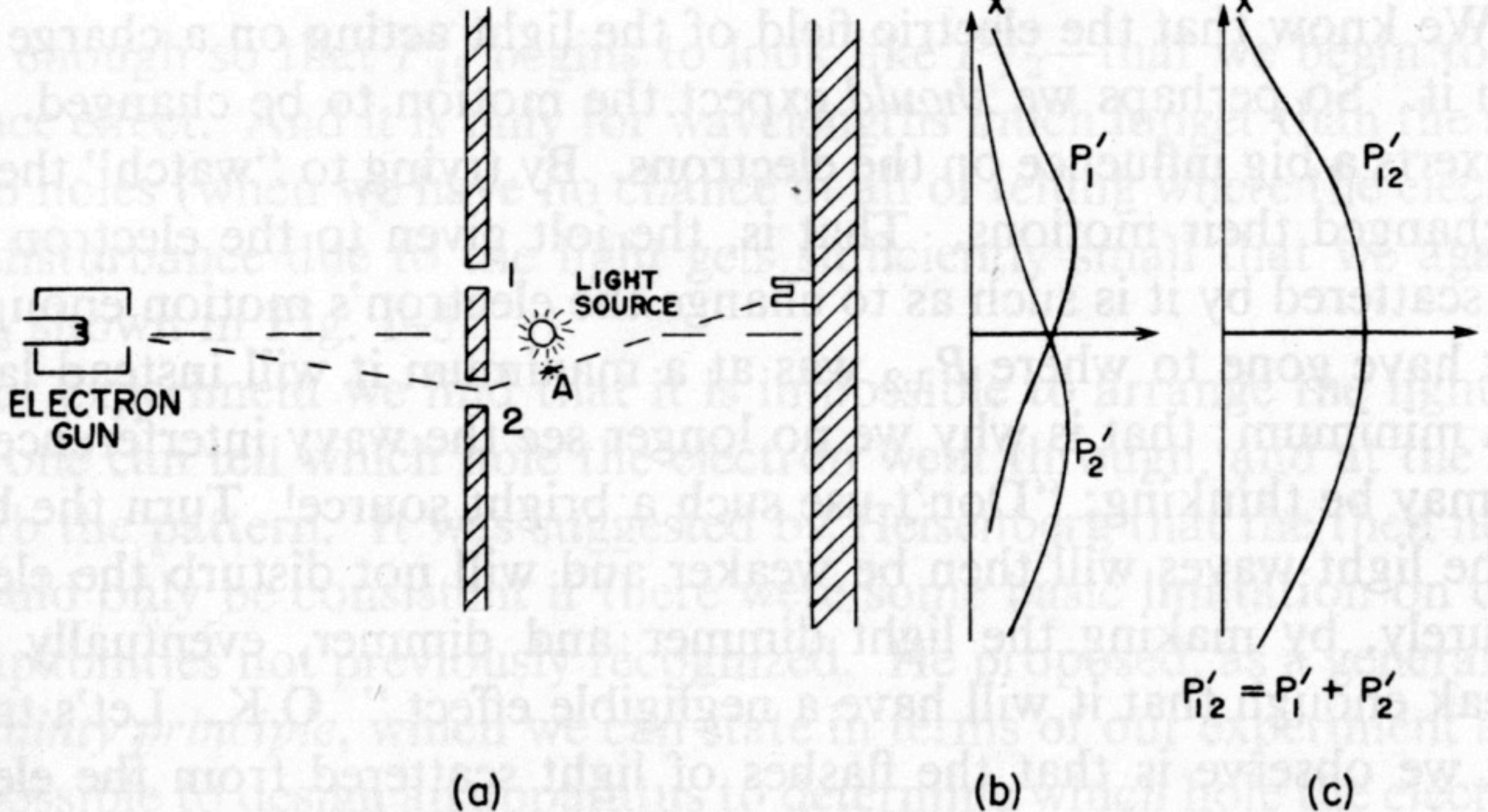


(a)

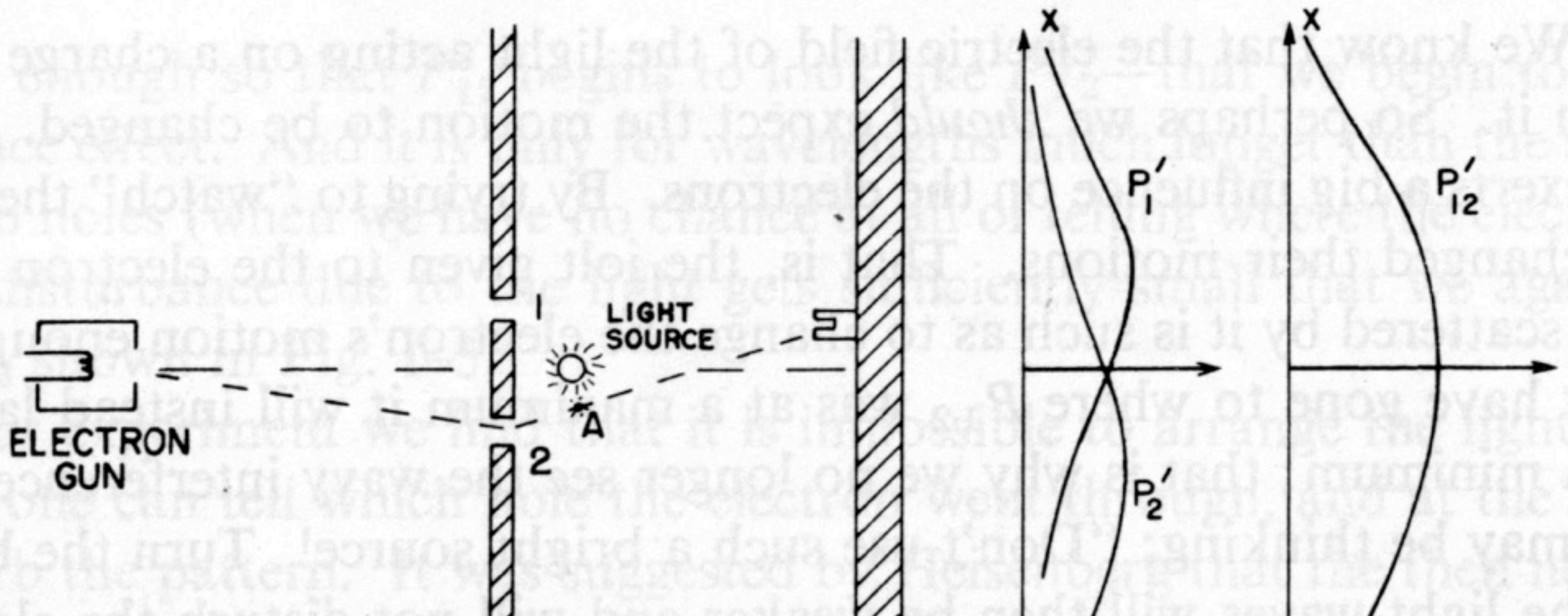
Guardare gli elettroni



Guardare gli elettroni



Guardare gli elettroni



Se so da che fenditura passa l'elettrone sparisce l'interferenza!

(a)

(b)

(c)

Principio d'indeterminazione

Principio d'indeterminazione

Particella di quantità di moto $p=mv$ e
posizione x ha un'indeterminazione Δx e Δp

Principio d'indeterminazione

Particella di quantità di moto $p=mv$ e
posizione x ha un'indeterminazione Δx e Δp

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

Principio d'indeterminazione

Particella di quantità di moto $p=mv$ e
posizione x ha un'indeterminazione Δx e Δp

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

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

Principio d'indeterminazione

Particella di quantità di moto $p=mv$ e
posizione x ha un'indeterminazione Δx e Δp

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

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

Le traiettorie non esistono

La diffrazione

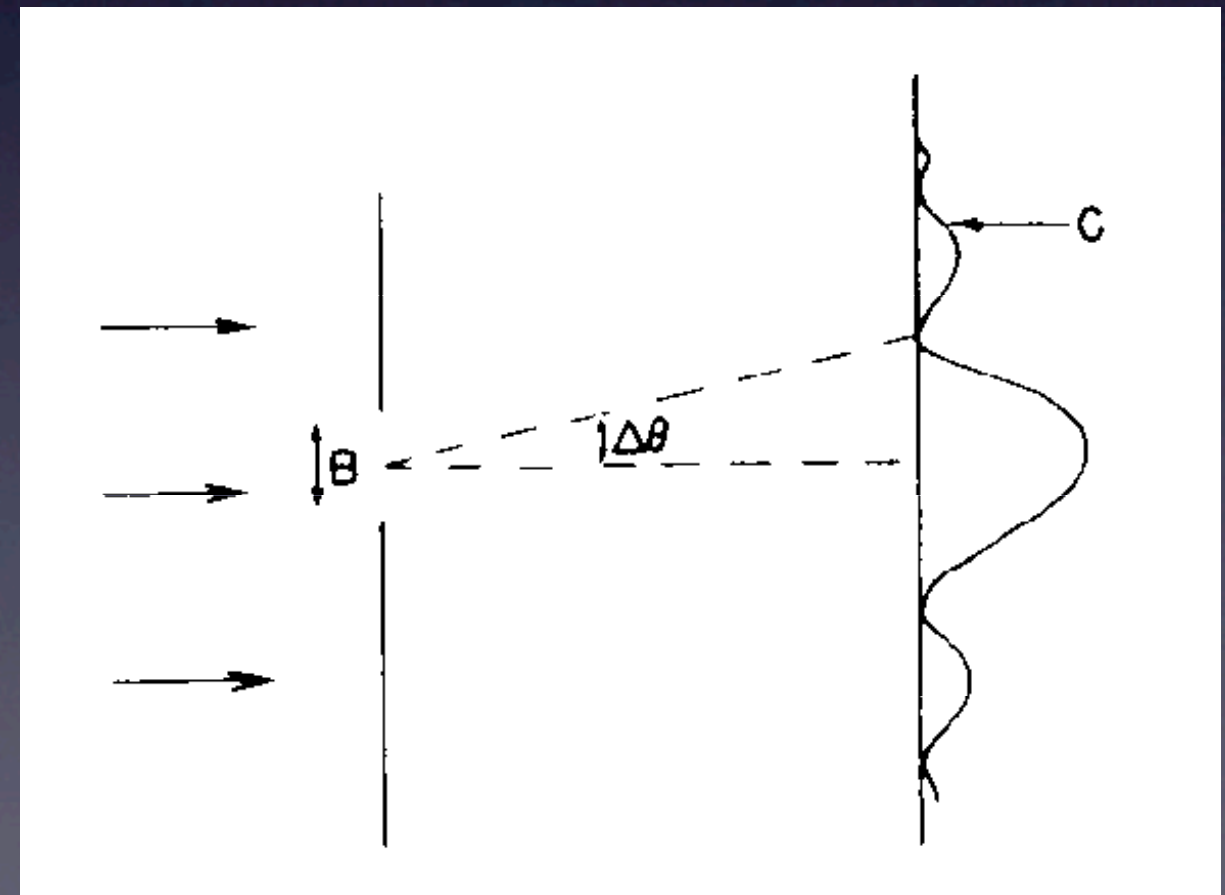
Si può spiegare la diffrazione col principio di indeterminazione:

$$\Delta x = B \quad \Delta p = p \Delta \theta = \Delta \theta h/\lambda \quad (\text{De Broglie})$$

$$\Delta x \Delta p \sim h$$

$$\Rightarrow \Delta \theta \sim \lambda / B$$

legge della diffrazione



La diffrazione

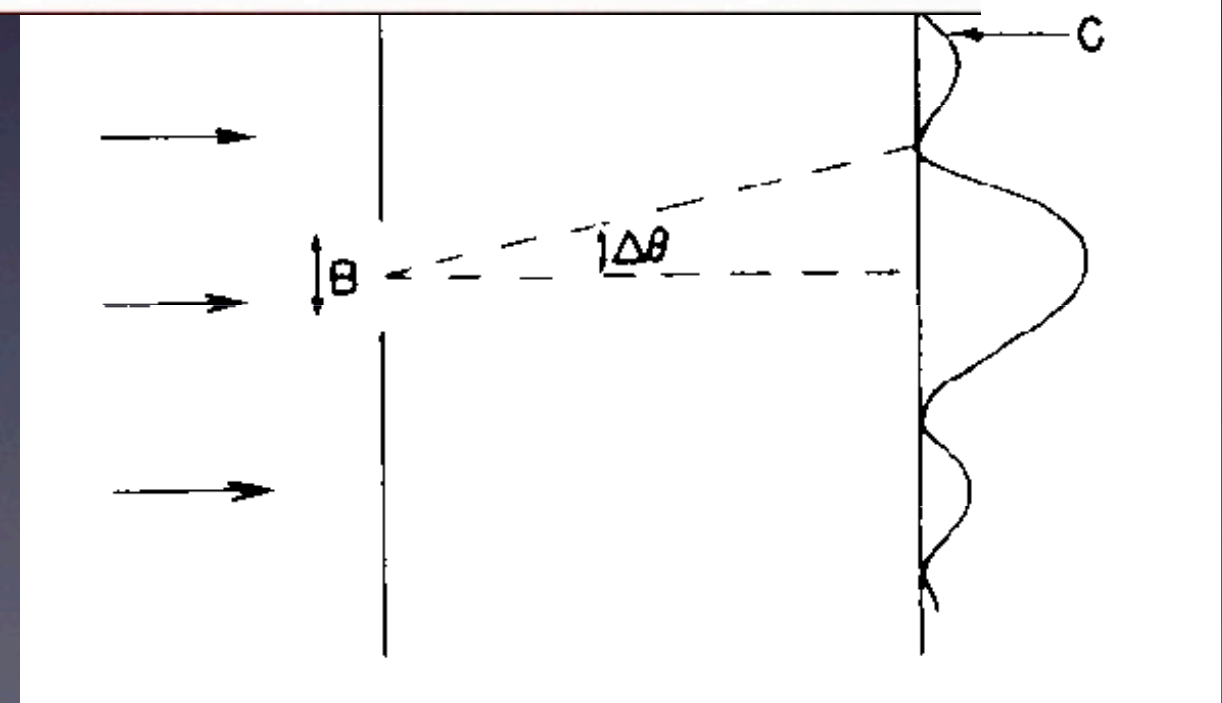
S
in
 Δ
 Δ



Pattern produced from a single slit.

$$\Rightarrow \Delta\theta \sim \lambda / B$$

legge della diffrazione



Le ampiezze

Nell'esperimento delle fenditure l'ampiezza è

$$A = \langle \text{part. arriva in } x \mid \text{part. parte da } s \rangle = \langle x \mid s \rangle$$

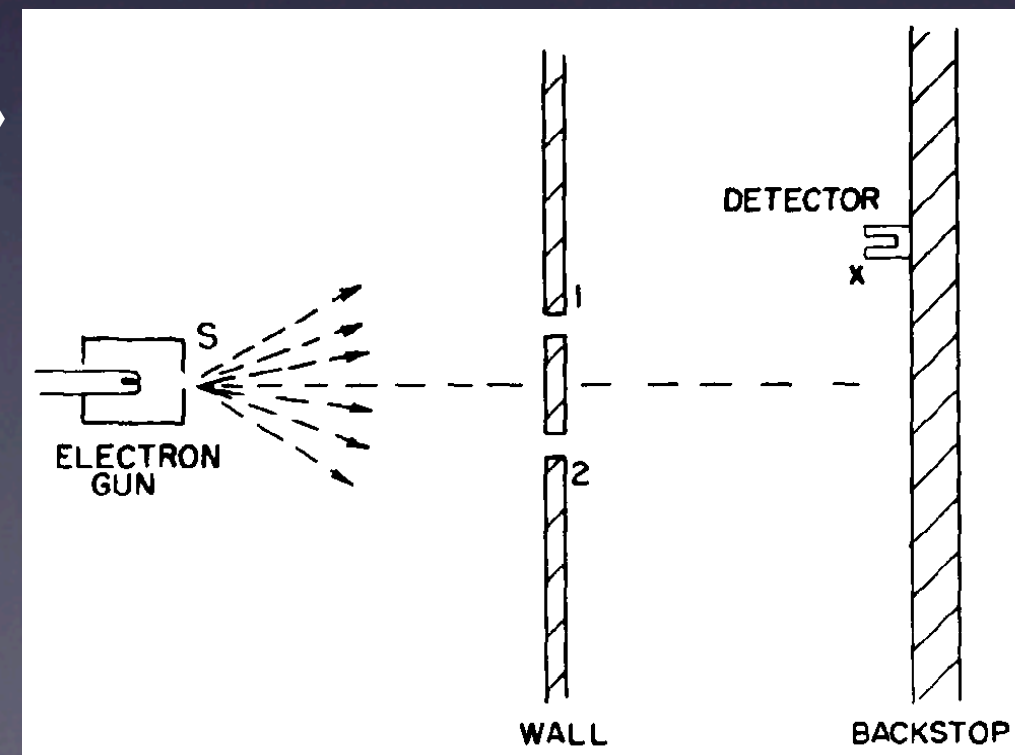
L'ampiezza A sarà composta di due ampiezze

$$A_1 = \langle x \mid s \rangle_{\text{tramite } 1} = \langle x \mid 1 \rangle \langle 1 \mid s \rangle$$

$$A_2 = \langle x \mid s \rangle_{\text{tramite } 2} = \langle x \mid 2 \rangle \langle 2 \mid s \rangle$$

$$A = A_1 + A_2$$

$$\text{probabilità} = |A|^2$$



Il collasso

Se si osserva dove passa l'elettrone

$$\langle x|s \rangle = \langle x|1 \rangle \langle 1|s \rangle$$

oppure

$$\langle x|s \rangle = \langle x|2 \rangle \langle 2|s \rangle$$

Si dice che la funzione d'onda $\langle x|s \rangle$ è collassata in uno dei due percorsi possibili.

Gli stati

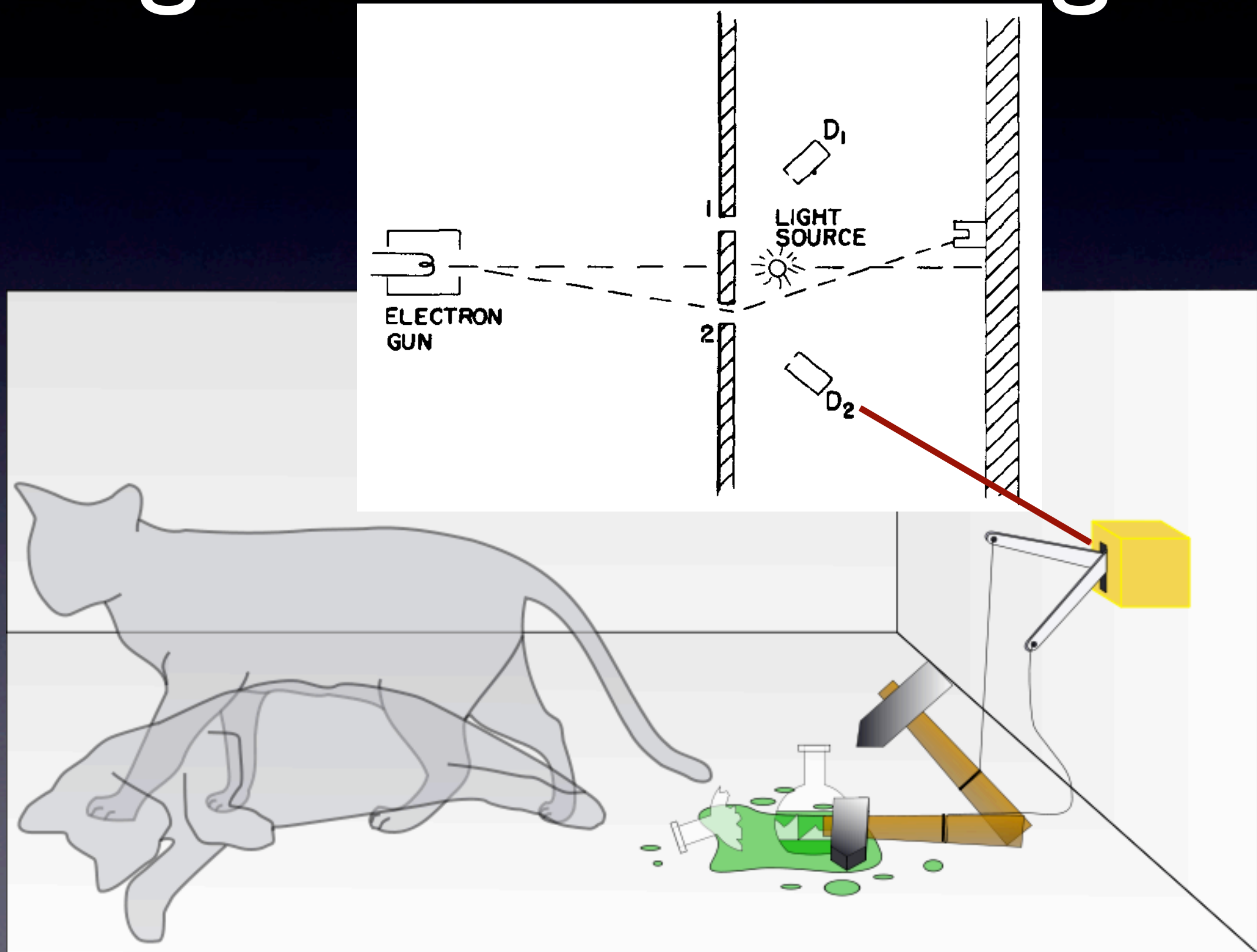
I simboli $\langle \dots |$ e $|\dots \rangle$ rappresentano STATI del sistema quantistico.

Il sistema può trovarsi in uno stato che è sovrapposizione di altri stati più elementari.

L'ampiezza di probabilità si scrive come

$$\langle \text{stato finale} | \text{stato iniziale} \rangle$$

Il gatto di Schrödinger



Il gatto di Schrödinger

- Se l'elettrone passa per la fenditura 2

$| \text{morto} \rangle$

- Se l'elettrone passa per la fenditura 1

$| \text{vivo} \rangle$

Visto che l'elettrone passa con eguale probabilità dalle due fenditure

$$| \text{gatto} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| \text{vivo} \rangle + | \text{morto} \rangle)$$

