

# Meccanica quantistica: 15 minuti per entrare in un nuovo mondo

Dr. Valentina Brosco

Istituto dei Sistemi Complessi, Consiglio Nazionale delle Ricerche & Dipartimento di Fisica, Università “La Sapienza”



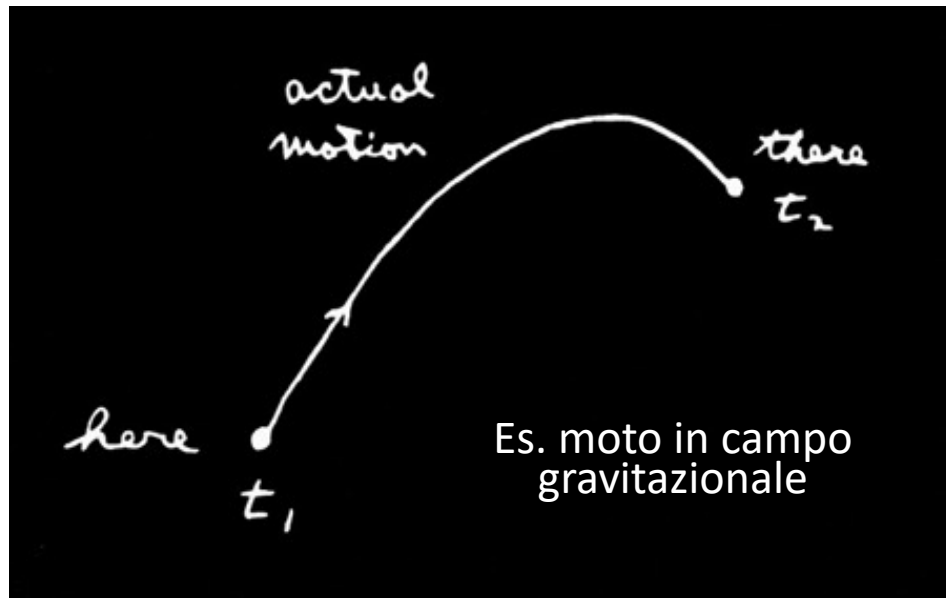
SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Una nuova visione del mondo

## Meccanica classica

Condizioni iniziali + Equazioni del moto

→ Traiettoria

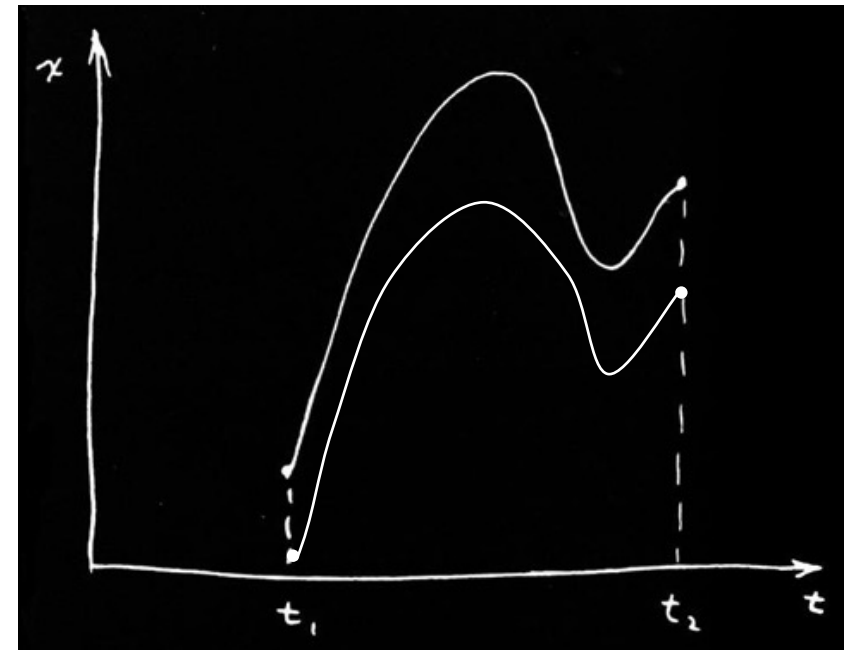


Velocità e posizione di un sistema determinate dalle condizioni iniziali e dalle forze in gioco

## Meccanica quantistica

Ogni moto permesso dalle simmetrie e dalle leggi di conservazione ha una certa probabilità di realizzarsi

Tale probabilità è determinata dalle condizioni iniziali e dalle forze in gioco



$P(x, t_1)$

$P(x, t_2)$



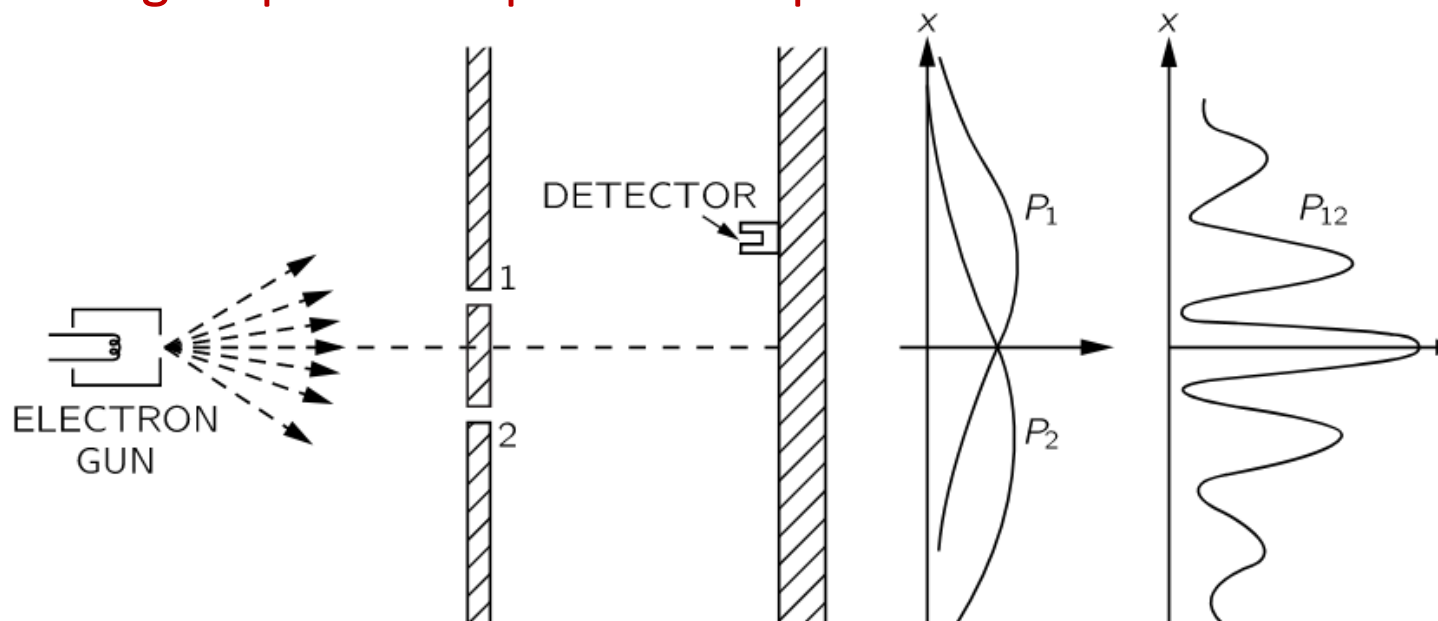
# L'Universo è quantistico, possibile?!

Con le parole di R. Feynman

*"It is impossible to predict exactly what would happen in a given circumstance the only thing that can be predicted is the probability of different events."*

PROSPETTIVA COMPLETAMENTE NUOVA! <https://www.feynmanlectures.caltech.edu>

**Tutti gli esperimenti puntano in questa direzione!**



## ESPERIMENTO di Feynman

Un elettrone emesso dalla sorgente passa con una certa probabilità attraverso ognuna delle due fenditure!

Per un singolo elettrone il risultato di questo esperimento è casuale con probabilità calcolabile e misurabile.

Gli elettroni sono oggetti microscopici, la meccanica quantistica vale anche per le sedie o per i gatti?

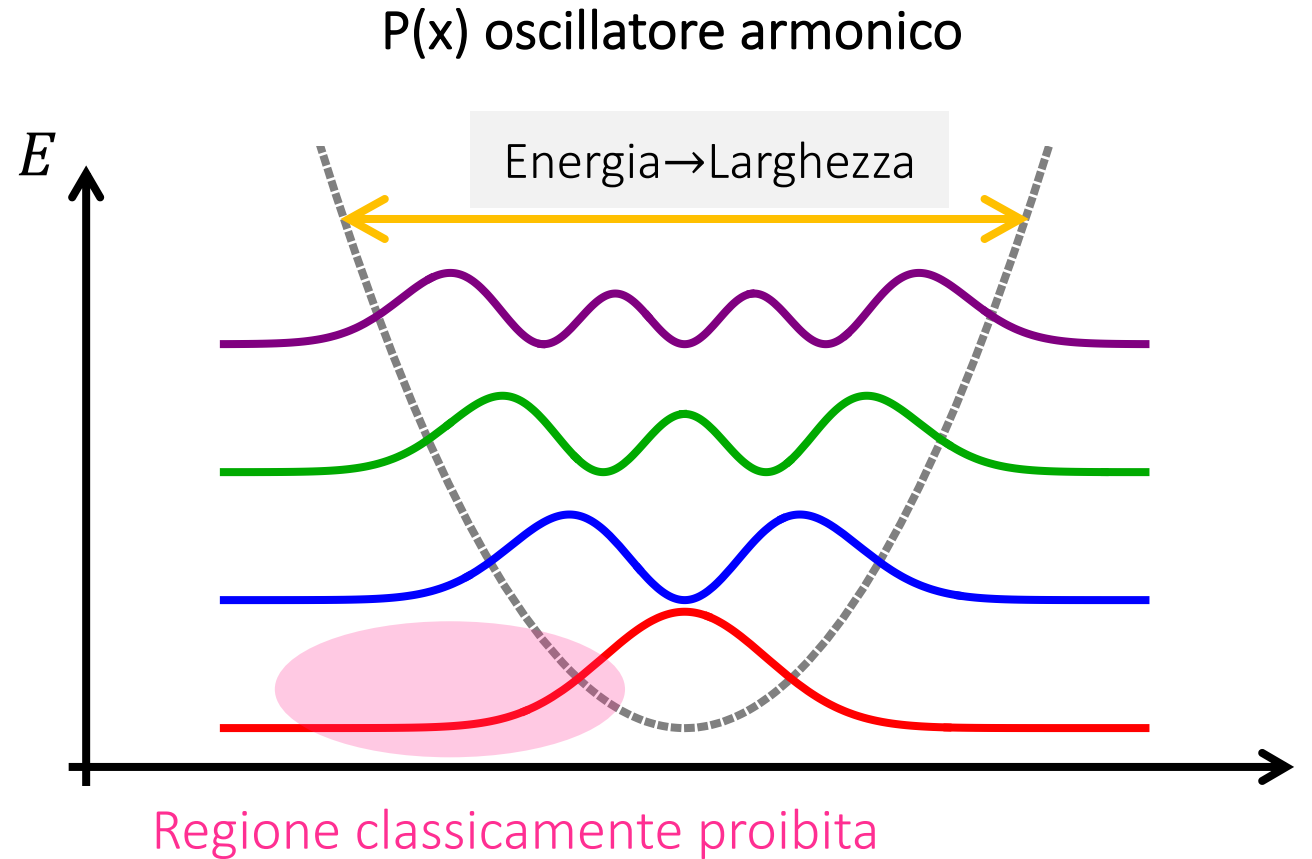
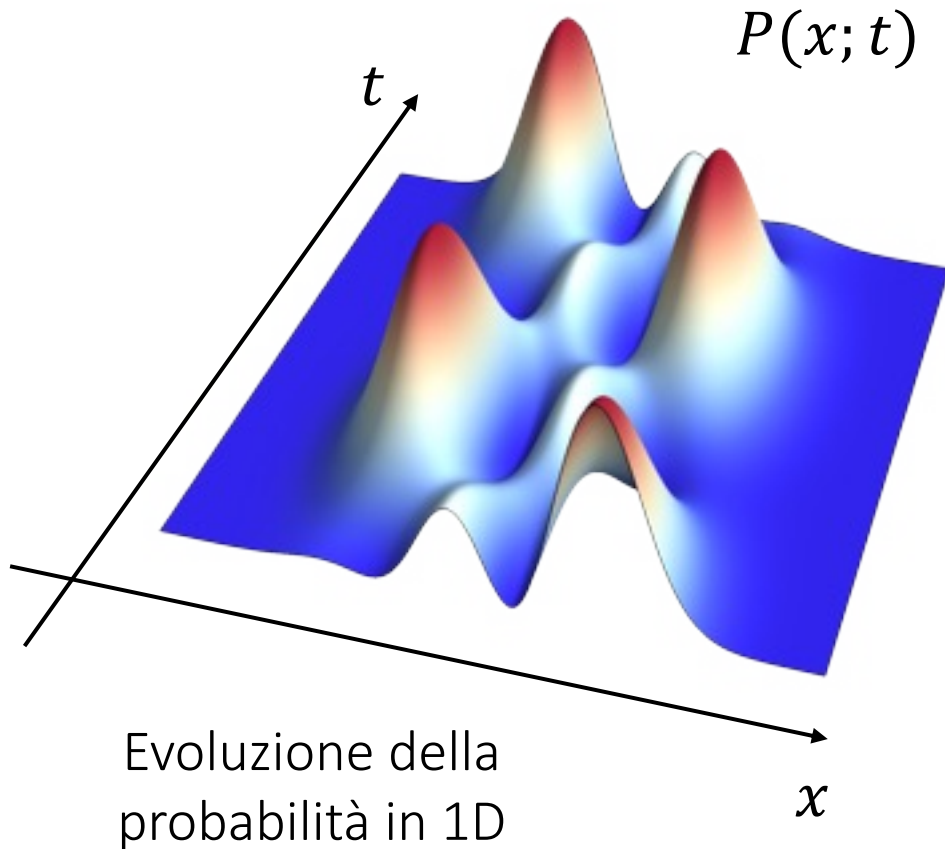
**Sì, anche per oggetti macroscopici!**

# La funzione d'onda, $\psi(t)$

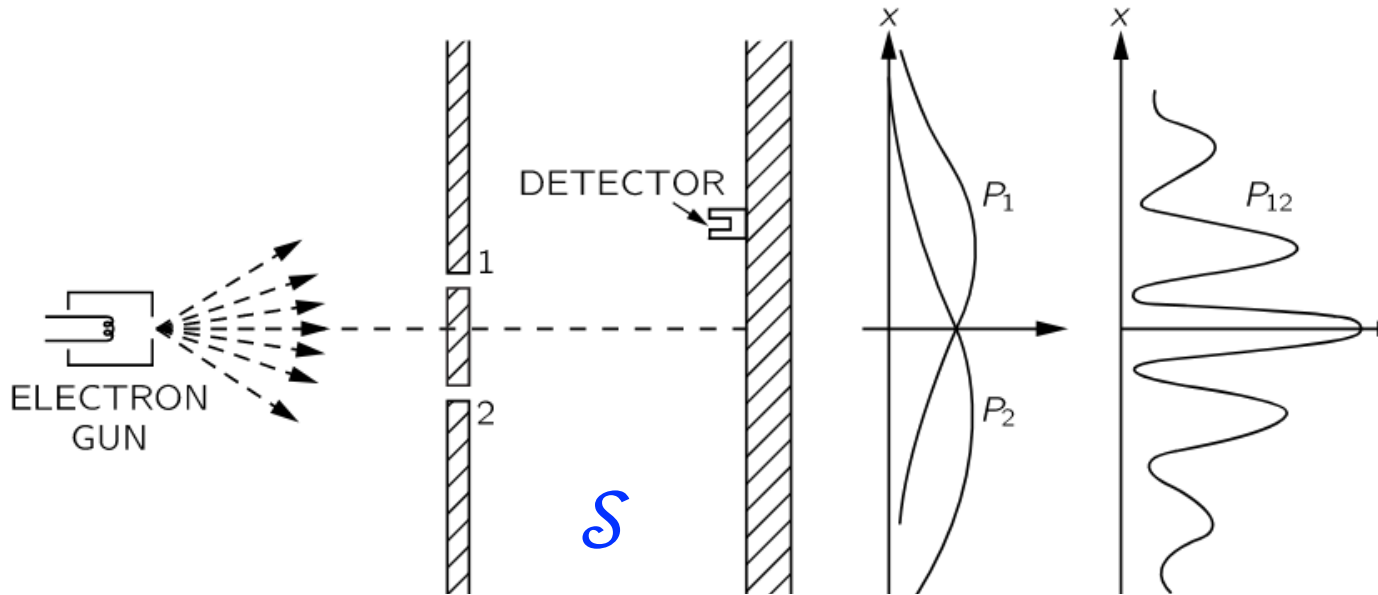
L'evoluzione dello stato di un sistema quantistico descritta dall'**equazione di Schroedinger**



Funzione d'onda,  $\psi(t) \rightarrow P(x, t)$



# Principio di sovrapposizione



## Cambio di prospettiva!

Nella regione  $S$  l'elettrone è simultaneamente in due stati distinti che corrispondono a diversi percorsi dalla sorgente allo schermo

Il carattere intermedio della sovrapposizione riguarda la probabilità di un risultato non il risultato stesso

La funzione d'onda dà conto della probabilità di ciascun percorso

Immaginiamo l'esperimento su un gatto...

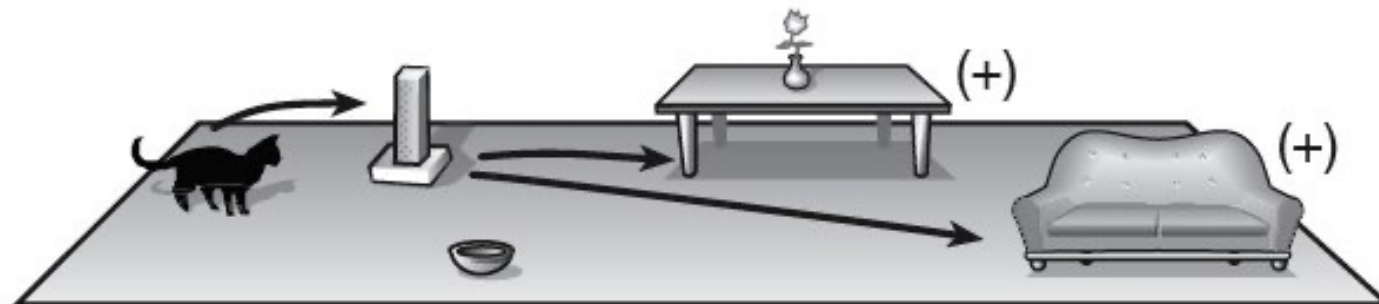
PROBABILITA' = (SOMMA DELLE AMPIEZZE)<sup>2</sup>

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

$$P_{12} = |\psi_1 + \psi_2|^2 \neq P_1 + P_2$$

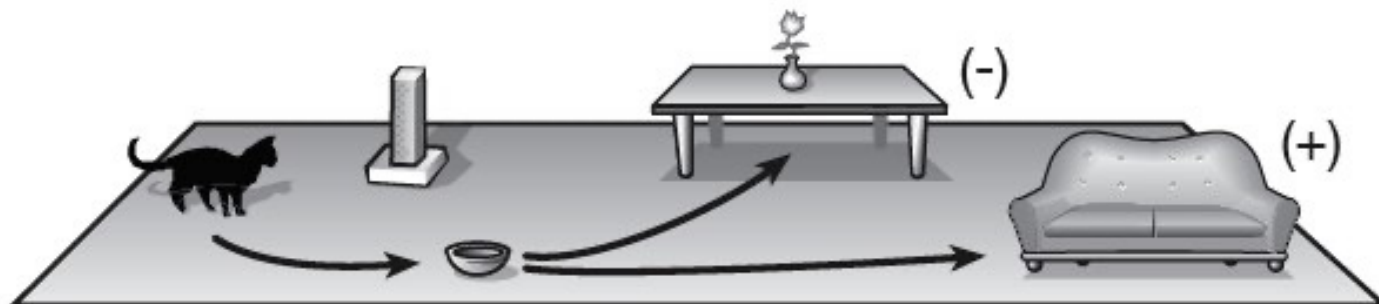
INTERFERENZA COME PER LE ONDE!

TIRAGRAFFI



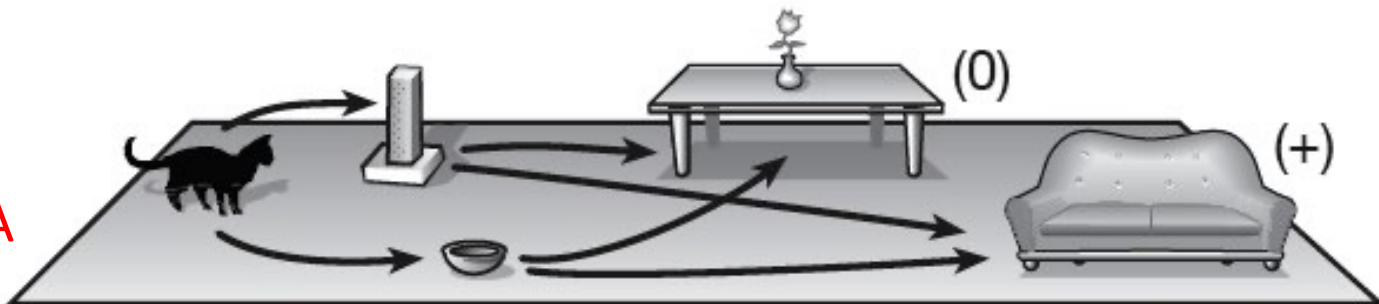
DIVANO o  
TAVOLO

CIOTOLA



DIVANO o  
TAVOLO

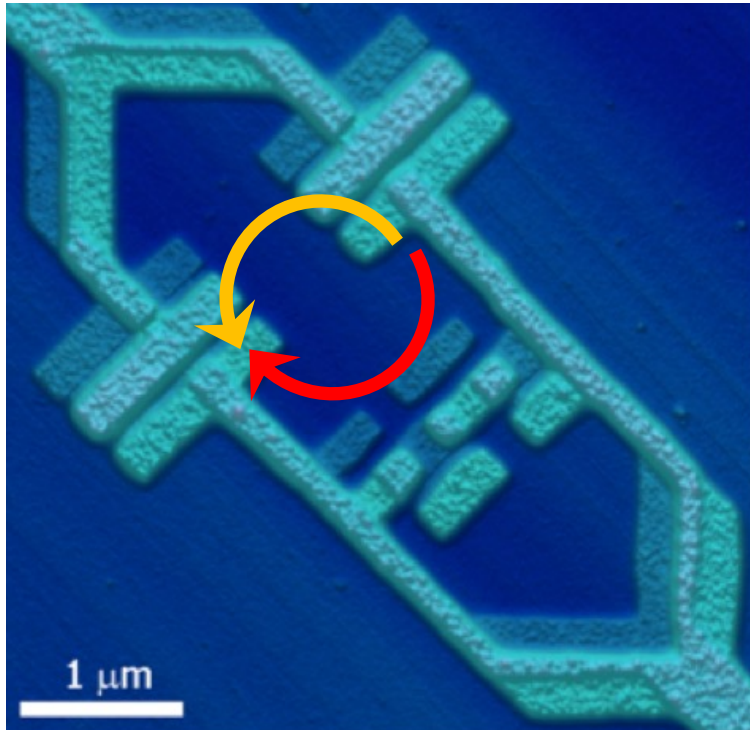
TIRAGRAFFI+CIOTOLA



DIVANO

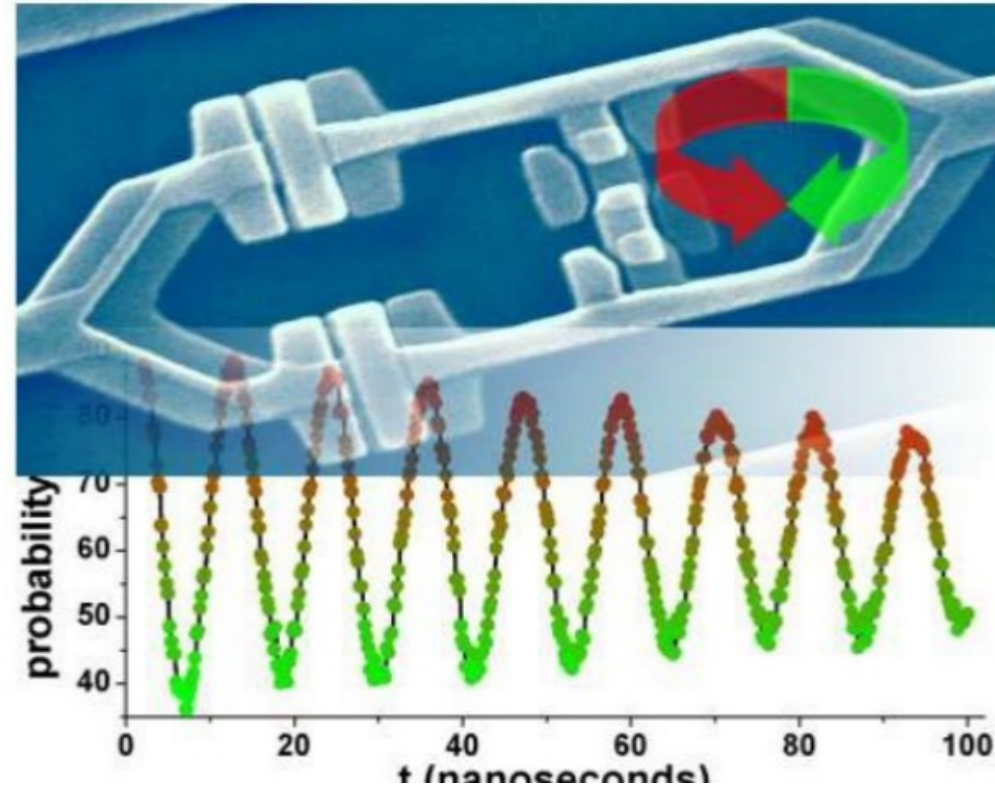
# Sistemi quantistici macroscopici

Oggetti macroscopici sono «classici»?



Circuito superconduttore  
simultaneamente in due stati  
di corrente opposti

Possibile osservare fenomeni  
quantistici di sistemi macroscopici?



Y. Chiorescu et al. Science 2003

Come in questo quadro di Magritte...

## Coerenza quantistica

- Un sistema quantistico può essere in diversi stati simultaneamente, è delocalizzato in punti diversi dello spazio

## Indeterminazione

- Indeterminazione intrinseca nella descrizione quantistica di uno stato : es. estensione spaziale funzione d'onda

$$\langle x^2 \rangle = \Delta x$$



Le Blanc Seing, R. Magritte 1965



# Relazioni di indeterminazione

E' impossibile definire ad un certo istante di tempo la posizione ed il momento di una particella

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

La costante di Planck:

$$\hbar \cong 1 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$$

Heisenberg, 1927

Se il momento di una particella è fissato con precisione arbitraria, il suo stato è completamente delocalizzato

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{V}} e^{i k \cdot x - \omega \cdot t} \quad \longrightarrow \quad P(x) = \frac{1}{V}$$

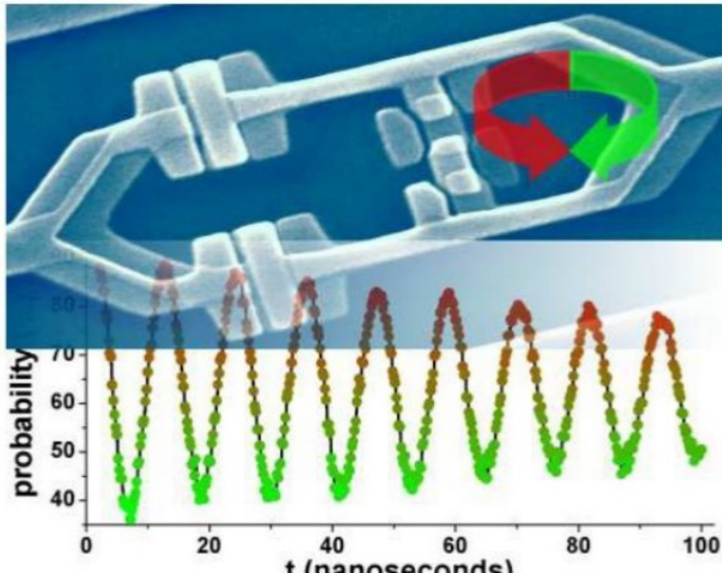
Probabilità uniforme

Per ogni sistema esistono coppie di grandezze fisiche che non possono avere contemporaneamente valori definiti

ESEMPI

- momento angolare  $[L_x, L_y]$ ,
- carica e fase  $[Q, \varphi]$
- ...

# Principio di indeterminazione $[t, E]$



Ampiezza oscillazioni della funzione d'onda diminuisce nel tempo

Lo stato creato è instabile a causa dell'interazione con l'ambiente

Principio di indeterminazione tempo – energia stabilisce che il tempo di vita,  $\tau$ , è connesso all'indeterminazione sull'energia

$$\Delta E \cdot \tau \geq \hbar$$

Relazione verificata anche nei decadimenti radioattivi

**Gli stati ad energia fissata con precisione arbitraria hanno tempo di vita infinito**

**Stati quantistici che non evolvono, stazionari!**

Come in questo quadro di Magritte...

## Coerenza quantistica

- Un sistema quantistico può essere in diversi stati simultaneamente, è delocalizzato in punti diversi dello spazio

## Indeterminazione

- Indeterminazione intrinseca nella descrizione quantistica di uno stato : es. estensione spaziale funzione d'onda

$$\langle x^2 \rangle = \Delta x$$

## Correlazione o entanglement

- Le diverse parti del sistema sono correlate



Le Blanc Seing, R. Magritte 1965

# Entanglement

Correlazione tra diversi sistemi quantistici che evolvono nel tempo, le diverse possibili evoluzioni di sistemi interagenti dipendono da tale correlazione o **entanglement**

Esempio processo di misura e interazione con l'ambiente

Sean Carroll, CERN Colloquium 2019

L'osservatore è in una sovrapposizione quantistica!  
Strano...

$$(cat)(obs) = \left( \text{cat1} + \text{cat2} \right) \left( \text{obs} \right)$$

Misura

$$(cat, obs) = \left( \text{cat1}, \text{obs} \right) + \left( \text{cat2}, \text{obs} \right)$$

Ambiente

$$(cat, obs, env) = \left( \text{cat1}, \text{obs}, \text{env} \right) + \left( \text{cat2}, \text{obs}, \text{env} \right)$$

# Conclusioni

- Coerenza quantistica
- Indeterminazione
- Entanglement

Cambio di visione dovuto ad esperimenti

Quel che vediamo è solo una piccola parte di quel che è «possibile»

**Seconda rivoluzione quantistica:**  
applicazioni usando ciò che non vediamo!



Le Blanc Seing, R. Magritte 1965