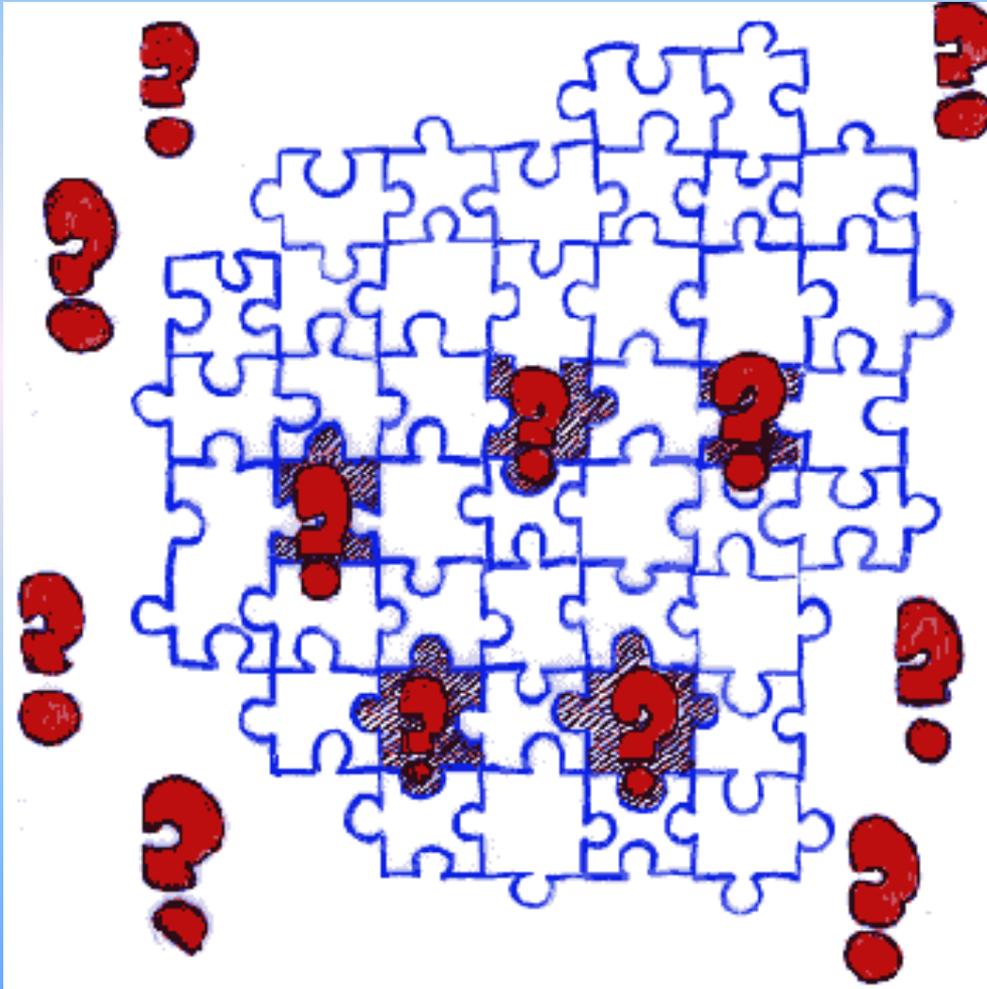


Nel puzzle della scienza



Le basi della Meccanica Quantistica- Ondulatoria

*Dalla fisica classica
alla fisica moderna*

Paolo Strolin

*con la collaborazione di
Salvatore Buontempo
Lello Ingenito
Laura Strolin*

Febbraio 2008

Referenze bibliografiche

R.P.Feynman, R.B.Leighton e M.Sands
La Fisica di Feynman, Vol III, Masson (1985)

J.Orear, *Fisica generale*, Zanichelli (1970)

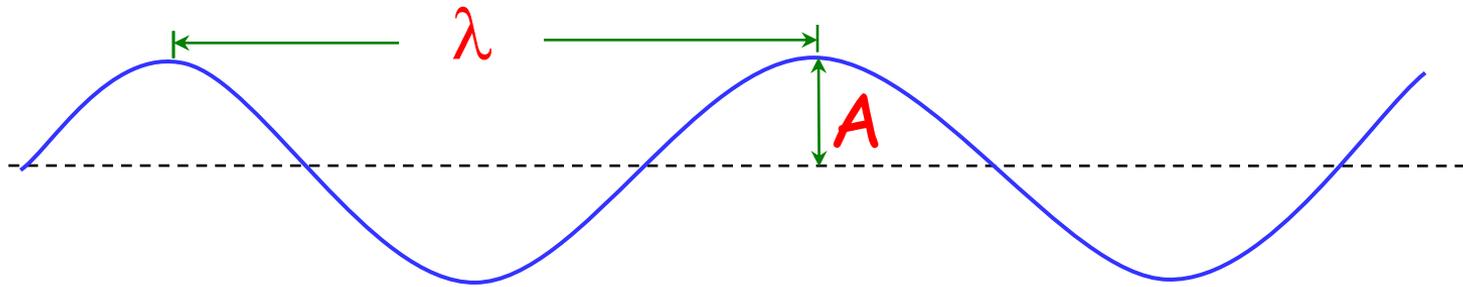
www.na.infn.it → Elenco tel. → Strolin → [www](#)

“Sono nato senza conoscenza e ho avuto un po' di tempo per cambiare, qua e là, questa mia condizione”

(R. Feynman 1918-1988)



Parliamo un poco di ONDE

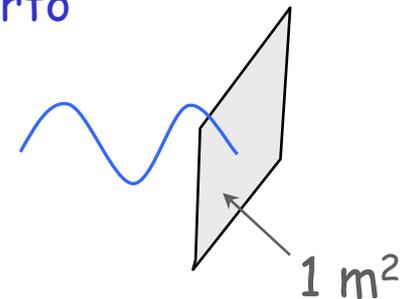


Lunghezza d'onda λ (onde marine ~ 10 m ; luce visibile $\sim 0,0005$ mm)

Ampiezza A (oscillazioni tra $\pm A$)

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

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

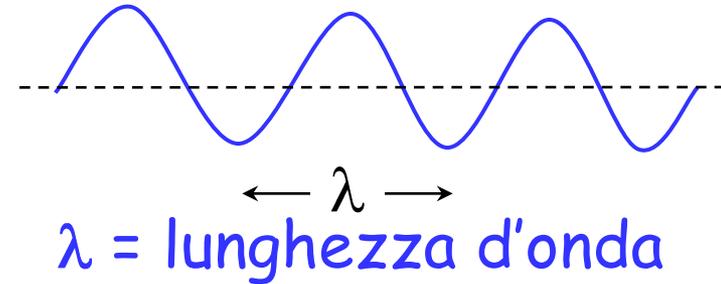


Ottica in fisica classica

i "raggi" di luce

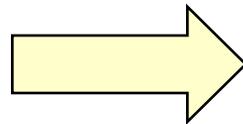


in realtà
sono **ONDE**



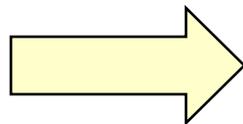
Se $\lambda \ll d$

(d = dimensioni oggetti)



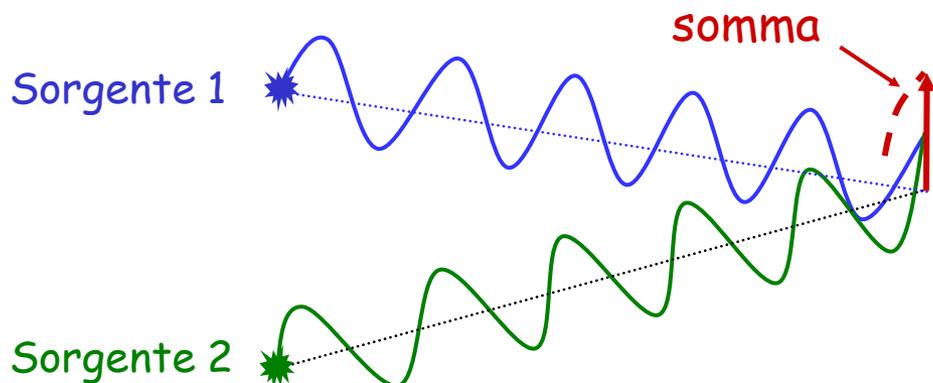
"raggi" di luce
"ottica geometrica"

Se $\lambda \sim d$

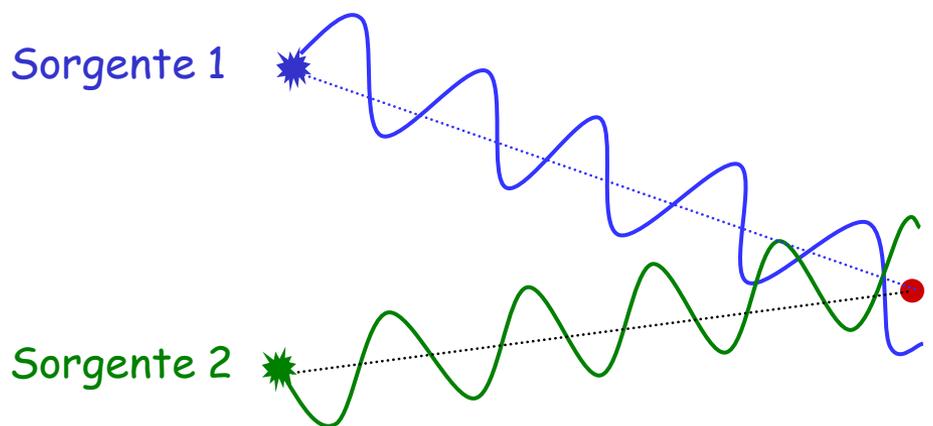


"interferenza", "diffrazione"
fenomeni ottici legati
alla natura ondulatoria

INTERFERENZA



$+A + A = 2A$
*interferenza
"costruttiva"*



$+A - A = 0$
*interferenza
"distruttiva"*

In sintesi: nella sovrapposizione (algebrica \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 →



le onde incrociate temute in mare

"interferenza"

tra 1 e 2



massimi
ove le onde si
sommano !

zero
ove le onde si
sottraggono

ONDE → fenomeni di "INTERFERENZA"

E viceversa:

Osservazione di fenomeni di
INTERFERENZA



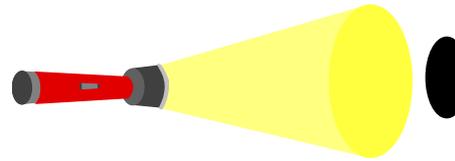
"sintomo" di
NATURA ONDULATORIA

Come fu evidenziata la natura ondulatoria della luce

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

A. Fresnel: teoria ondulatoria della luce (1819)

...se illumino un disco nero...

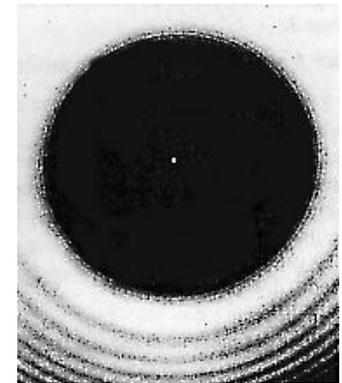
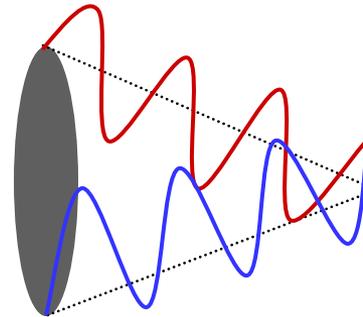


S. Poisson: la teoria ondulatoria predice una **macchia luminosa in piena ombra**

Per interferenza costruttiva
il disco appare "bucato al centro"



Teoria "non plausibile"



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

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*

* Nella vita corrente i pregiudizi dipendono da:

- *condizioni al contorno (ambiente, istruzione, famiglia, scuola, amici ...)*
- *capacità critiche*

Iniziamo un viaggio nel mondo dei "perché ?"

(il mondo preferito da bambini e scienziati)

" ... perché questo accade ?..."

" ... se faccio questo, che cosa succede ?..."

.....

I dilemmi

(anche in era pre-scientifica)

Luce



Evidenze sperimentali



fenomeni di interferenza

effetto fotoelettrico:
"quanti" di luce

Elettrone

*(e in generale
particelle elementari)*



quantizzato in massa e
in carica elettrica

fenomeni di interferenza ?

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



Il percorso della lezione

Fisica classica

- **particelle**: trattate come minuscole pallottole
- **onde**: interferenza come fenomeno peculiare

Totale separazione tra onde e particelle

Fisica moderna: Meccanica Quantistica- Ondulatoria

Dualismo "onda-particella"

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

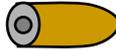
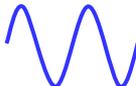
Onde e particelle elementari : quadro comune !



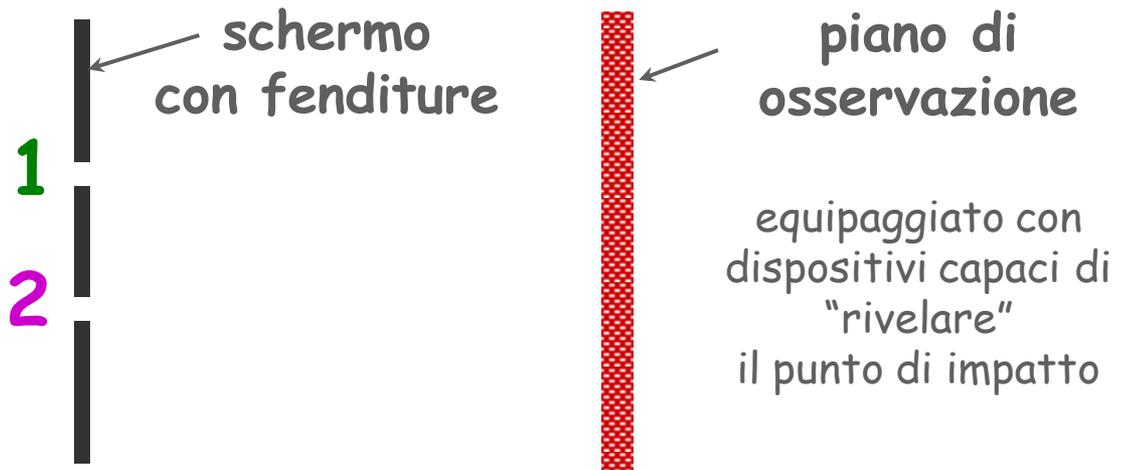
un poco di pazienza e attenzione!

Il modo per capire

Immaginiamo di fare esperimenti con

-  Pallottole
-  Onde
-  Elettroni (particelle elementari)

inviandoli su un apposito "strumento"



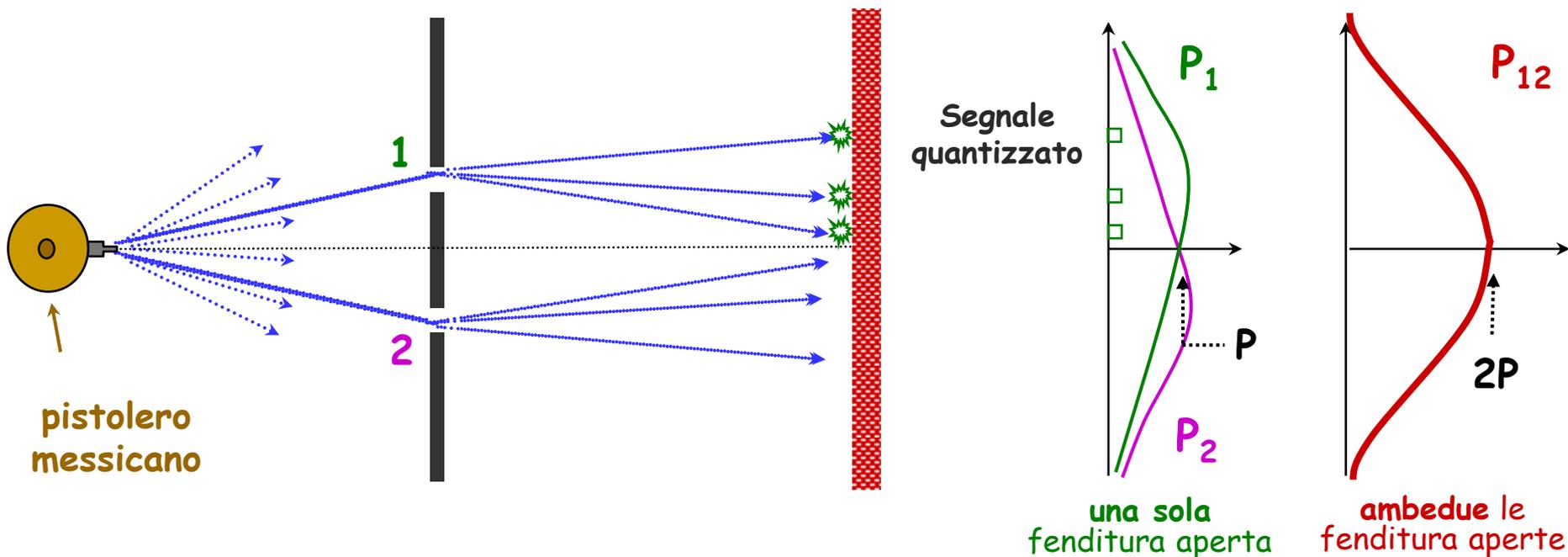
(metodo galileiano: il piano inclinato fu concepito quale "strumento per lo studio della caduta dei gravi)

Che accade nei vari casi?

Esperimento con particelle classiche (pallottole)

Il pistolero spara all'impazzata (in ogni direzione)

Urtando casualmente contro i bordi delle fenditure, le pallottole vengono diffuse
Sul piano di osservazione sono registrate con una certa "distribuzione di probabilità"



EFFETTI CARATTERISTICI DI PARTICELLE

arrivano a colpi (quantizzazione!)

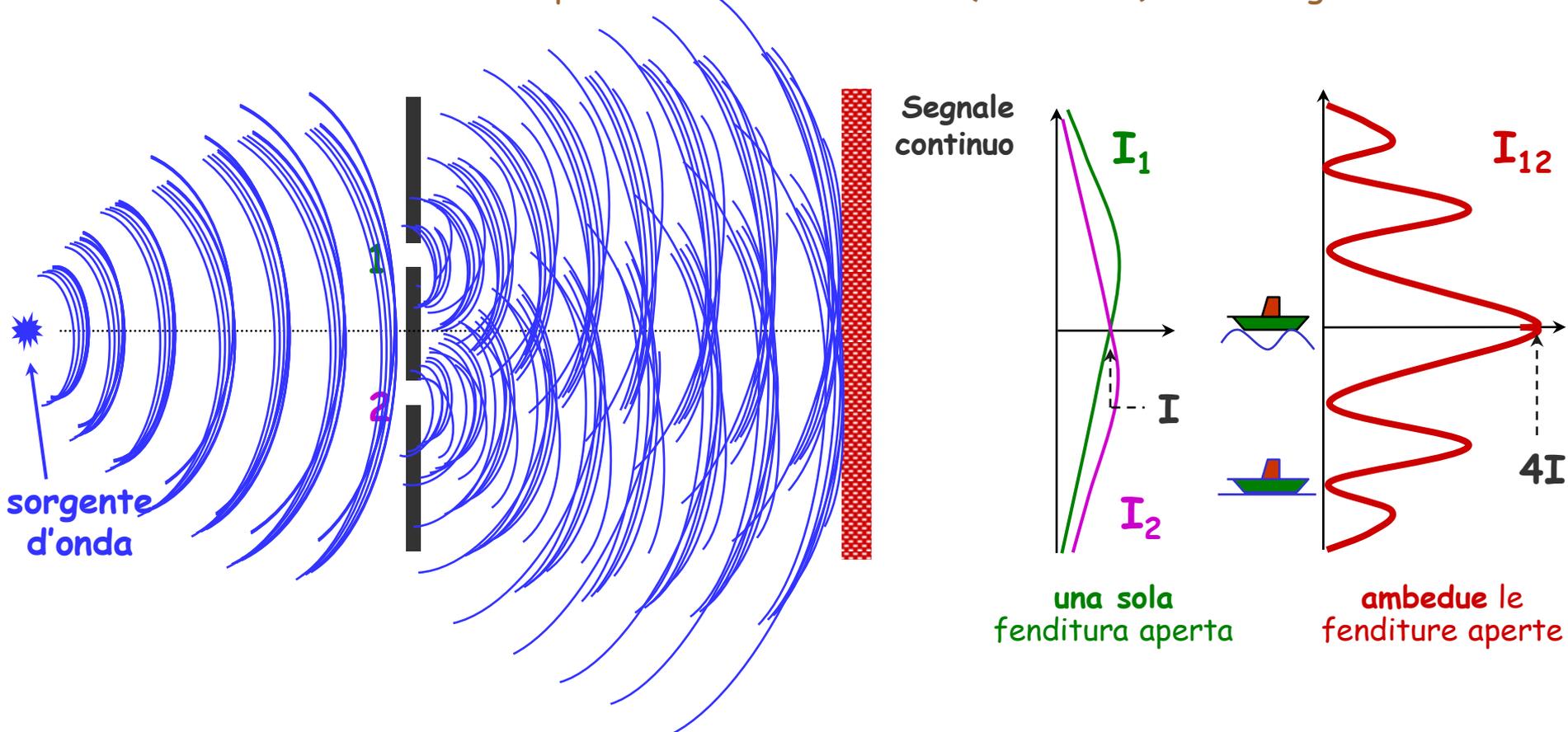
$P_{12} = P_1 + P_2$ (additività di effetti!)

al centro $P_{12} = 2P$

Notare bene: in nessun luogo si hanno meno colpi con due fenditure aperte che con una

Esperimento con onde

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



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

ampiezza d'onda: $\pm A$
Intensità $I = A^2$

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 $2I$)

Onde e particelle: comportamenti diversi

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

Queste proprietà permettono di distinguerle
sperimentalmente



Sappiamo come investigare la natura degli elettroni:

Onde ?



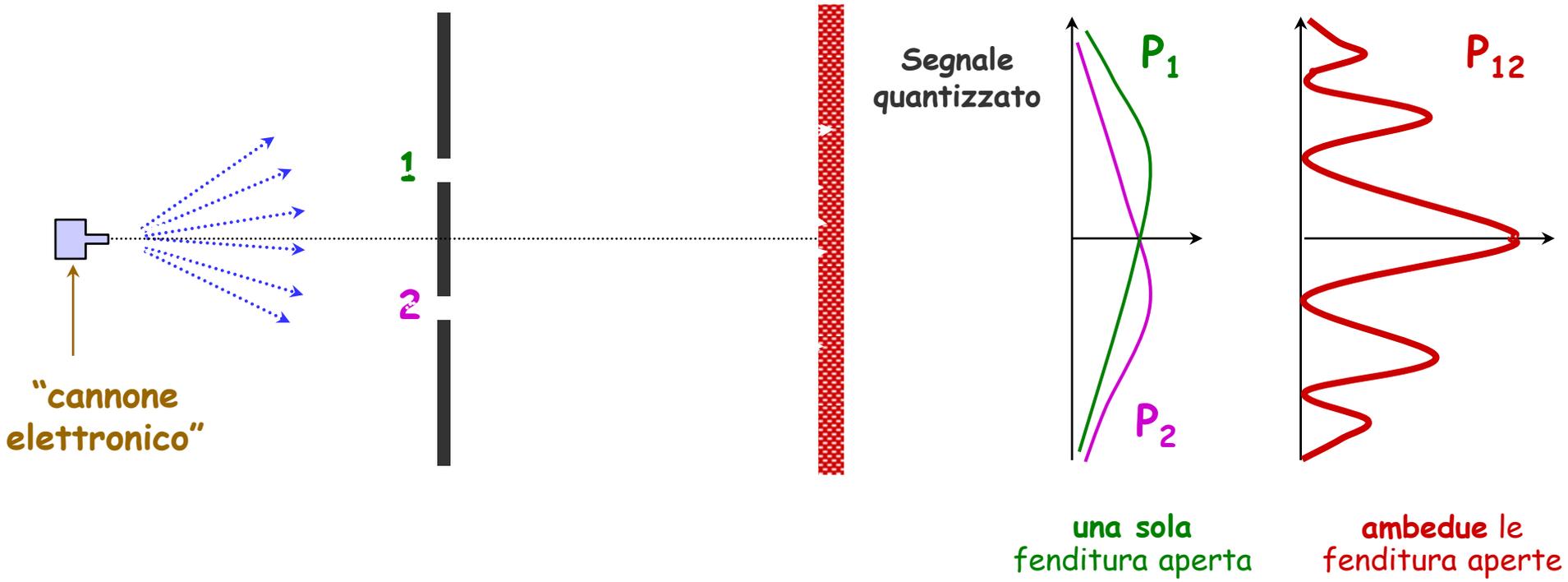
o

Particelle ?



C'è chi dice che la realtà è o Bianca o Nera . Ma è proprio così ???

Esperimento con elettroni



Tic sul rivelatore (quantizzazione)



particelle!

Interferenza



onde!



Le differenze scompaiono !

L'elettrone che credevamo
solo **particella**
ha anche comportamento di
onda

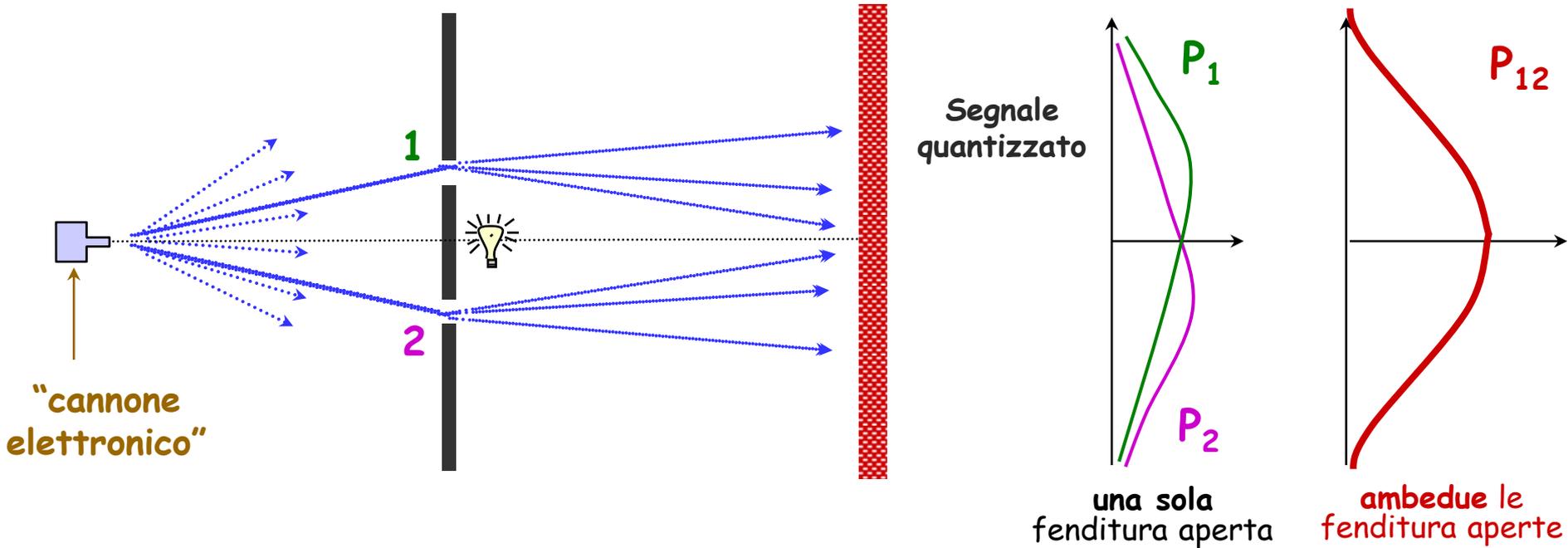


La luce che credevamo solo
onda (elettro-magnetica)
ha anche comportamento di
particella

La realtà può essere anche un po' bianca un po' nera !!!
Particelle come "pacchetti di 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!



MECCANICA QUANTISTICA-ONDULATORIA

↑
particelle

↑
onde

LUCE e ELETTRONI sono
QUANTIZZATI come PARTICELLE
"fotoni" e "elettroni"

...ma...

FOTONI e ELETTRONI
hanno anche un comportamento ONDOSO
(con fenomeni di interferenza)

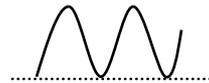
Nuova struttura matematica

ampiezza di probabilità



→ nuova grandezza fisica A

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 probabilità A^2
- Comportamento di **particelle**

Non distinguiamo da quale fenditura l'elettrone è passato

Mr. Hyde

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

"DUALISMO ONDA - PARTICELLA"

(quadro comune per onde e particelle)

Elettrone rappresentato come onda 

ciò non parliamo più di una particella con una sua posizione ben precisa
ma di probabilità di trovarlo in un punto = (ampiezza dell'onda)²

Se lo localizziamo

lo perturbiamo e perdiamo le frange d'interferenza,
cioè l'informazione sulla lunghezza d'onda λ :

l'elettrone appare come particella !

Principio di Indeterminazione (Heisenberg, 1925)

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

quantità di moto $\propto 1/\lambda$

"costante di Planck"
(fondamentale)

Meccanica Classica

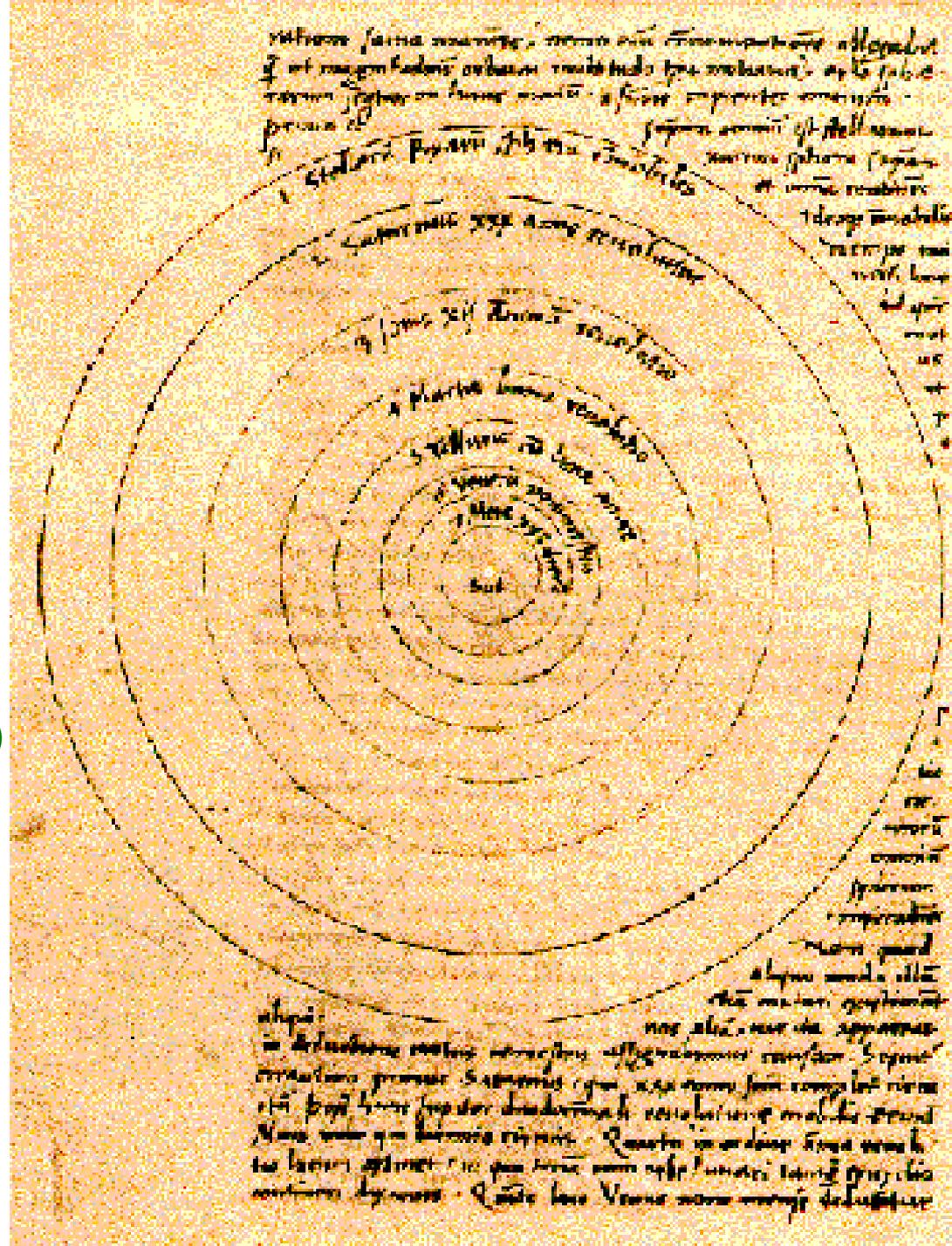
orbite dei pianeti

Nicolò Copernico (1473-1543)

De revolutionibus orbium
cælestium

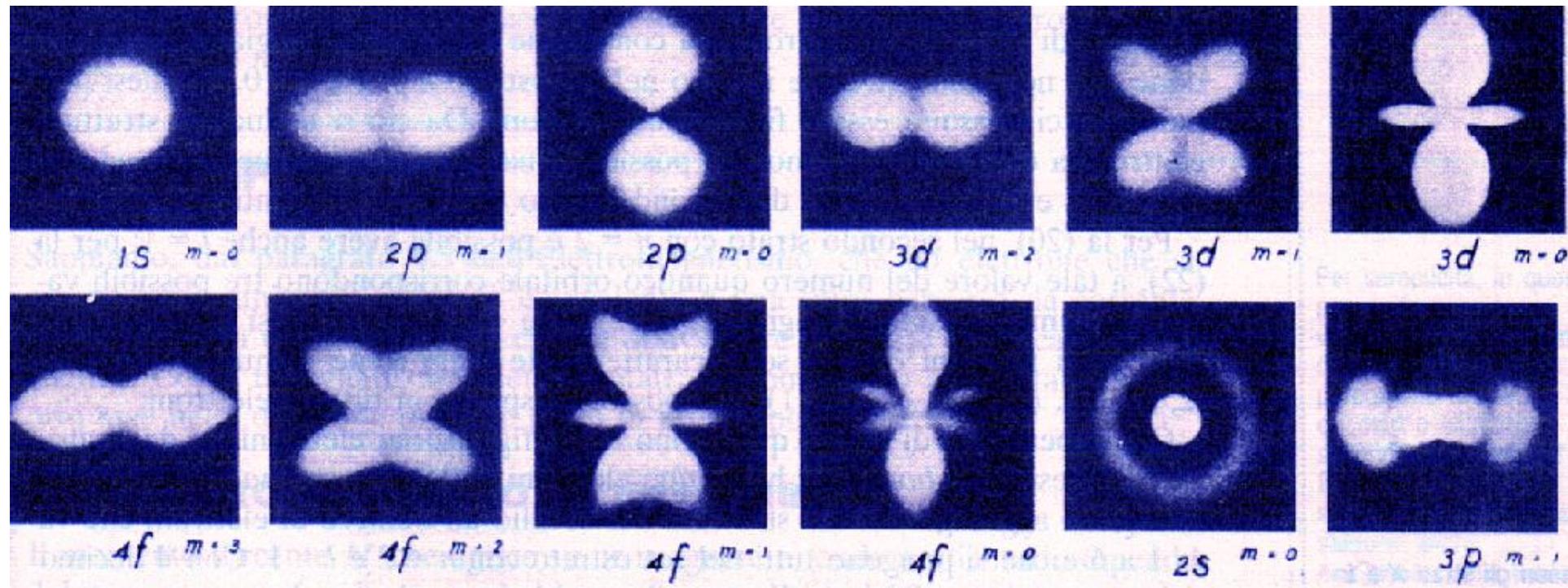
(pubblicato nel 1543, dopo la sua morte)

*"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

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, di forma regolare ma a volte complessa

Una rivoluzione scientifico-filosofica

La posizione di un elettrone in un atomo è descritta da una **distribuzione di probabilità** nello spazio-tempo ("nuvola elettronica")

Non è determinabile con precisione
Dobbiamo accettare un grado di "incertezza"



Formidabile e sana *scossa* al mondo delle
assolute certezze del secolo precedente

Abbiamo trovato un nuovo tassello del puzzle!



"Funziona", cioè spiega correttamente gli esperimenti

Ma perché ? Quali ne sono i fondamenti ?

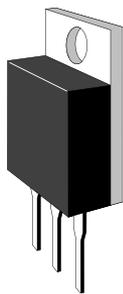
Einstein :

vi sono "variabili nascoste", l'ignoranza delle quali introduce una apparente indeterminazione ?

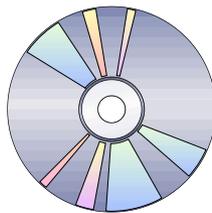
E senza queste ricerche di Fisica Fondamentale non vivremmo come viviamo!

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

Senza di essa niente di tutto questo :



Transistor



Compact Disc



Calcolatore elettronico



Il grande puzzle della Scienza

Appassiona

Allarga le conoscenze

Porta alle applicazioni pratiche del domani

E ci insegna che

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

I pregiudizi sono insensati

Per concludere, una riflessione:

*Le proprietà degli elettroni e della luce
sarebbero state scoperte*

senza

*una approfondita conoscenza della Fisica Classica
da cui iniziano i nostri studi ?*

NO !

QUINDI STUDIATE