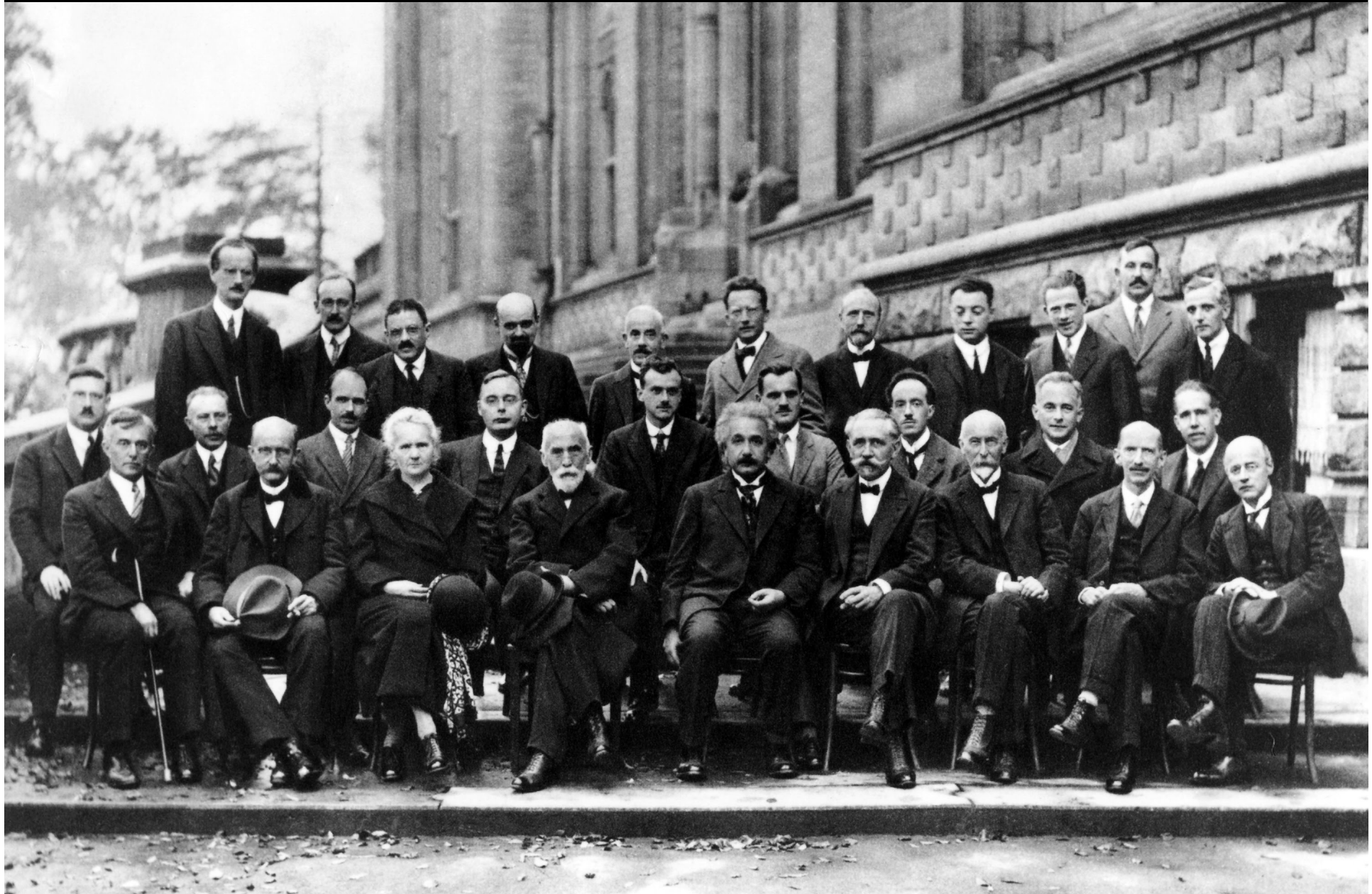


Prima dei titoli di testa

Conferenza Solvay 1927





L'universo in fiore 2016-2017

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



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

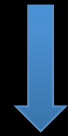


Spazio (m)

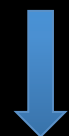
0

10

25



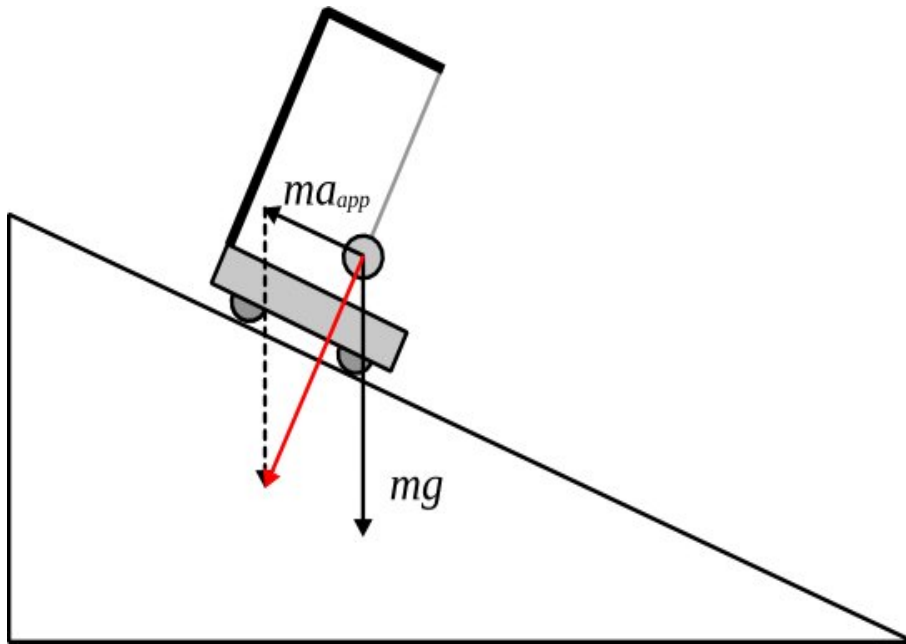
velocità (m/s)



accelerazione (m/s²)

Meccanica (classica)

$$F = m a$$



Identificazione delle forze

Equazione del moto

Previsione dei risultati

L'importanza della misura



Posizione x

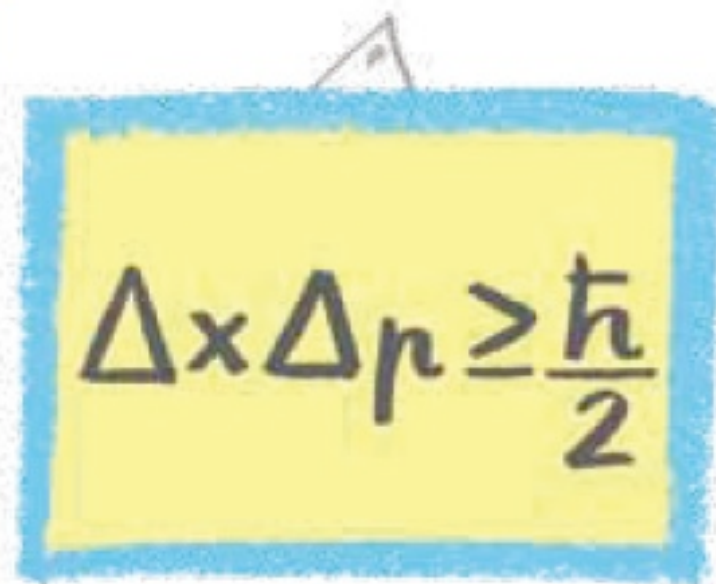
Quantità di moto $p = m * v$



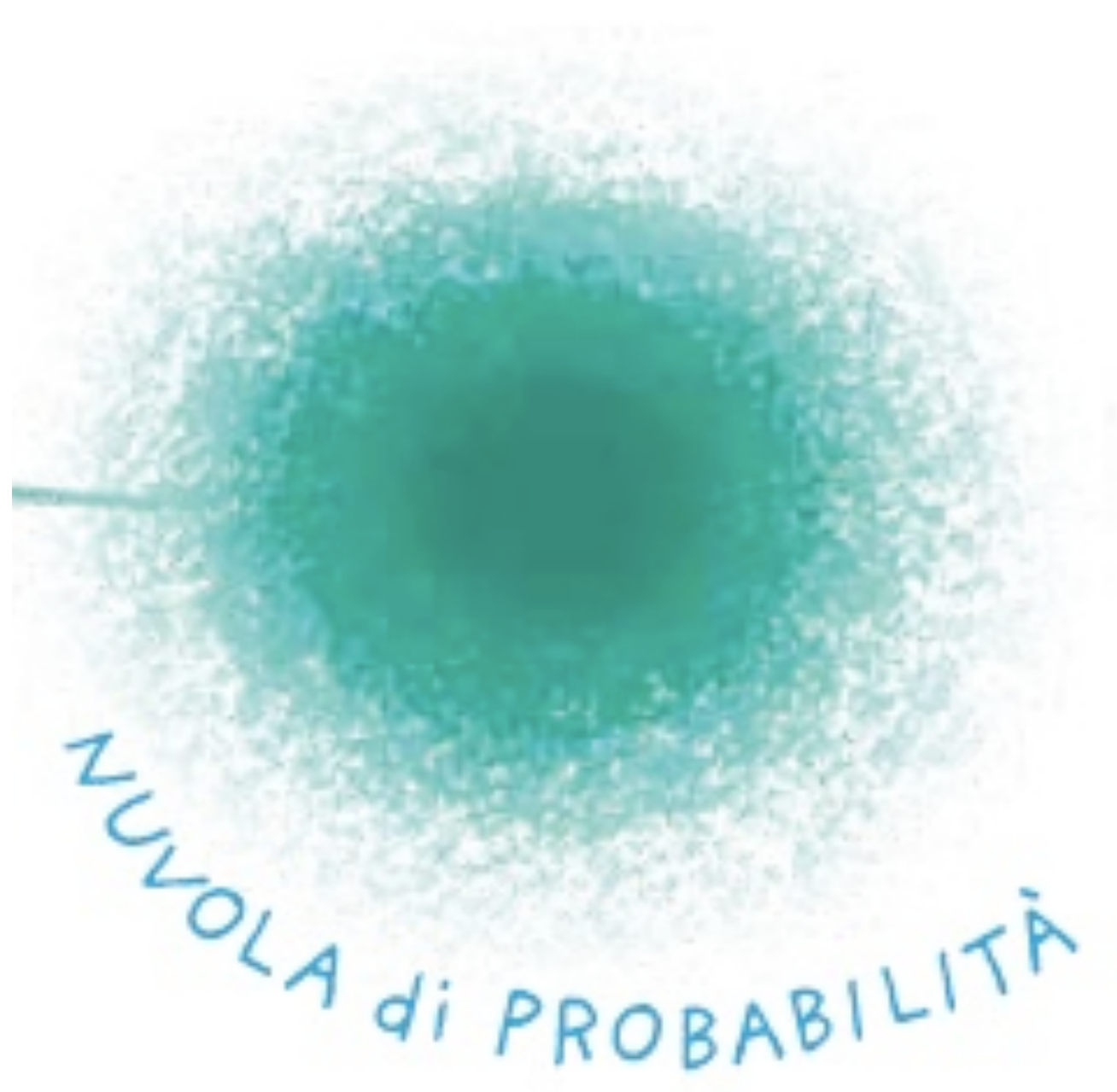


Werner Karl Heisenberg
1901-1976

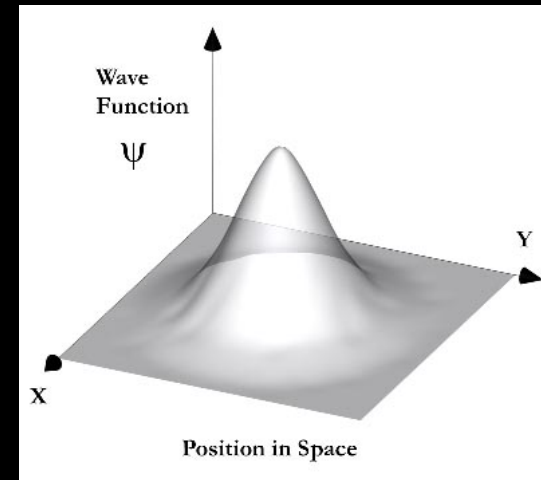
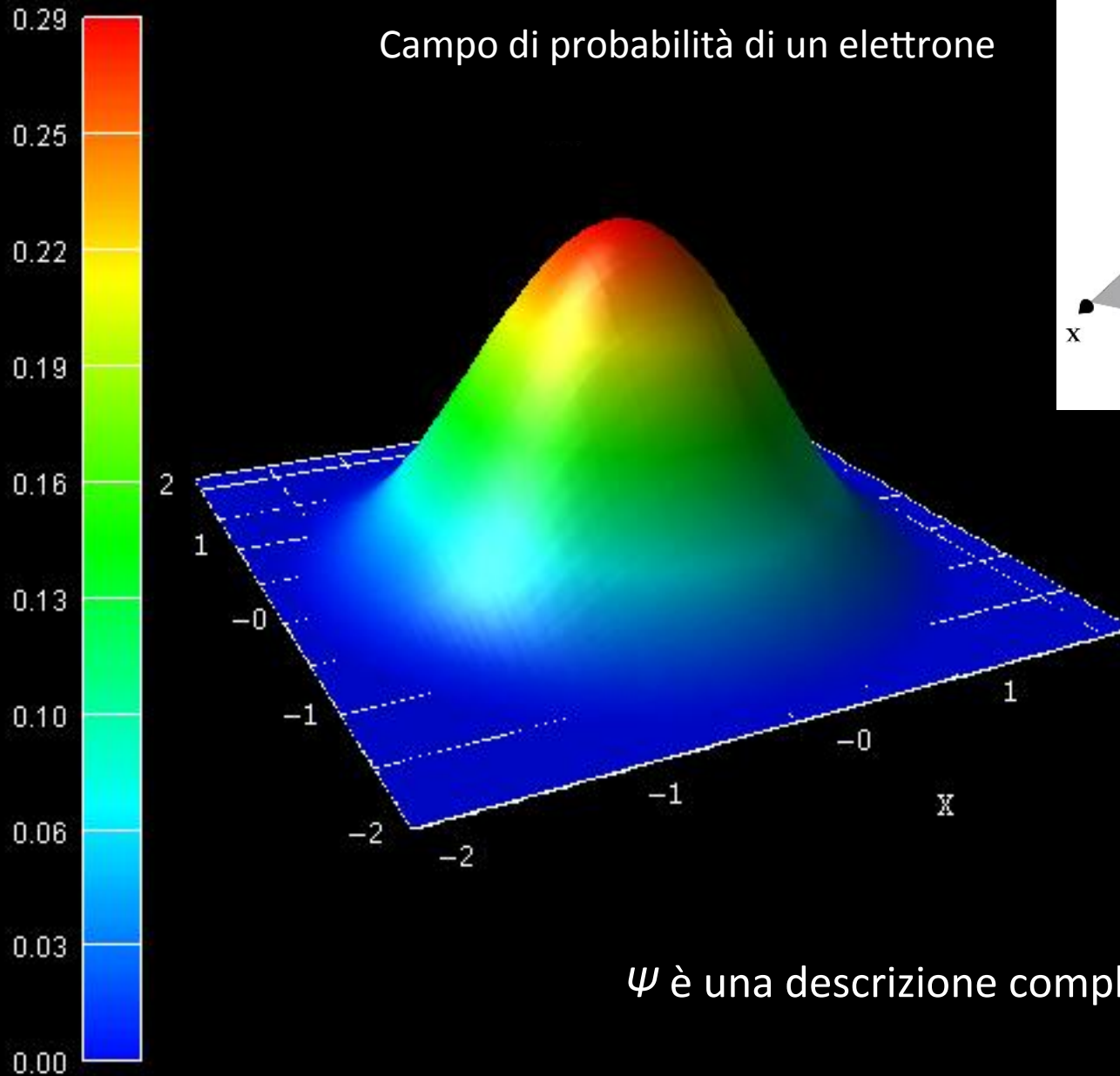
1927

A yellow rectangular card with a blue border, featuring the Heisenberg uncertainty principle equation. The equation is written in a black, handwritten-style font. The card is pinned to the background with a small white triangular fastener at the top center.
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

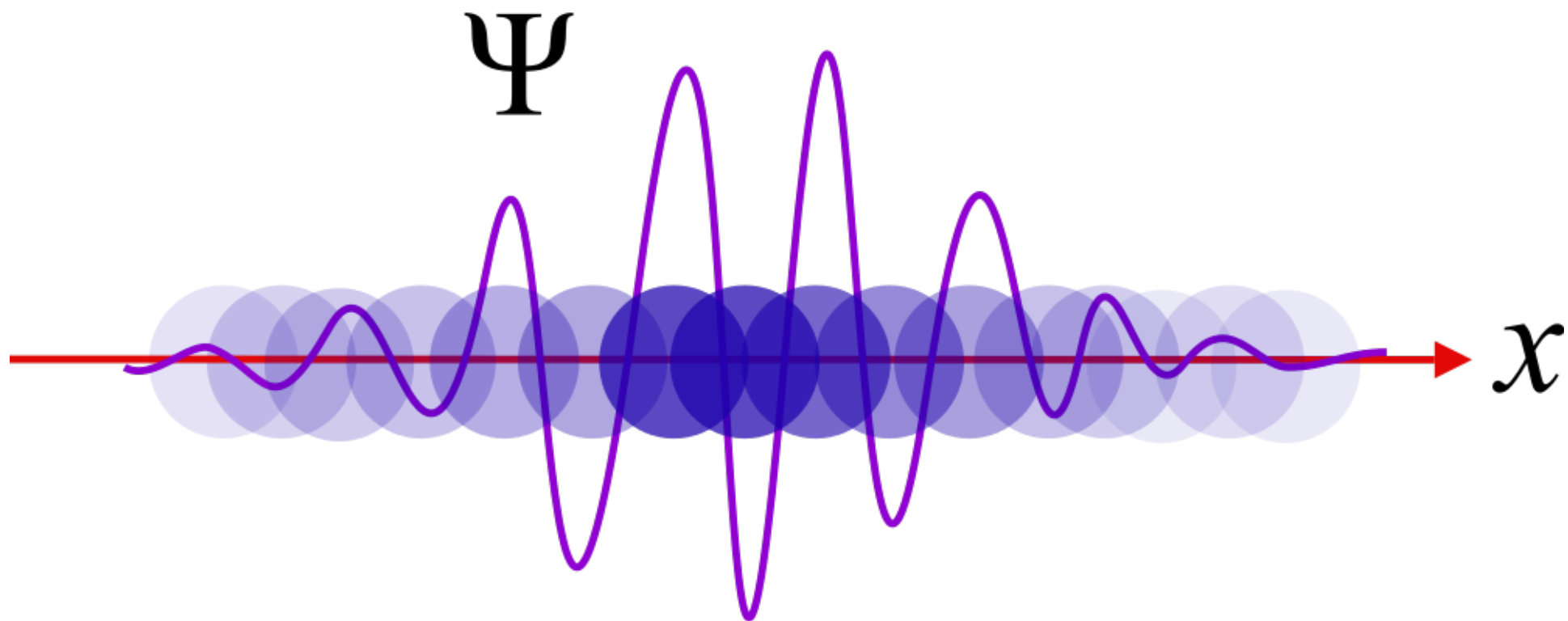
Il principio
di indeterminazione



Campo di probabilità di un elettrone



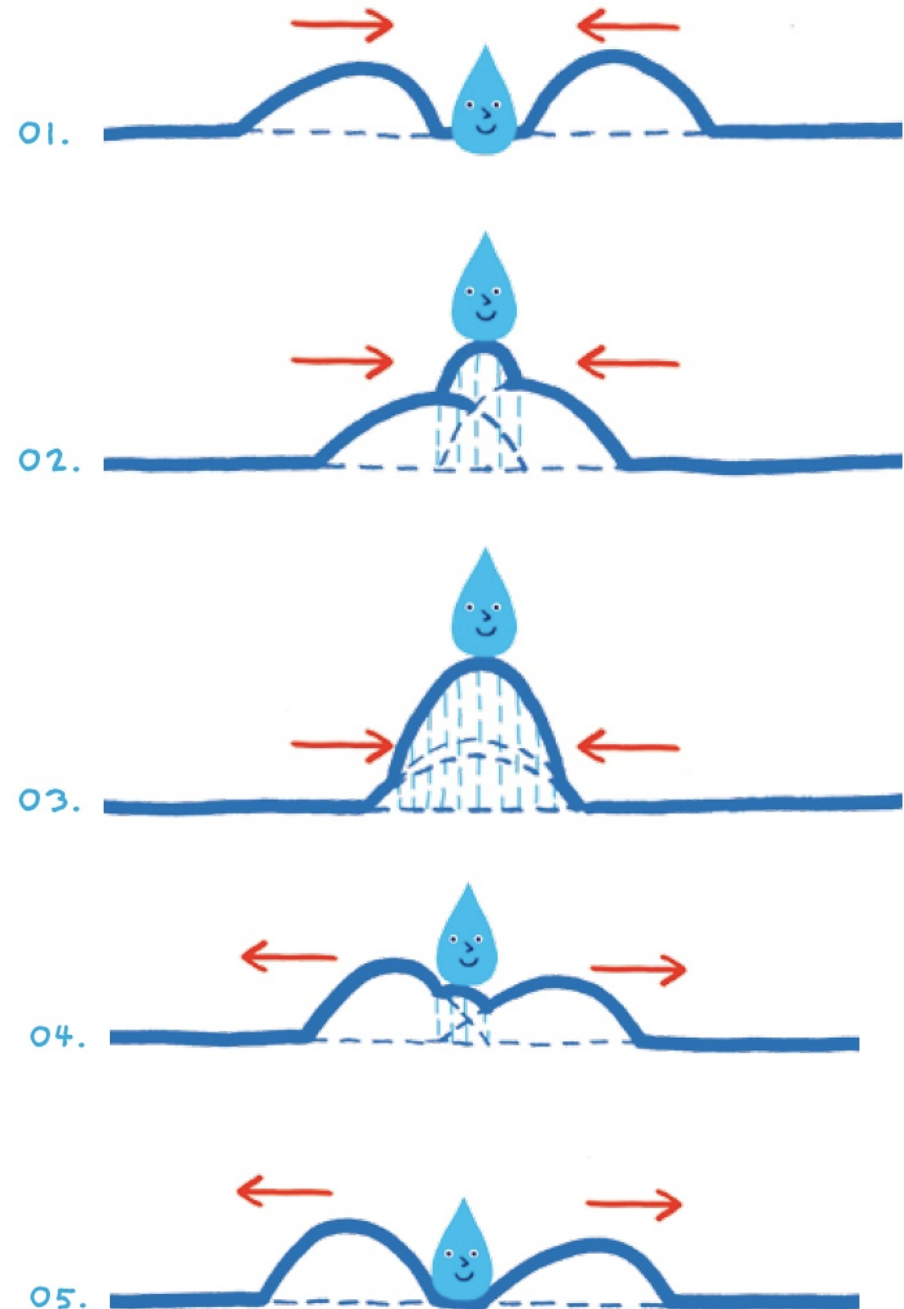
ψ è una descrizione completa del sistema fisico



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

Il principio di sovrapposizione

Le onde si sommano punto per punto





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

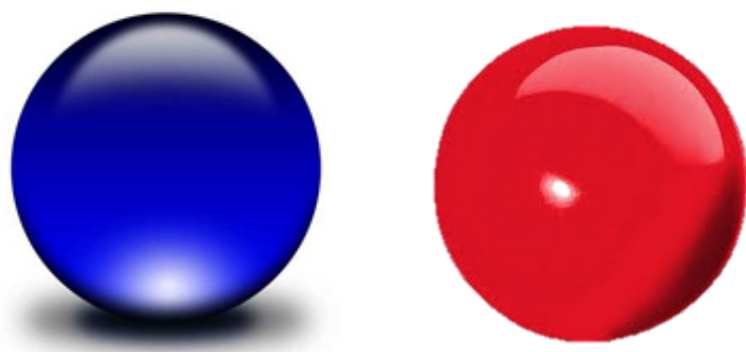
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$



*L'incredibile
storia degli
amanti separati
inseparabili*

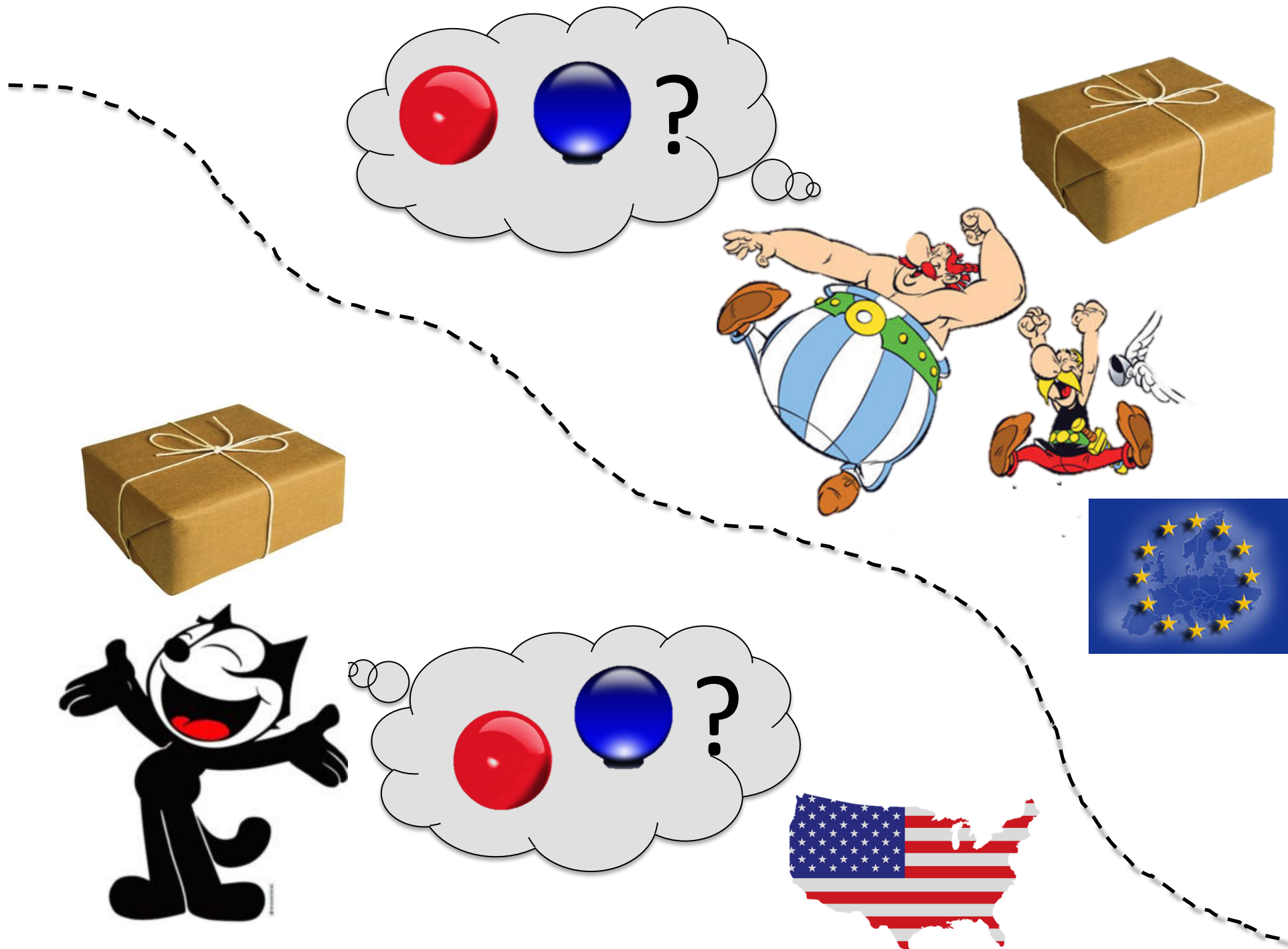
BONUS:

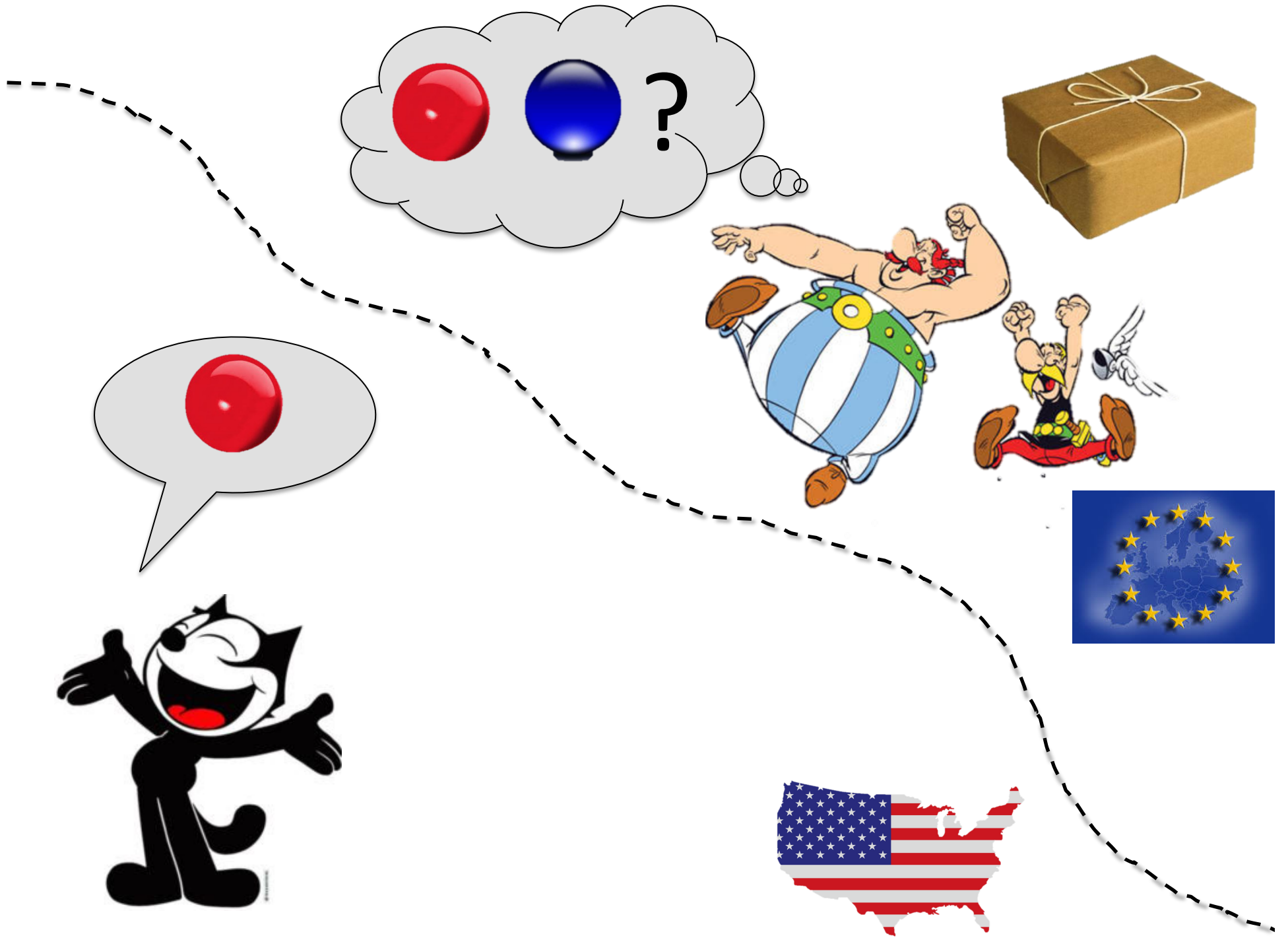
L'allegria storia del pisello in scatola

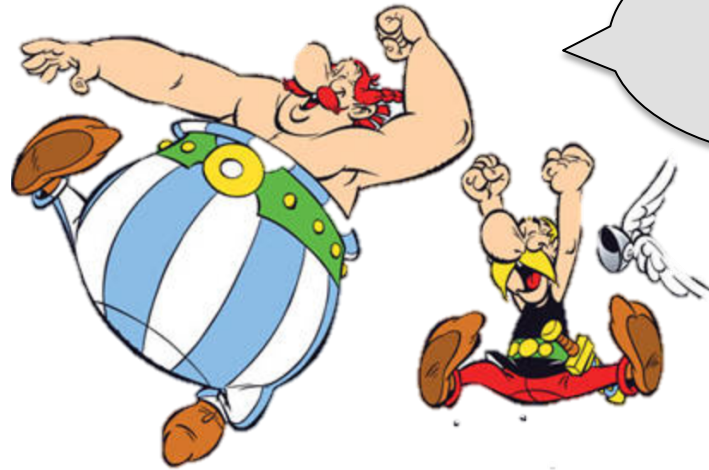
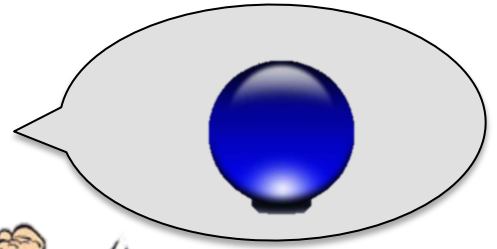


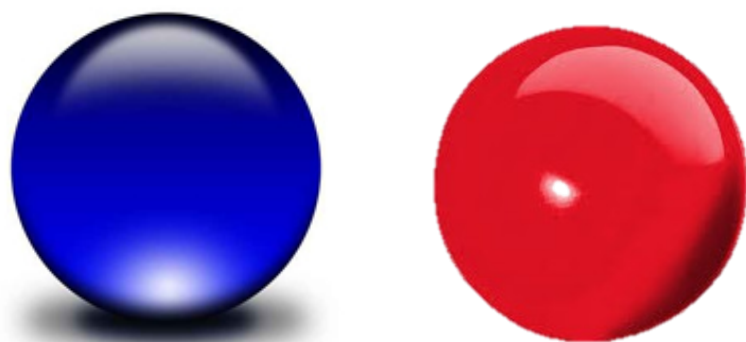
guardando











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:

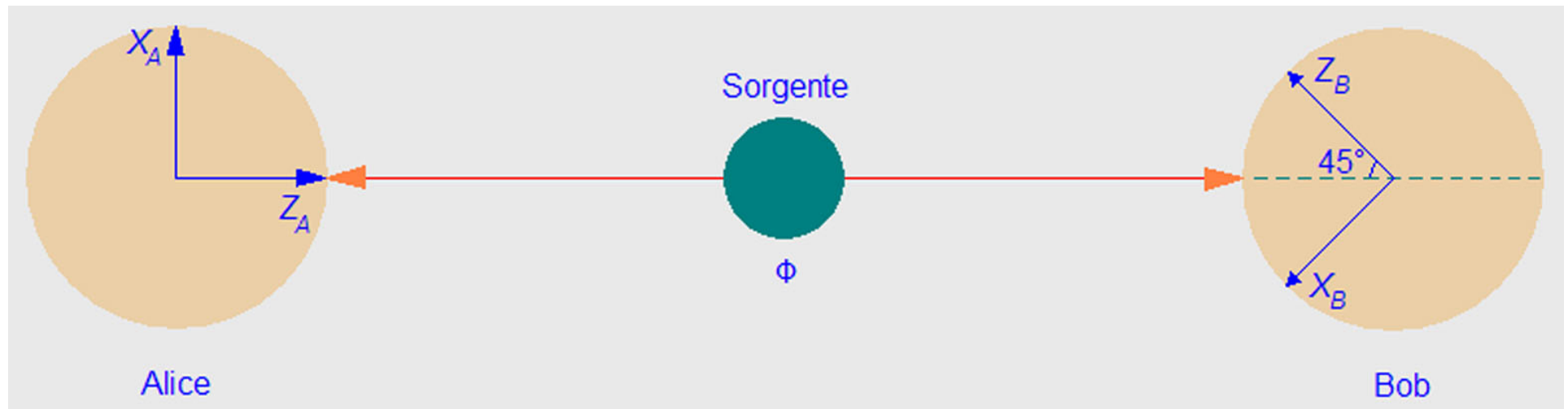
località e realismo sono necessarie.

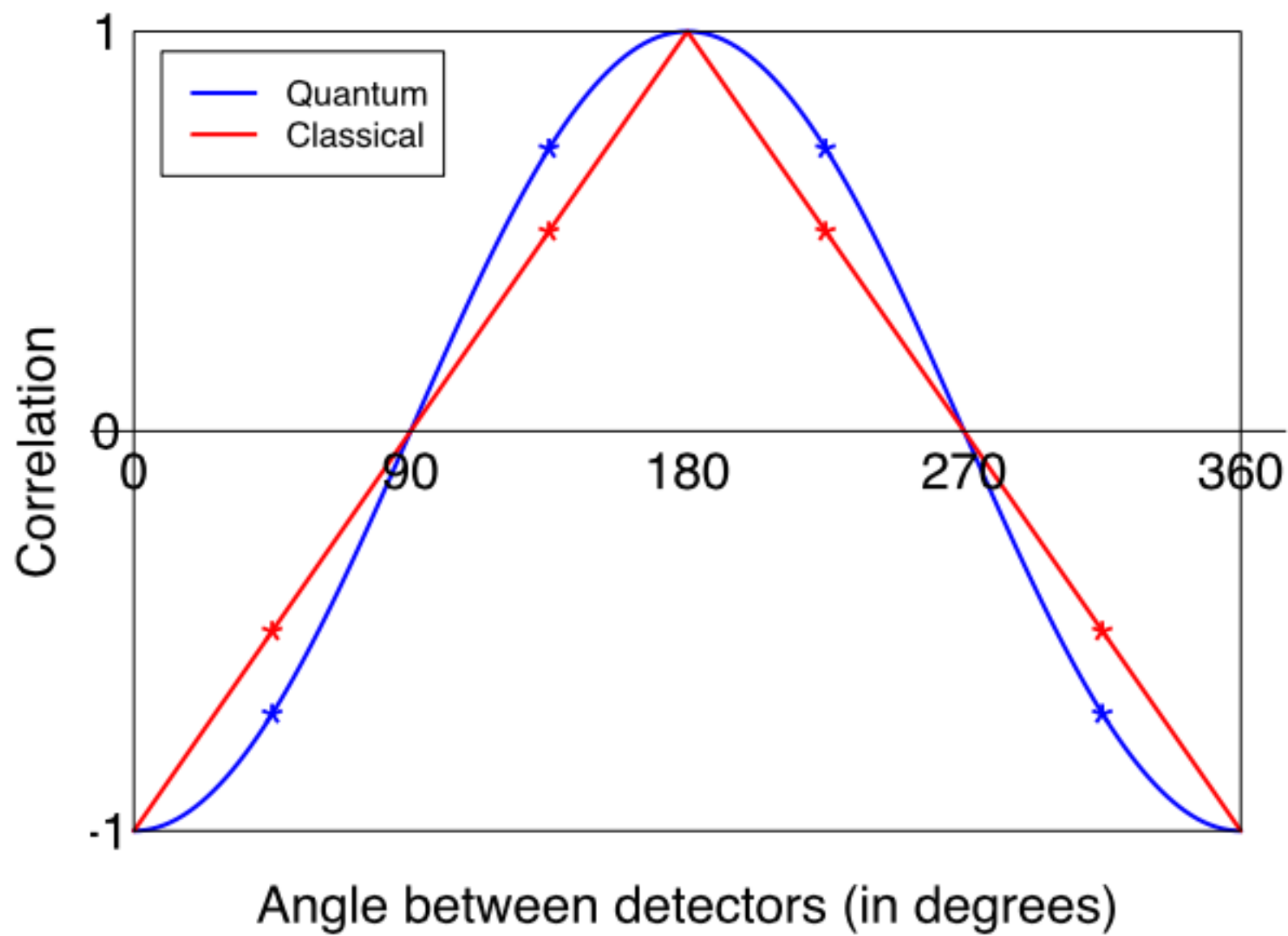
- Un esperimento come quello ideato mostra semplicemente che la MQ è una teoria non completa
- Esistono cioè delle variabili, di cui la MQ non tiene conto, che – se incluse – permetterebbero di predire il risultato delle misure.

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



John Stewart Bell





*L'allegria storia
del pisello in scatola*

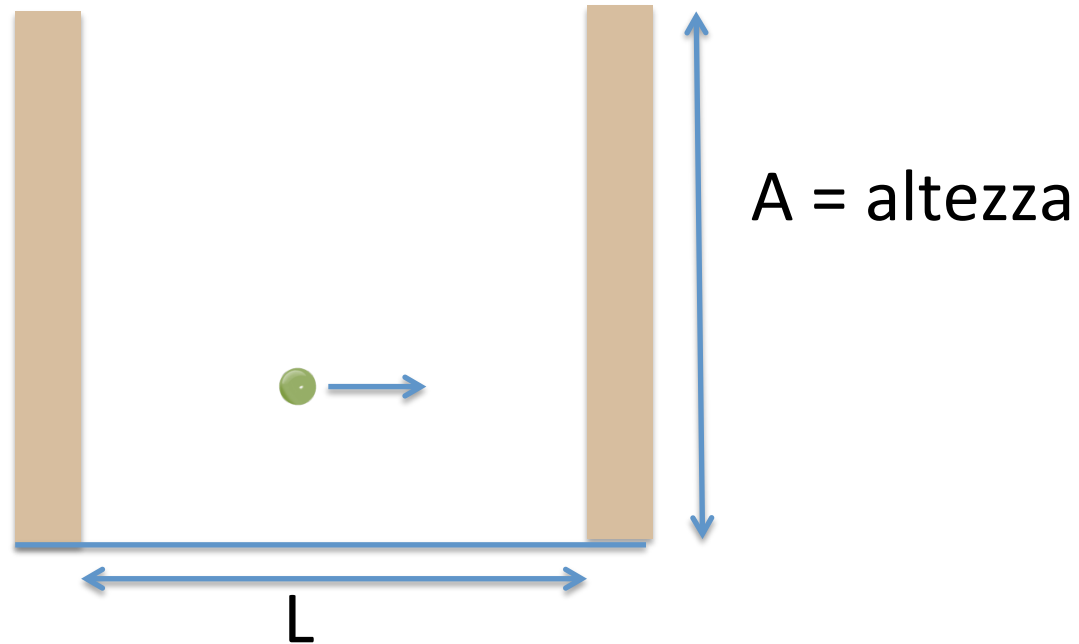


Il pisello in una scatola

v = velocità

m = massa

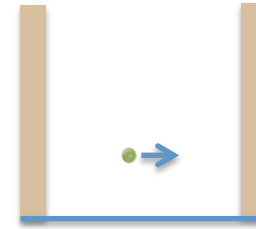
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$



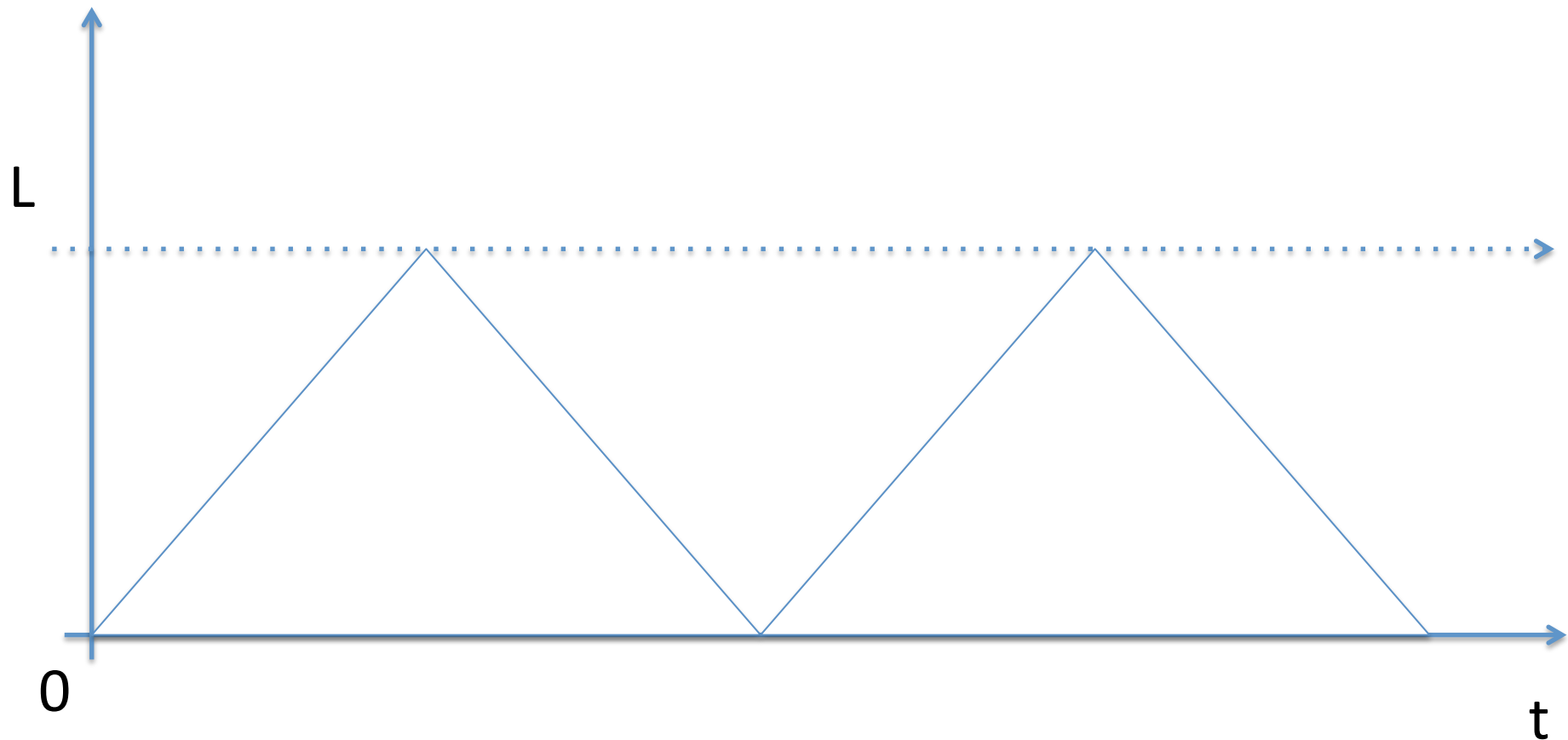
Urti sono perfettamente elastici

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

Il pisello in una scatola



Posizione della particella

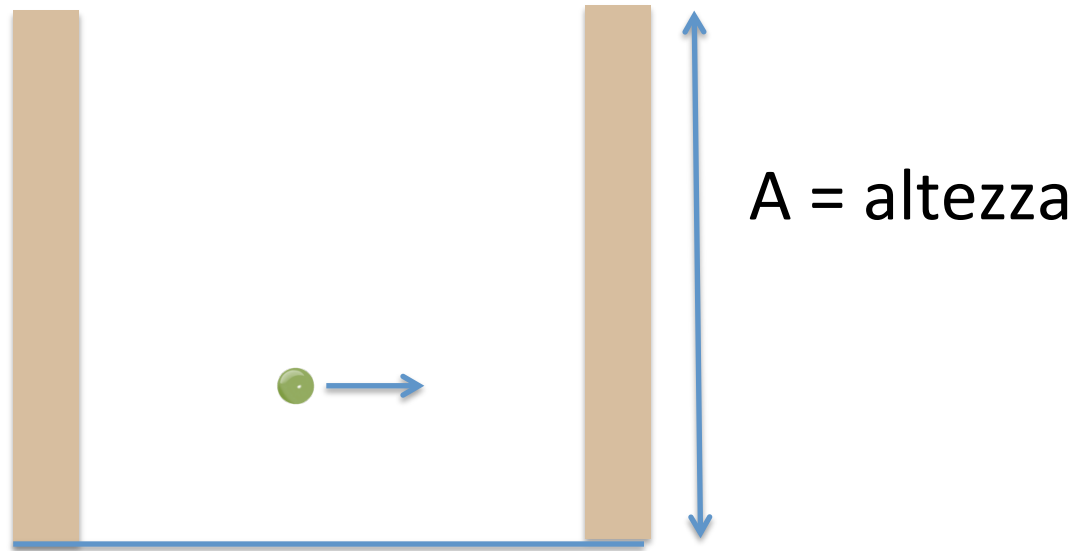


Il pisello in una scatola, QM

v = velocità

m = massa

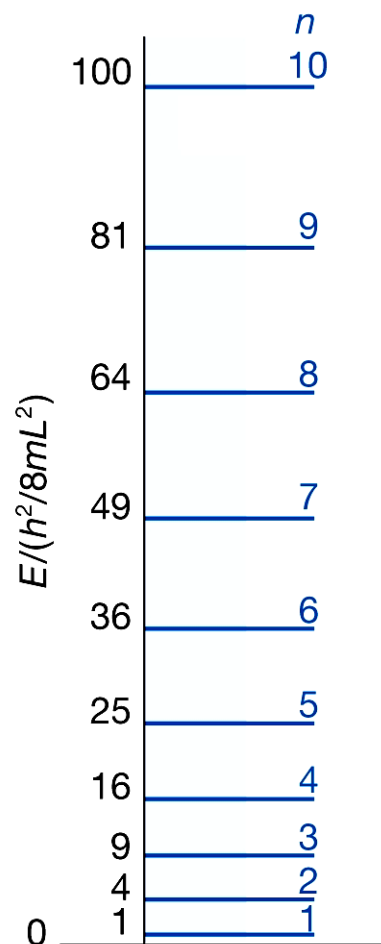
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$



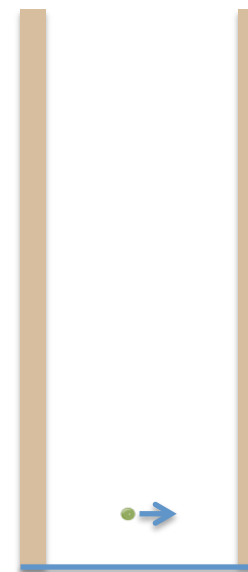
Urti perfettamente elastici

Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

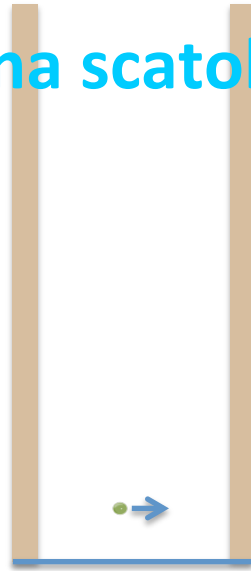


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$



Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

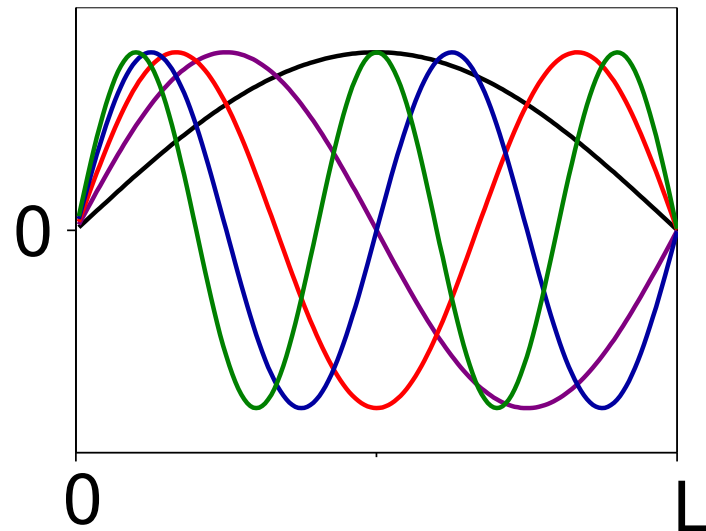


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

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

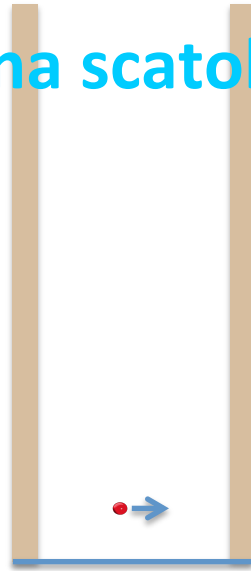
Urti perfettamente elastici
 A infinito

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



Il pisello in una scatola, QM

Se $A \rightarrow$ infinito

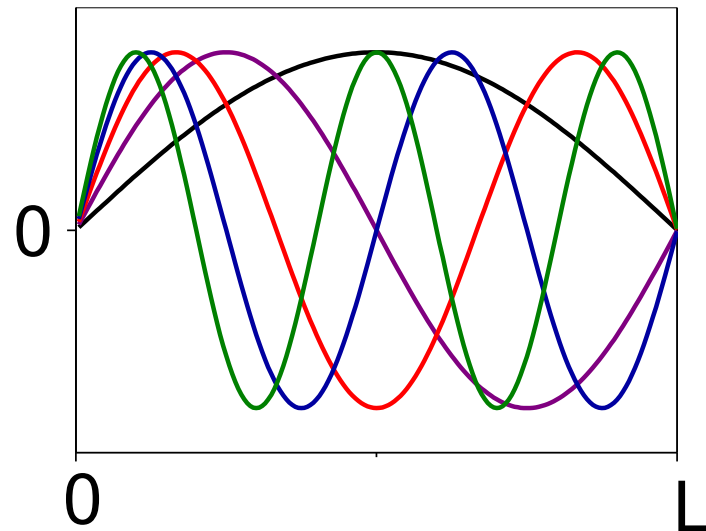


$$E = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

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

Urti perfettamente elastici
 A infinito

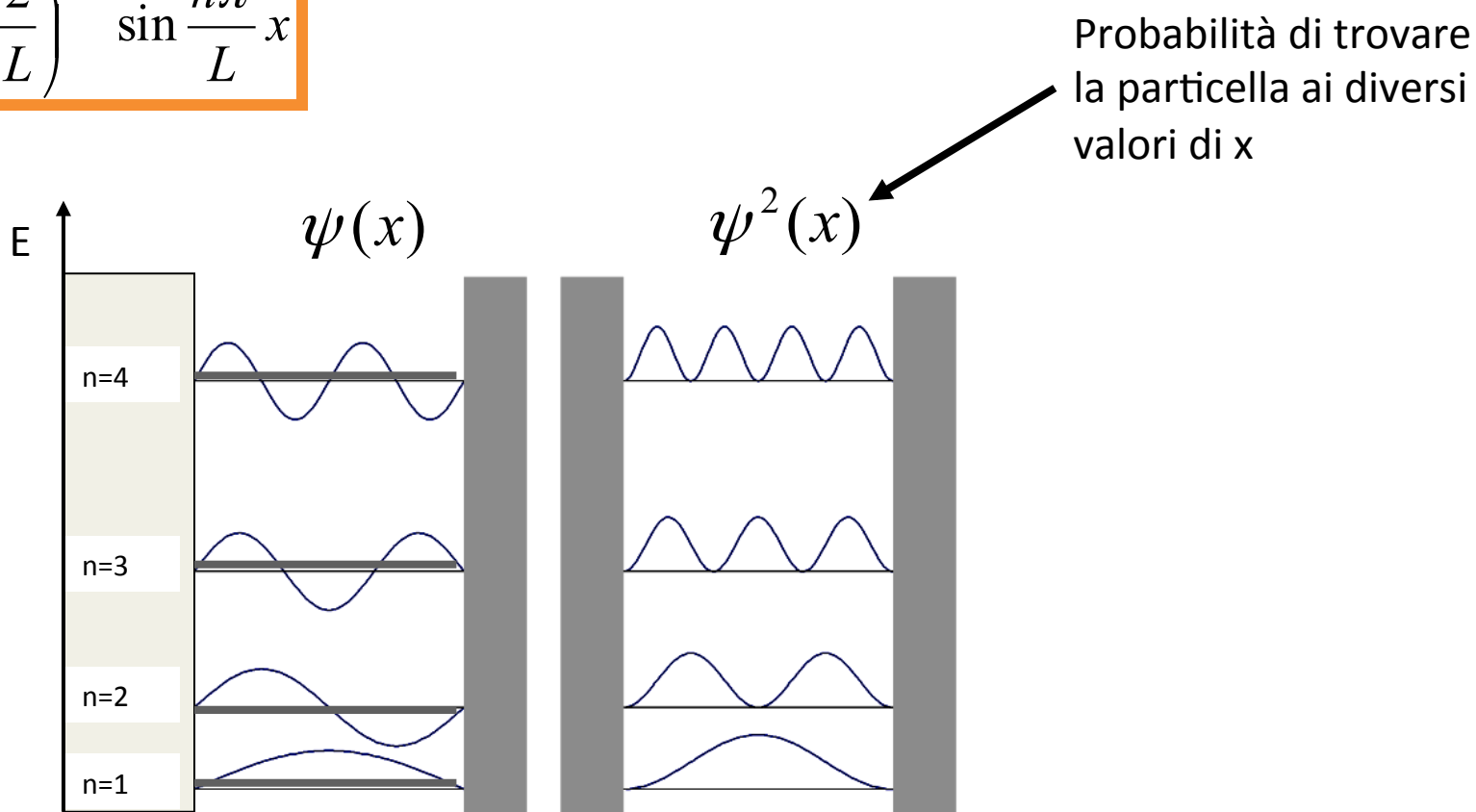
- moto periodico
- possibile solo per alcune E
- confinato per sempre nella scatola



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

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

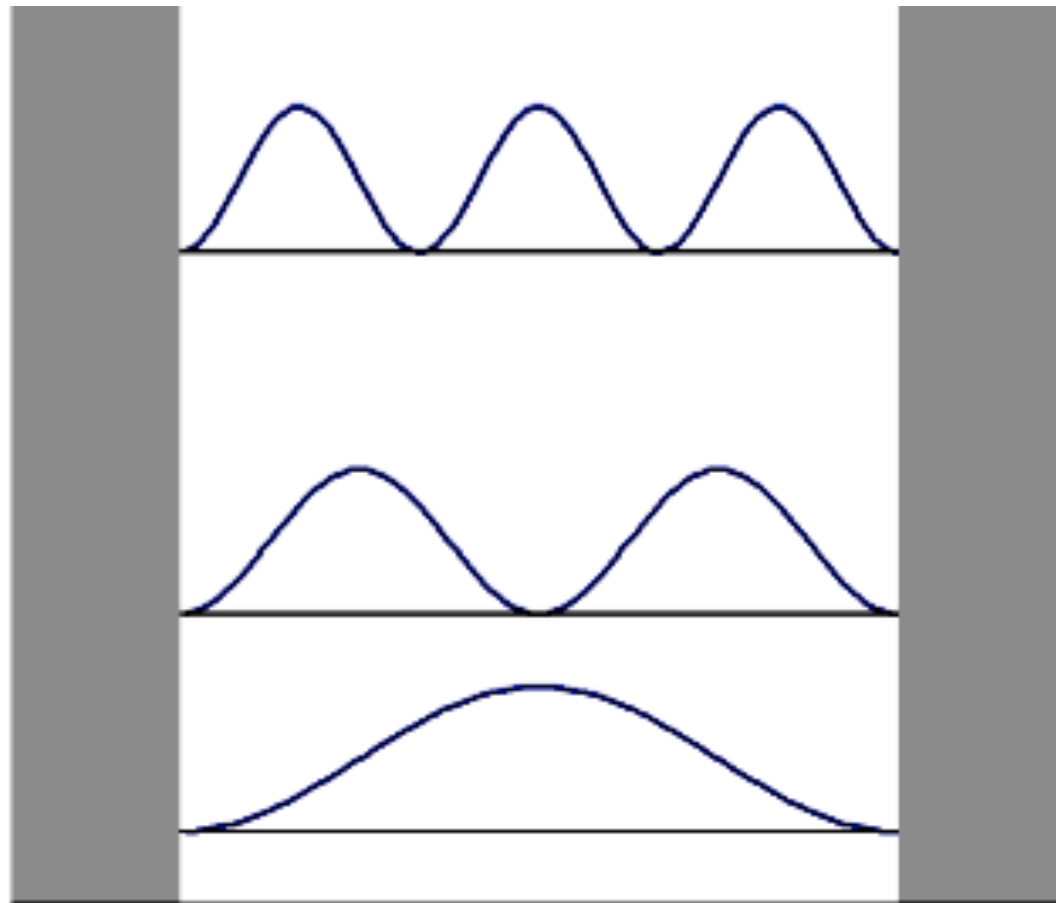
$n = 3$

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

$n = 2$

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

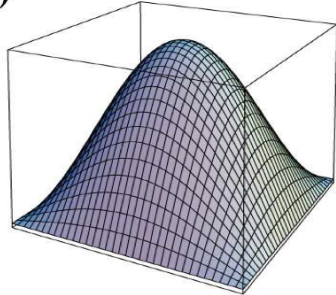
$n = 1$



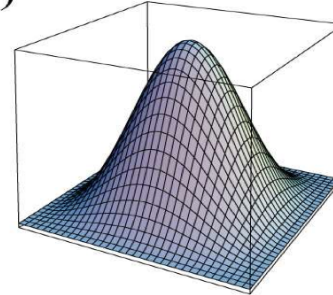
Il pisello in una scatola, QM

Funzione d'onda e probabilità per una scatola quadrata

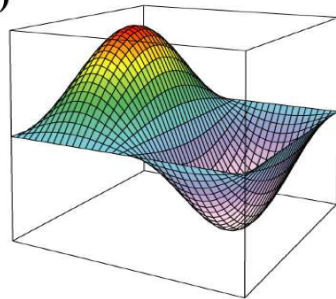
$$\Psi(1,1)$$



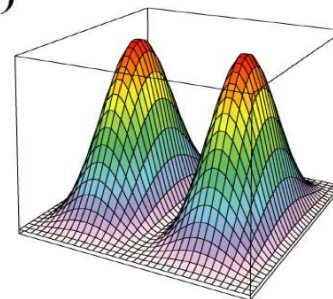
$$\Psi^2(1,1)$$



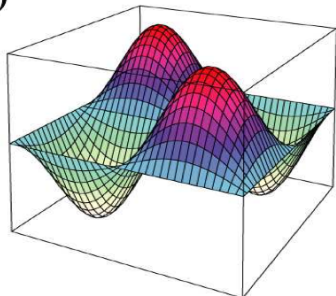
$$\Psi(1,2)$$



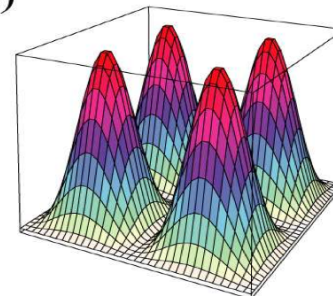
$$\Psi^2(1,2)$$



$$\Psi(2,2)$$



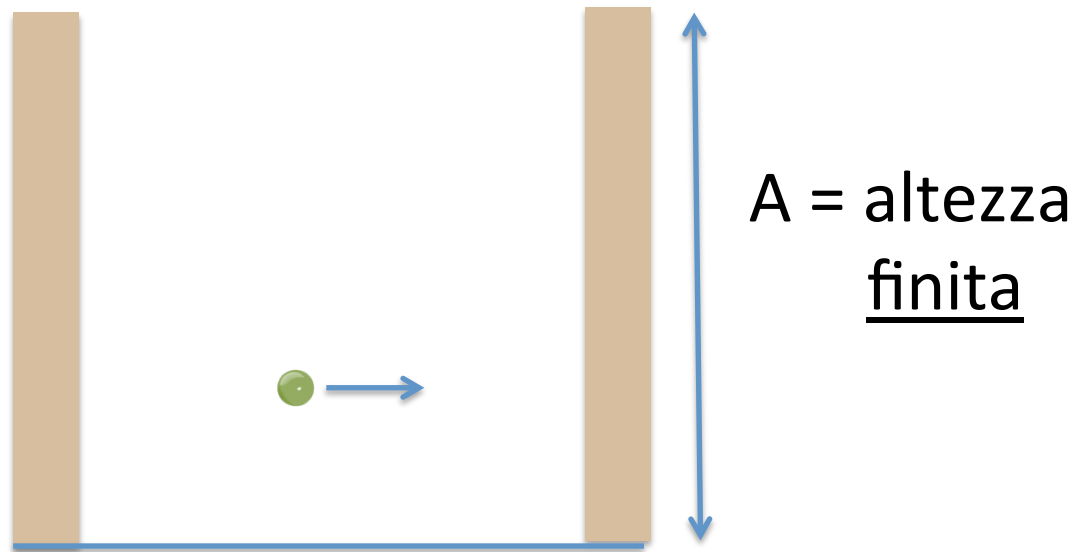
$$\Psi^2(2,2)$$



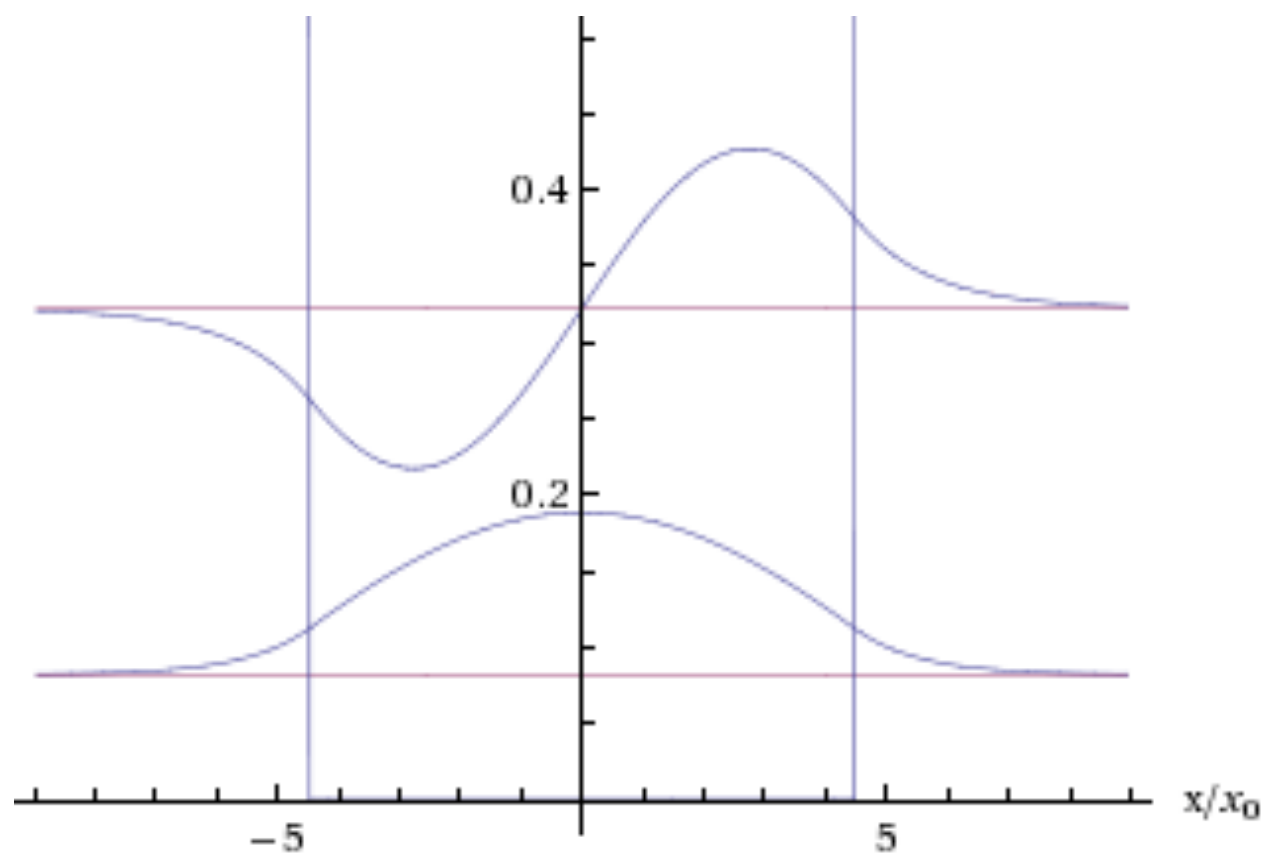
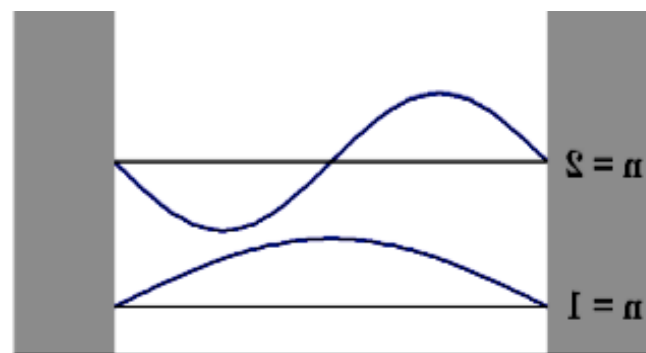
Il pisello in una scatola, QM

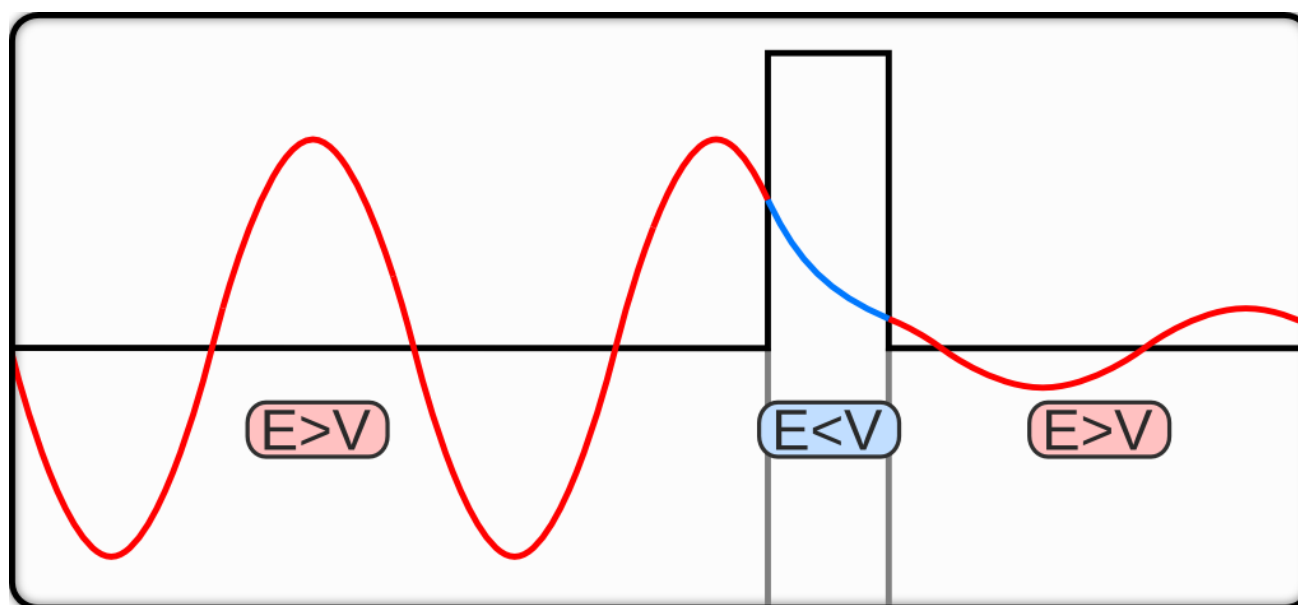
v = velocità
 m = massa

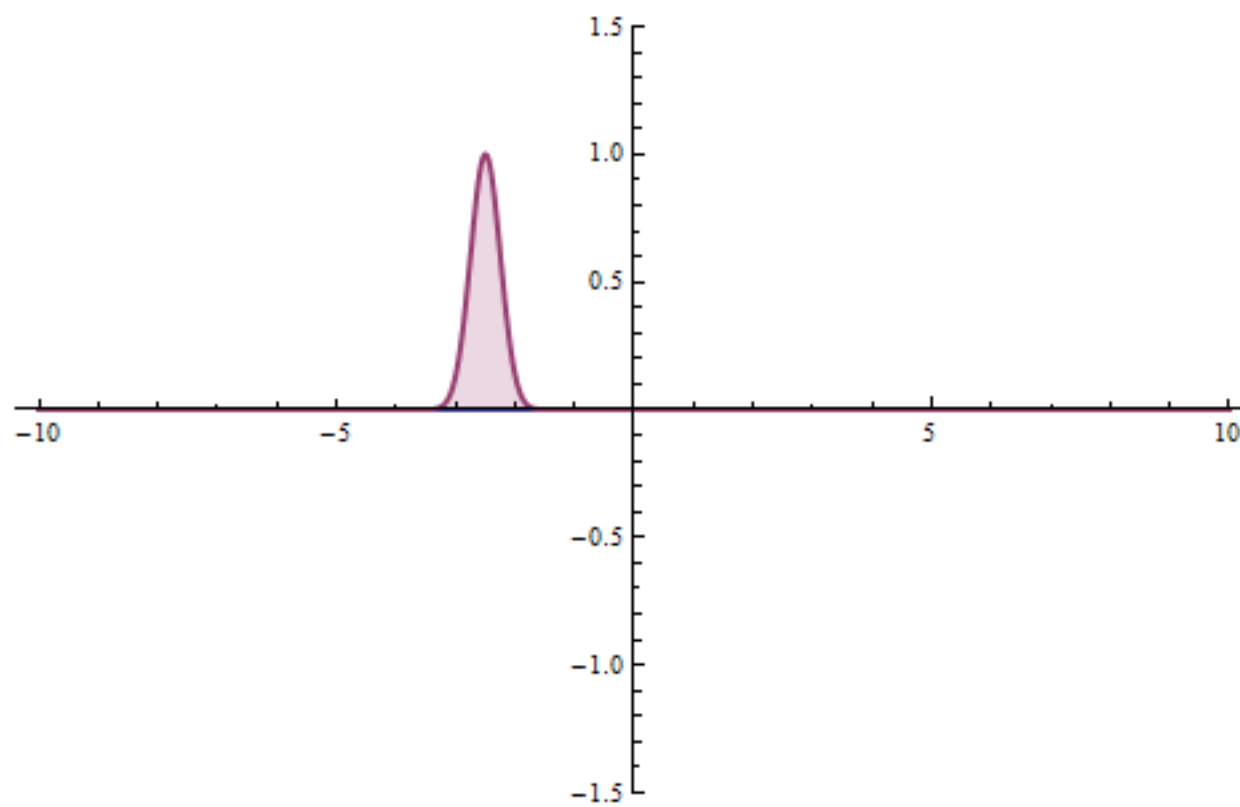
$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

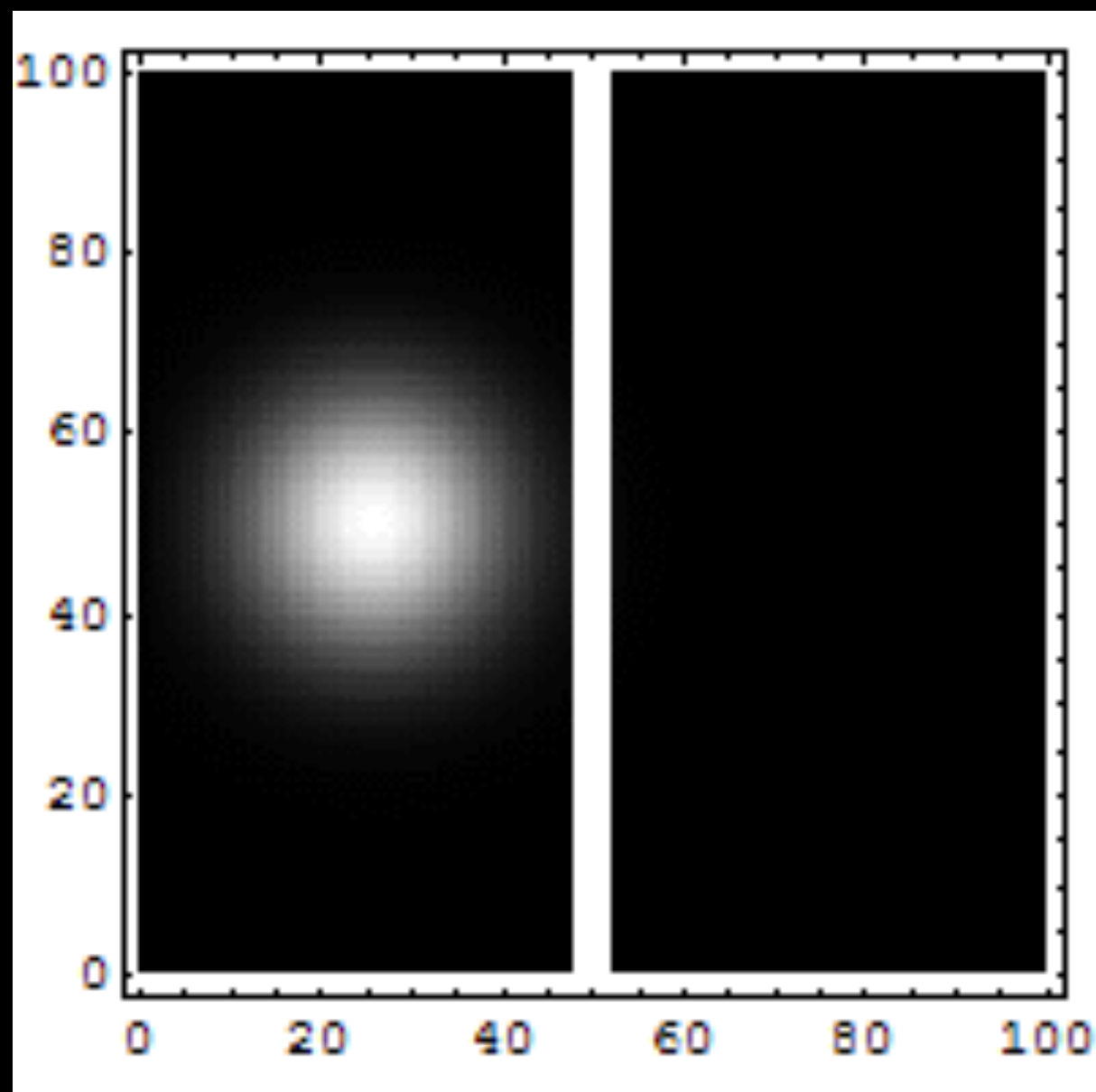


Urti perfettamente elastici









Peccato
non essere
un elettrone!

