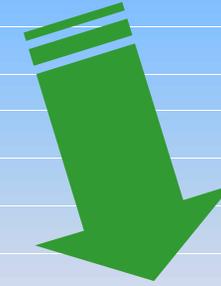
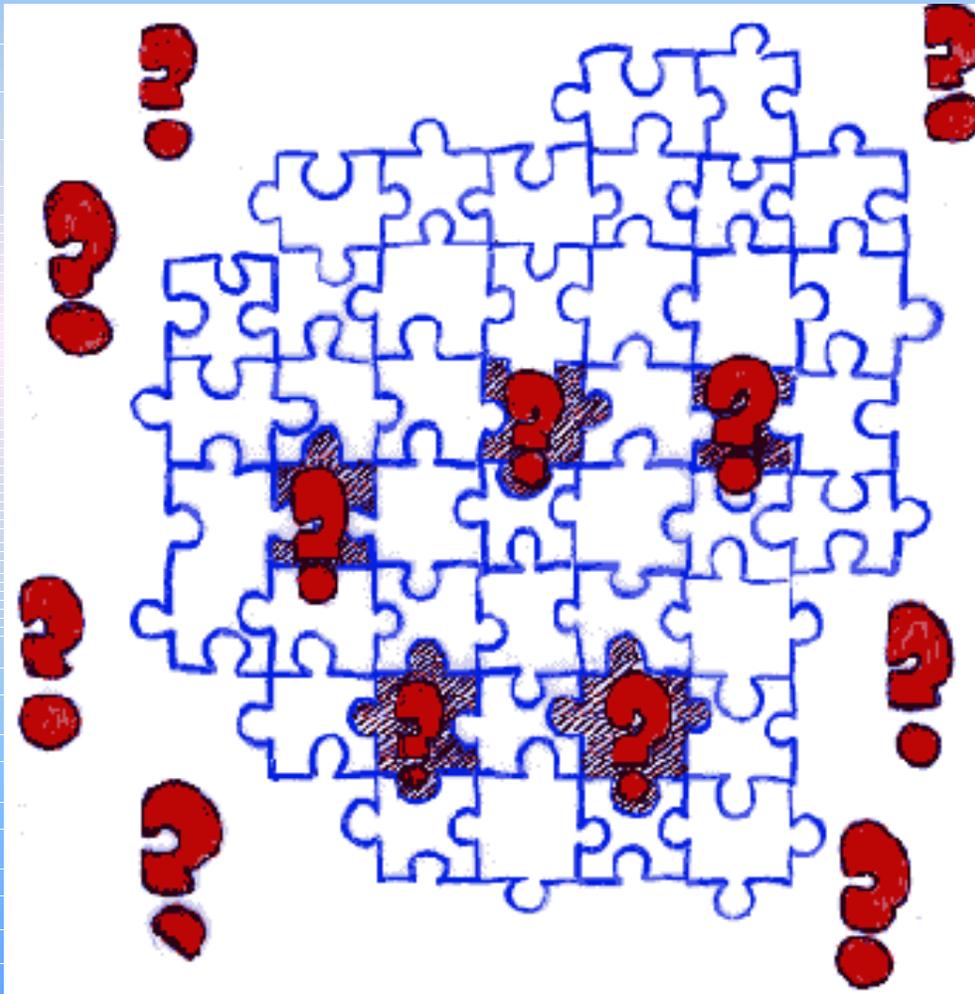


Tra i puzzle della natura



Le basi della Meccanica
Quantistica-Ondulatoria

Dalla fisica classica
alla fisica moderna

Paolo Strolin
con la collaborazione di
Lello Ingenito e Laura Strolin

Un viaggio nel mondo dei
??? perché ???

(il mondo preferito da bambini e scienziati)

Referenze bibliografiche

- R.P.Feynman, R.B.Leighton e M.Sands
The Feynman Physics, Vol III, Addison-Wesley (1964)
La Fisica di Feynman, Vol III, Masson (1985)
- J.Orear
Fundamental Physics, John Wiley & Sons (1967)
Fisica generale, Zanichelli (1970)

A proposito di "classico " e "moderno"...

Domanda

che intendiamo per **fisica "moderna"** ?

Risposta

la fisica dopo ~ 1915:

→ Teoria della Relatività

→ Meccanica Quantistico-Ondulatoria

... ma un giorno sarà forse chiamata **"classica"**

La Scienza progredisce senza smentirsi

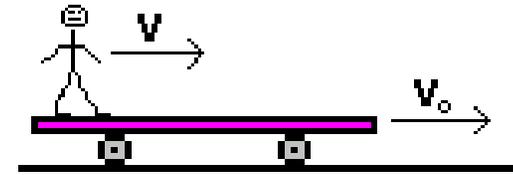
(ingloba le scoperte in una visione più completa)

Esempio: la Relatività

Galileo

→ Addizione di velocità

$$V_{\dagger} = v + v_0$$



V_{\dagger} : velocità rispetto a terra

Einstein

→ Una addizione potrebbe portare a $v_0 + v > c$!
(c = velocità della luce = massima velocità raggiungibile)

→ Trasformazione di Lorenz, più complessa → $v \leq c$

→ Ingloba la relatività Galileiana

(che resta un'ottima "approssimazione" per $v, v_0 \ll c$)

Quindi Galileo può stare tranquillo

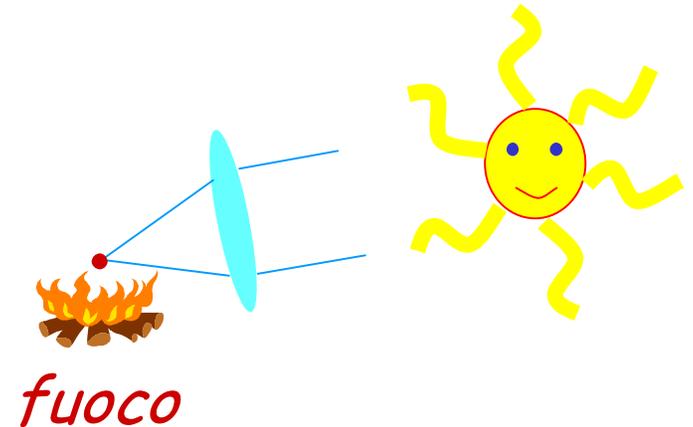
Ottica in fisica classica

$$\lambda \ll d \text{ (dimensioni oggetti)}$$



"raggi" di luce

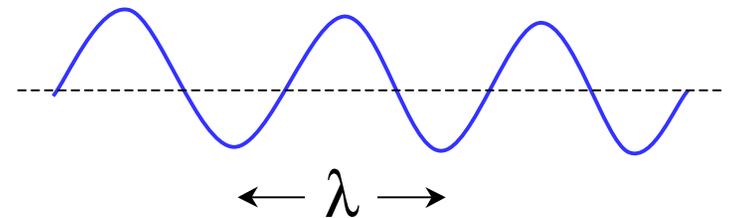
"ottica geometrica"



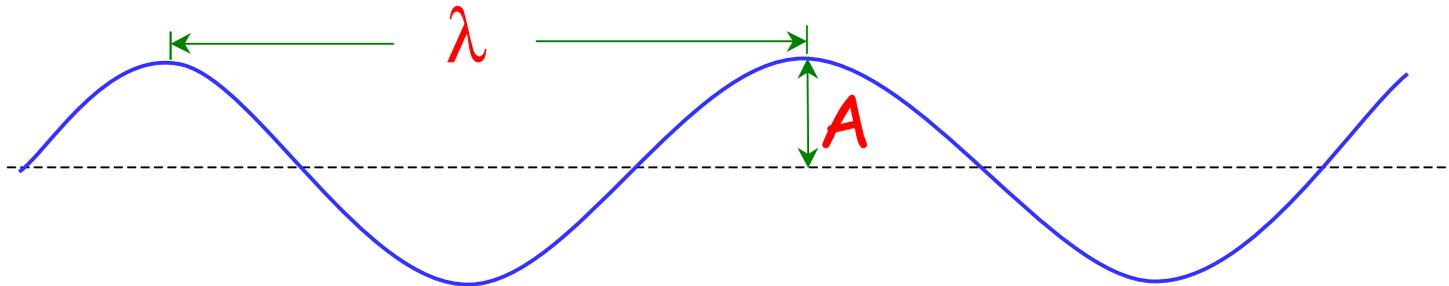
$$\lambda \sim d$$



"interferenza", "diffrazione"
**fenomeni ottici legati
alla natura ondulatoria**



ONDE

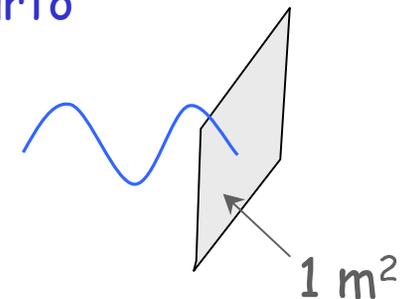


Lunghezza d'onda λ (onde marine ~ 10 m ; luce visibile $\sim 0,5$ micron)

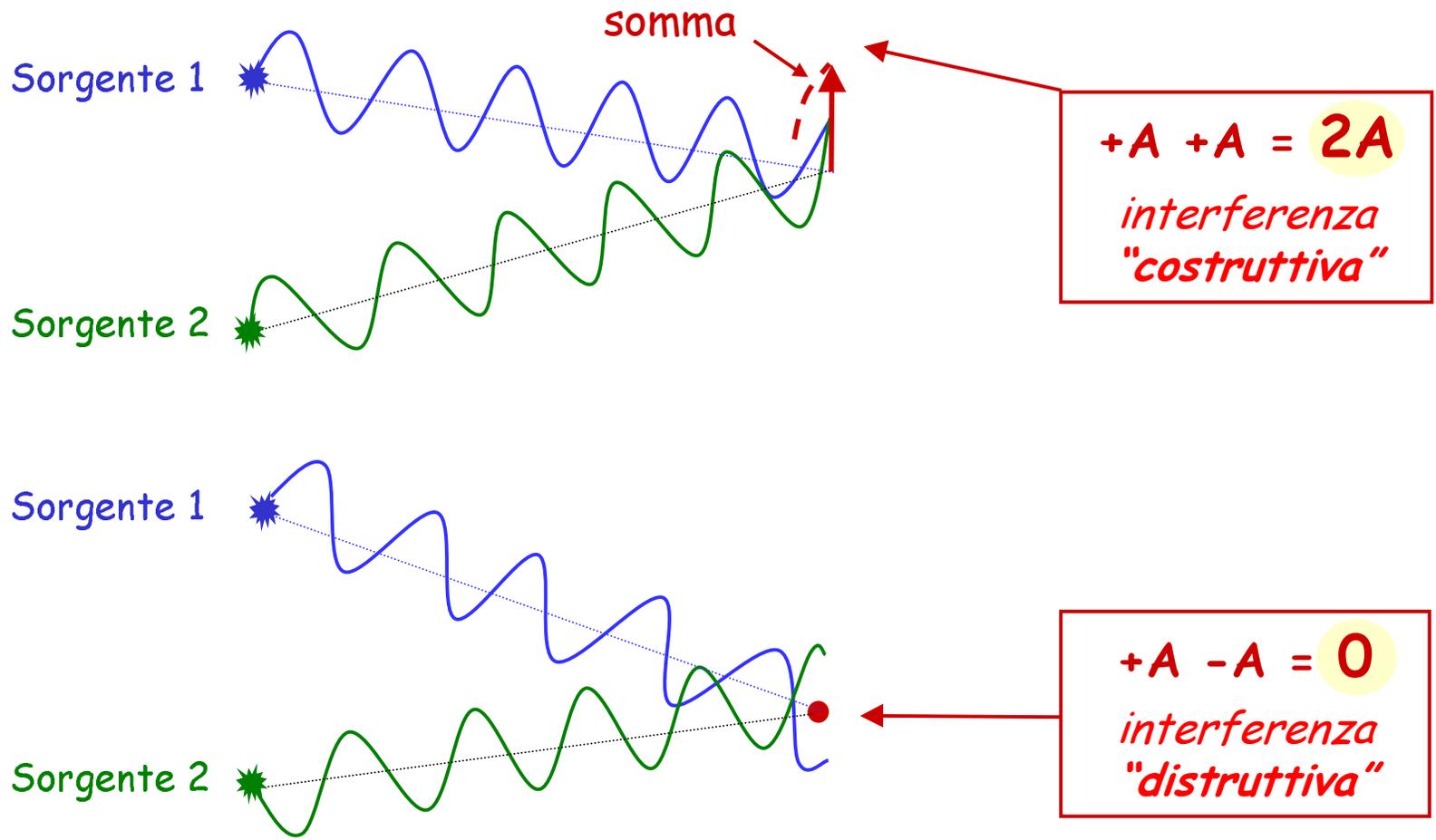
Ampiezza A (oscillazioni tra $\pm A$)

Energia trasportata $\propto A^2 > 0$ \rightarrow impatto nell'urto

Intensità I \rightarrow $\frac{\text{energia}}{\text{m}^2 \text{ sec}}$



INTERFERENZA



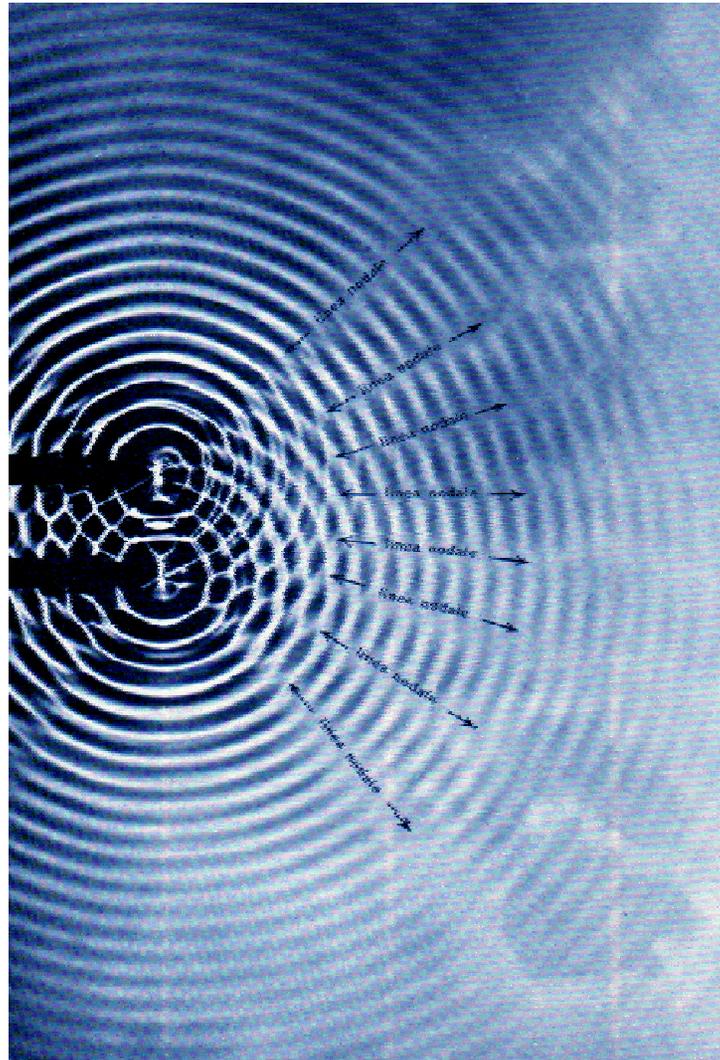
In sintesi: nella sovrapposizione (algebraica \pm) di onde

due possibilità estreme: $\begin{cases} + + , - - & \rightarrow \pm 2A \\ + - , - + & \rightarrow 0 \end{cases}$

ONDE SULLA SUPERFICIE DI UN LIQUIDO

Sorgenti
"sincrone"

1 →
2 →



"interferenza"

tra 1 e 2



massimi ove le
ampiezze si
sommano !

(e zero ove si sottraggono)

ONDE ➡ fenomeni di "INTERFERENZA"

Osservazione di fenomeni di
INTERFERENZA

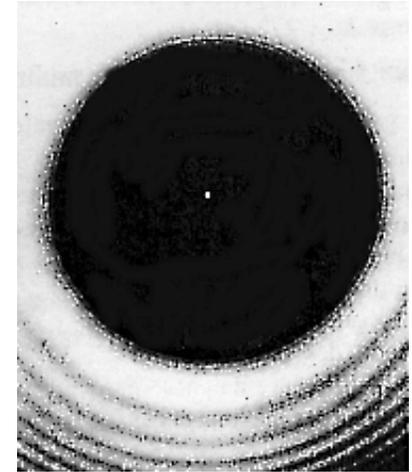
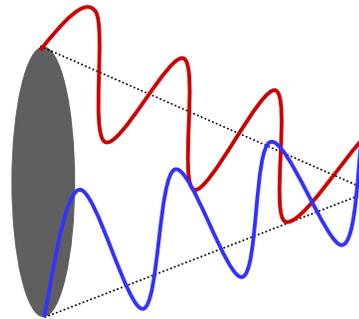


"sintomo" di
NATURA ONDULATORIA

Come fu evidenziato che la luce ha natura ondulatoria

(vedremo nel seguito che la realtà è più interessante e complessa !)

interferenza costruttiva
al centro del disco
↓
un buco come miraggio



A.Fresnel: teoria ondulatoria della luce (1819)

S.Poisson: macchia luminosa al centro dell'ombra predetta dalla teoria !
→ teoria "non plausibile"

F.Arago: il "non plausibile" viene osservato !
analogia per convincersi: uno scoglio ($d \sim \lambda$) non dà riparo

Morale: la scienza non ammette pregiudizi !

(sarebbe meglio se così fosse anche nella società)

Per dirla con Einstein

Il "senso comune" è quello strato di pregiudizi che si deposita nella mente fino ai diciotto anni

e qua iniziano i

P
U
N
T
I
I
N
T
E
R
E
T
E
I
T
A
G
O
R
R
E
T
E
I
V
I
I
?

Storici dilemmi

(anche in era pre-scientifica)

Luce

onda ?
particella ?

Elettrone

(e in generale
particelle elementari)

particella ?
onda ?

Evidenze sperimentali



fenomeni di interferenza

effetto fotoelettrico
(visto a inizio secolo)

quantizzato in massa e
carica elettrica

fenomeni di interferenza ?

Domanda: vi è una simmetria luce \leftrightarrow e^- ?





**Cerchiamo un
tassello del
puzzle !**

Protagonisti principali: Schrödinger, Heisenberg, Born ... (1926-27)

Il percorso della lezione

Fisica classica

- **particelle elementari**: trattate come minuscole pallottole
- **onde**: interferenza come fenomeno peculiare
(esempio: la risacca in un porto deriva da riflessioni e interferenze)

Totale separazione tra onde e particelle

Fisica moderna: Meccanica quantistica-ondulatoria

Dualità "onda-particella"

Come Dr. Jekyll e Mr. Hyde: comportamento da onda o da particella a seconda delle circostanze in cui **osserviamo**

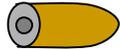
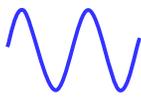
Onde e particelle elementari : quadro comune !



un poco di pazienza e attenzione!

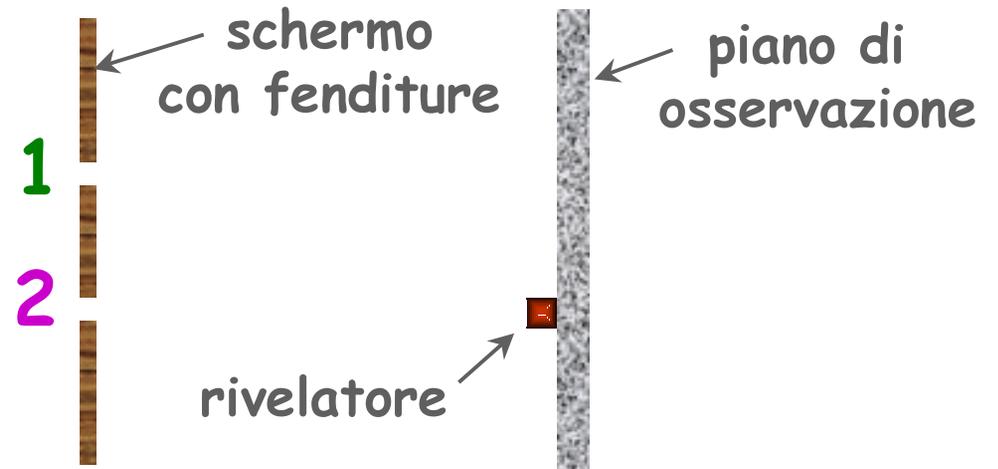
Il modo per capire

Immaginiamo di fare esperimenti su

-  Pallottole (particelle materiali)
-  Onde
-  Elettroni (particelle elementari)

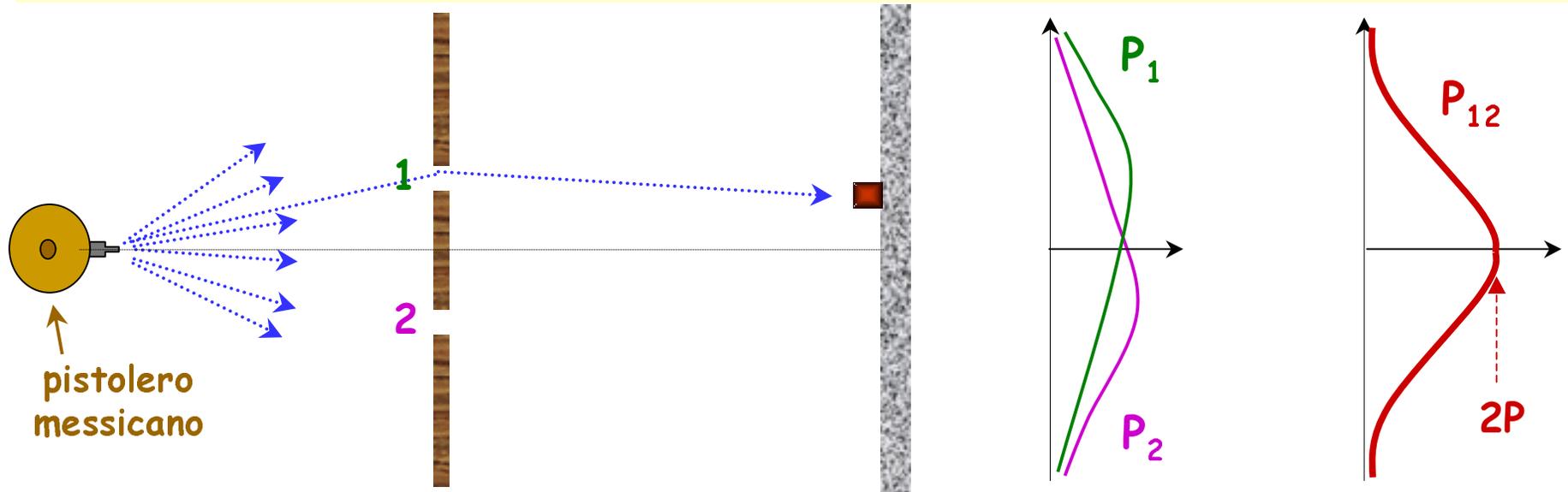
usando uno strumento semplice

(Galileo per lo studio della caduta dei gravi inventò uno strumento semplice: il piano inclinato)



Che accade ?

Esperimento con particelle (pallottole)



Il **pistolero** spara all'impazzata (in ogni direzione)
Urtando casualmente contro i bordi delle fenditure, le pallottole vengono diffuse e rivelate con probabilità

P_1 (P_2) se una sola fenditura è aperta , P_{12} se lo sono ambedue

EFFETTI CARATTERISTICI DI PARTICELLE

arrivano a colpi (quantizzazione !)

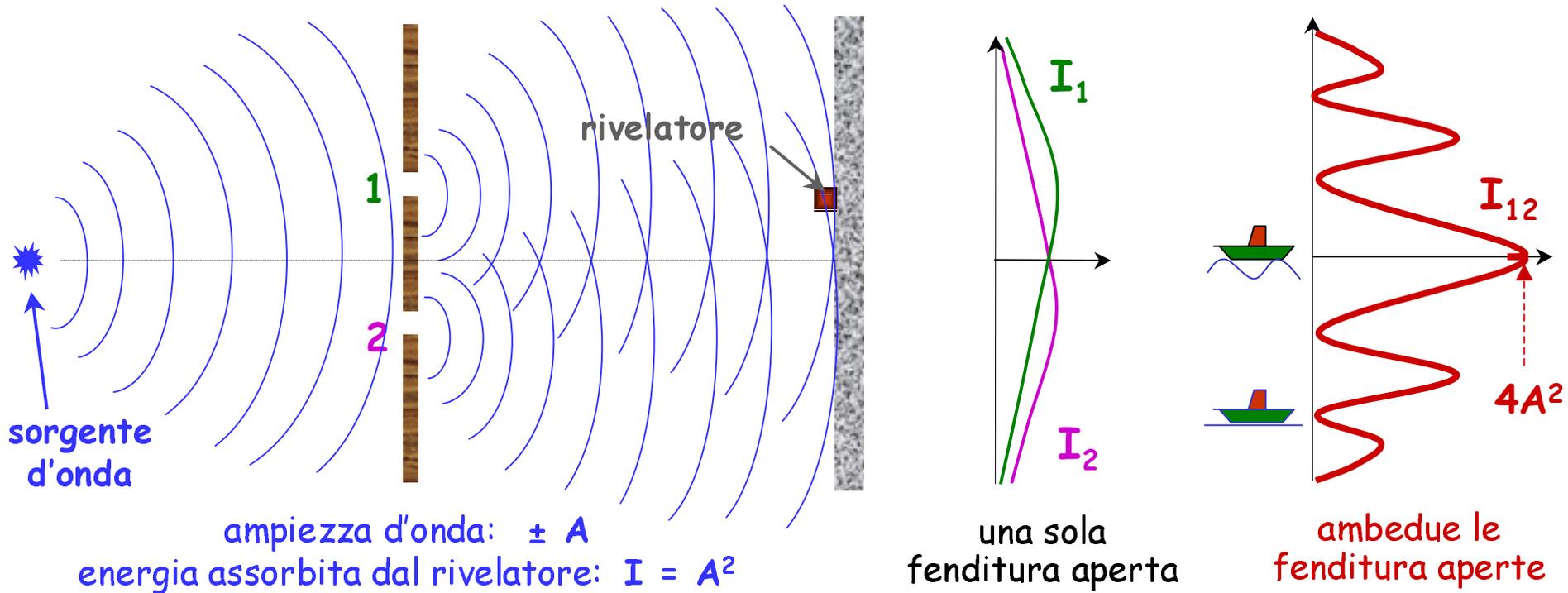
$P_{12} = P_1 + P_2 > P_1, P_2$ (additività !)

al centro $P_{12} = 2P$

- **In particolare:** mai si hanno meno colpi aprendo una fenditura

Esperimento con onde

Pensate al moto ondoso in porto con 2 imboccature (fenditure) come sorgenti di onde



Effetti caratteristici di onde

- "frange di interferenza" : $I_{12} \neq I_1 + I_2$
- al centro : $I_{12} = (2A)^2 = 4A^2 = 4I$! (e non $2I$)

Sorpresa : in  vi è meno risacca con ambedue le imboccature aperte !

Onde e particelle: comportamenti diversi

	Additività?	Quantizzazione?
onde	no (interferenza!)	no
particelle	si	si

Queste proprietà permettono di distinguerle
sperimentalmente

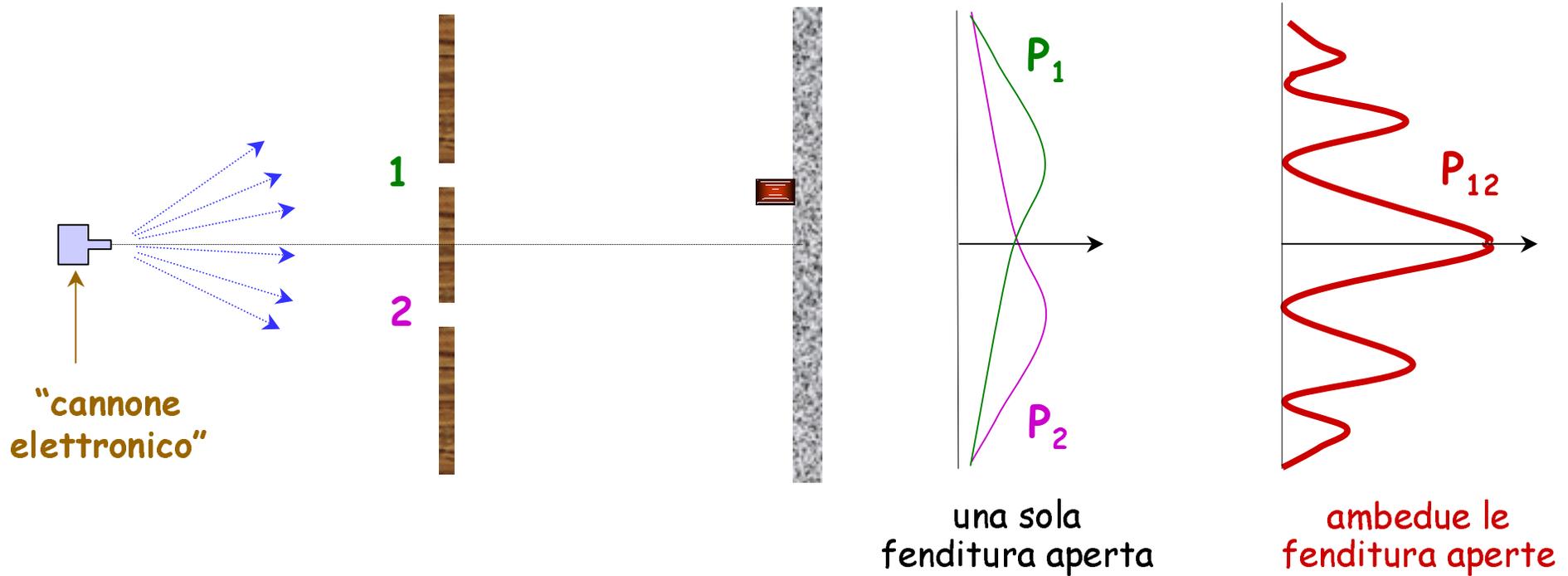


Sappiamo come investigare la natura degli elettroni:

Onde ?
A blue wavy line representing a wave.

Particelle ?
Three red dots arranged horizontally, representing particles.

Esperimento con elettroni



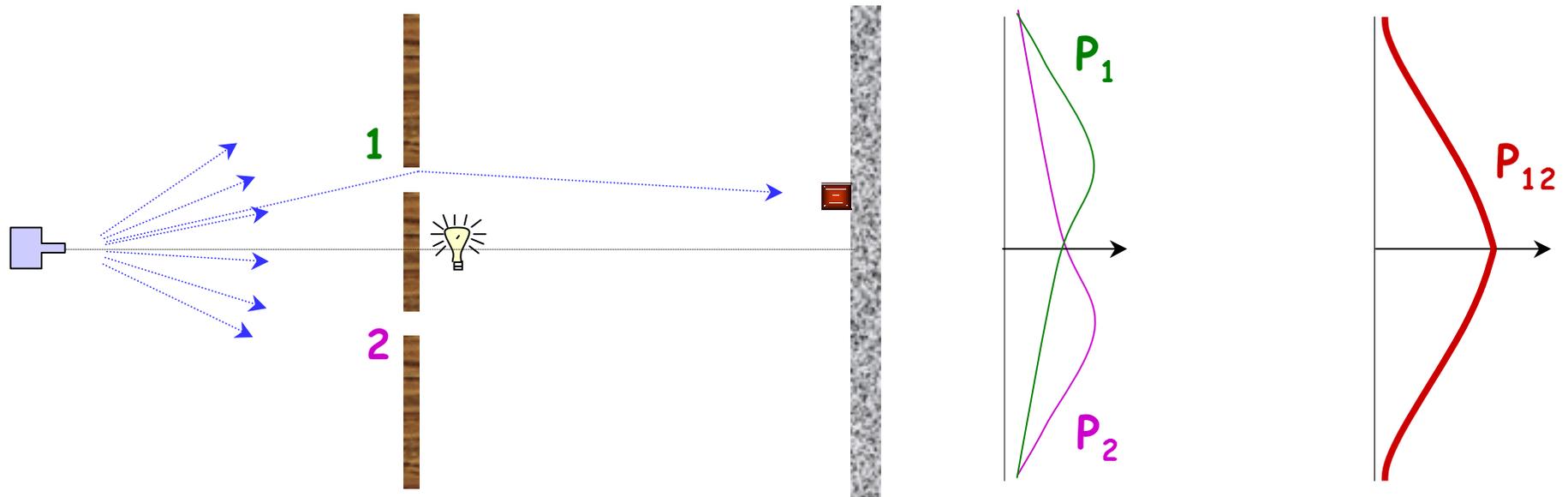
Tic sul rivelatore (quantizzazione) → **particelle !**

Interferenza → **onde !**



Per capire meglio

illuminiamo gli elettroni e vediamo se passano da **1** o **2**



Per ogni elettrone ora sappiamo se applicare P_1 o P_2

Infatti $P_{12} = P_1 + P_2$ e l'interferenza scompare!

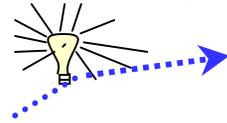


Quando "si sentono osservati" gli elettroni hanno comportamento da particelle!



Una congettura razionale (... ?)

La luce troppo intensa **colpisce** gli elettroni e li devia



Frange d'interferenza **confuse** tra loro



Quindi riduciamo l'intensità della luce per attenuare gli urti

Quasi sempre **non** vediamo l'elettrone



Ma quando lo vediamo **niente interferenza !**



A bassissima intensità luminosa, la luce urta gli elettroni con minore frequenza ma con la stessa forza !

? La luce è "quantizzata" : è particella ?
Ma anche onda !

Le differenze scompaiono !

L'elettrone che credevamo
particella
ha anche comportamento di
onda



La luce che credevamo
onda (e.m.)
ha anche comportamento di
particella

Un mistero è svelato



A livello microscopico qualsiasi misura
introduce una perturbazione



Nell'osservare da quale fenditura passa l'elettrone
lo deviamo sempre un poco, quanto basta per
confondere e annullare le frange di interferenza



L'elettrone mostra comportamento da onda
(interferenza)
solo se non si misura da quale fenditura passa

Nuovo concetto

A livello microscopico impossibile separare

- evoluzione di un sistema fisico
- misure su di esso (lo perturbano)



Un sistema fisico microscopico

- non ha evoluzione indipendente da noi
- si "accorge" che lo stiamo guardando
(con questo fatalmente lo perturbiamo e ne mutiamo il comportamento)

Invece in fisica classica :
sistemi fisici (macroscopici) incuranti delle misure
Ma è solo un'approssimazione, non verità assoluta

Quadro comune per onde e particelle "DUALITÀ ONDA PARTICELLA"



MECCANICA QUANTISTICA-ONDULATORIA

particelle

onde

Elettrone rappresentato come **onda** 
Probabilità di trovarlo in un punto = (ampiezza dell'onda)²

Se lo localizziamo (idealmente con una sorgente luminosa) lo perturbiamo e perdiamo le frange d'interferenza, cioè l'informazione sulla lunghezza d'onda λ :
appare come **particella !**

Principio di Indeterminazione (Heisenberg, 1927)

$$\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$$

quantità di moto $\propto 1/\lambda$

"costante di Planck"
(fondamentale)

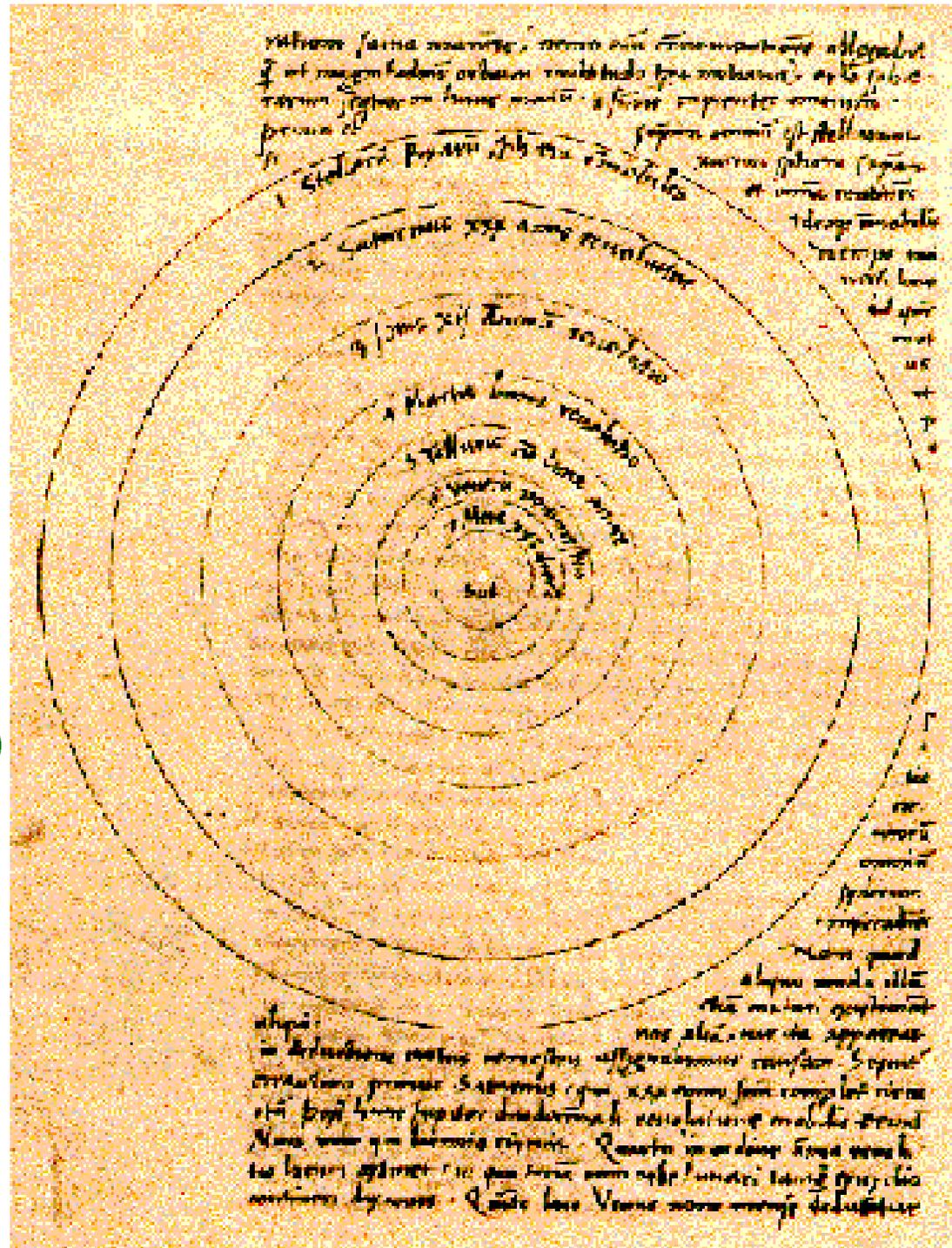
Meccanica Classica: le orbite dei pianeti nel Sistema Solare

Nicolò Copernico (1473-1543)

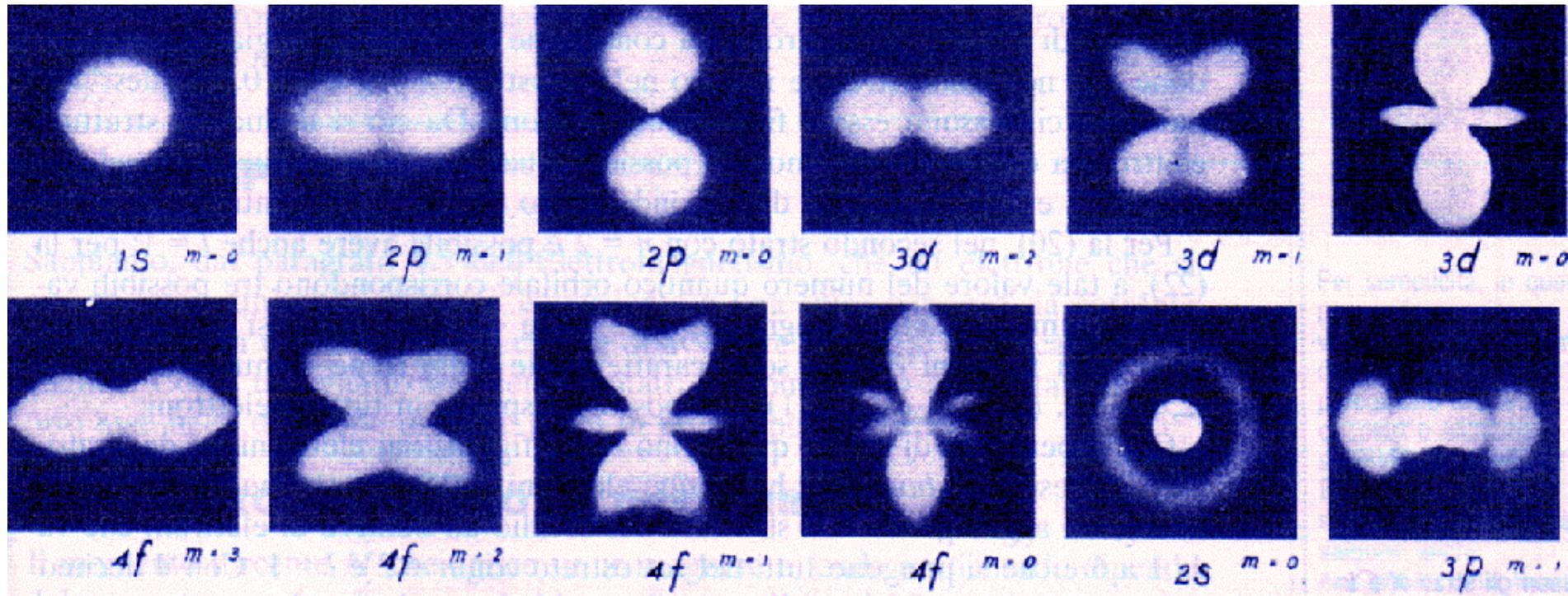
De revolutionibus orbium
cælestium

(pubblicato nel 1543, dopo la sua morte)

*"Ma al centro di tutto si trova
il Sole, poiché chi porrebbe
questo lume, in questo tempio
splendido, altrove o meglio che
nel luogo da cui esso può
illuminare tutto allo stesso
tempo?"*



Meccanica Quantistica-Ondulatoria: gli elettroni in un atomo

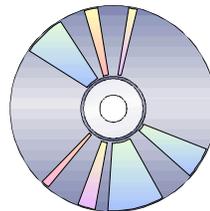
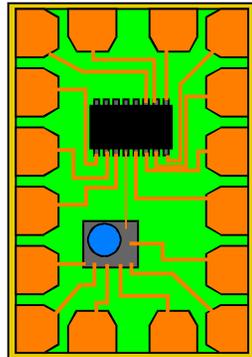
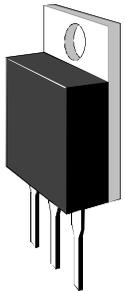


- Non seguono orbite vere e proprie
- Ciascuno ha una diversa distribuzione di probabilità nello spazio-tempo
- La distribuzione di probabilità può venire rappresentata come una specie di nuvola

La Meccanica Quantistica-Ondulatoria
spiega la struttura atomica della materia
(elettroni attorno al nucleo atomico)

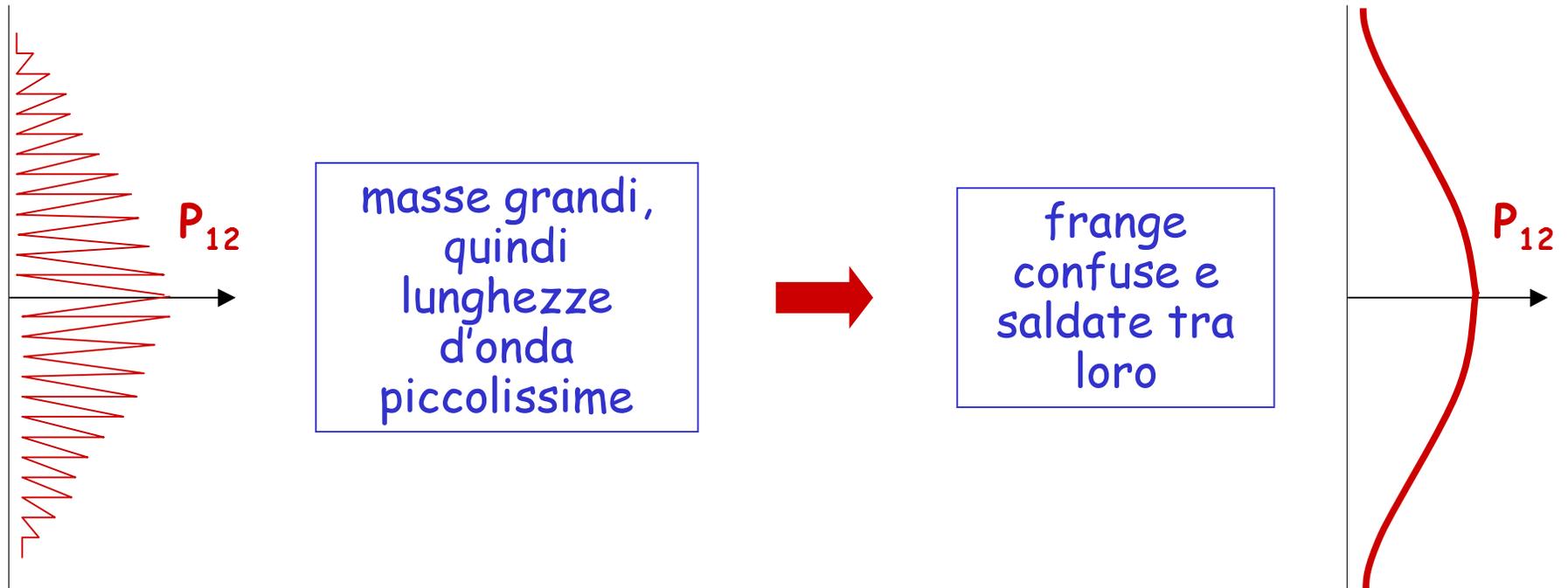
Senza queste ricerche di
Fisica Fondamentale
non vivremmo come viviamo!

Cioè niente di tutto questo:



E per i comuni corpi macroscopici ?

(ad es. pallottole)



Quindi non osserviamo alcun effetto quantistico-ondulatorio

La fisica classica resta valida
Non è smentita, abbiamo solo ampliato la visione al caso più generale!

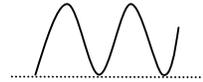
Nuova struttura matematica

ampiezza di probabilità



→ nuova grandezza fisica

probabilità = ampiezza²



→ come energia $\propto A^2 > 0$

Due comportamenti possibili (secondo le circostanze)

Distinguiamo da quale fenditura l'elettrone è passato

Dr. Jekyll

- Si sommano **ampiezze**
- Interferenza come per **onde**

Non distinguiamo da quale fenditura l'elettrone è passato

Mr. Hyde

- Si sommano **probabilità**
- Comportamento di **particelle**

Abbiamo trovato un nuovo tassello del puzzle!



“Funziona”, cioè spiega correttamente gli esperimenti

Ma perché ? Quali sono i suoi fondamenti ?

Posizione di un elettrone in un atomo non (*) determinata con precisione:
descritta da una distribuzione probabilità nello spazio-tempo

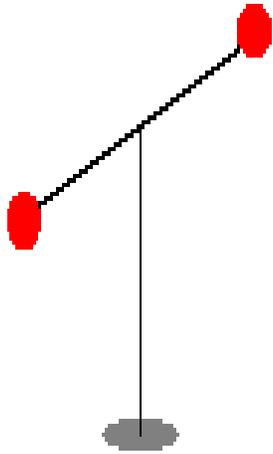
Einstein

*Vi sono "variabili nascoste", la cui ignoranza
introduce una apparente indeterminazione ?*

* Formidabile scossa al mondo delle assolute certezze della fisica precedente:
RIVOLUZIONE SCIENTIFICO-FILOSOFICA

Variabili nascoste: una analogia

A riposo



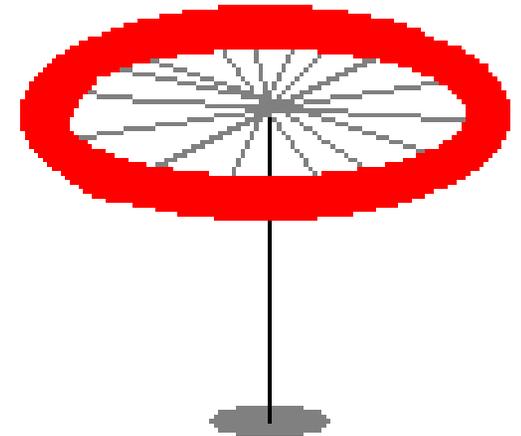
Tempo di latenza
delle immagini
nella retina

$\sim 0,1 \text{ s}$

Quindi oltre

$\sim 10 \text{ giri/s}$

Rotazione veloce

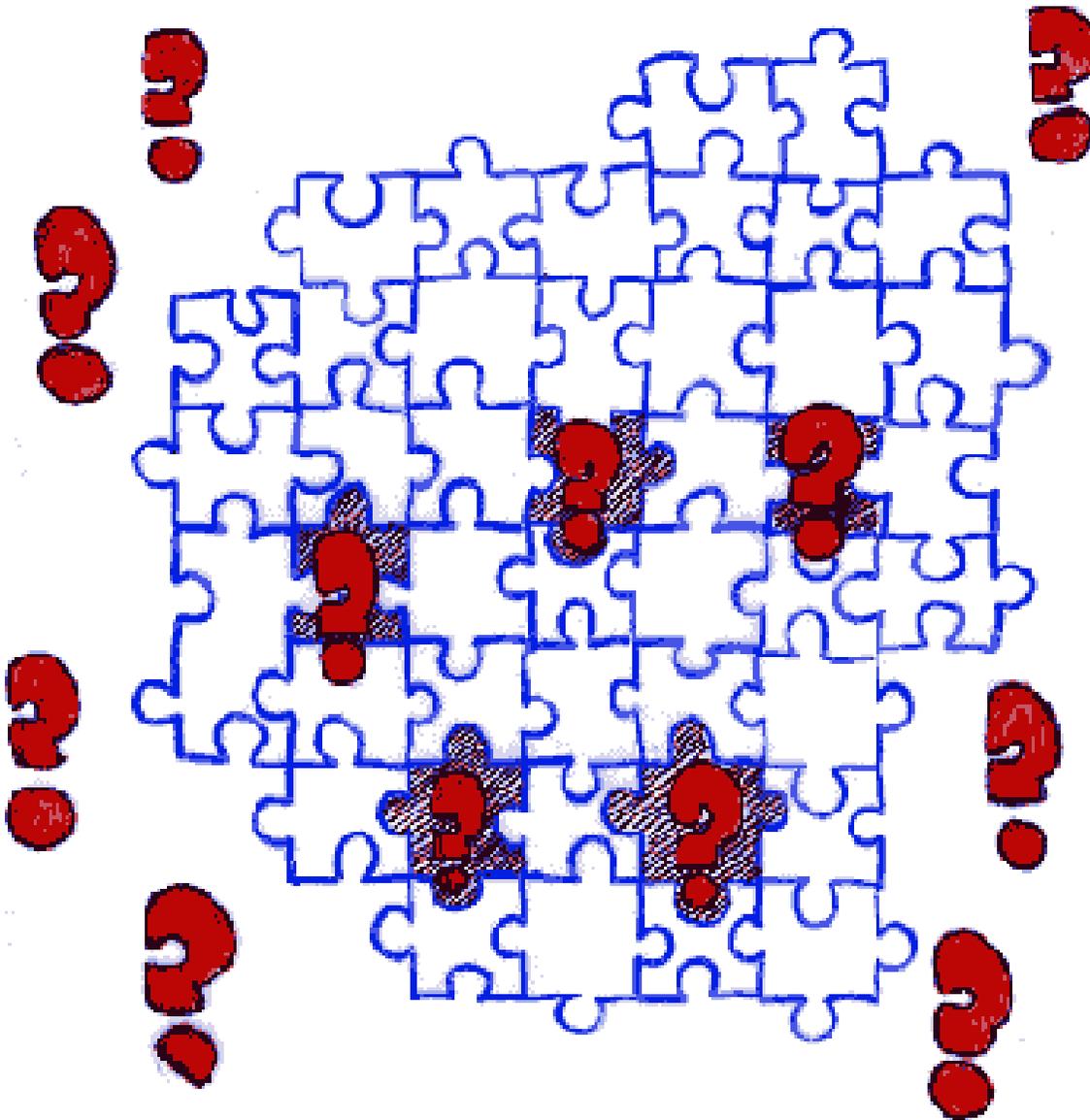


non percepiamo più le **posizioni** della sfere:
diventano "**variabili nascoste**"

Possiamo solo parlare di "**probabilità**" che
ad un certo istante le sfere siano in un certo punto

Come in Meccanica Quantistica-Ondulatoria !

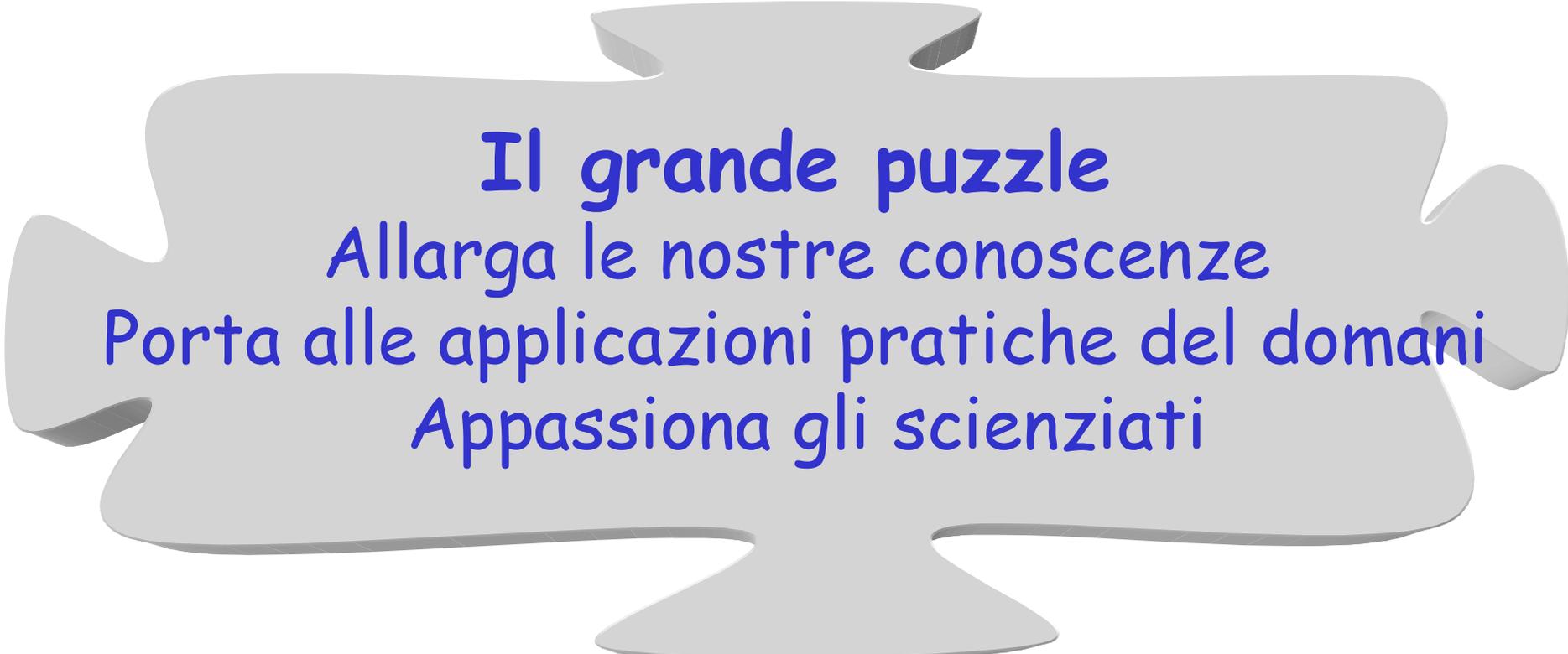
Il puzzle della scienza si completa e si allarga



Troviamo tasselli mancanti, ma attorno vi sono zone inesplorate

Frontiere :

- comprensione profonda dei fenomeni
- nuove scoperte



Il grande puzzle

Allarga le nostre conoscenze
Porta alle applicazioni pratiche del domani
Appassiona gli scienziati

Lezioni dalla Scienza

**Non esiste verità assoluta, tutto è relativo ai
limiti delle nostre conoscenze**

I pregiudizi sono insensati

Per concludere, una riflessione

⋮
*"Lo scoperta della proprietà degli
elettroni e della sarebbe stata possibile
senza una approfondita conoscenza di
base della fisica classica ? "*

NO



Vale la pena
STUDIARE

INTELLIGENZA E **FANTASIA**

POSSONO RENDERE LO STUDIO

DIVERTENTE

Le orbite dei pianeti nel Sistema Solare

Nicolò Copernico (1473-1543)

De revolutionibus orbium
cælestium

(pubblicato nel 1543, dopo la sua morte)

*"Mais au centre de tout se
trouve le Soleil, car qui
placerait cette lampe, en ce
temple splendide, à une autre
ou meilleure place que celle-là
où elle peut tout illuminer au
même temps "*

