



L'universo in fiore 2015-2016

Corsi di astronomia all'Osservatorio Astronomico di Brera

«I colori maturano la notte» - Alda Merini



Onda su onda – introduzione alla meccanica quantistica

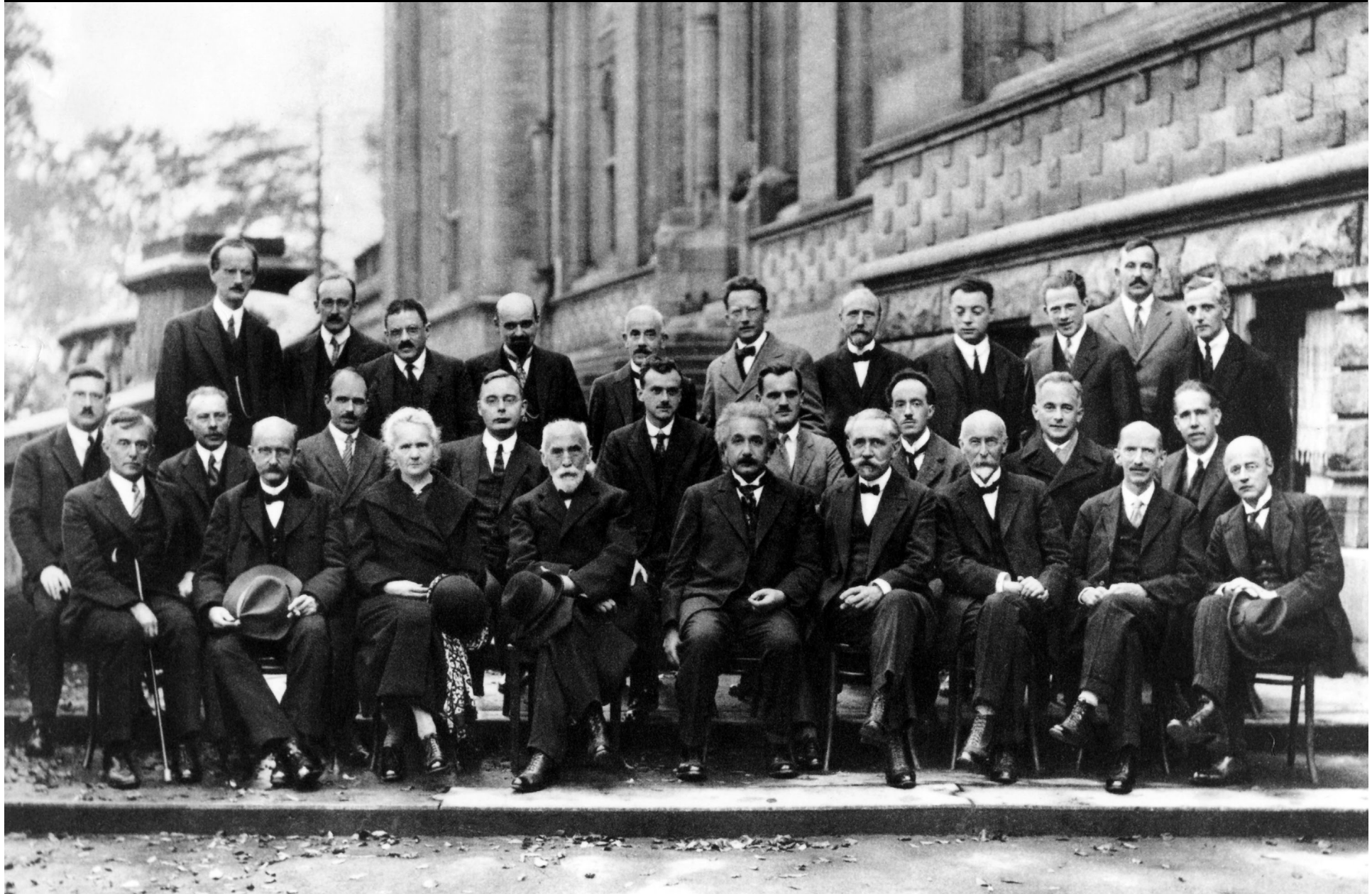
Stefano Sandrelli

INAF – Osservatorio Astronomico di Brera



Prima dei titoli di testa

Conferenza Solvay 1927



Meccanica (classica)

Dove si trova?

Quando?

Come si sposta? È possibile predire il suo comportamento?



Tempo (s)

Spazio (m)



Meccanica (classica)



Tempo (s)

0

1

2

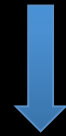


Spazio (m)

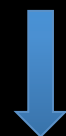
0

10

25



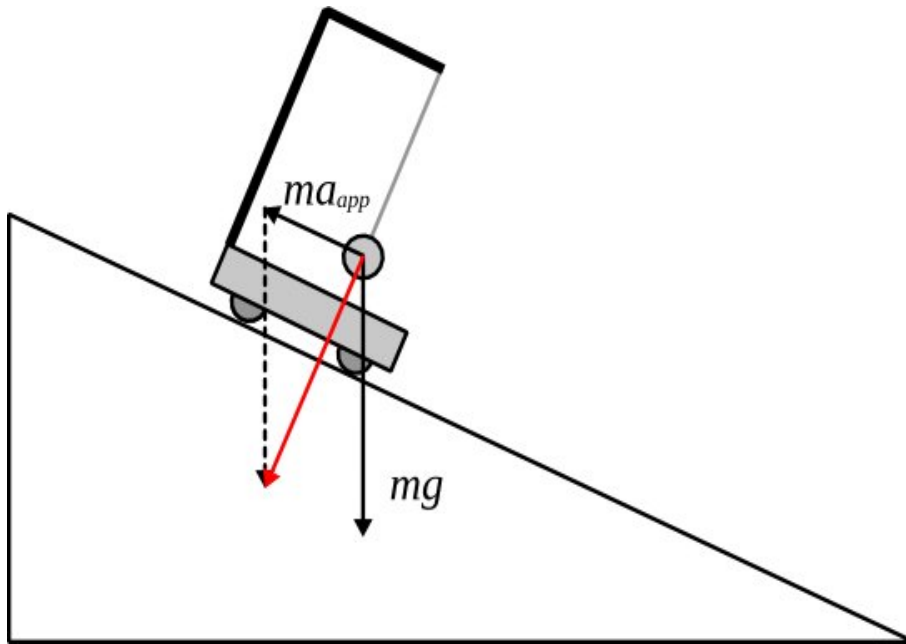
velocità (m/s)



accelerazione (m/s²)

Meccanica (classica)

$$F = m a$$



Identificazione delle forze

Equazione del moto

Previsione dei risultati

L'importanza della misura



Posizione x

Quantità di moto $p = m * v$

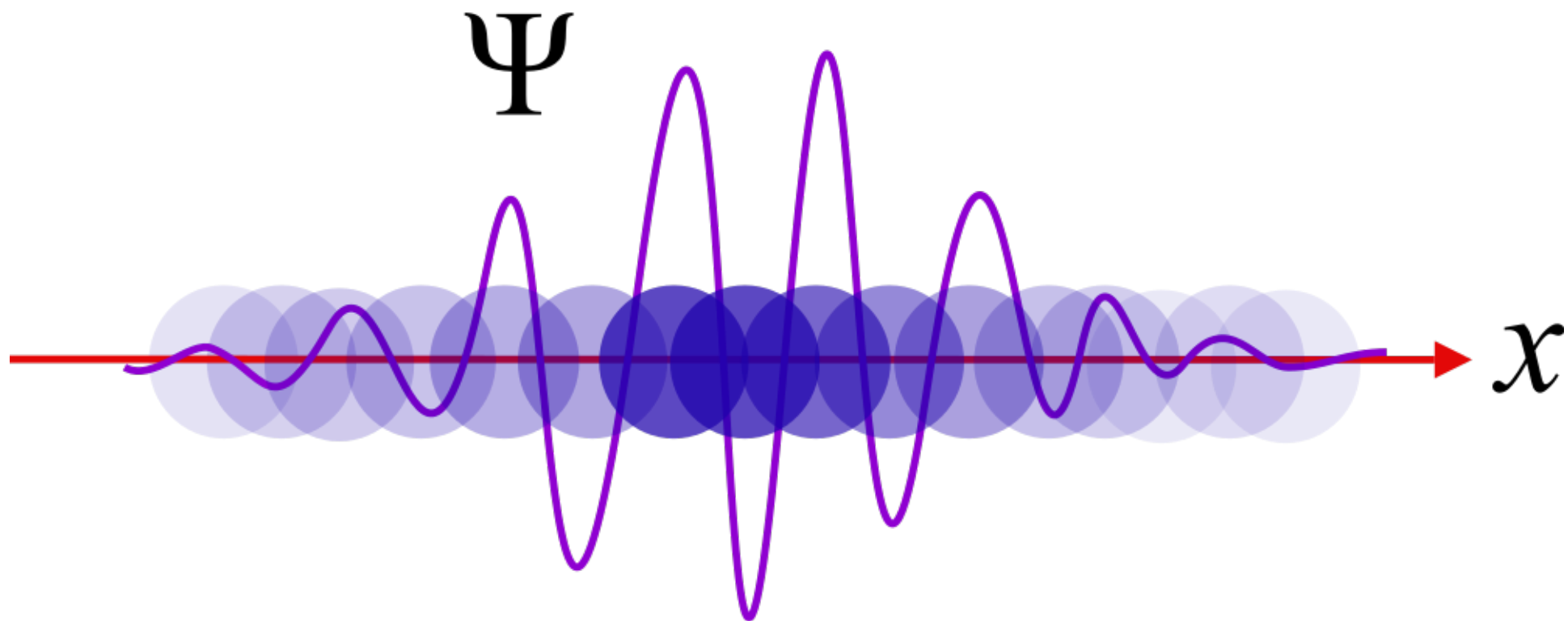




1927

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

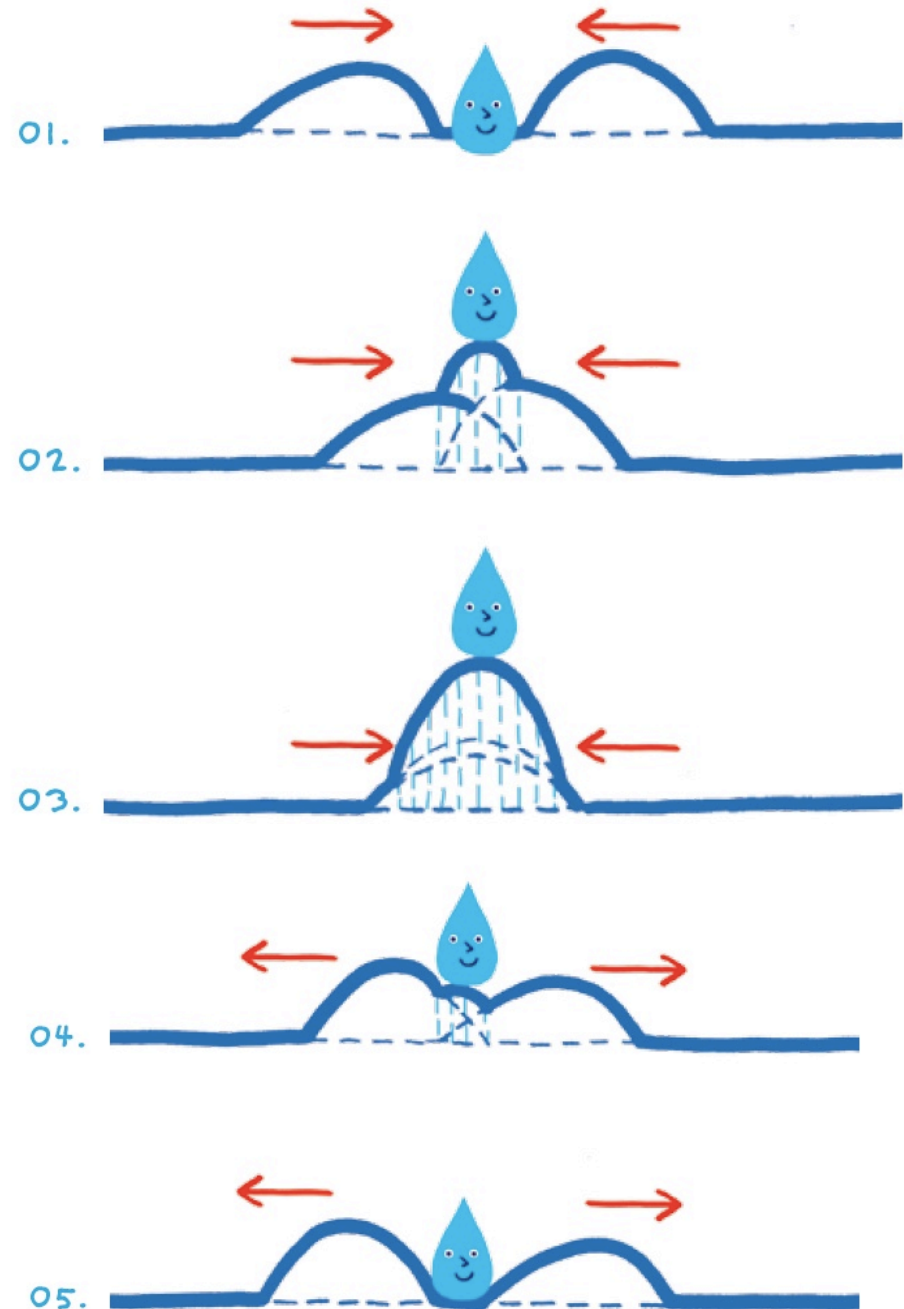
Il principio
di indeterminazione



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Il principio di sovrapposizione

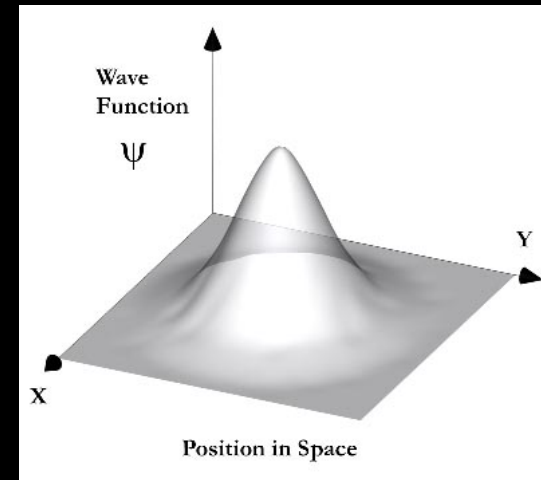
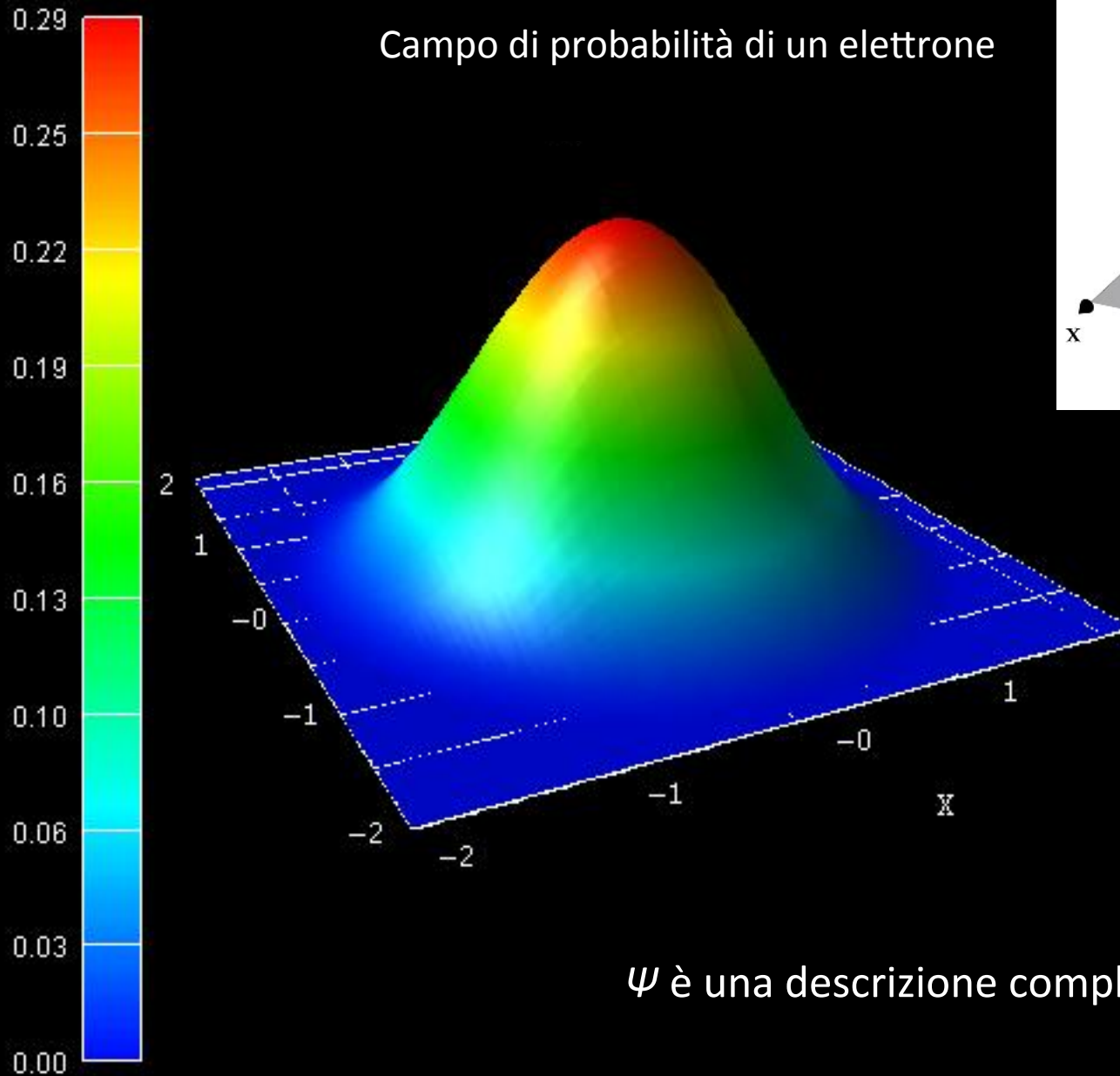
Le onde si sommano punto per punto





NUVOLA di PROBABILITÀ

Campo di probabilità di un elettrone



ψ è una descrizione completa del sistema fisico



Schroedinger, 1926

$$F = m a$$

Equazione del moto

$$i \hbar \psi = H \psi$$

ψ è una descrizione completa del sistema fisico per ogni t

A photograph of a person's back, showing a large tattoo of the Schrödinger equation. The person has dark hair and is wearing a light-colored top. The tattoo is in black ink and is oriented horizontally across the upper back. The equation is written as
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

La triste storia
della luce
incerta

L'allegria storia
del pisello in
scatola

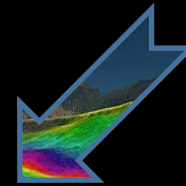
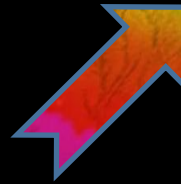
L'incredibile
storia
degli amanti
separati
ma inseparabili

*La triste storia
della luce incerta*

Solo il presente ci è tolto, dato che solo questo abbiamo. »

(Marco Aurelio, *Pensieri*)

Che cosa è



Galeno di Pergamo (129 - 199)

Quali proprietà ha

Euclide (367–283 a.C)

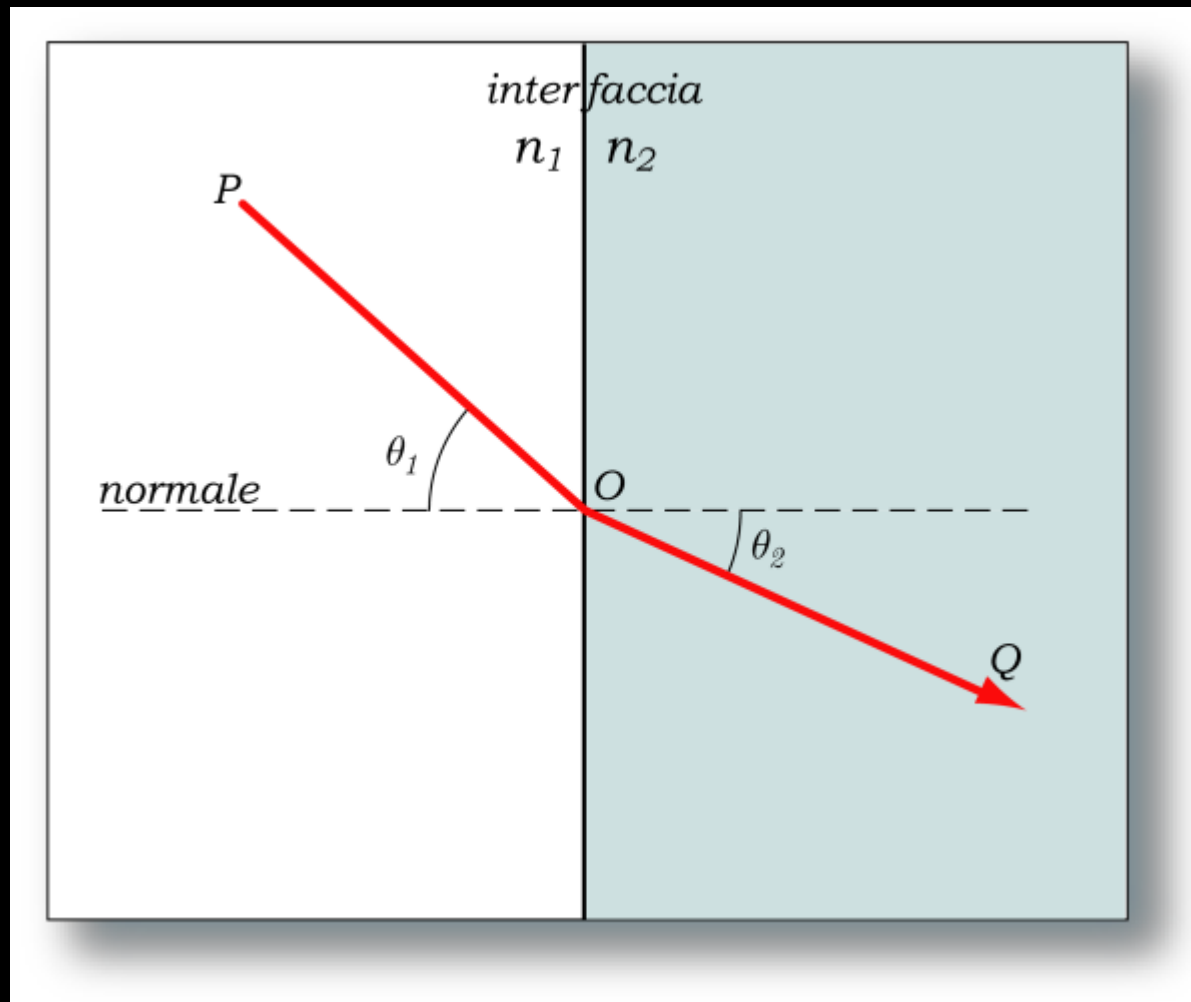
- i raggi emessi dall'occhio procedono per via diretta
- la figura compresa dai raggi visivi è un cono con il vertice nell'occhio e la base al margine dell'oggetto

Riflessione

Tso Moriri Lake, India



Rifrazione



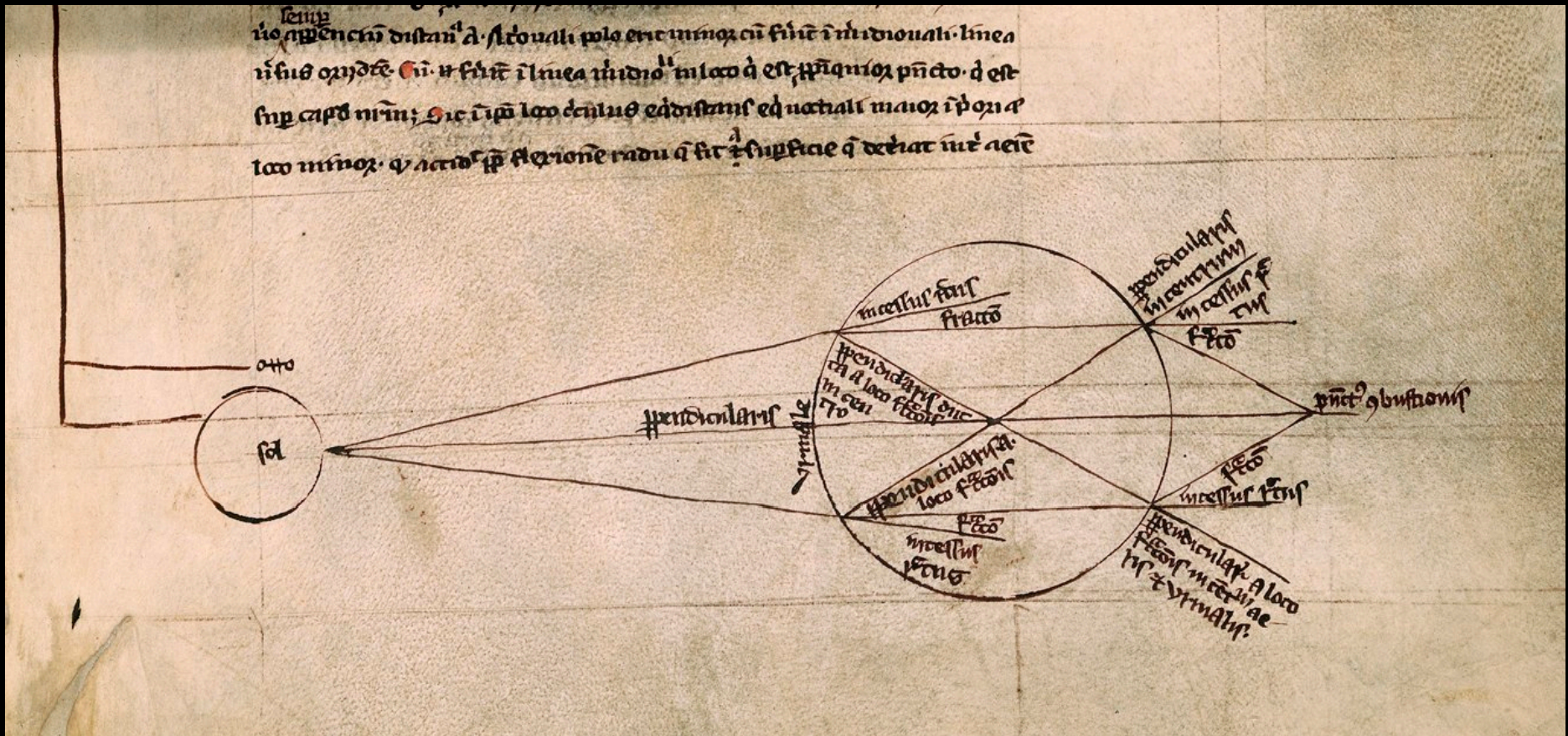
Rifrazione (1621)

Snellius (Leida 1580 ca.-1626)

leggi di Snellius o leggi della rifrazione

Cartesio, *Dioptrique* (1637)

C. Huygens *Dioptrica* (1703)



Francesco Bacone (1561 –1626)

Galileo (1564-1642)

Romer (1676)

finitezza velocità della luce

Cartesio
(1596 –1650)

Linea
particellare

Isaac Newton
(1642-1727)



Linea
ondulatoria

Pierre de Fermat
(1601 –1665)

Christiaan Huygens
(1629-1695)



C'è qualcosa in più: la diffrazione

Francesco Maria Grimaldi (1618 –1663)



1665

PROPOSITIO I.

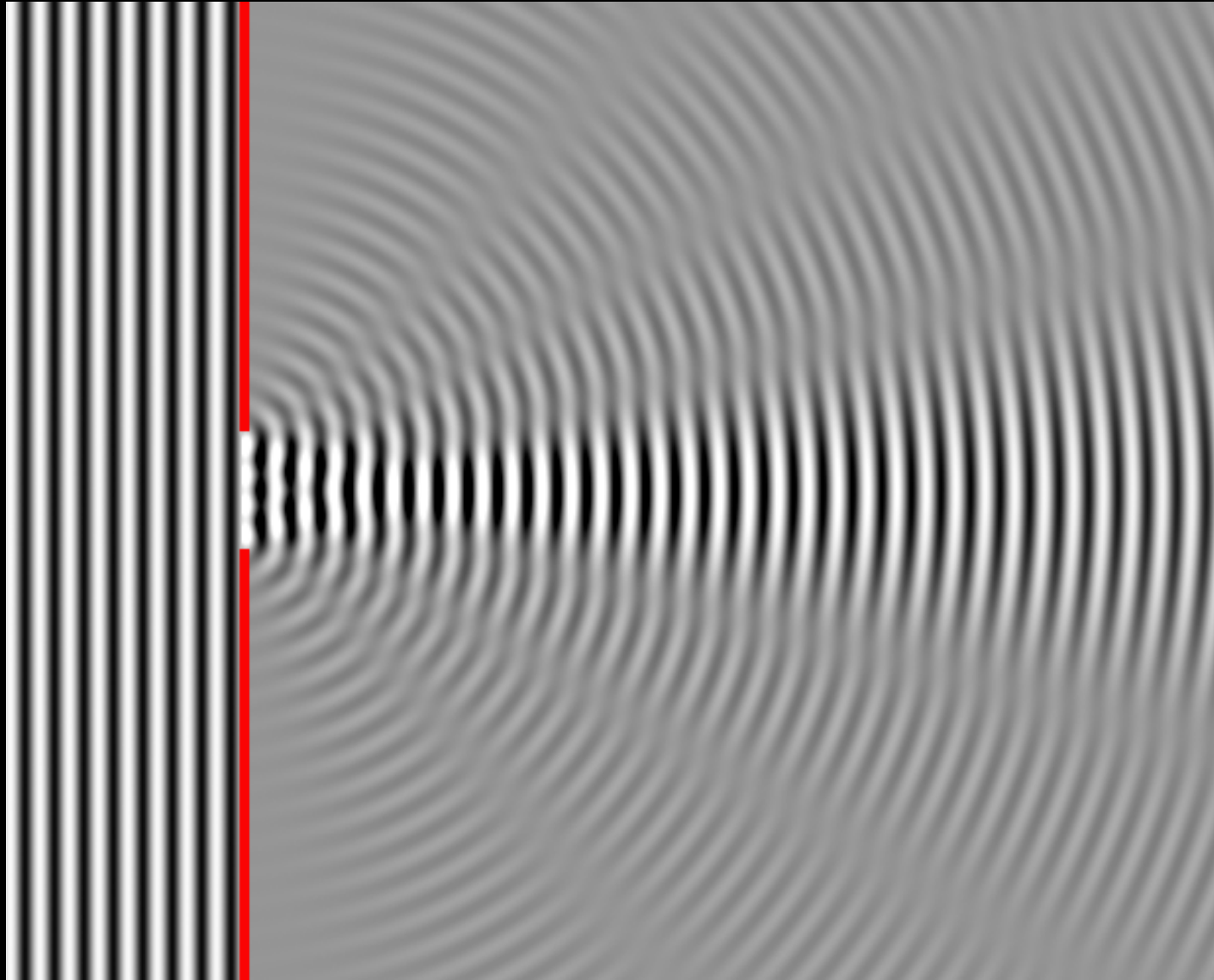
*Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directè,
Refractè, ac Reflexè, sed etiam alio quodam
Quarto modo, DIFFRACTE'.*



Diffrazione delle onde



Diffrazione

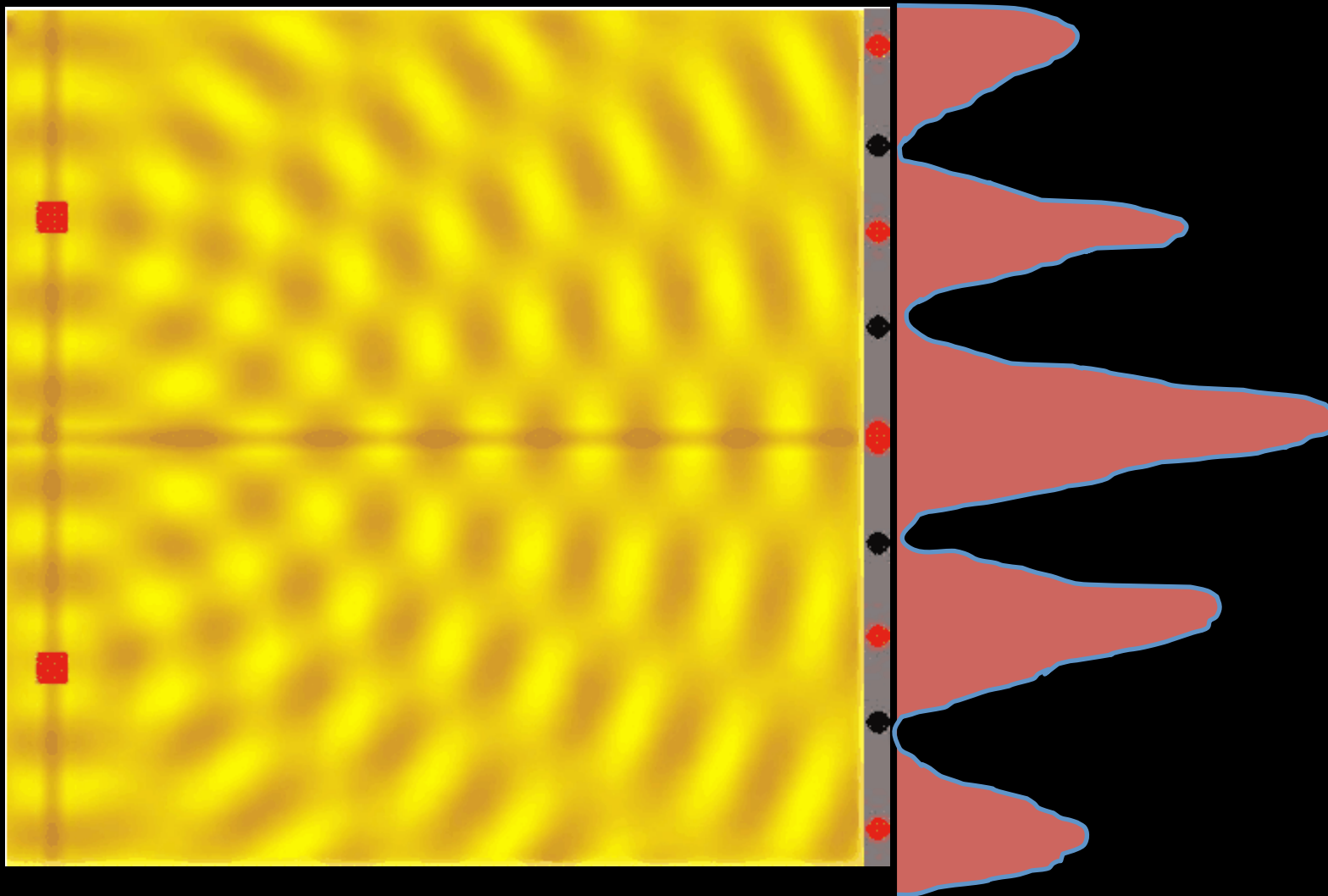


Diffrazione

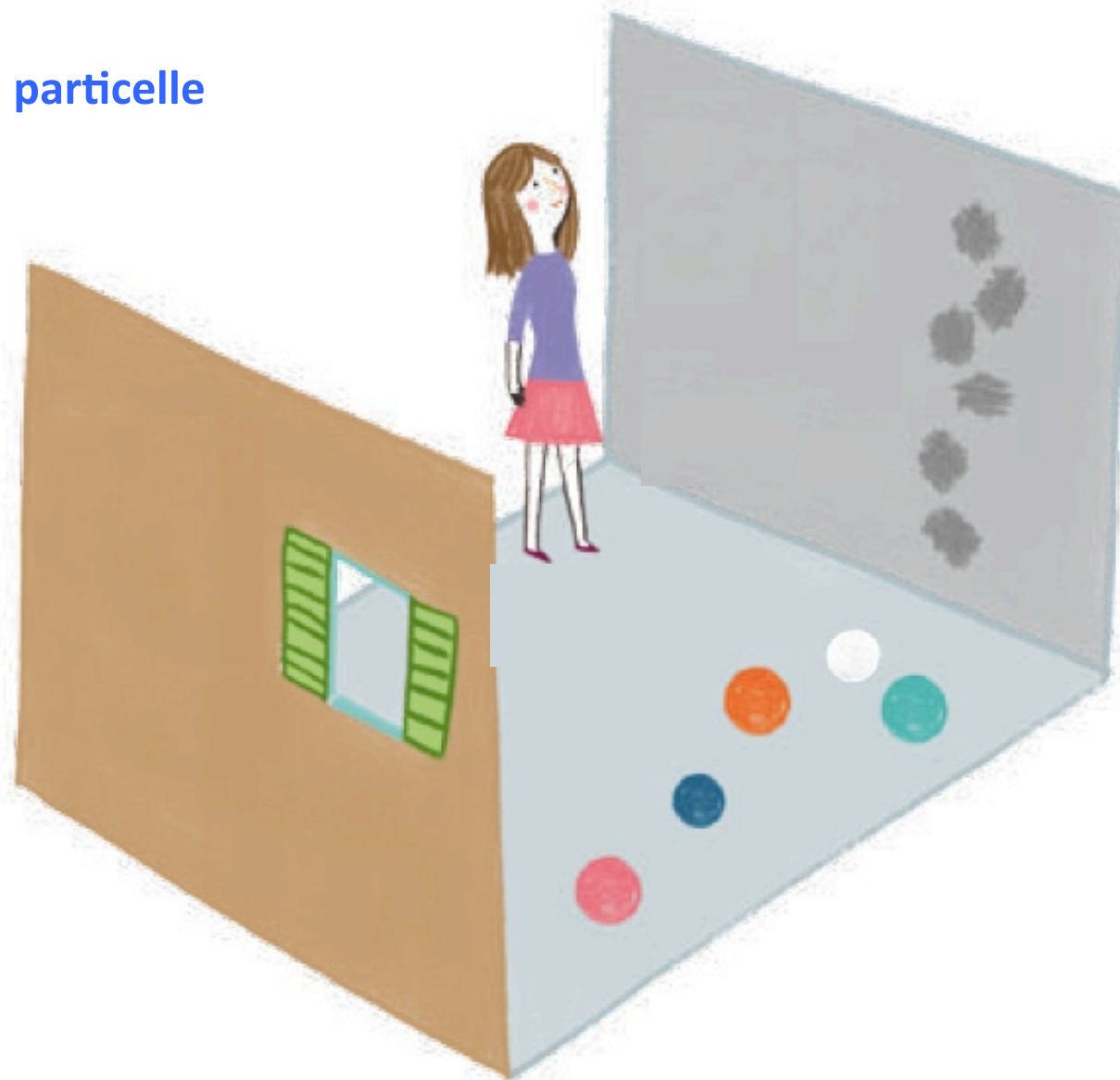


Esperimento di Young (1801)

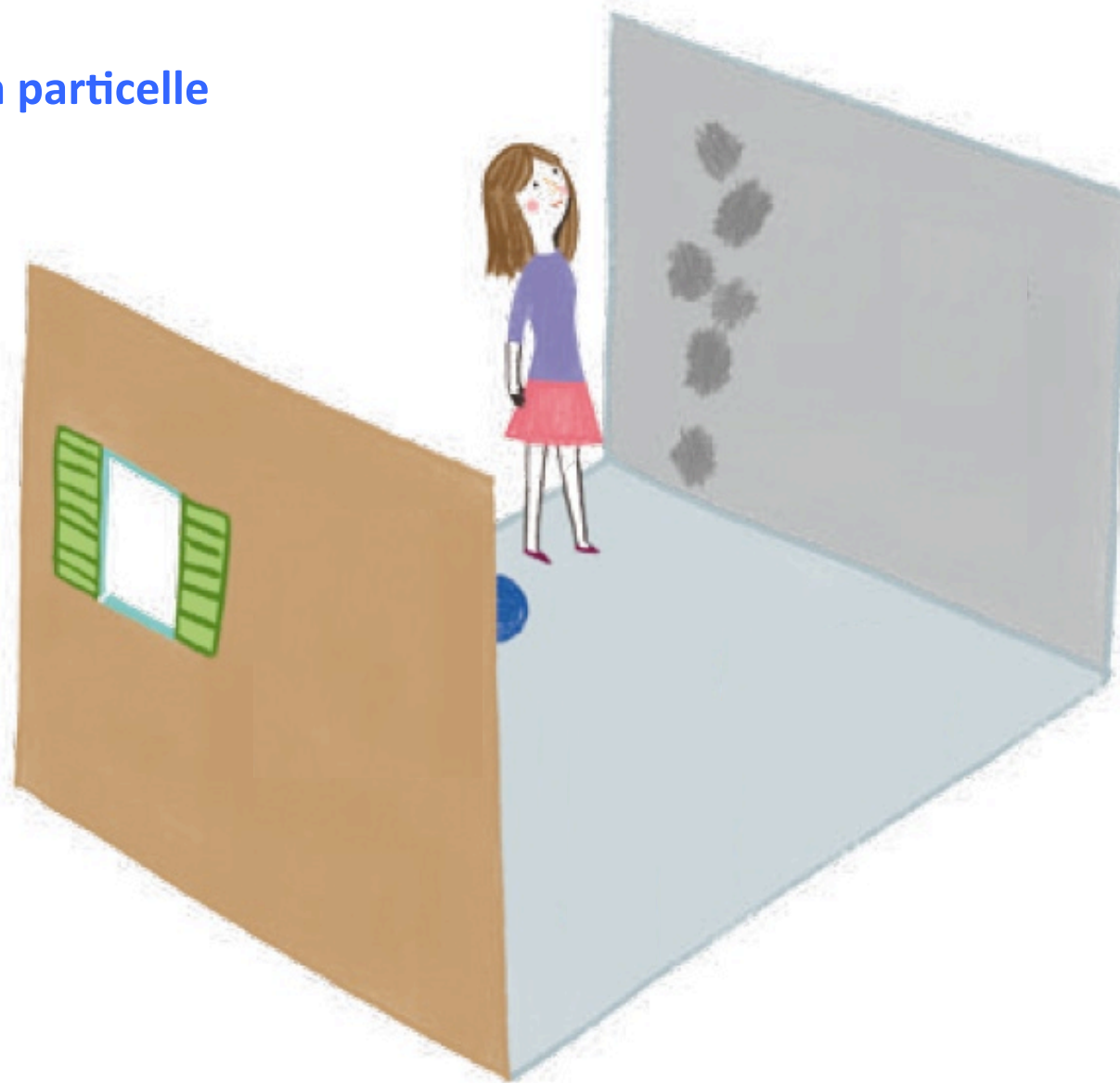
Thomas Young
(1773-1829)



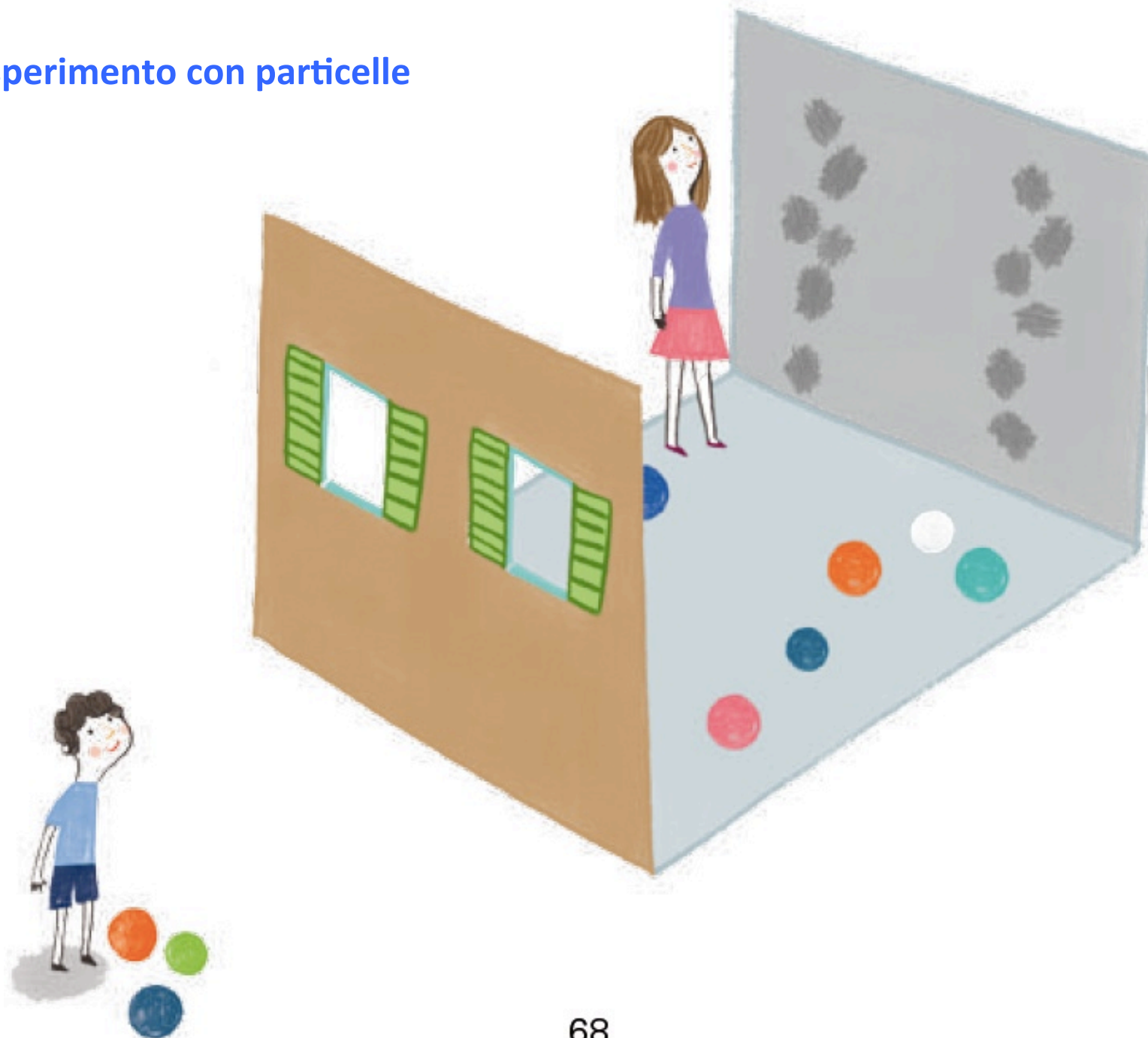
Esperimento con particelle

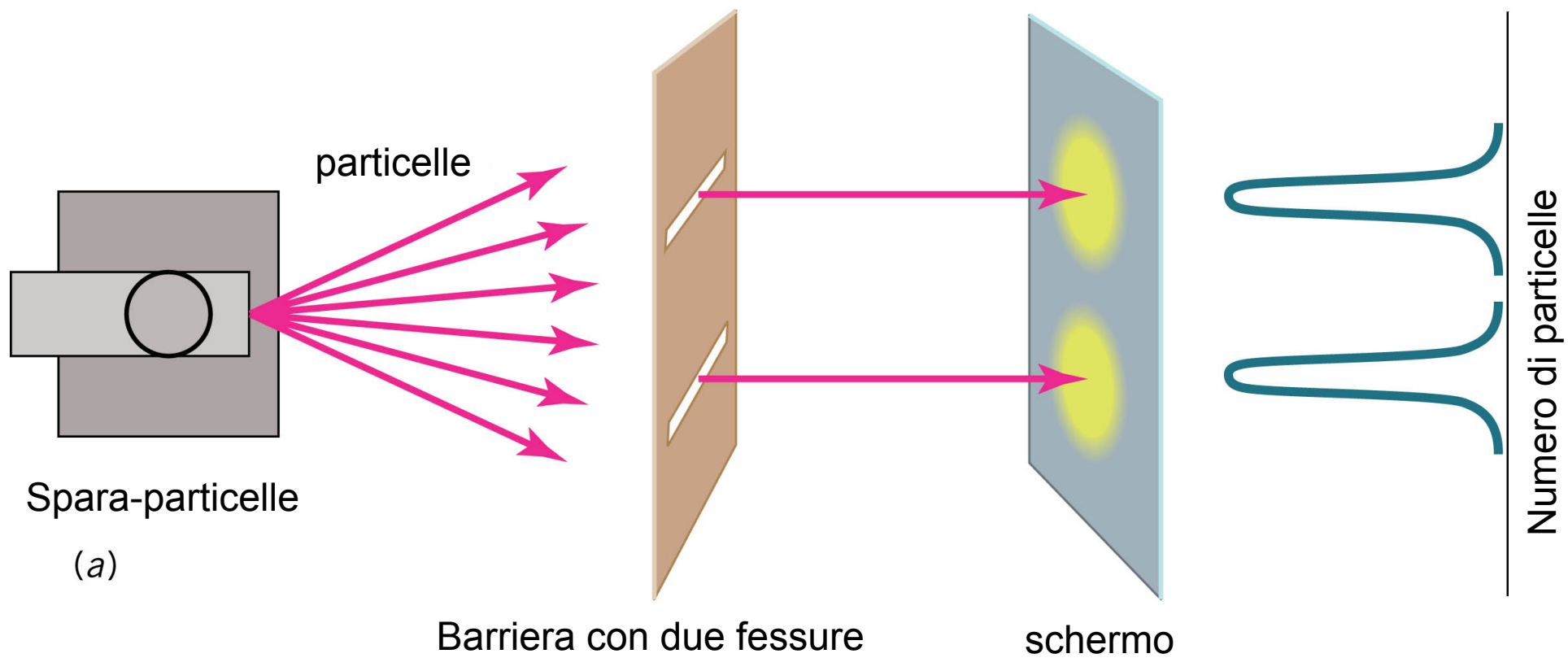


Esperimento con particelle



Esperimento con particelle





Conclusione 1

La luce ha a che fare con fenomeni di tipo ondulatorio

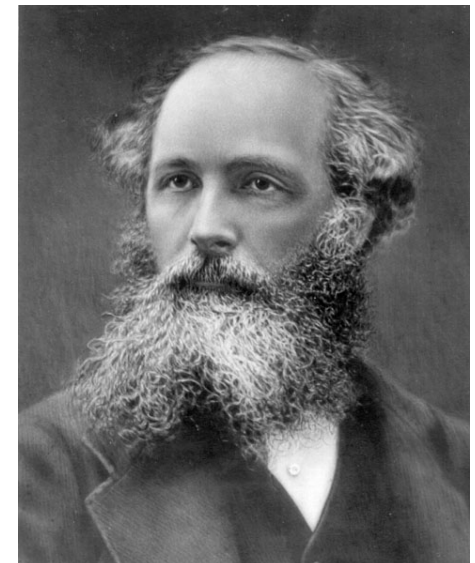




Elettromagnetismo (classico)

Le equazioni di Maxwell

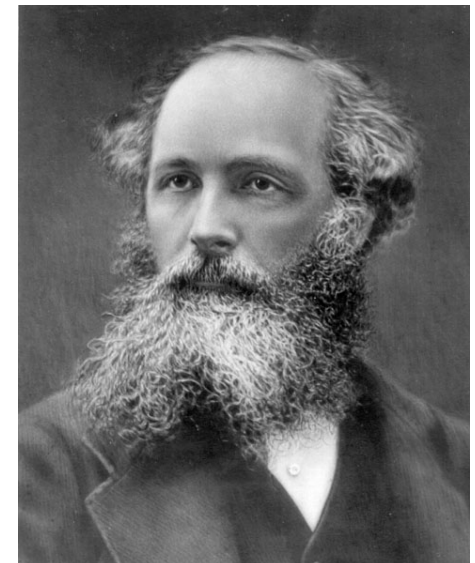
	Forma integrale	Forma differenziale
Legge di Gauss per il campo elettrico	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
Legge di Gauss per il campo magnetico	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Legge di Ampère-Maxwell	$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$
Legge di Faraday	$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$



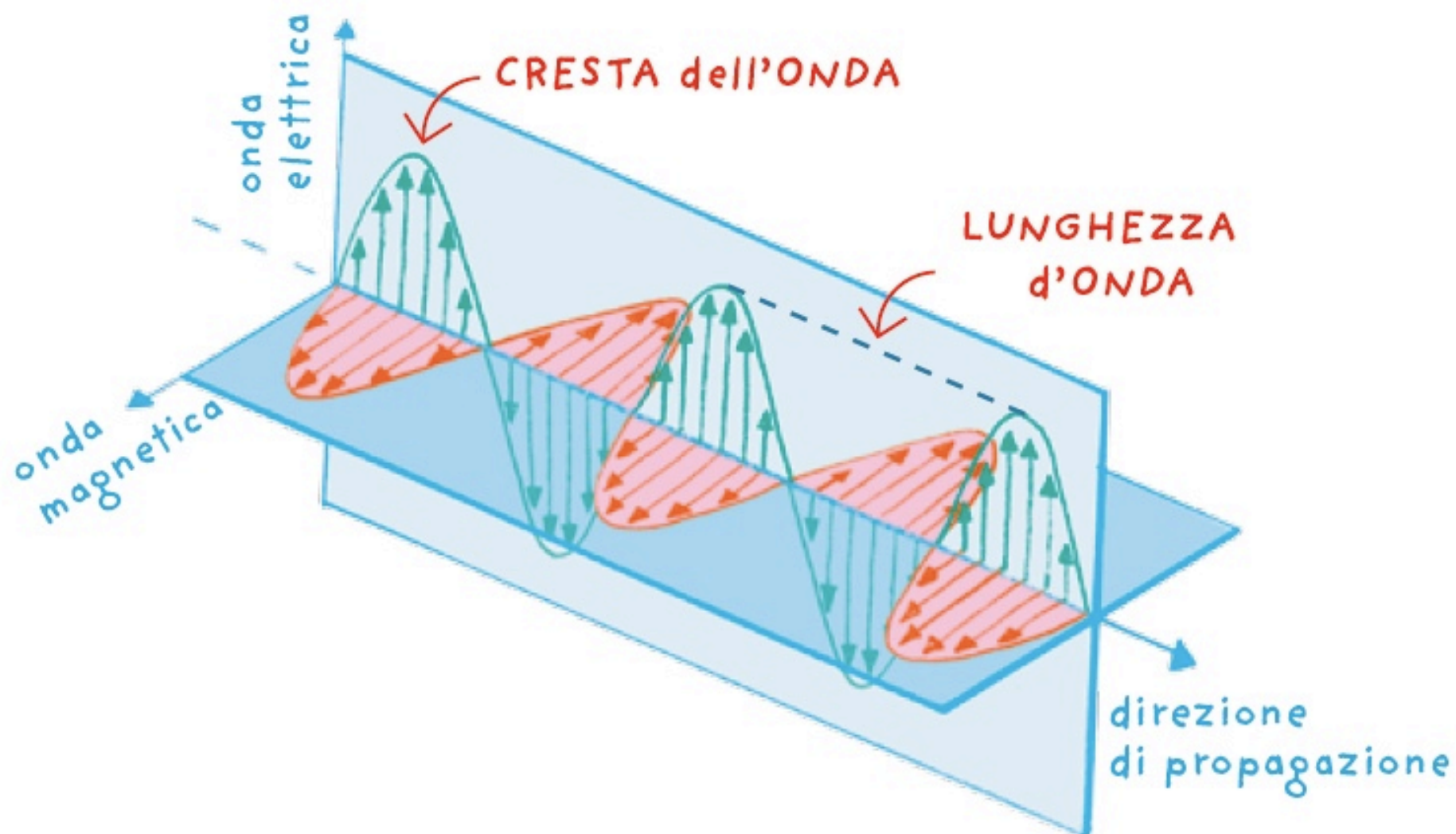
Elettromagnetismo (classico)

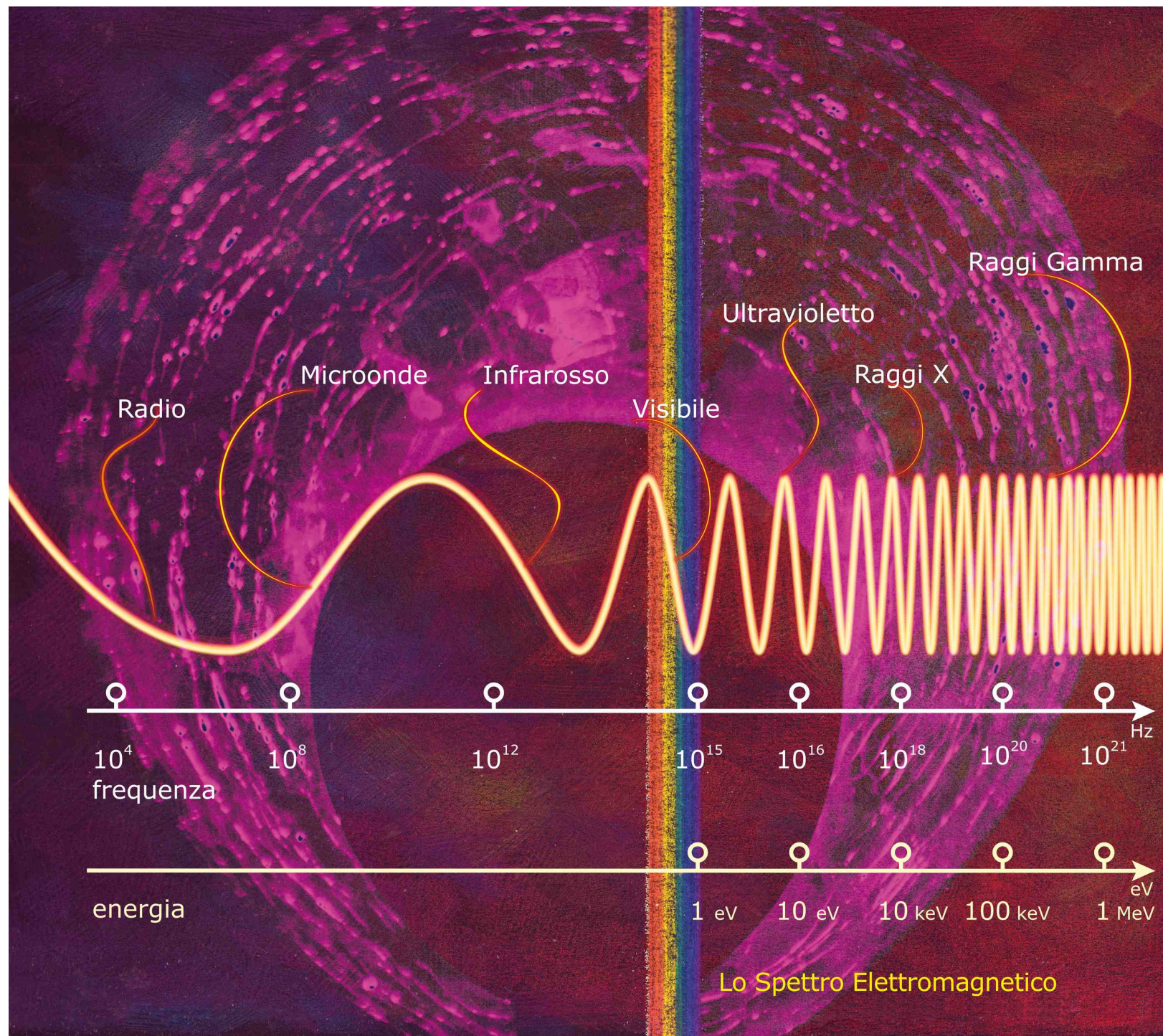
Le equazioni di Maxwell

	Forma integrale	Forma differenziale
Legge di Gauss per il campo elettrico	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
Legge di Gauss per il campo magnetico	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Legge di Ampère-Maxwell	$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$
Legge di Faraday	$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

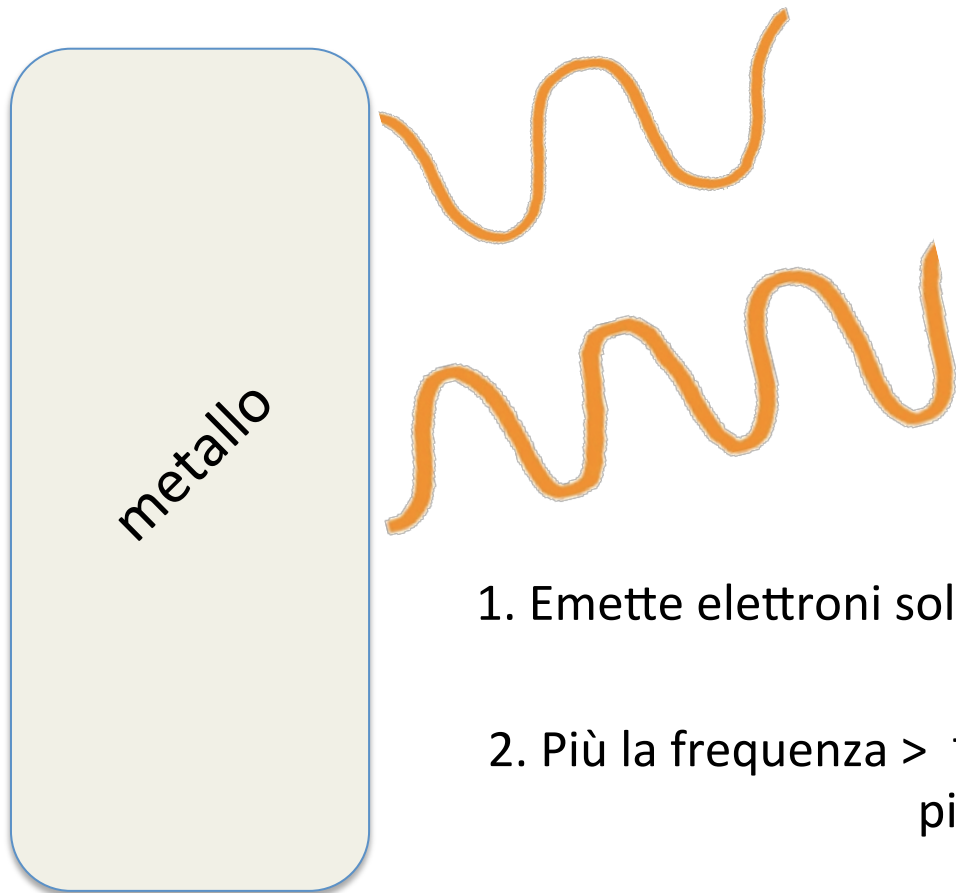


Elettromagnetismo (classico)





Uno strano fenomeno. L'effetto fotoelettrico



Becquerel, 1839

Hertz, 1887

Lenard, 1900

Einstein, 1905

Premio Nobel 1921

1. Emette elettroni solo se la frequenza $>$ frequenza di soglia
2. Più la frequenza $>$ frequenza di soglia,
più gli elettroni emessi
sono veloci
3. Il numero degli elettroni emessi dipende dalla intensità





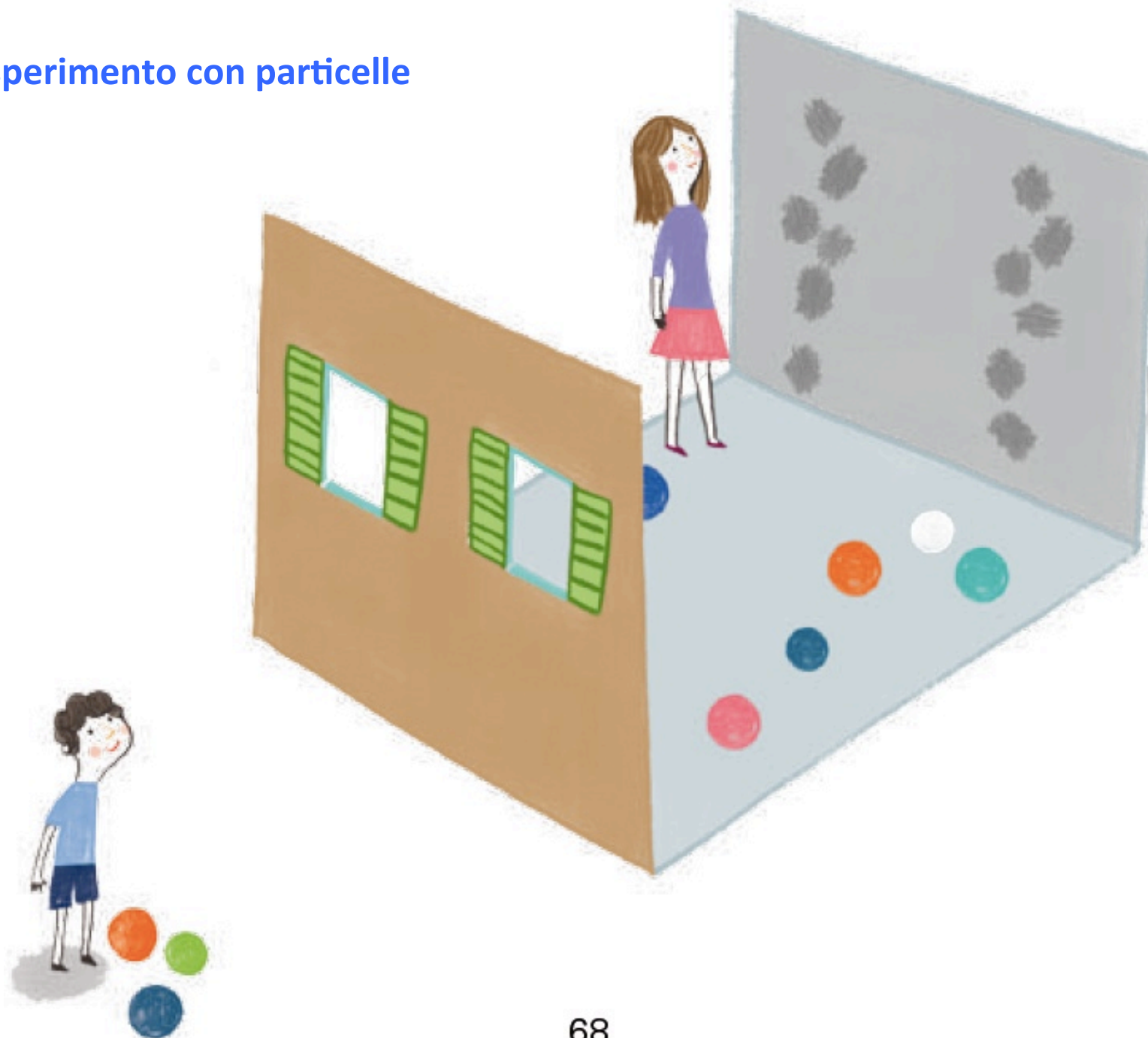


Conclusione 2

La luce ha a che fare con fenomeni di tipo corpuscolare



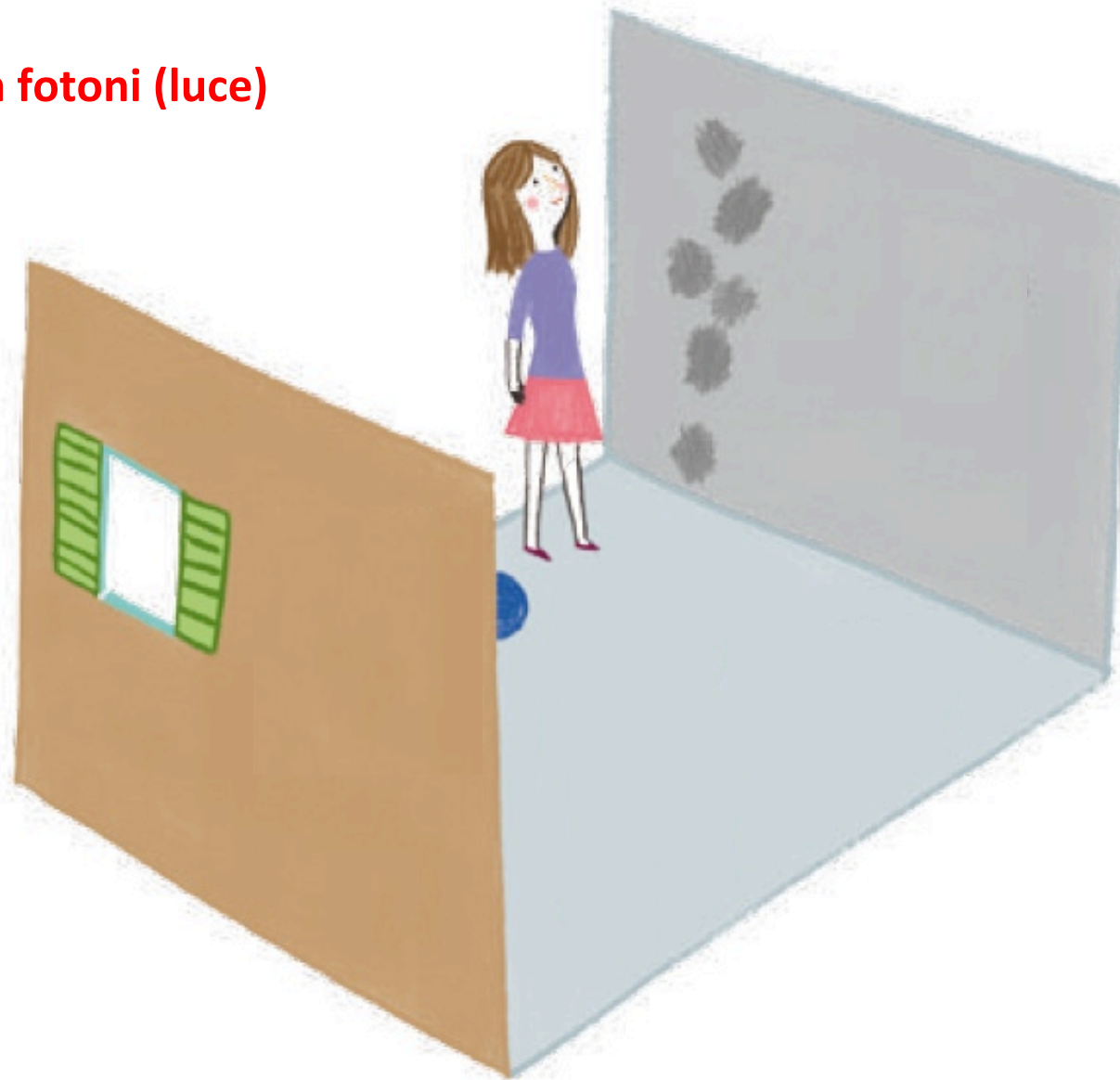
Esperimento con particelle



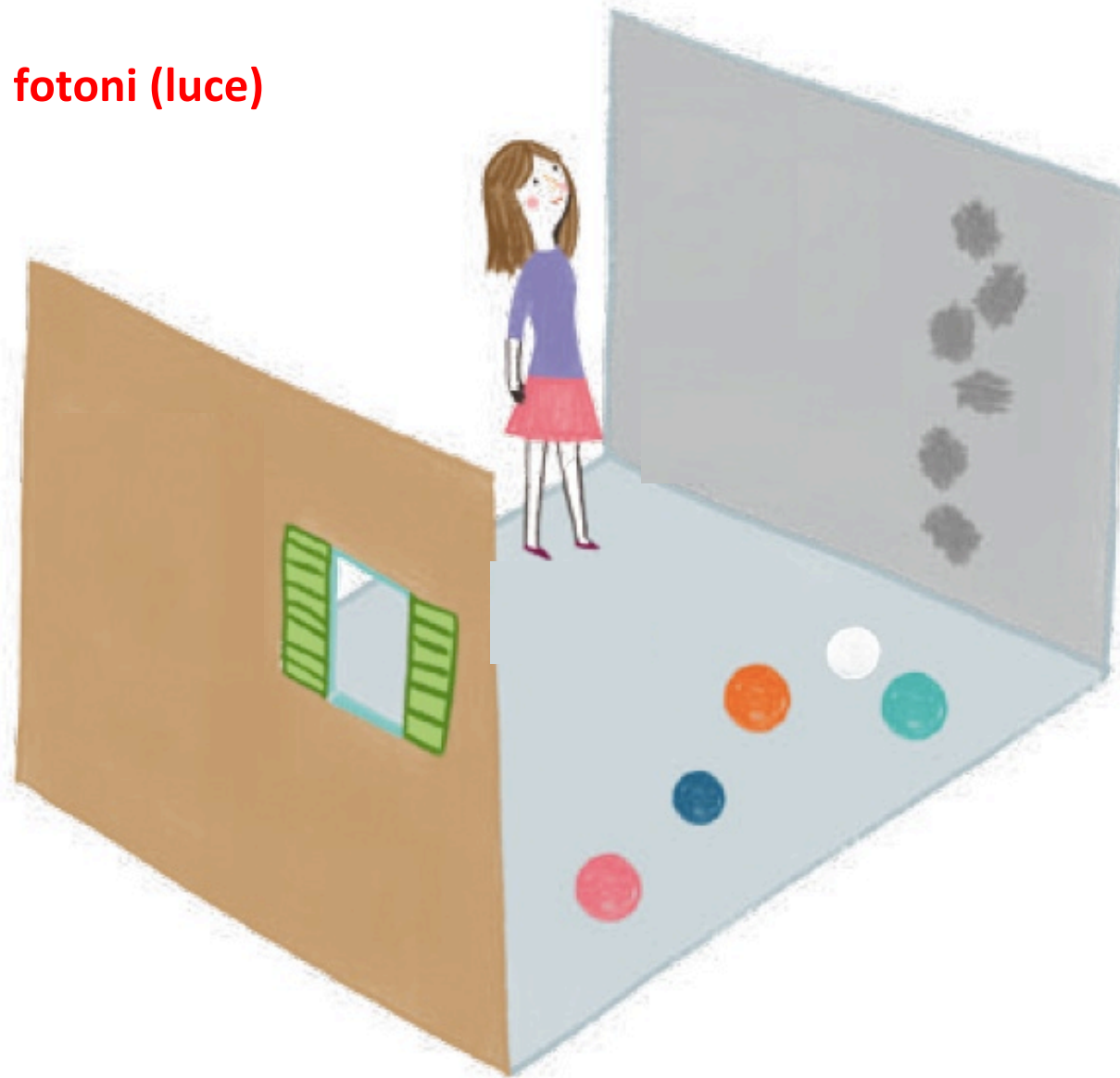
Facciamo il test con i fotoni (luce)



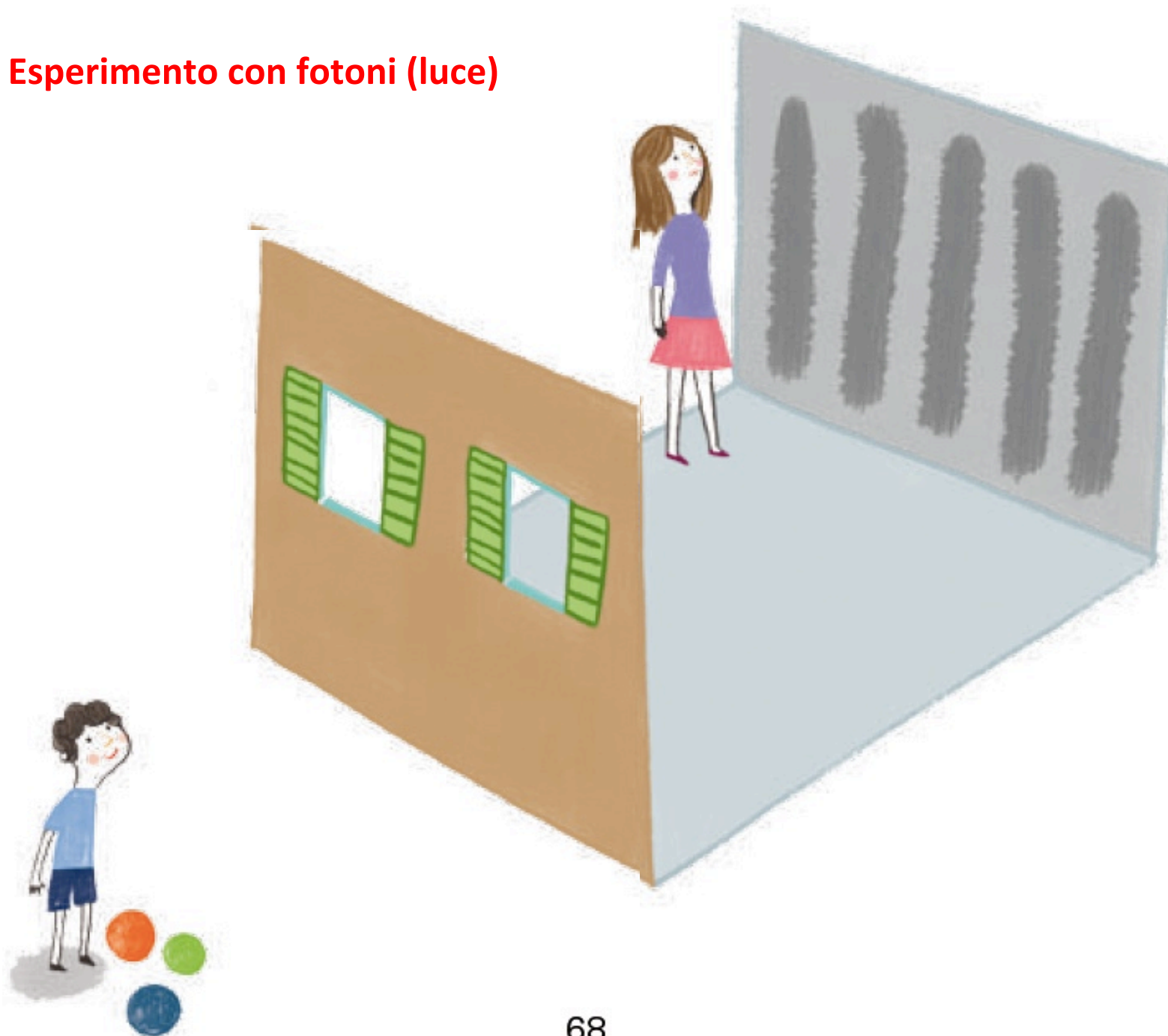
Esperimento con fotoni (luce)



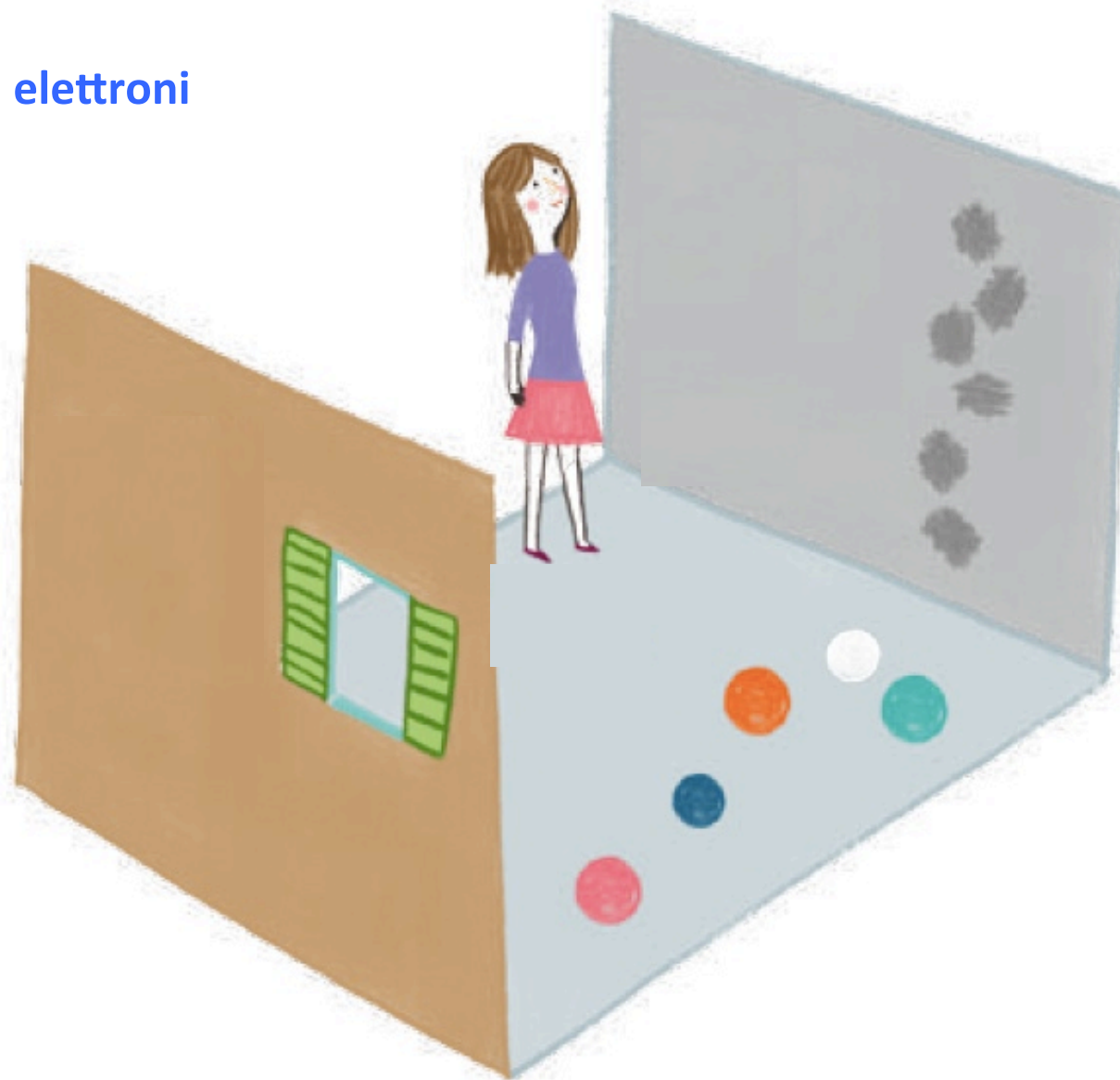
Esperimento con fotoni (luce)



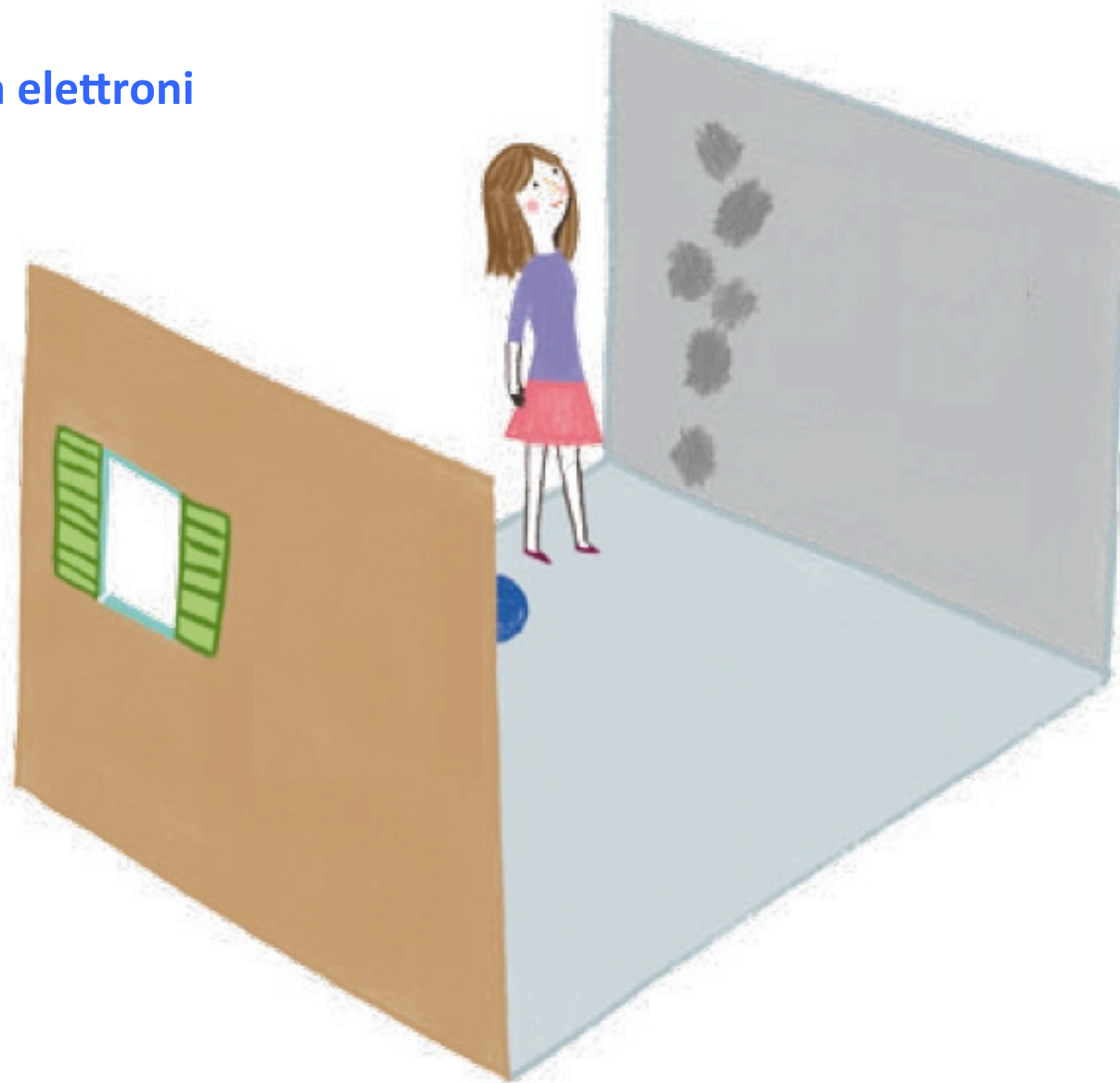
Esperimento con fotoni (luce)



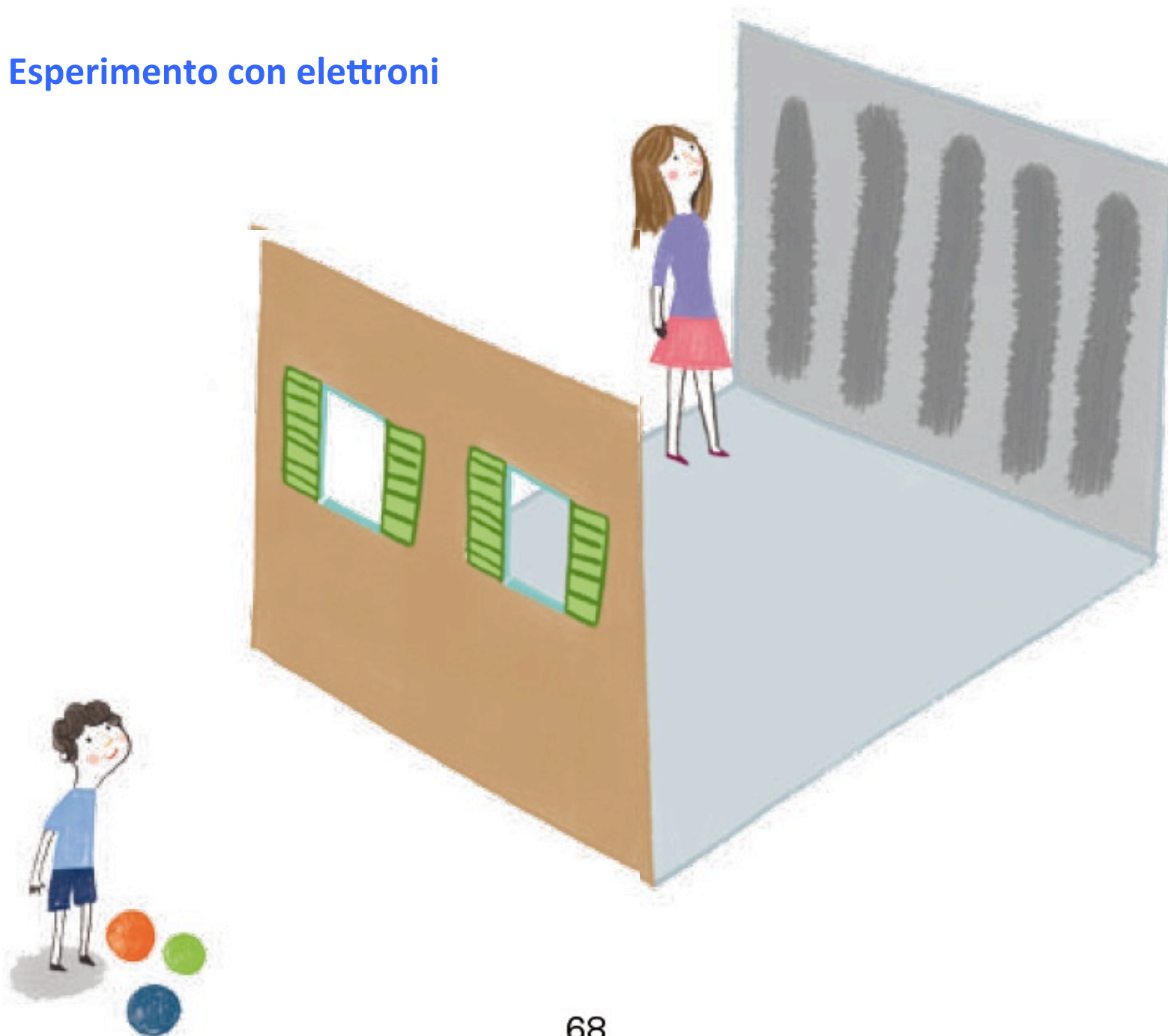
Esperimento con elettroni



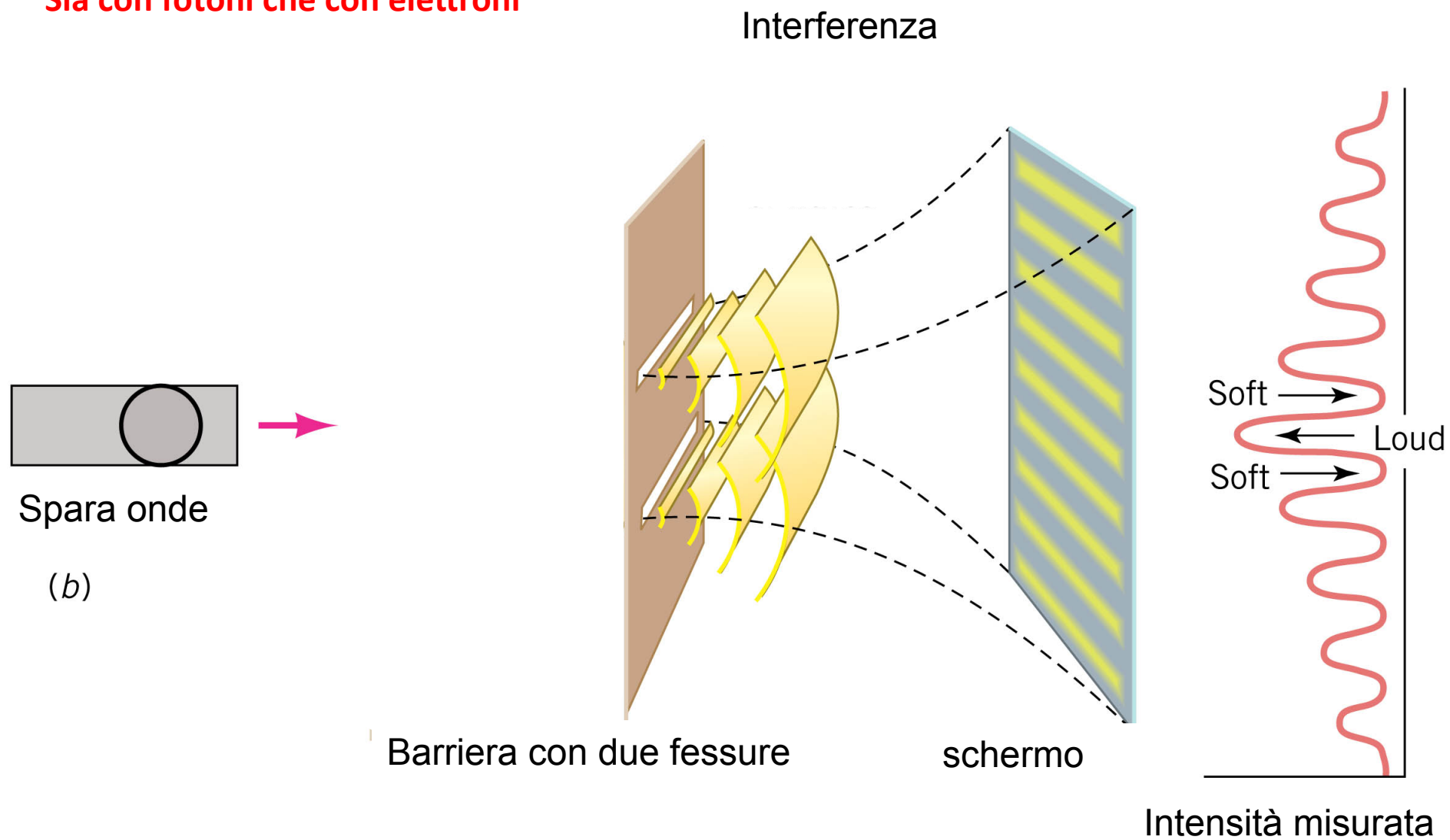
Esperimento con elettroni



Esperimento con elettroni



Sia con fotoni che con elettroni



I fotoni si comportano in modo “ambiguo”

Gli elettroni si comportano in modo identico ai fotoni

Che cosa sta succedendo?

FULVIO E FEDERICA LUCISANO E RAI CINEMA PRESENTANO



Claudio BISIO Marco GIALLINI Anna FOGLIETTA Massimiliano BRUNO
Paola MINACCIONI Caterina GUZZANTI Pietro SERMONTI Kelly PALACIOS

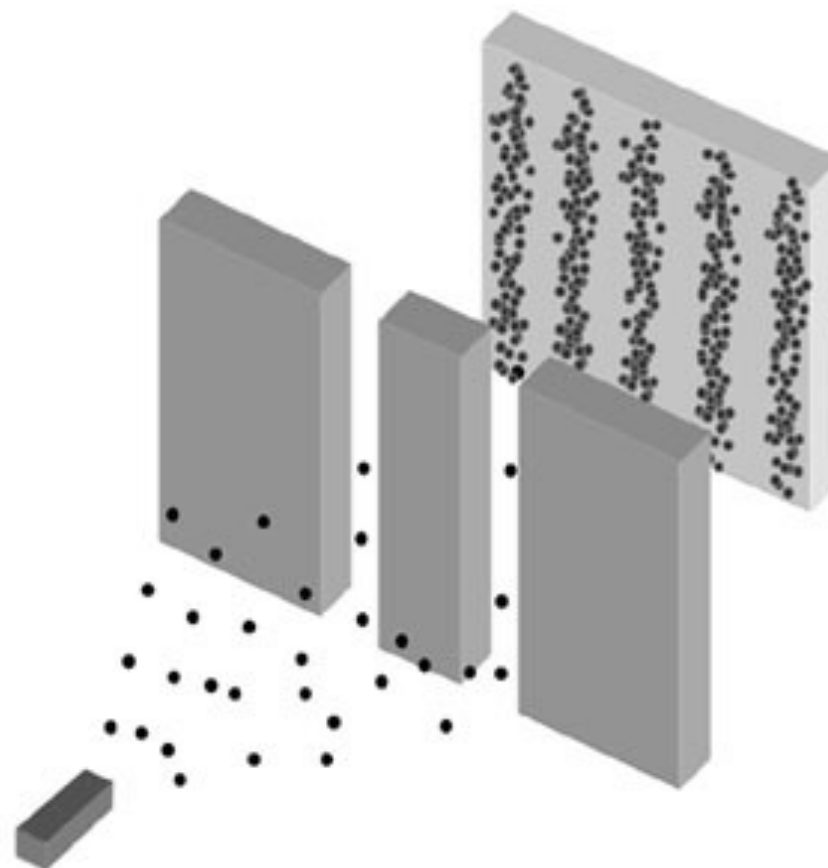
Chi analizza l'analista?

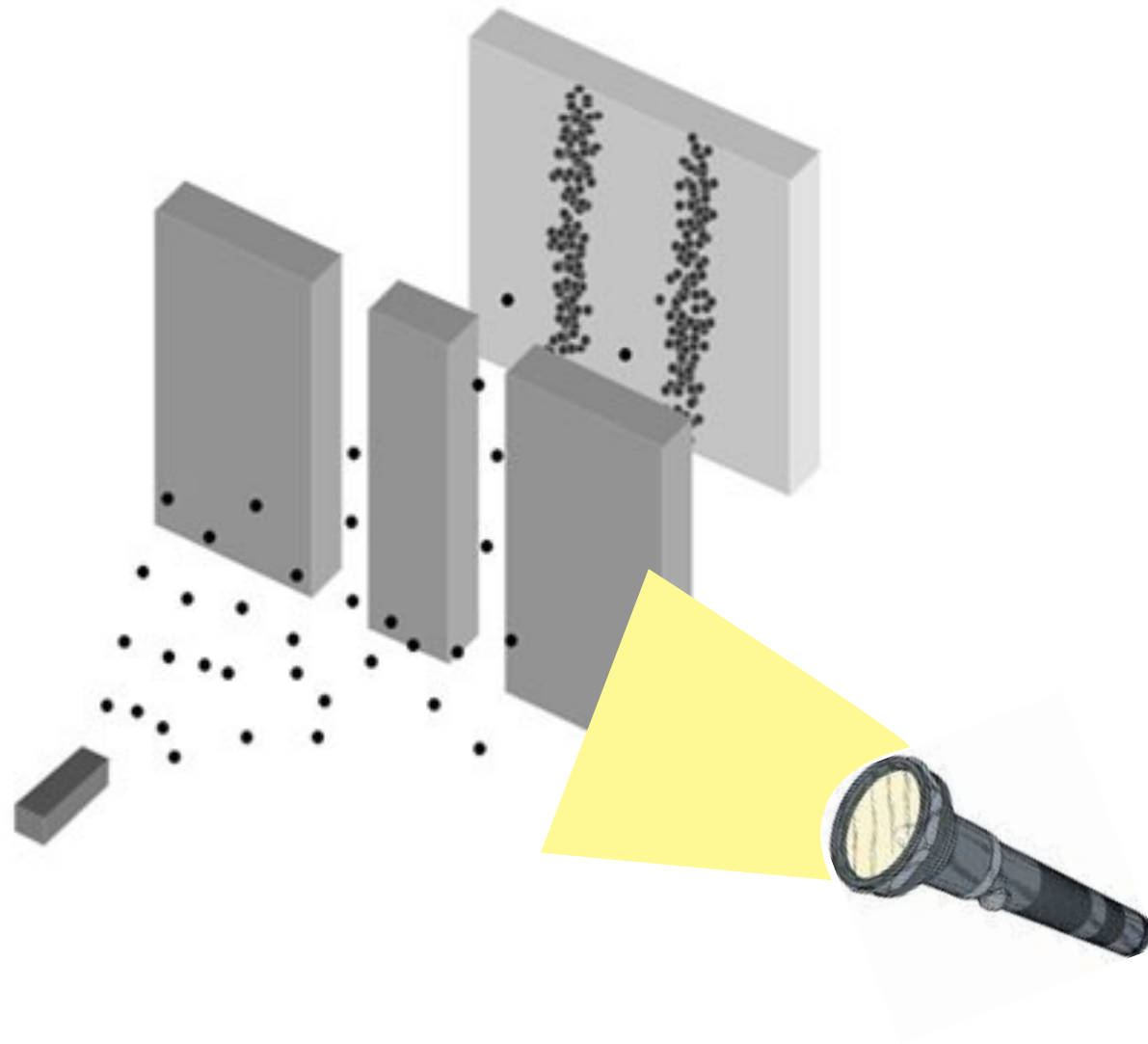
CONFUSI E FELICI

UN FILM DI Massimiliano BRUNO

DAL 30 OTTOBRE AL CINEMA

Esperimento con fotoni (luce) o con elettroni



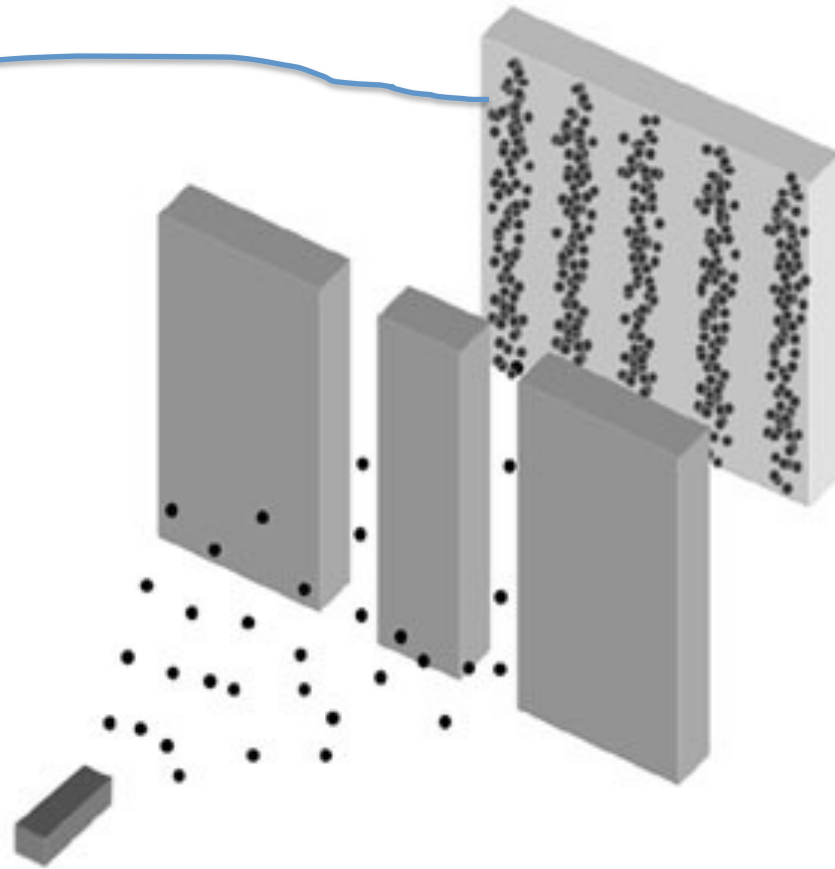


Esperimento con fotoni (luce) o con elettroni

Nasce dalla
non-scelta

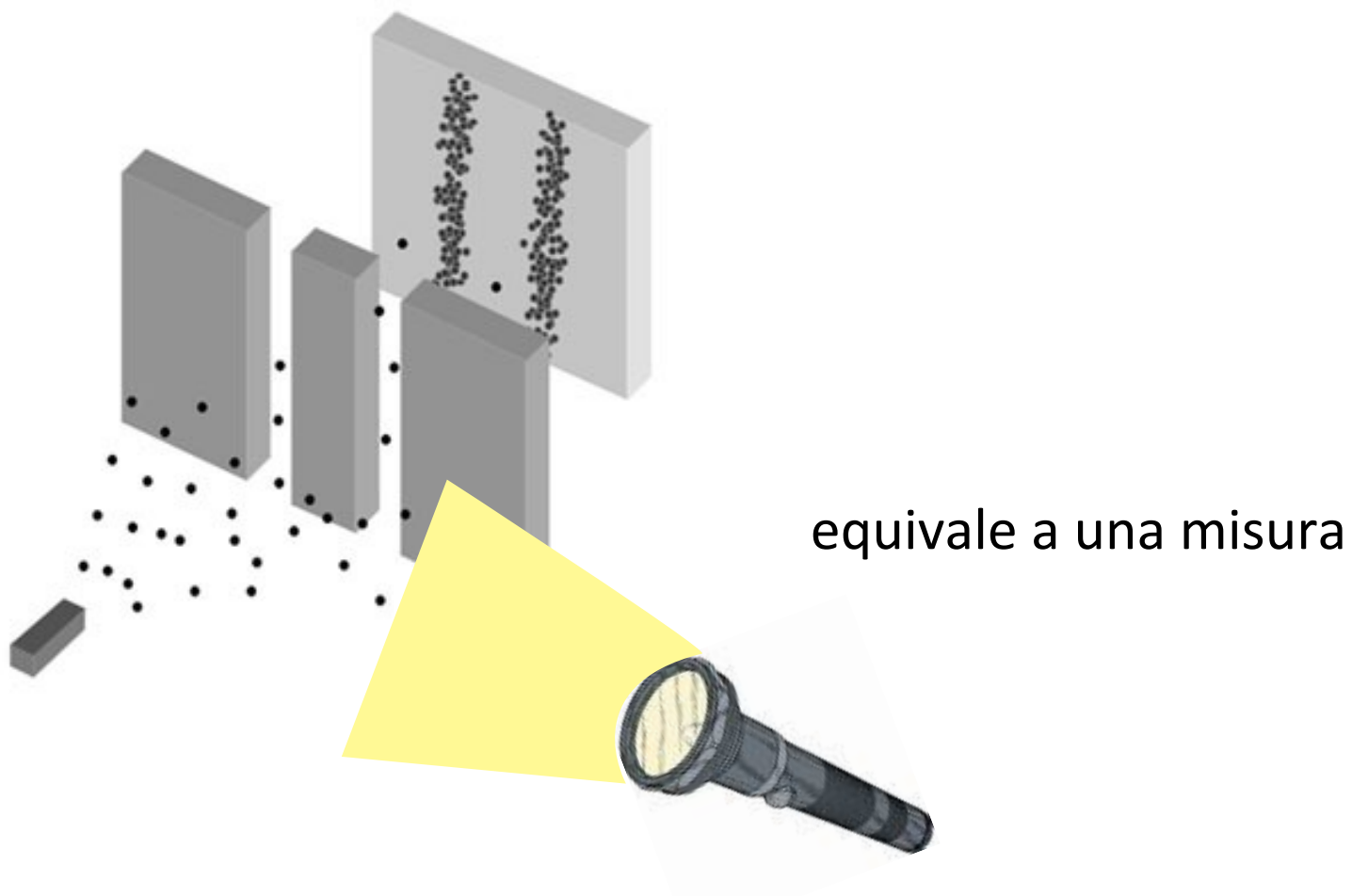
Sovrapposizione di

- Passaggio a dx
- Passaggio a sx

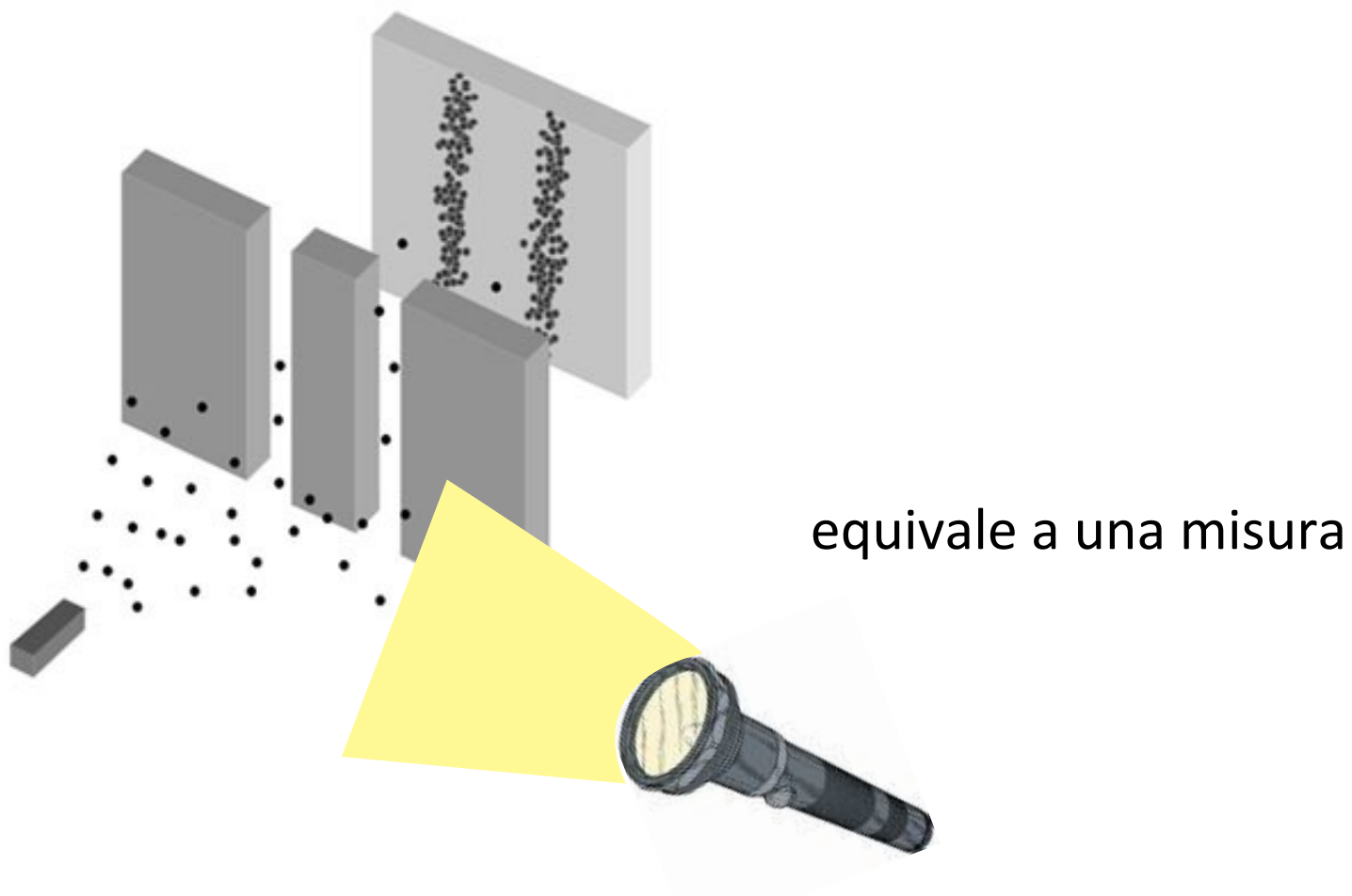


$$\psi = \text{passaggio a dx} + \text{passaggio a sx}$$

$$\psi = \text{passaggio a dx} + \text{passaggio a sx}$$



$$\psi = \text{passaggio a dx} + \text{passaggio a sx}$$



*L'allegria storia
del pisello in scatola*

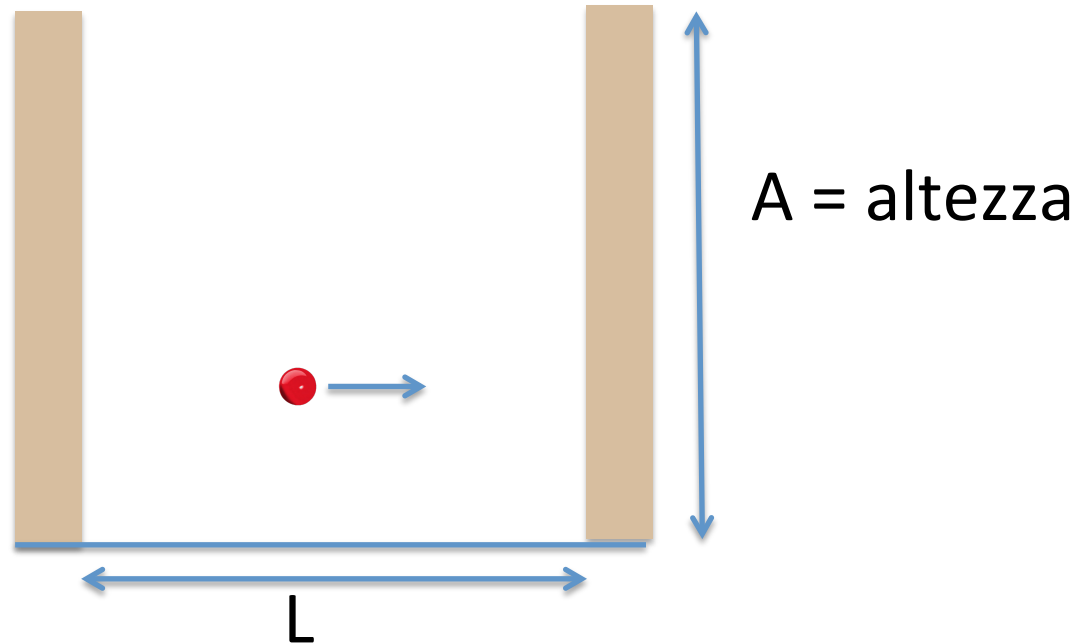


Il pisello in una scatola

v = velocità

m = massa

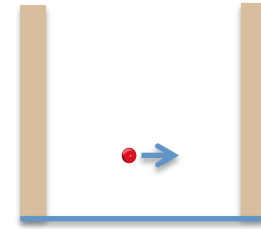
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$



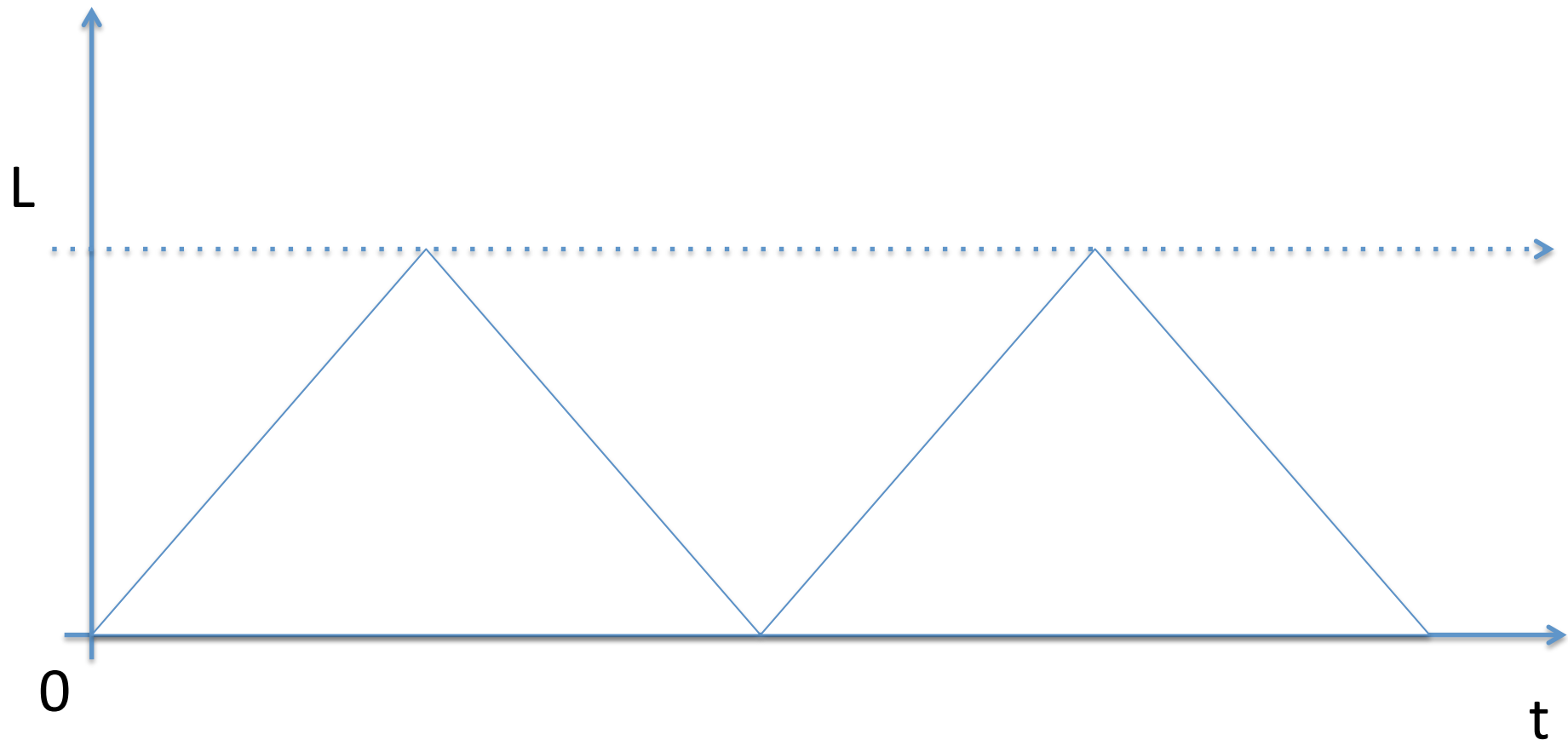
Urti sono perfettamente elastici

- moto periodico
- confinato per sempre nella scatola per qualsiasi valore di E e di A .

Il pisello in una scatola



Posizione della particella

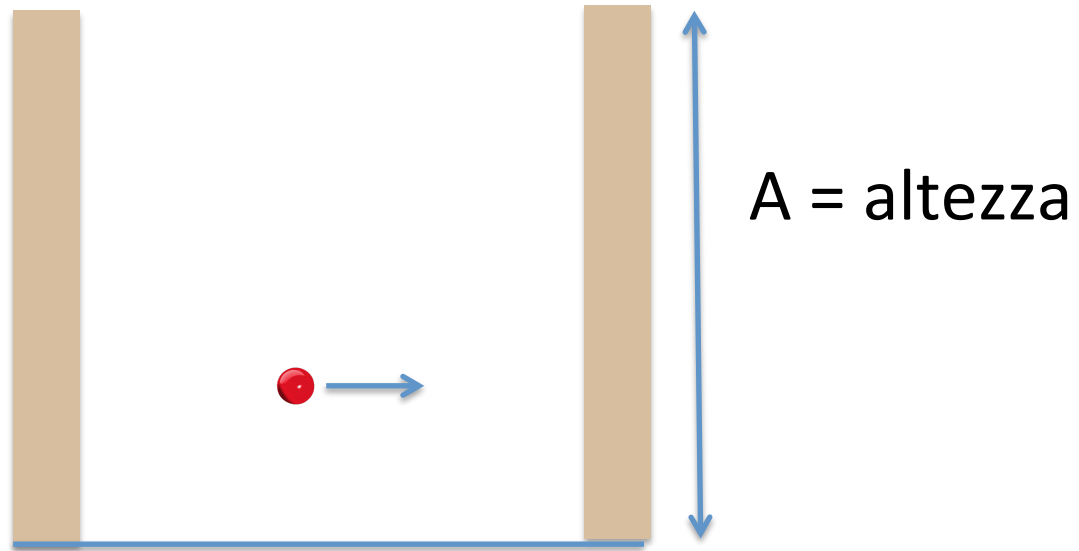


Il pisello in una scatola, QM

v = velocità

m = massa

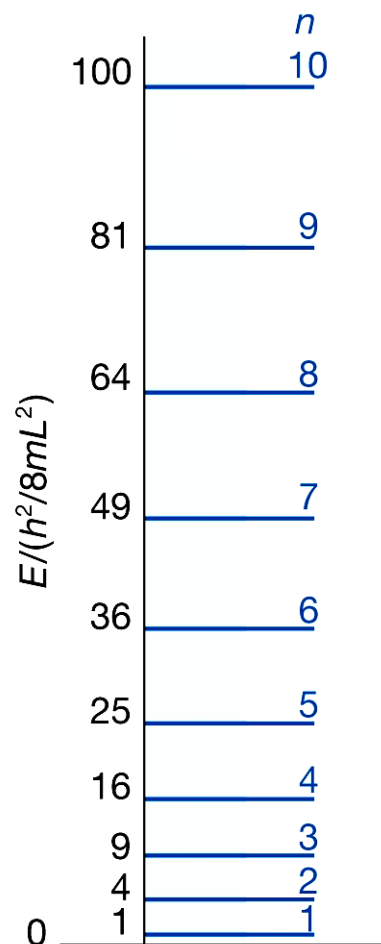
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$



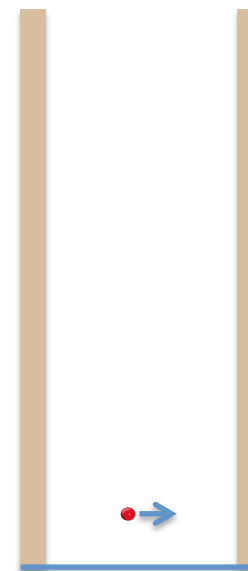
Urti perfettamente elastici

Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

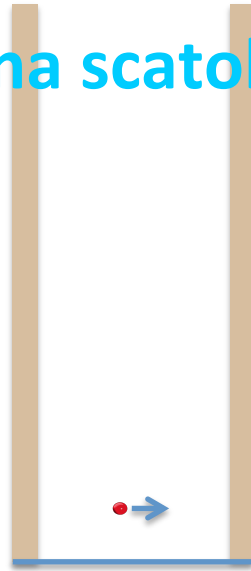


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$



Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

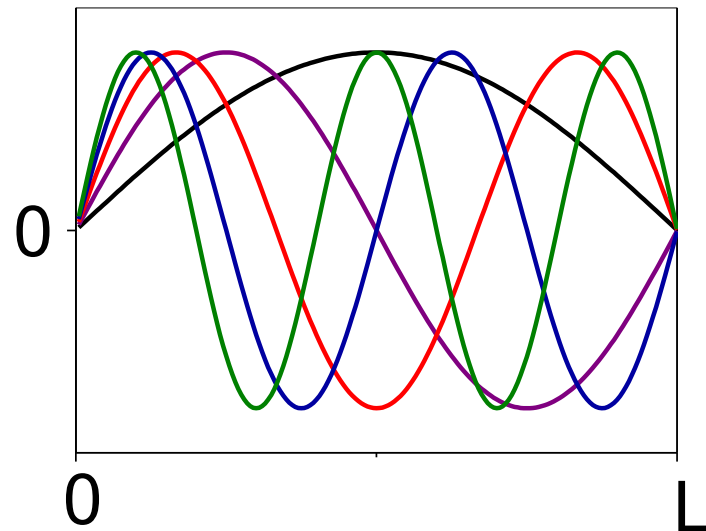


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

$$\psi_n(x) = \left(\frac{2}{L}\right)^{1/2} \sin \frac{n\pi}{L} x$$

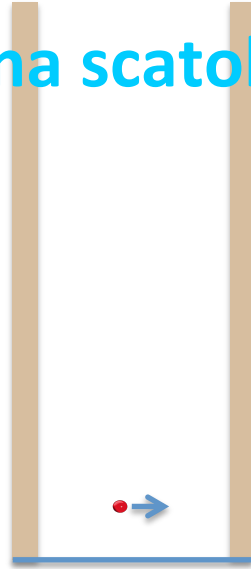
Urti perfettamente elastici
 A infinito

- moto periodico
- possibile solo per alcune E
- confinato per sempre nella scatola



Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

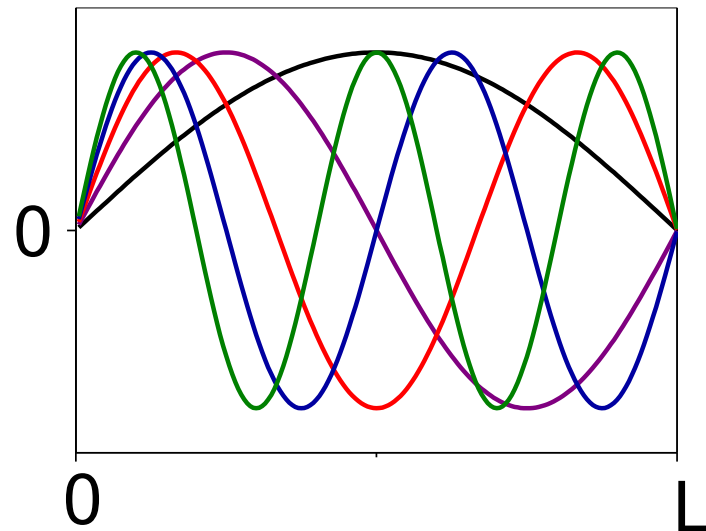


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

$$\psi_n(x) = \left(\frac{2}{L}\right)^{1/2} \sin \frac{n\pi}{L} x$$

Urti perfettamente elastici
 A infinito

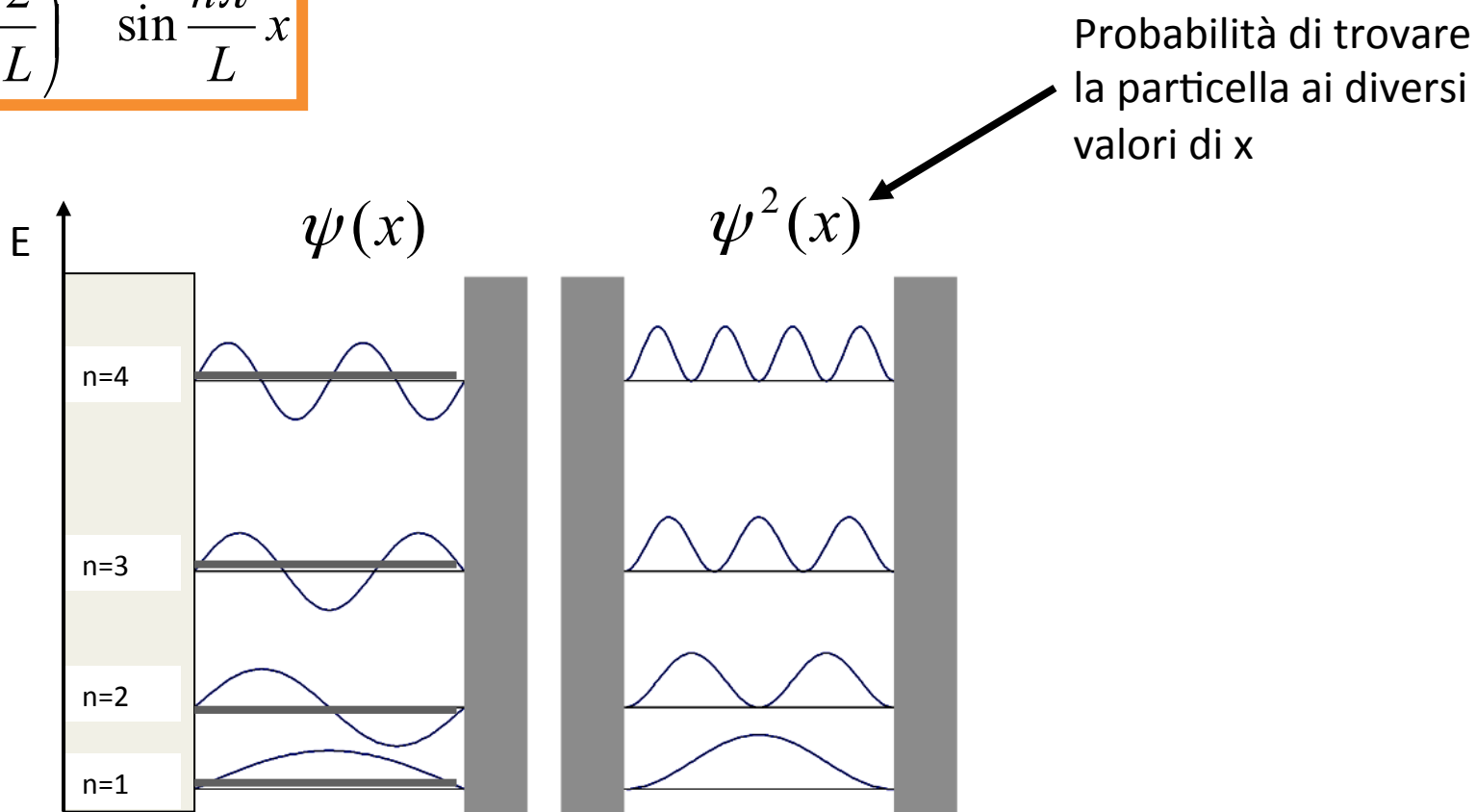
- moto periodico
- possibile solo per alcune E
- confinato per sempre nella scatola



Il pisello in una scatola, QM

Funzione d'onda e probabilità

$$\psi_n(x) = \left(\frac{2}{L}\right)^{1/2} \sin \frac{n\pi}{L} x$$



Il pisello in una scatola, QM

La probabilità

$$E = \frac{9h^2}{8mL^2}$$

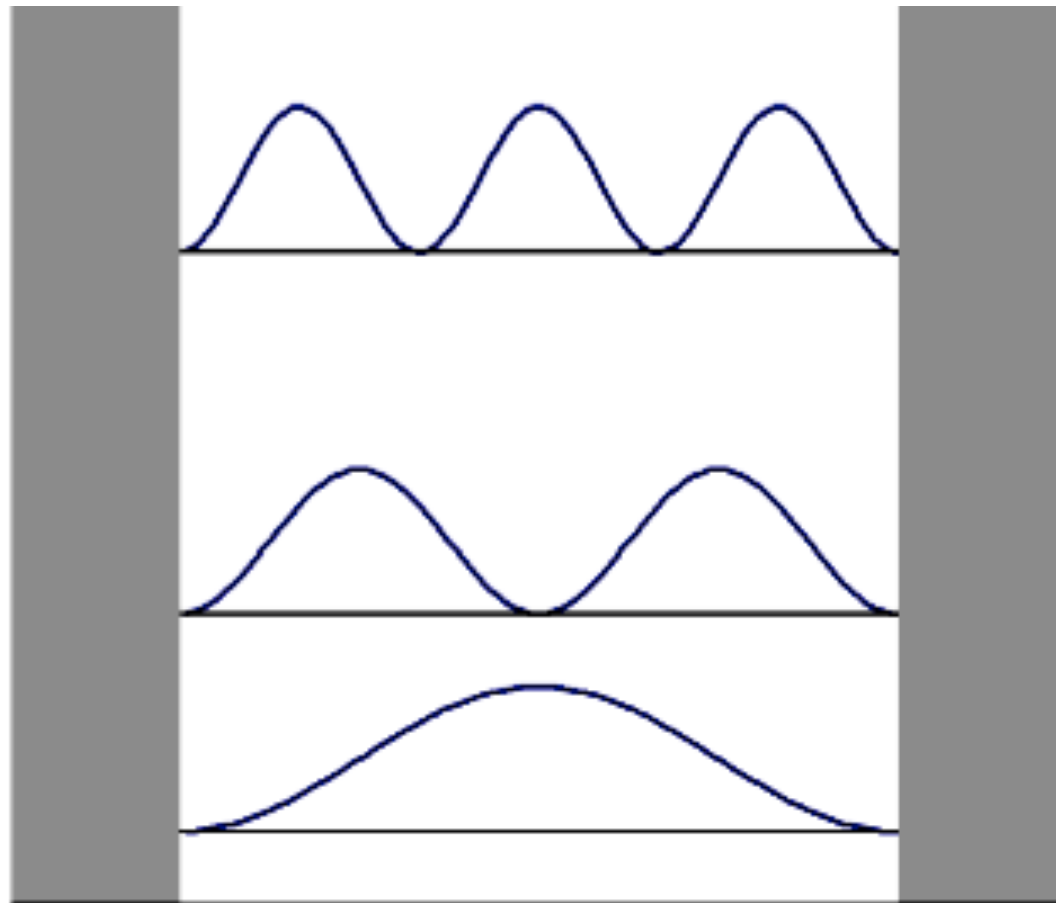
$n = 3$

$$E = \frac{4h^2}{8mL^2}$$

$n = 2$

$$E = \frac{h^2}{8mL^2}$$

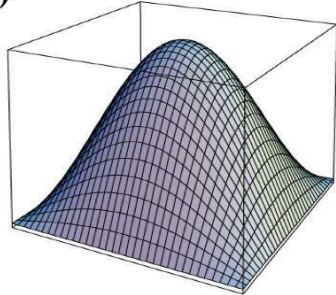
$n = 1$



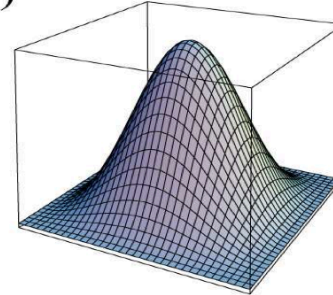
Il pisello in una scatola, QM

Funzione d'onda e probabilità per una scatola quadrata

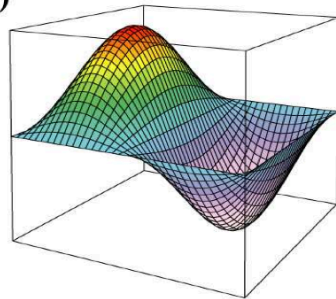
$$\Psi(1,1)$$



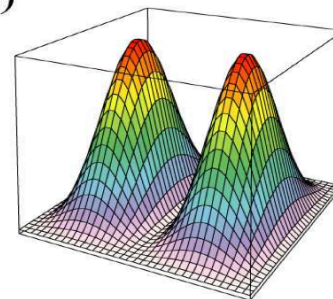
$$\Psi^2(1,1)$$



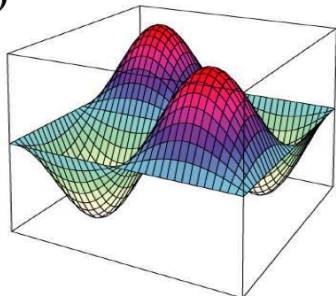
$$\Psi(1,2)$$



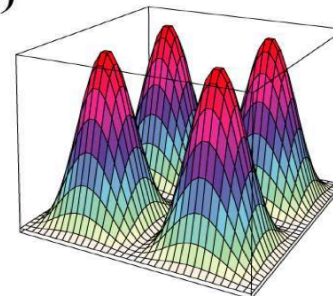
$$\Psi^2(1,2)$$



$$\Psi(2,2)$$



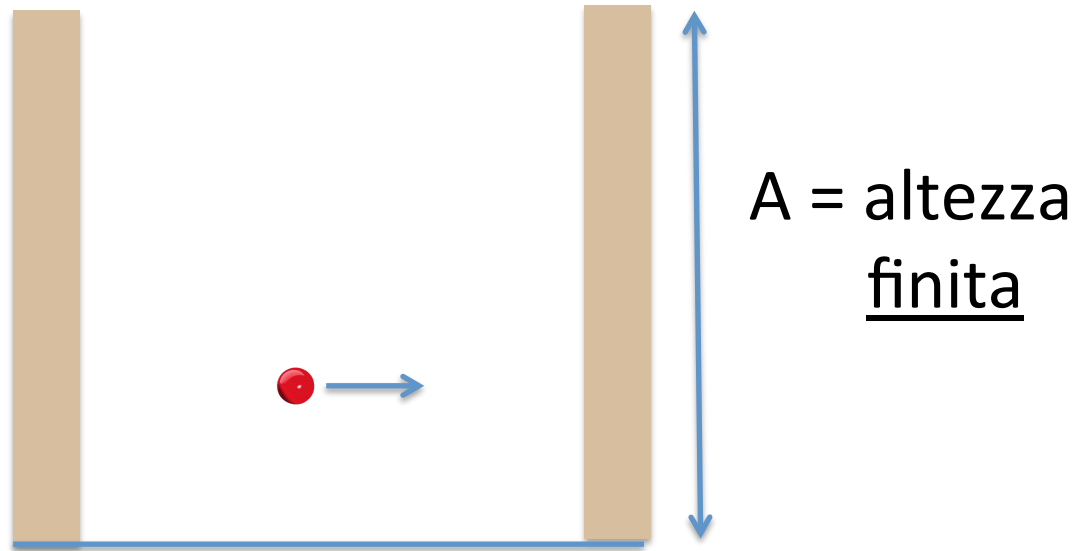
$$\Psi^2(2,2)$$



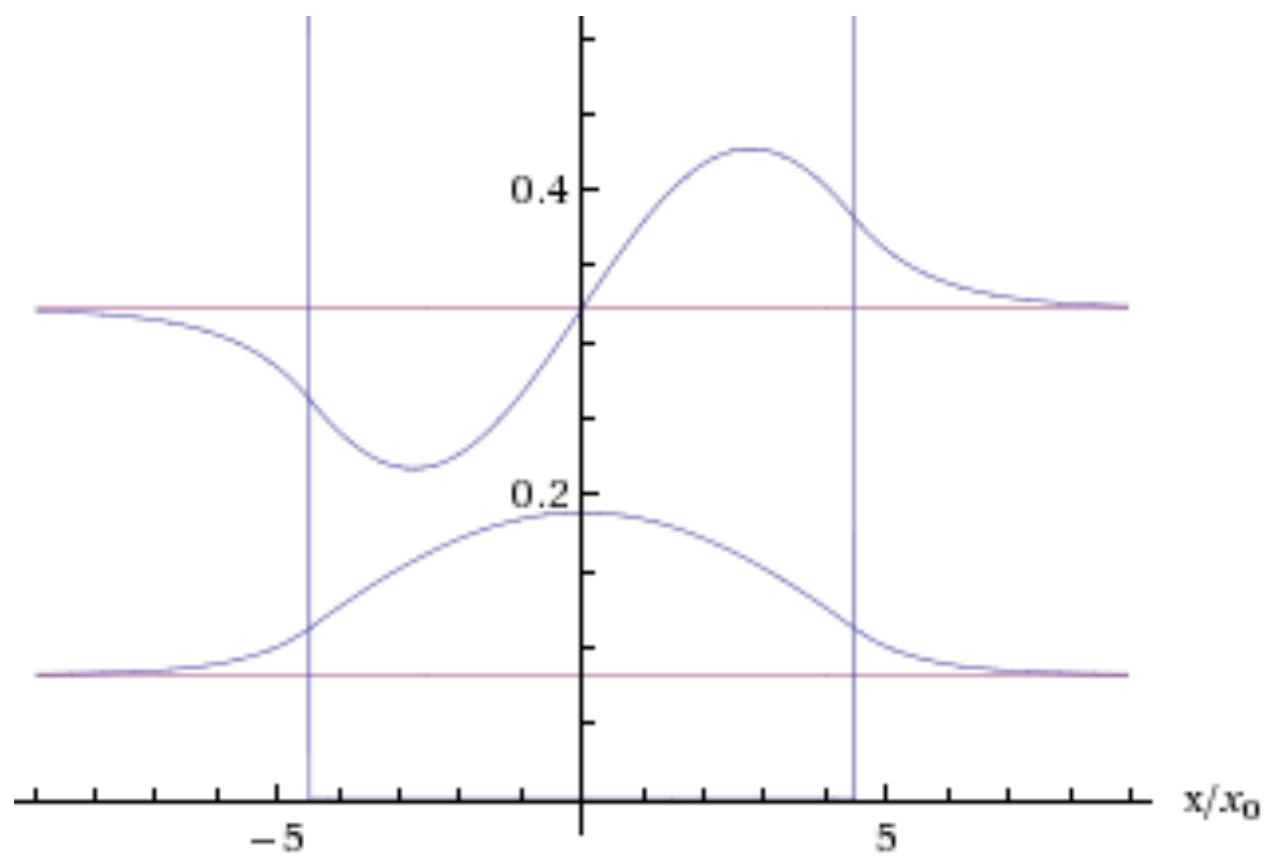
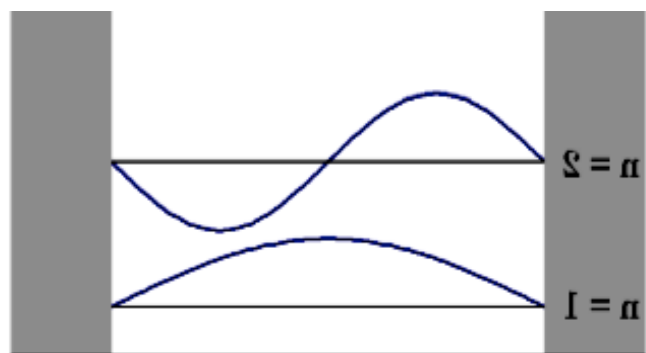
Il pisello in una scatola, QM

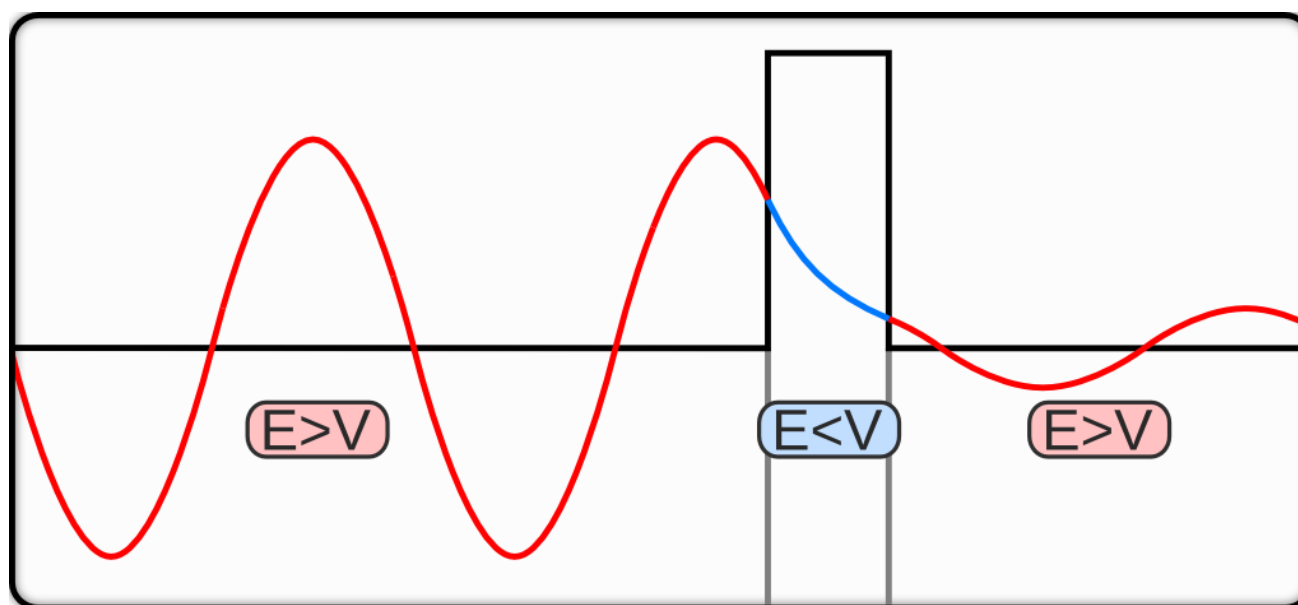
v = velocità
 m = massa

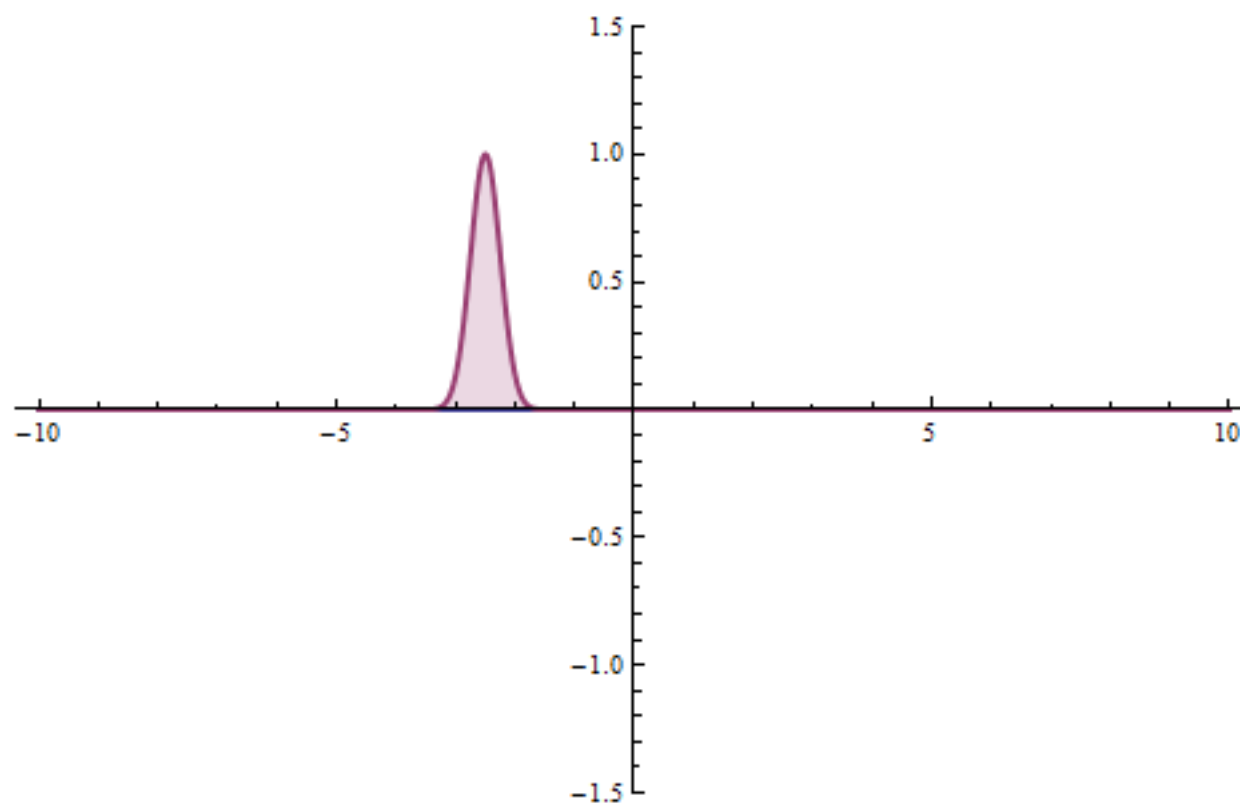
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

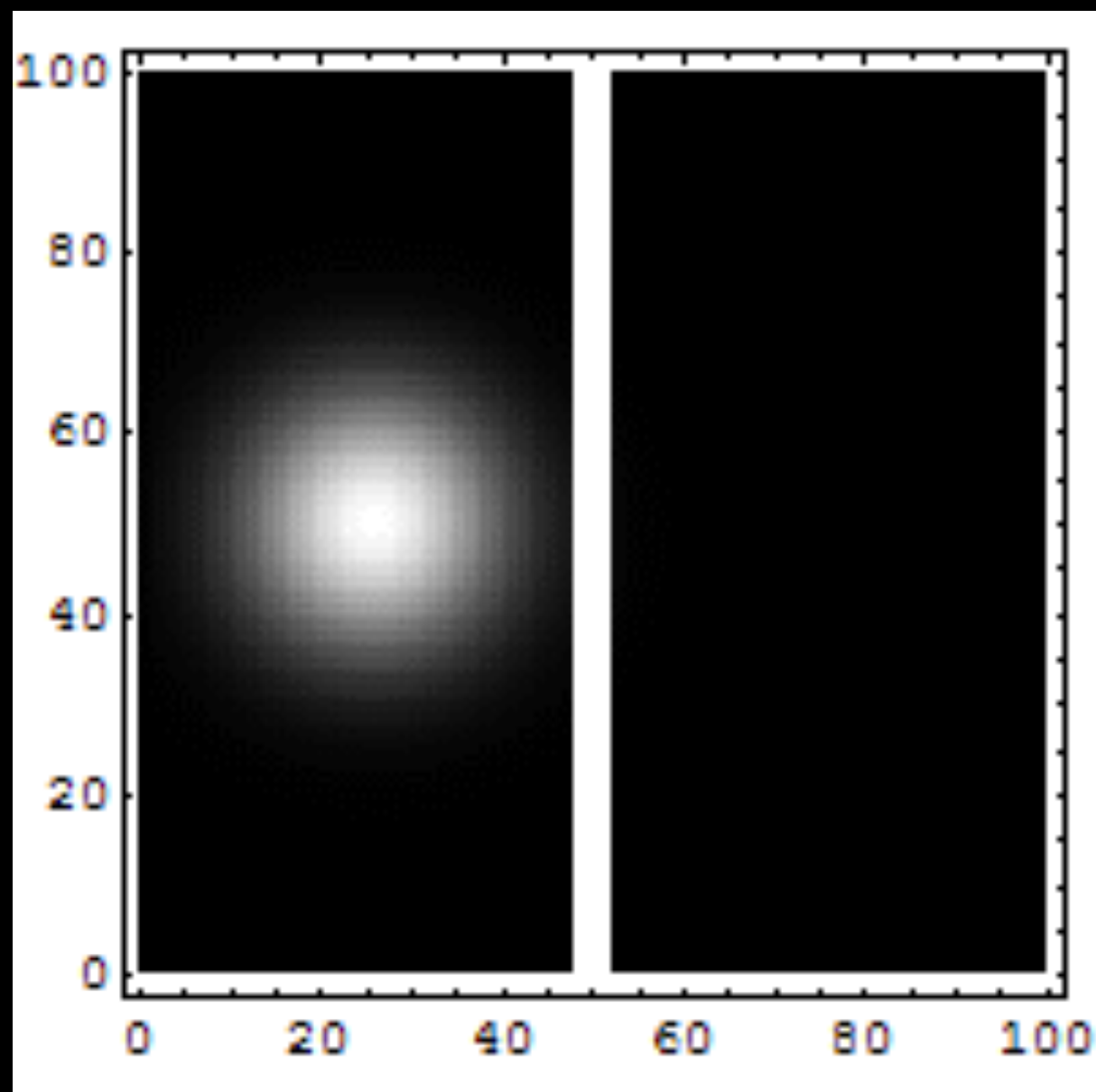


Urti perfettamente elastici





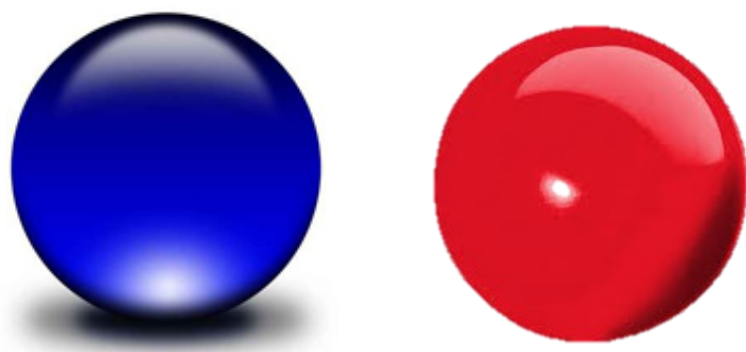




Peccato
non essere
un elettrone!

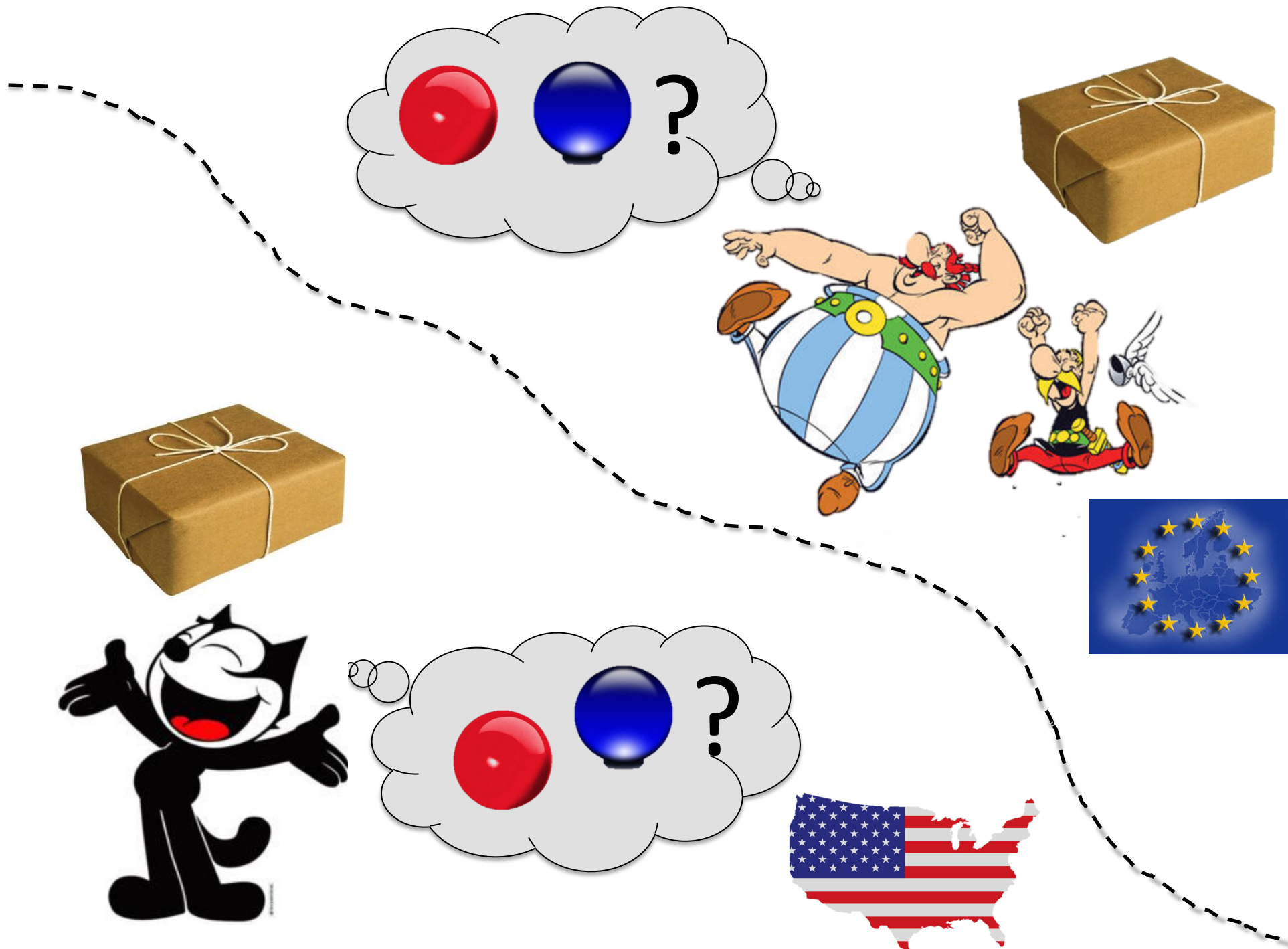


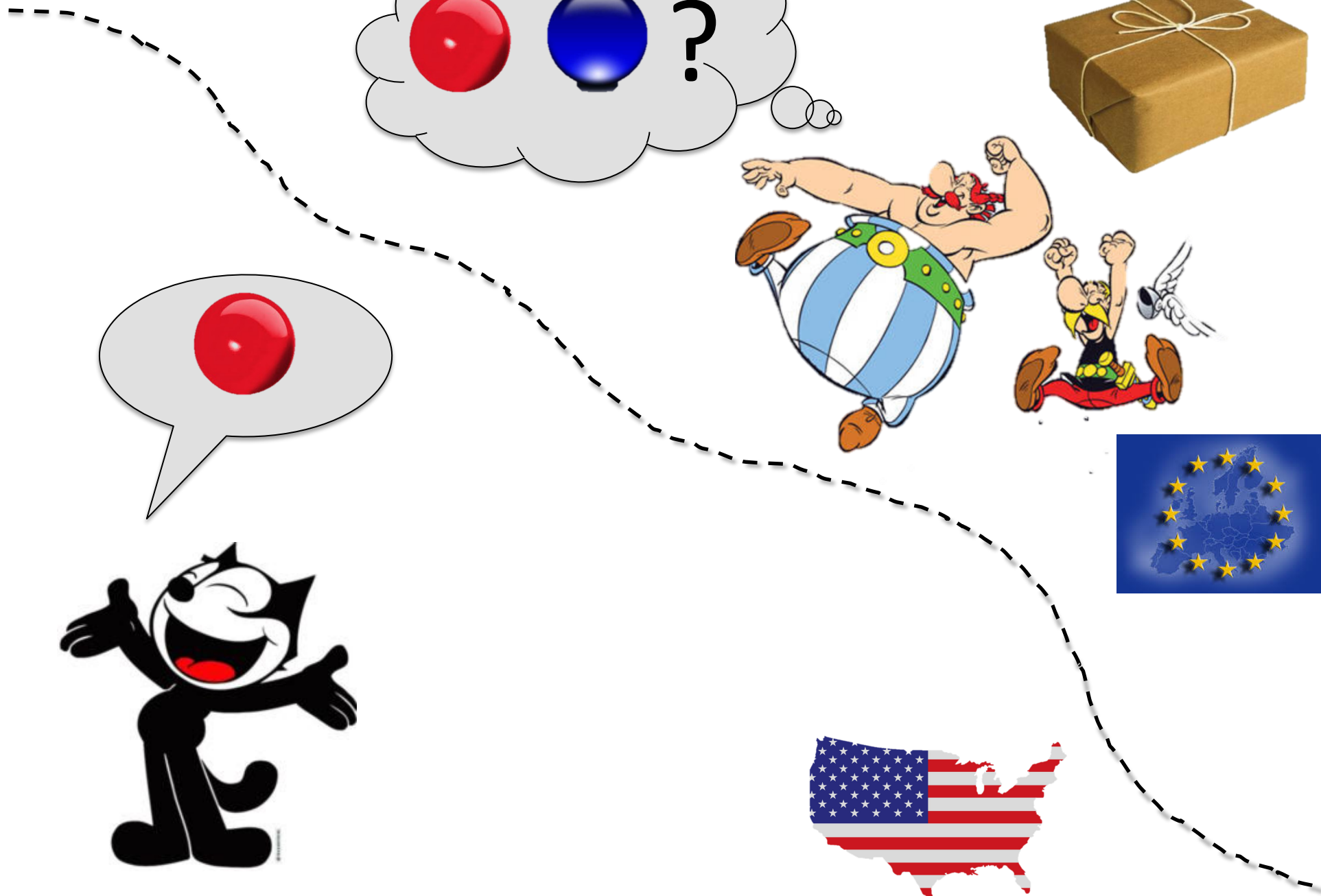
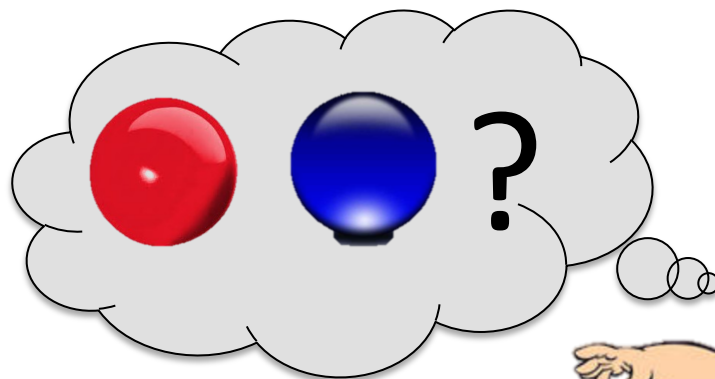
L'incredibile storia
degli amanti separati
ma inseparabili

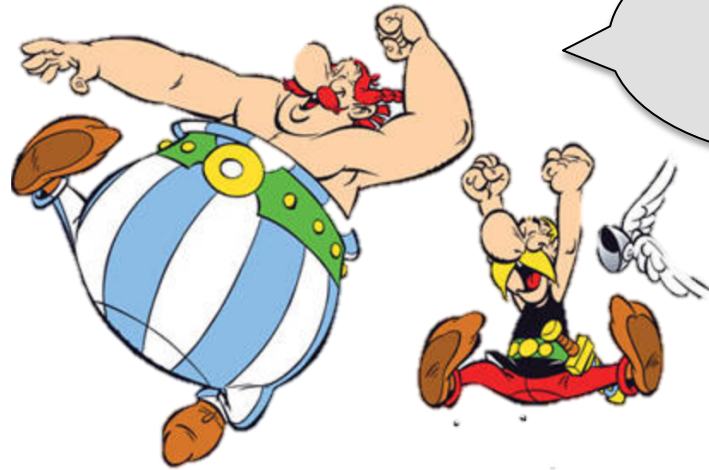
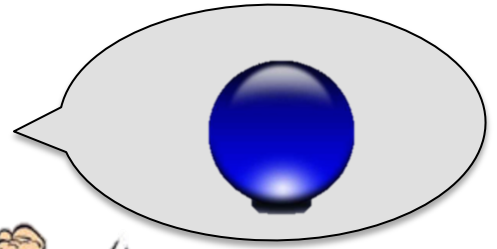


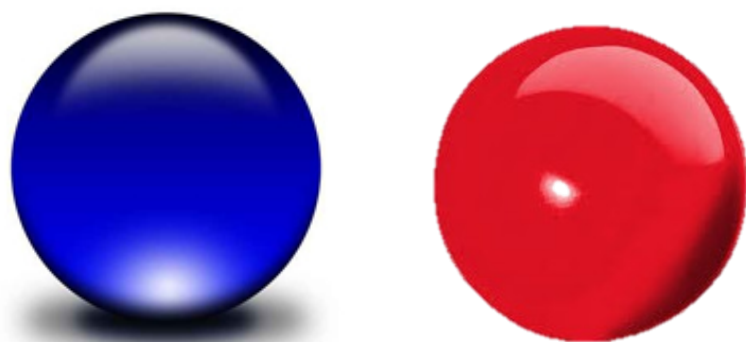
guardando











Senza guardare



1. PRINCIPIO DI REALTA'

Se, senza perturbare in alcun modo un sistema fisico, sono in grado di prevedere con certezza il valore di una sua grandezza fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica associato a tale grandezza.



Senza guardare, ok?



il sistema in esame possiede una proprietà oggettiva: la sferetta è blu o rossa – *indipendentemente* dal fatto che noi lo sappiamo

2. PRINCIPIO DI LOCALITA'

Se un sistema A è separato fisicamente da un sistema B, anche se in passato ha interagito con A, nessuna azione fisica su A può aver effetto sugli elementi di realtà di B.



Se eseguo delle misurazioni su A, queste non possono influire sulle “proprietà oggettive” di B.

Gli elementi di una teoria fisica

1) Principio di realtà

2) Principio di località

COMPLETEZZA

Esempio di teoria incompleta:

supponendo di conoscere solo la forza gravitazionale, qual è la dinamica di una particella con una carica elettrica?

Non so formalizzare la carica di una particella né il suo comportamento dinamico

COMPLETEZZA

Una teoria è completa quando contiene la *controparte formale* di tutti gli elementi di realtà di cui si occupa

Esempio di teoria incompleta

m = massa totale di una moneta

v_0 = la sua velocità iniziale

x_0 = la sua posizione iniziale

F = insieme delle forze che agiscono

Posso predire la sua traiettoria con $F = m * a$?



Più in generale: se io parlo di proprietà possedute da certi oggetti e la teoria non mi consente di rappresentarle, evidentemente non è una teoria (ancora) completa.

Sistemi fisici quantistici: particelle che decadono

L'esperimento di Einstein – Podolsky- Rosen



$$\text{Spin} = \downarrow + \uparrow = 0$$

$$\psi = 1\uparrow 2\downarrow + 1\downarrow 2\uparrow$$

Sistemi fisici quantistici: particelle che decadono

Misurando 1, supponiamo di trovare $\uparrow$

Quindi 2 è $\downarrow$

$$\psi = \uparrow \downarrow + \downarrow \uparrow$$

Paradosso EPR

Paradosso EPR

Einstein dice:

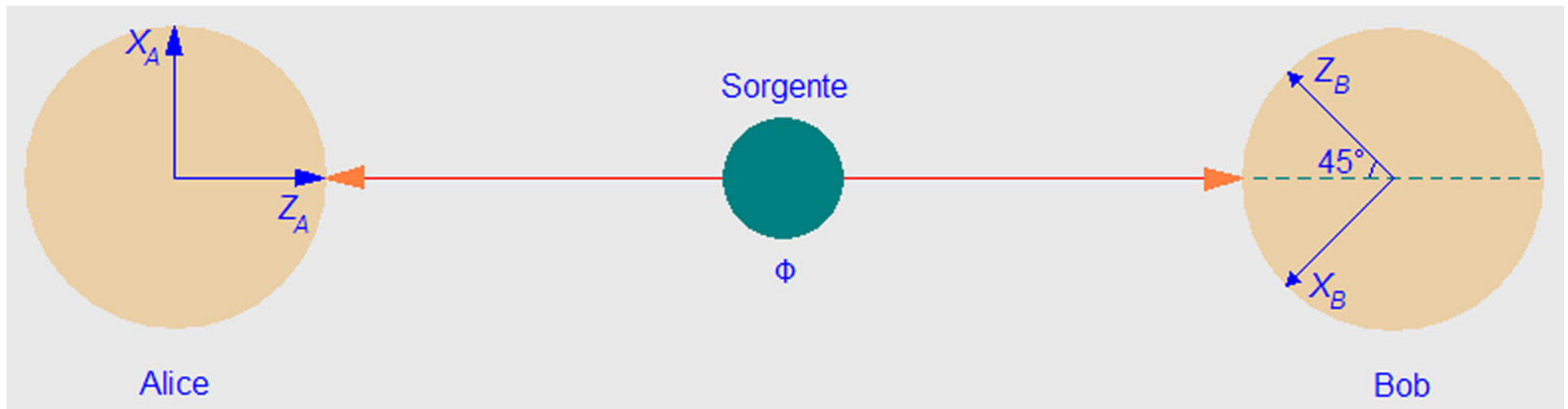
località e realismo sono necessarie.

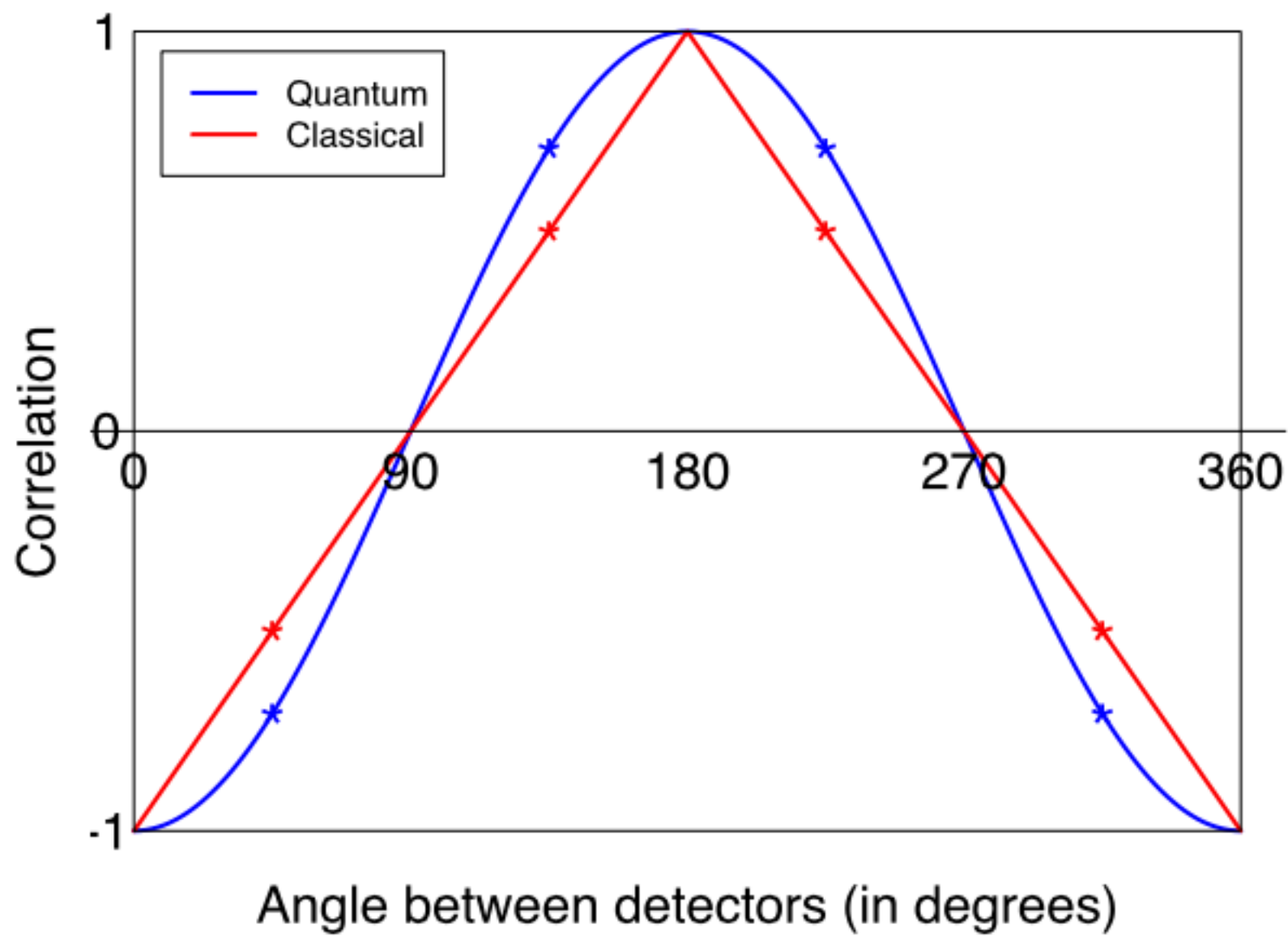
- Un esperimento come quello ideato mostra semplicemente che la MQ è una teoria non completa
- Esistono cioè delle variabili, di cui la MQ non tiene conto, che – se incluse – permetterebbero di predire il risultato delle misure.

Teorie “a variabili nascoste” (HV), come ad es. quella di de Broglie e Bohm (1956) (onda pilota.. Meccanica Bohmiana)



John Stewart Bell





Il risultato di Bell implica che

nessuna teoria fisica locale e realistica a variabili nascoste
può riprodurre le predizioni della MQ

Nei limiti della correttezza della MQ

1) NON LOCALITA' 2) ENTANGLEMENT

sono effetti reali





Un'idea di Felix

