

Introduzione alla fisica moderna

Giovanni De Lellis

Università “Federico II” Napoli



www.na.infn.it

*Attività di ricerca
Fisica delle particelle
Fisica del neutrino
Materiale divulgativo*

Cortesia di Paolo Strolin

Fisica “classica” e “moderna”

Domanda

che intendiamo per **fisica “moderna”** ?

Risposta

la fisica dopo ~ 1905:

- Meccanica Quantistica-Ondulatoria
- Teoria della Relatività
-

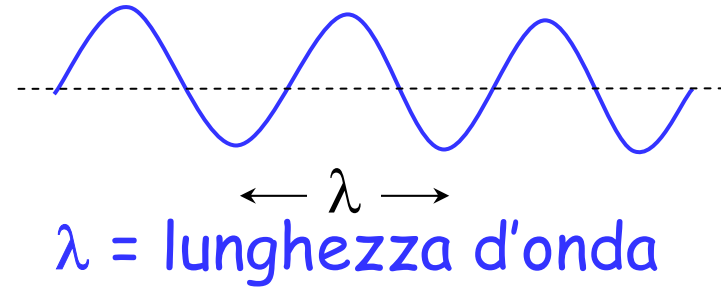
Sempre più studiata sui banchi di scuola
... un giorno sarà forse considerata **“classica”**

Ottica in fisica classica

i "raggi" di luce



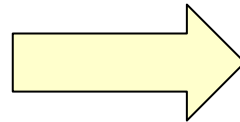
in realta'
sono **ONDE**



fuoco

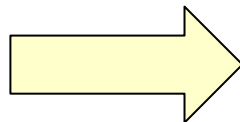
Se $\lambda \ll d$

(d = dimensioni oggetti)



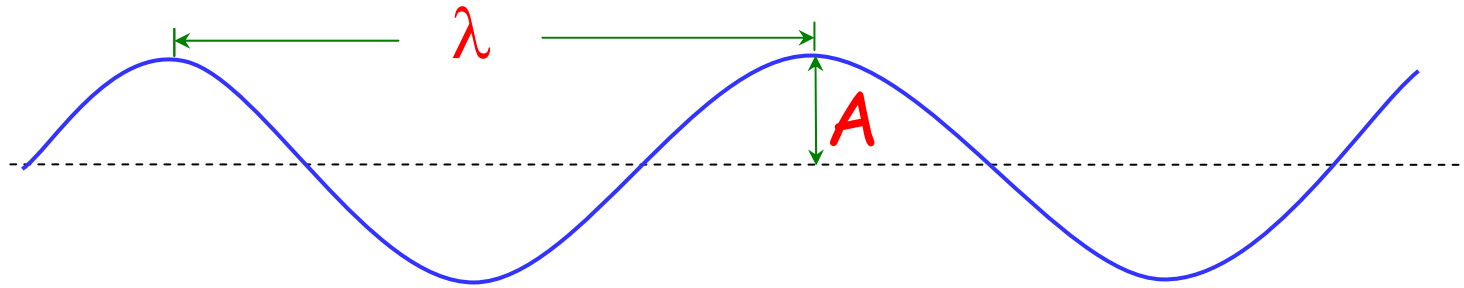
"raggi" di luce
"ottica geometrica"

Se $\lambda \sim d$



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

ONDE : definiamone altri parametri

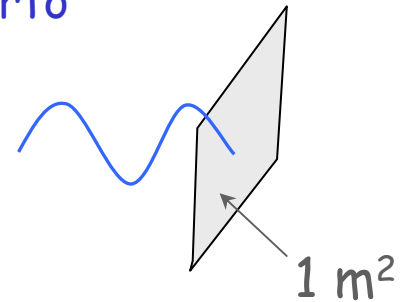


Lunghezza d'onda λ (onde marine ~ 10 m ; luce visibile ~ 0,0005 mm)

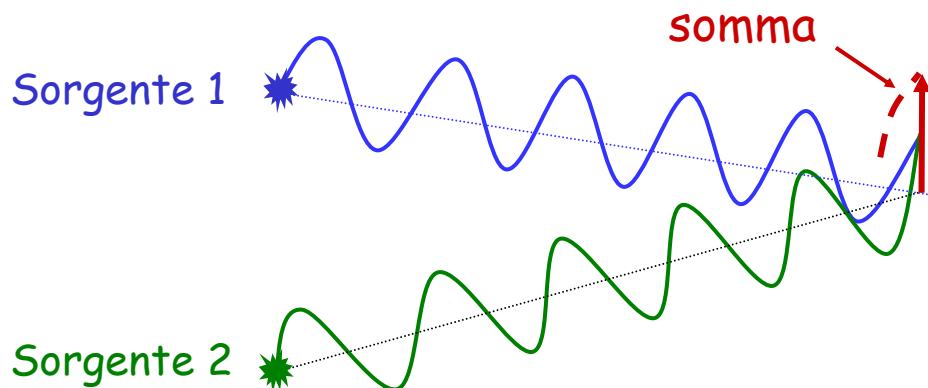
Ampiezza A (oscillazioni tra $\pm A$)

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

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

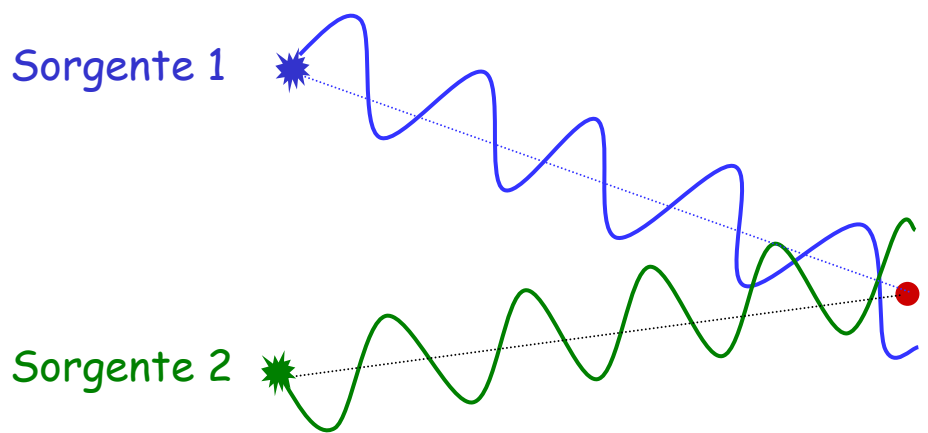


INTERFERENZA



$$+A + A = 2A$$

*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 ampiezze si
sommano !

zero
ove esse si
sottraggono

ONDE → fenomeni di

Osservazione di fenomeni di
INTERFERENZA



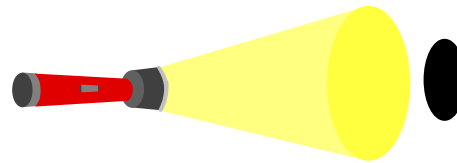
"sintomo" di
NATURA ONDULATORIA

Come fu evidenziata la natura ondulatoria della luce

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

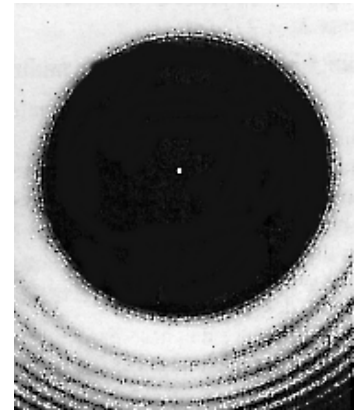
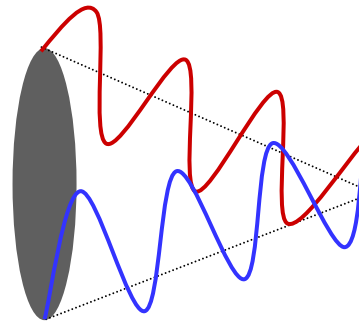
A. Fresnel: teoria ondulatoria della luce (1819)

...se illumino un disco nero...



S. Poisson: la teoria ondulatoria predice una **macchia luminosa in piena ombra**
⇒ teoria considerata "non plausibile"

Per interferenza costruttiva
il disco appare "bucato al centro"
Un miraggio?



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

Morale: la scienza non ammette pregiudizi !

Storici dilemmi

Evidenze sperimentali



Luce

onda ?
particella ?

fenomeni di interferenza

effetto fotoelettrico
(visto agli inizi del 1900)

Elettrone

(e in generale
particelle elementari)


particella ?
onda ?

quantizzato in massa e
carica elettrica

fenomeni di interferenza ?

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





**Cerchiamo un
tassello del puzzle
della scienza !**

Protagonisti principali (1925-27)
Schrödinger, Heisenberg, Born, Dirac

Il percorso della lezione

Fisica classica

- **particelle elementari**: 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 !



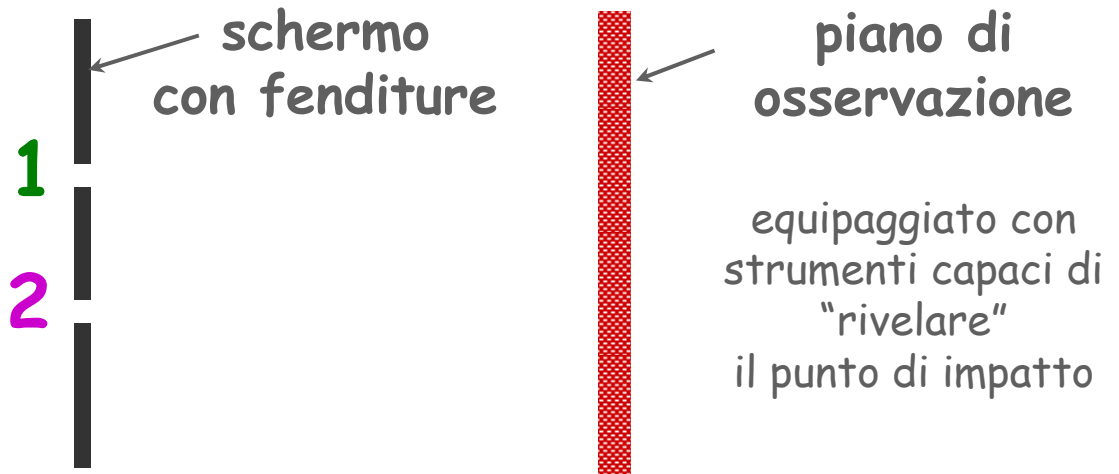
un poco di pazienza e attenzione!

Il modo per capire

Immaginiamo di fare esperimenti su

-  Proiettili
-  Onde
-  Elettroni (particelle elementari)

inviandoli su un apposito "strumento"



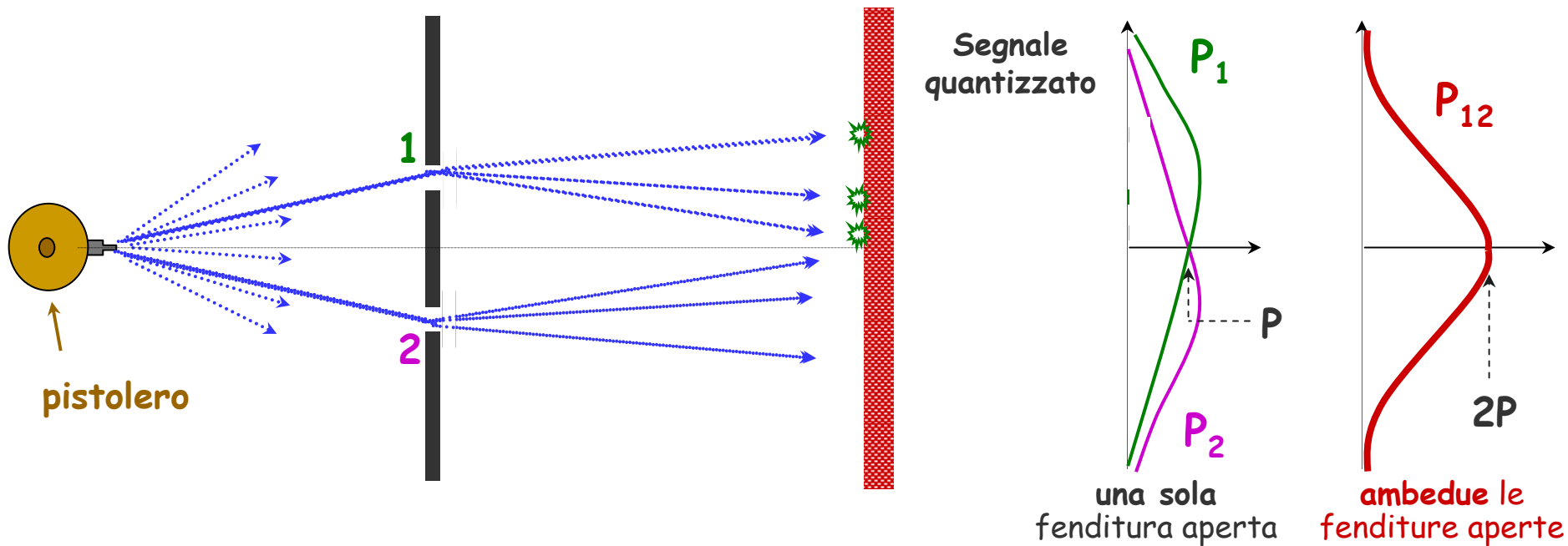
(metodo galileiano: il piano inclinato fu concepito quale "strumento" per lo studio della caduta dei gravi)

Che accade nei vari casi?

Esperimento con particelle (pallottole)

Il pistolero spara all'impazzata (in ogni direzione)

Urtando casualmente contro i bordi delle fenditure, le pallottole vengono diffuse e rivelate sul piano di osservazione con una certa "distribuzione di probabilità"



EFFETTI CARATTERISTICI DI PARTICELLE

arrivano a colpi (quantizzazione!)

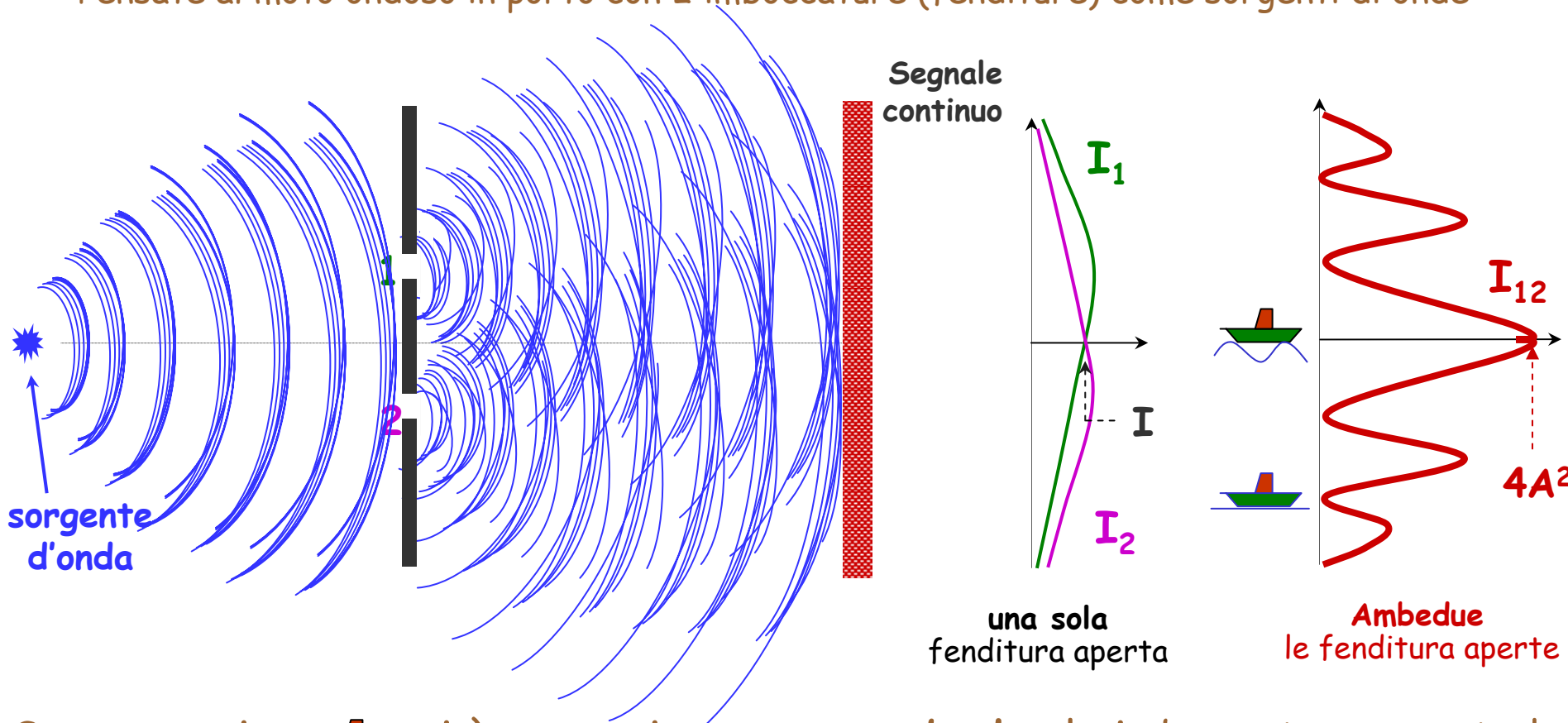
$$P_{12} = P_1 + P_2 > P_1, P_2 \text{ (additività!)}$$

$$\text{al centro } P_{12} = 2P$$

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

Esperimento con onde

Pensate al moto ondoso in 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: $I_{12} = (2A)^2 = 4A^2$ (e non $2I$)

Onde e particelle: comportamenti diversi

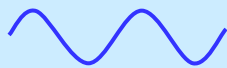
	Additività?	Quantizzazione?
onde	no (interferenza!)	no
particelle	si	si

Queste proprietà permettono di distinguerle
sperimentalmente



Sappiamo come investigare la natura degli elettroni:

Onde ?



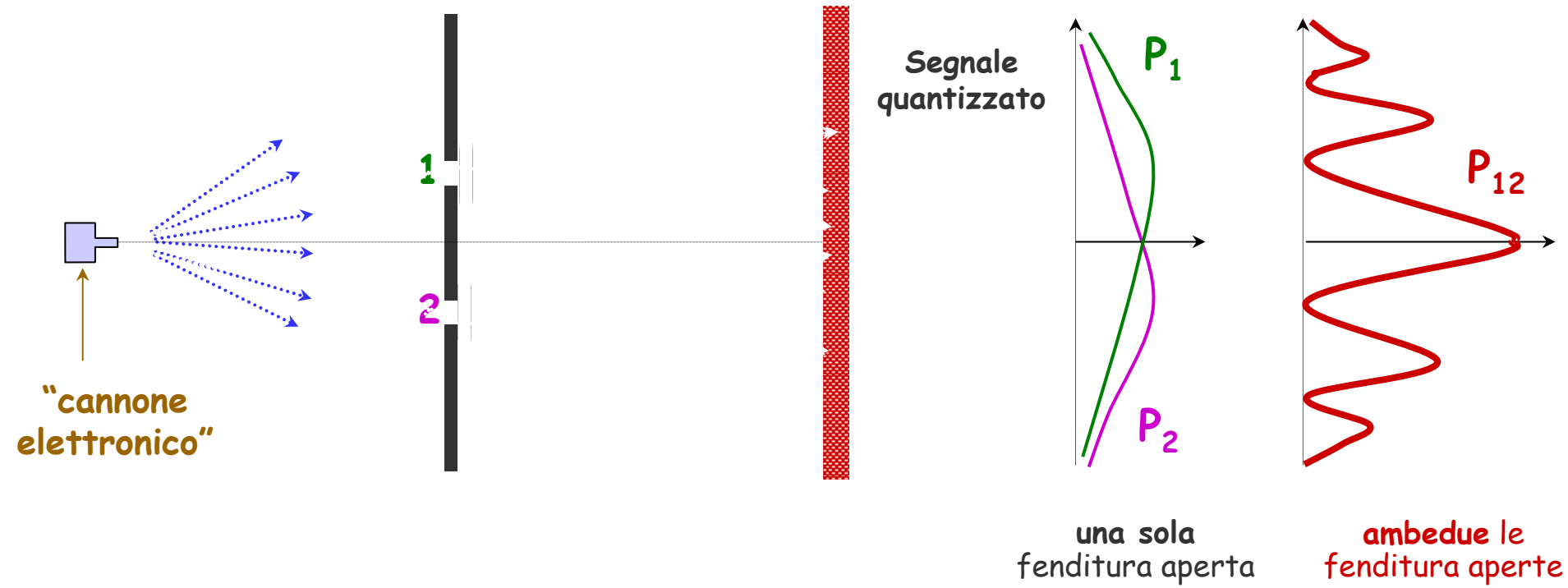
o

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

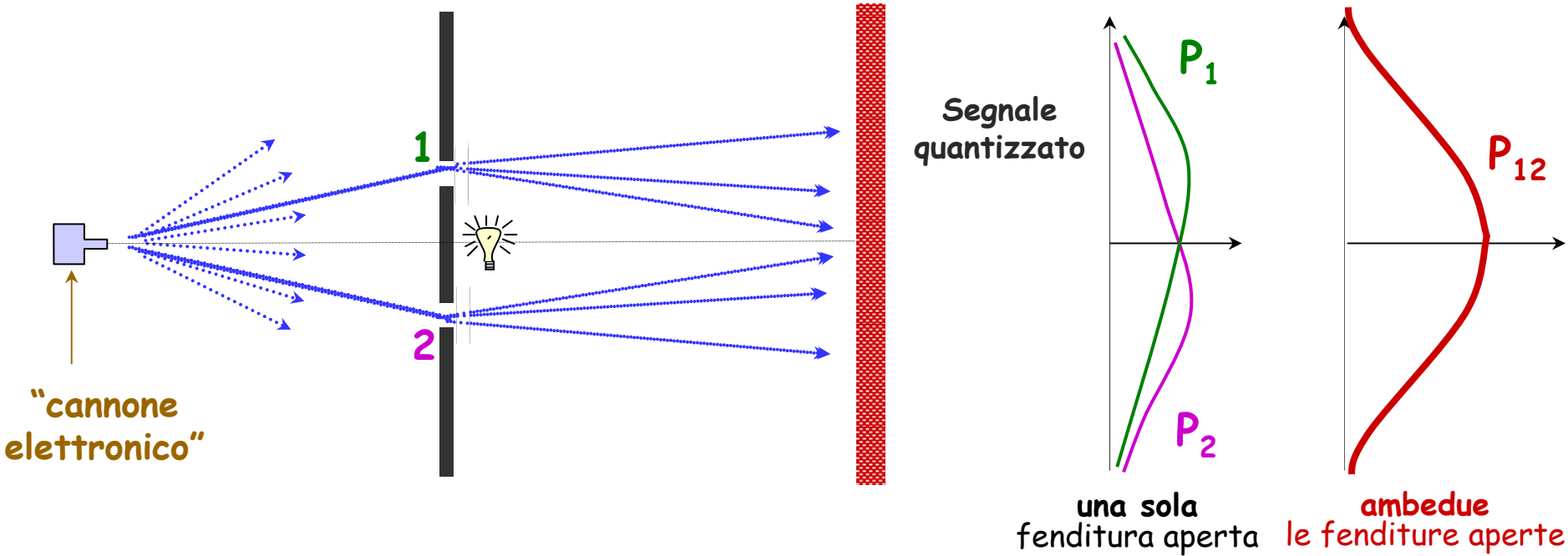


onde !



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!

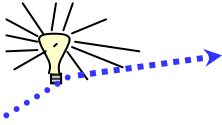


Quando "si sentono osservati" gli elettroni hanno comportamento da particelle!



Una congettura razionale (... ?)

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

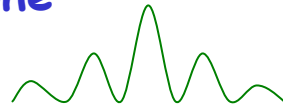


Frangie d'interferenza **confuse** tra loro



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 raramente ma con la stessa "forza"!

Anche la luce è "quantizzata" :
pure lei è anche particella !



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"

MECCANICA QUANTISTICA-ONDULATORIA

↑
particelle

↑
onde

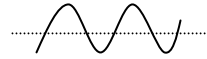
LUCE e CORRENTE DI ELETTRONI sono
QUANTIZZATE ("a scatti") in PARTICELLE
"fotoni" e "elettroni"

...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)

Non distinguiamo da quale fenditura l'elettrone è passato

Dr. Jekyll

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

Distinguiamo da quale fenditura l'elettrone è passato

Mr. Hyde

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

"DUALISMO ONDA - PARTICELLA"

(quadro comune per onde e particelle)

Elettrone rappresentato come onda 

cioè 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 precisa 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)

La nuova meccanica

Una sorgente di luce di frequenza ν produce in realtà pacchetti di luce ("fotoni") di energia

$$E = h\nu$$

ove h è la costante di Planck (1900)



Meccanica Quantistica

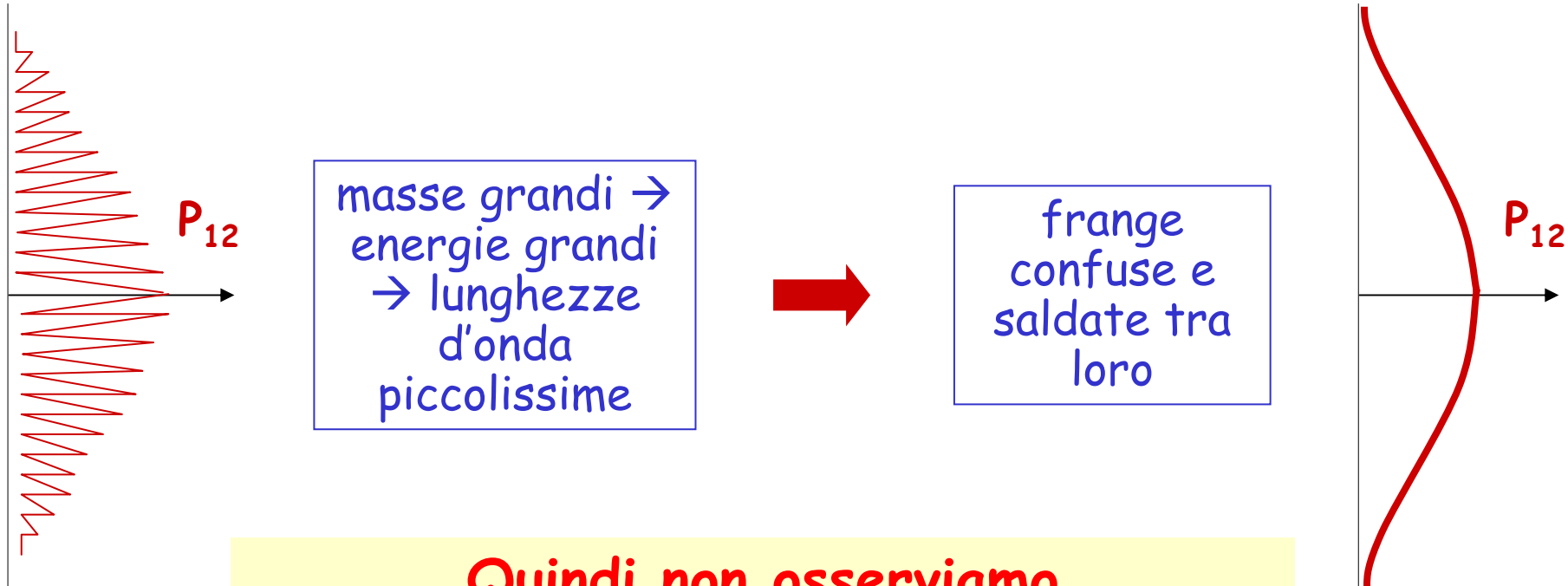
L'equazione di Dirac (1927) descrisse il moto dell'elettrone in regime relativistico e introdusse il concetto di anti-particella



(Meccanica Quantistica-Relativistica)

E per i comuni corpi macroscopici ?

(ad esempio pallottole)



Quindi non osserviamo alcun effetto quantistico-ondulatorio

**La fisica classica non è smentita
Abbiamo solo ampliato la visione al caso più generale!**

La Scienza progredisce senza smentirsi

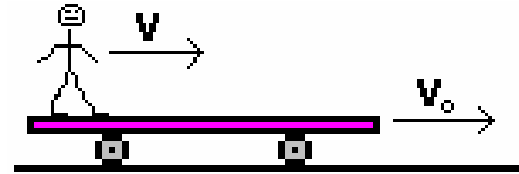
(ingloba nuove scoperte in una visione più completa e generale)

Esempio: la Relatività

Galileo

Addizione di velocità

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



V_{\dagger} : velocità rispetto a terra

Einstein e Lorentz

- Una addizione potrebbe portare a $v_0 + v > c$!
(c = velocità della luce = massima velocità raggiungibile)
- Trasformazione di Lorentz (più complessa) : **sempre** $v \leq c$
- Relatività Galileiana: un'ottima "approssimazione" per $v, v_0 \ll c$

Galileo può stare tranquillo

Un mistero è svelato



e inoltre abbiamo capito che
a livello microscopico qualsiasi misura
introduce una perturbazione

Esempio visto:

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



se osservato non si comporta più da onda

Una rivoluzione concettuale

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 :

i sistemi fisici (macroscopici) sono incuranti delle misure

**Ora capiamo che è solo un'approssimazione,
non verità assoluta**

Meccanica Classica

orbite dei pianeti

Nicolò Copernico (1473-1543)

De revolutionibus orbium
cælestium

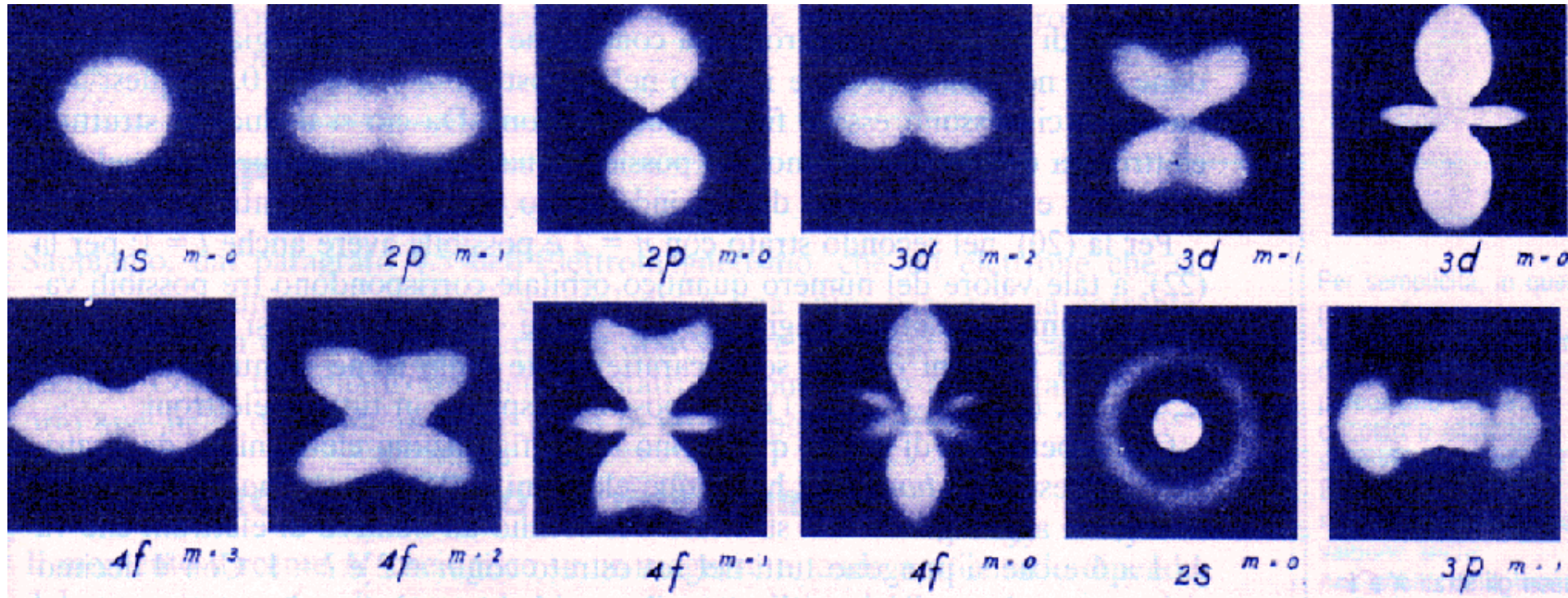
(pubblicato nel 1543, dopo la sua morte)

*"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"

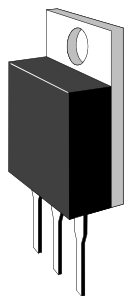


Formidabile e sana *scossa* al mondo delle
assolute certezze del secolo precedente

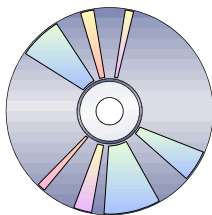
E senza queste ricerche di Fisica Fondamentale non vivremmo come viviamo!

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

Abbiamo trovato un nuovo tassello del puzzle!



"Funziona", cioè spiega correttamente gli esperimenti

Ma perché ? Quali ne sono i fondamenti ?

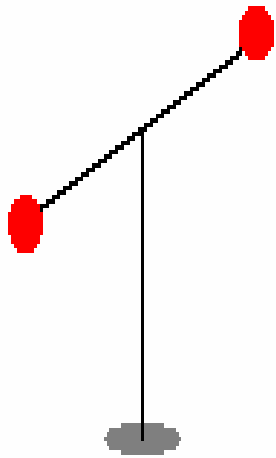
Einstein :

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

Variabili nascoste: una analogia

Un bilanciere rotante

A riposo



Tempo di latenza
delle immagini
nella retina

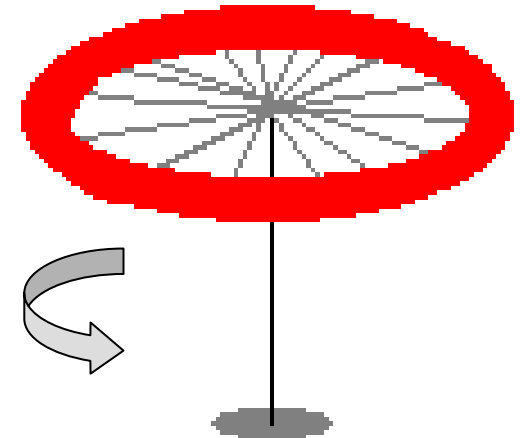
$\sim 0,1 \text{ s}$

Quindi oltre

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



In rotazione veloce



non percepiamo più le posizioni della sfere:
esse 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 grande puzzle della Scienza

Appassiona

Allarga le conoscenze

Porta alle applicazioni pratiche del domani

E ci insegna che

**Attenti a parlare di 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

Vale la pena **STUDIARE**



e inoltre

INTELLIGENZA E **FANTASIA**

possono rendere lo studio

DIVERTENTE