



Un oggetto quantistico tra le mani: la rivoluzione del Nobel 2025

K. Piscicchia

Centro Ricerche Enrico Fermi

25/02/2026

EEE Run Coordination Meeting

Nobel Prize in Physics 2025



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

John Clarke

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo: Clément Morin

Michel H. Devoret

Prize share: 1/3



© Nobel Prize Outreach. Photo: Clément Morin

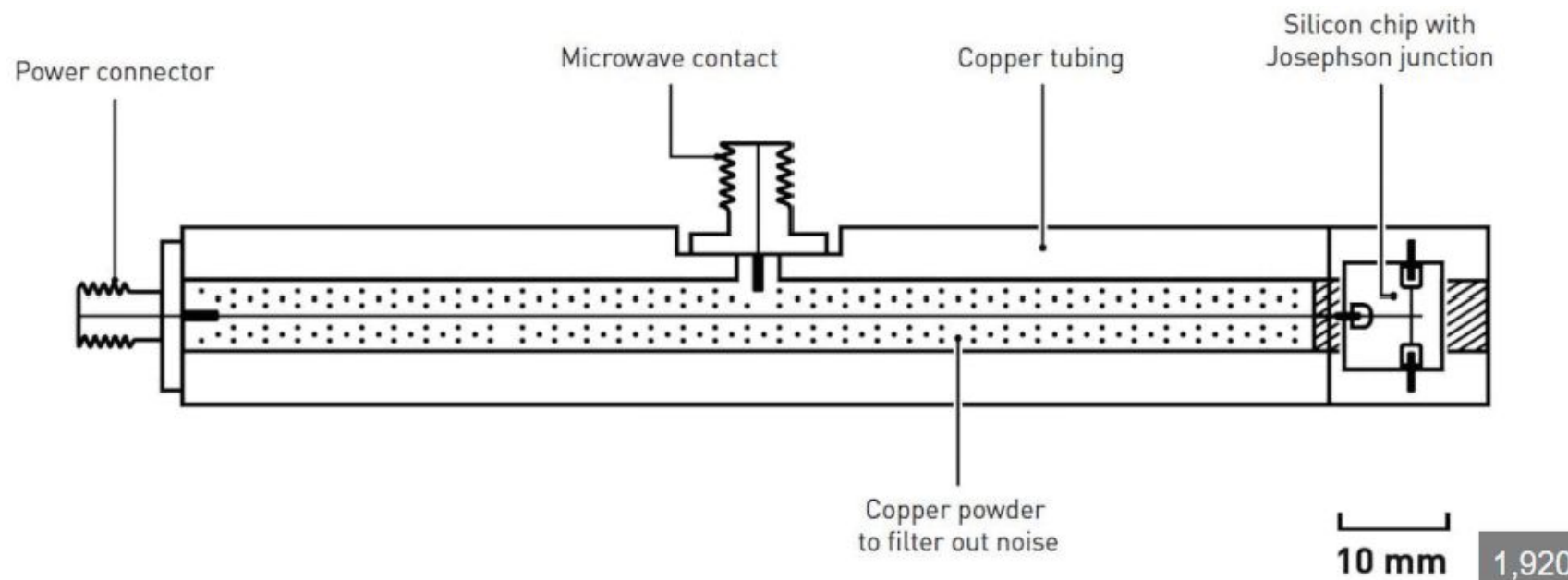
John M. Martinis

Prize share: 1/3

Clarke: ***“Il Maestro Zen del mondo della superconduttività”***



The Nobel Prize in Physics 2025 was awarded jointly to John Clarke, Michel H. Devoret and John M. Martinis "for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit"



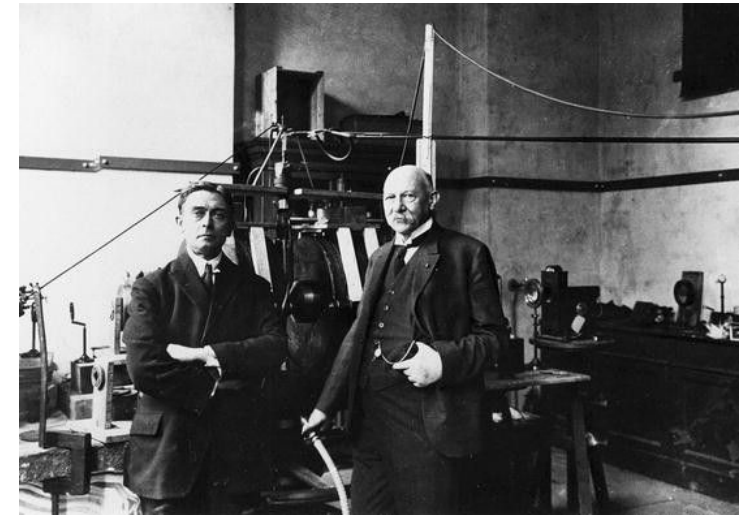
**Josephson junction
and the circuit cooled
down to cryogenic
temperatures**

Dalla Superconduttività ai Circuiti Quantistici

I Nobel che hanno portato al Nobel per la Fisica 2025

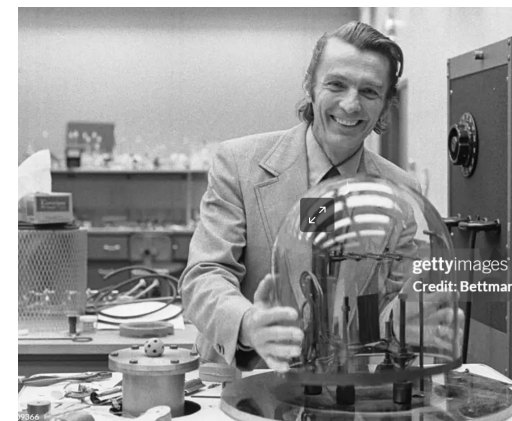
1913 — Scoperta della superconduttività:
resistenza elettrica nulla a basse temperature.

Heike Kamerlingh Onnes



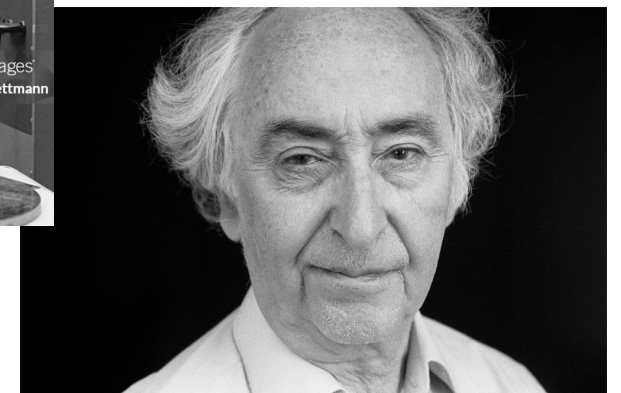
1972 — Teoria BCS della superconduttività:
spiegazione microscopica della
superconduttività.

John Bardeen, Leon N. Cooper, J. Robert Schrieffer



1973 — Tunneling quantistico e giunzione
Josephson

Ivar Giaever & Brian Josephson



Pillole di Meccanica Quantistica

Che cosa è uno stato fisico in MQ?

- In meccanica classica: lo stato di una particella è dato da **posizione x** e **velocità (o quantità di moto p)**.
- In meccanica quantistica: lo stato del sistema è descritto da una **funzione d'onda $\psi(x, t)$** .
- ψ è un **numero complesso**.
- Il significato fisico è probabilistico:
 $|\psi(x, t)|^2 = \text{probabilità di trovare la particella in } x$



A quale scala e come avvenga la transizione rimane un mistero!

Pillole di Meccanica Quantistica

Che cosa è un numero complesso?

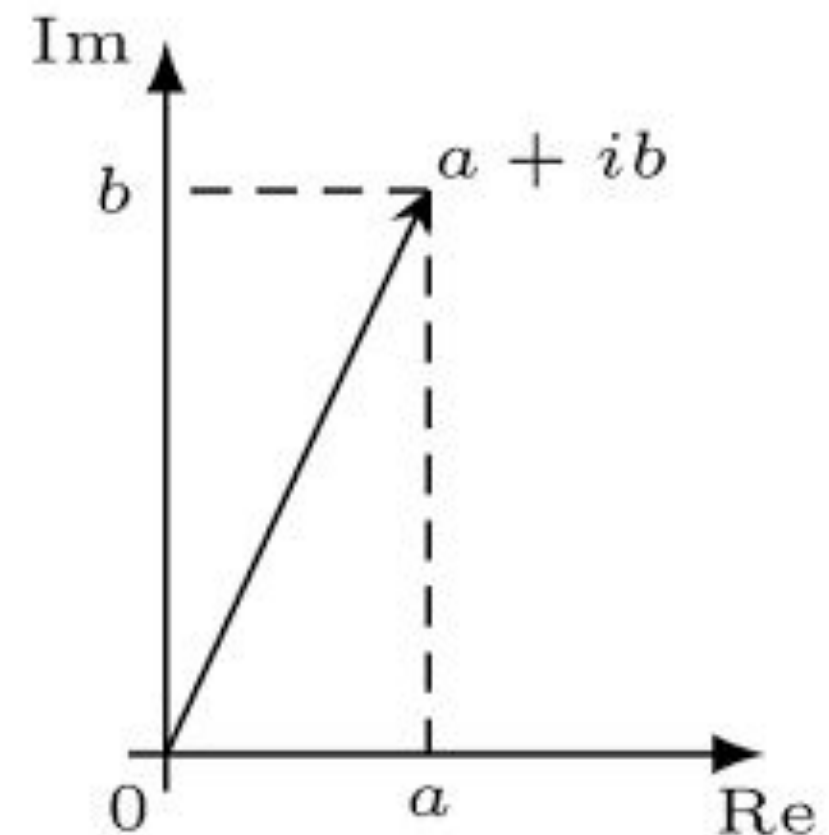
Un numero complesso ha due parti:

$$z = a + ib$$

- a = parte reale
- b = parte immaginaria
- i è definito da: $i^2 = -1$

Possiamo rappresentarlo come un punto nel piano:

- asse orizzontale $\rightarrow$ parte reale
- asse verticale $\rightarrow$ parte immaginaria



Pillole di Meccanica Quantistica

Che cosa è un numero complesso?

Un numero complesso ha due parti:

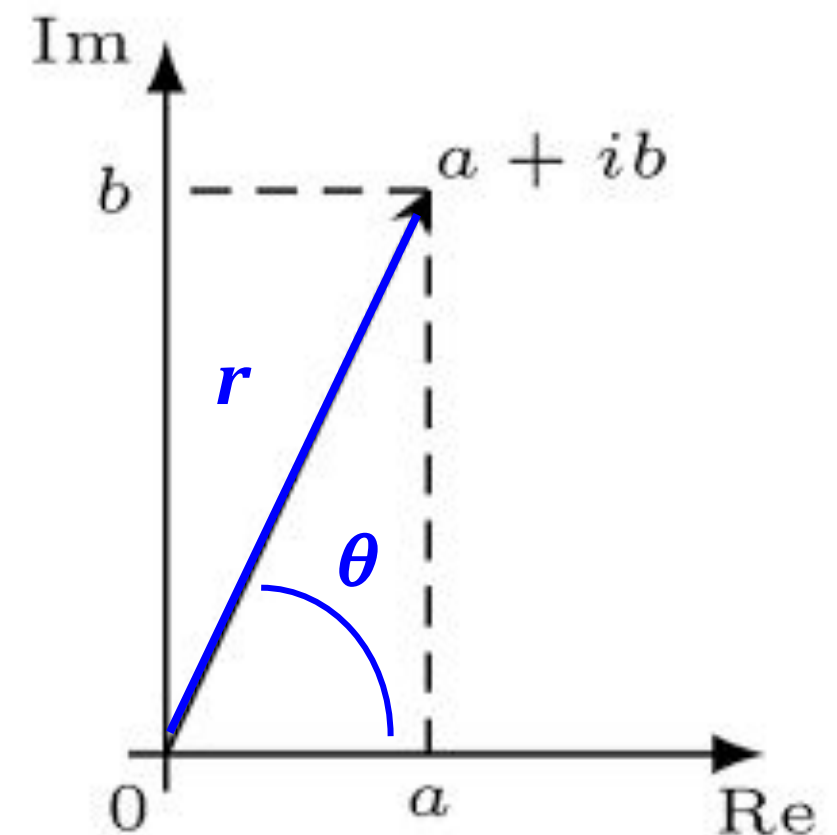
$$z = a + ib$$

- a = parte reale
- b = parte immaginaria
- i è definito da: $i^2 = -1$

Forma polare:

$$z = re^{i\theta}$$

- r = modulo (distanza dall'origine)
- θ = fase (angolo)



Pillole di Meccanica Quantistica

Addio traiettorie classiche ...

In meccanica classica possiamo conoscere contemporaneamente:

- posizione x
- quantità di moto p

In meccanica quantistica questo **non è più possibile**.

x e p non sono indipendenti

Principio di indeterminazione di Heisenberg:

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

- non esiste una traiettoria ben definita
- possiamo solo prevedere probabilità di misura

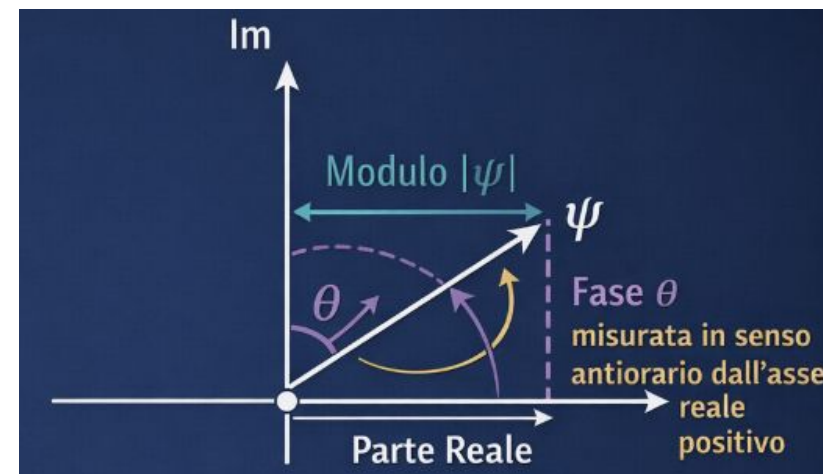
Pillole di Meccanica Quantistica

La funzione d'onda evolve nel tempo secondo l'equazione di Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

$\hat{H}$ rappresenta l'energia = energia cinetica + energia potenziale

$$\psi = |\psi| e^{i\theta}$$



- $|\psi|$ è il modulo della funzione d'onda **determina la probabilità**
- θ è la fase **determina la dinamica**

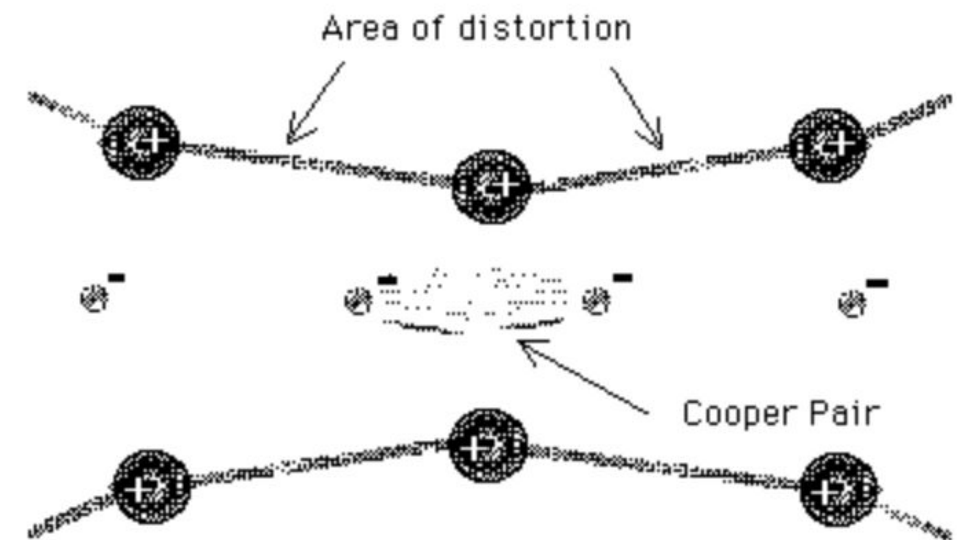
Nella fisica ordinaria la fase non è osservabile

**superconduttore -> coerenza macroscopica ->
fase osservabile macroscopicamente**

Superconduttività

L'instabilità di Cooper e il "Gluone" Reticolare

Come possono attrarsi due elettroni?



- Interazione Elettrone-Fonone: Un elettrone che attraversa il reticolo ionico positivo crea una deformazione (polarizzazione locale). Gli ioni, essendo pesanti, reagiscono lentamente (ritardo).
- Prima che il reticolo torni a riposo, un secondo elettrone viene attratto dalla scia di carica positiva lasciata dal primo.
- La Coppia di Cooper: Questa attrazione mediata dai quanti di vibrazione del reticolo (fononi) permette a **DUE ELETTRONI** con spin opposto e quantità di moto opposta ($-k$, $+k$) di formare uno **STATO LEGATO**.

Superconduttività

TEMPERATURA CRITICA T_c : La competizione tra ordine quantistico e disordine termico.

- Il Gap (Δ): Formare coppie abbassa l'energia del sistema. Per rompere una coppia serve un'energia minima, detta *Energy Gap*.
- Energia Termica ($k_B T$): Il calore è un disturbo cinetico casuale (energia cinetica delle particelle).
- La superconduttività esiste finché l'energia termica è insufficiente a rompere le coppie di Cooper ($k_B T < \Delta$).
- Transizione di fase - alla temperatura critica T_c l'agitazione termica distrugge il legame delle coppie; il gap si chiude e il materiale torna un conduttore normale (resistivo).

Superconduttività

Cosa abbiamo imparato? Affinché la fase superconduttiva sia stabile il sistema deve minimizzare l'energia.

Per farlo realizza uno **stato superconduttore al di sotto di T_c** :

- **NON** è: **coppie di Cooper** che si trovano **da qualche parte**,
- **INVECE** E': una **sovrapposizione quantistica** dei possibili numeri di coppie.

Conseguenza:

- In un metallo normale, le fasi delle funzioni d'onda degli elettroni sono casuali. **Il sistema è simmetrico** rispetto a una rotazione globale della fase. **E IL NUMERO DI PARICELLE E' FISSATO**
- **MA QUANDO SI CREA IL CONDENSATO**: le coppie di Cooper si comportano come bosoni. Sotto T_c un **numero macroscopico di coppie "condensa" nello stesso stato quantistico fondamentale.**

Superconduttività

ROTTURA DI SIMMETRIA:

- Il sistema "sceglie" arbitrariamente **UNA** fase specifica θ .
- Non è più simmetrico: ha preferito uno stato ordinato rispetto a uno disordinato, ora **LA FASE E' FISSATA** ma **IL NUMERO DI COPPIE di COOPER NO.**

fase θ e numero di particelle N non possono essere misurati contemporaneamente con precisione arbitraria, ricordate **PRINCIPIO DI HEISENBERG?**

$$\text{ORA } \Delta\theta \Delta N \geq \frac{1}{2}$$

L'intero condensato è descritto da un'unica funzione d'onda macroscopica:

$$\psi = |\psi| e^{i\theta}$$

Superconduttività

SUPER-CONDUTTORE: perché la **resistenza** è **zero** e il campo magnetico viene espulso:

- **Rigidità della fase:** Poiché **tutte le coppie condividono la stessa fase θ** , il sistema è "rigido".
- Per **cambiare lo stato di una sola coppia**, dovresti **cambiare lo stato di tutte**, il che è energeticamente impossibile a basse energie $< kT_c$.

Assenza di Scattering: Un elettrone normale perde energia urtando le impurità (resistenza). Una coppia di Cooper nel condensato non può "urtare" nulla singolarmente perché è legata alla fase globale: fluisce senza dissipazione.

Effetto Meissner: La rigidità della fase costringe le correnti superficiali a reagire in modo da cancellare ogni campo magnetico interno, portando al diamagnetismo perfetto.

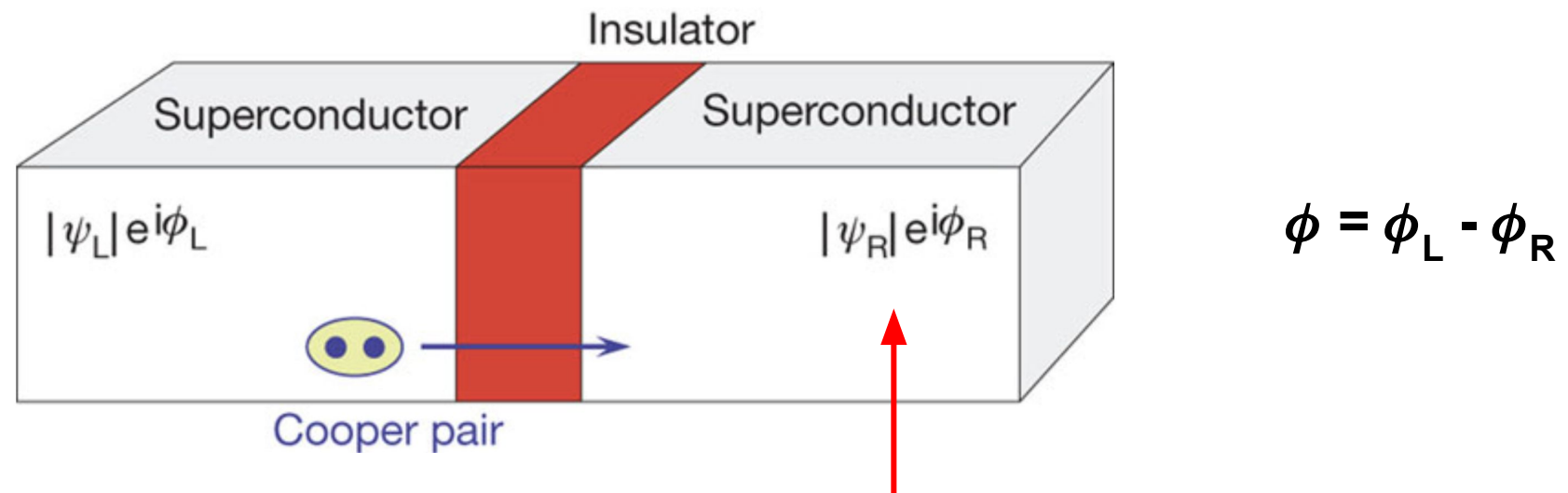
Dai superconduttori ai circuiti quantistici

**Può un circuito elettrico macroscopico
comportarsi come un sistema quantistico?**

Si! Utilizzando la fisica dei superconduttori

Giunzione Josephson - corrente senza voltaggio

Una giunzione Josephson significa semplicemente separare due superconduttori con un materiale isolante:



Ogni superconduttore è caratterizzato dalla sua **funzione d'onda macroscopica** e quindi dalla sua fase. La differenza di fase ϕ fra i due superconduttori implica il passaggio di corrente:

Classicamente gli elettroni non potrebbero attraversare l'isolante, mentre **le coppie di Cooper possono fare un tunnelling quantistico**.

- La corrente fluisce perché il sistema abbassa l'energia eguagliando la fase.
- Non serve una differenza di potenziale elettrico, è un fenomeno puramente quantistico:

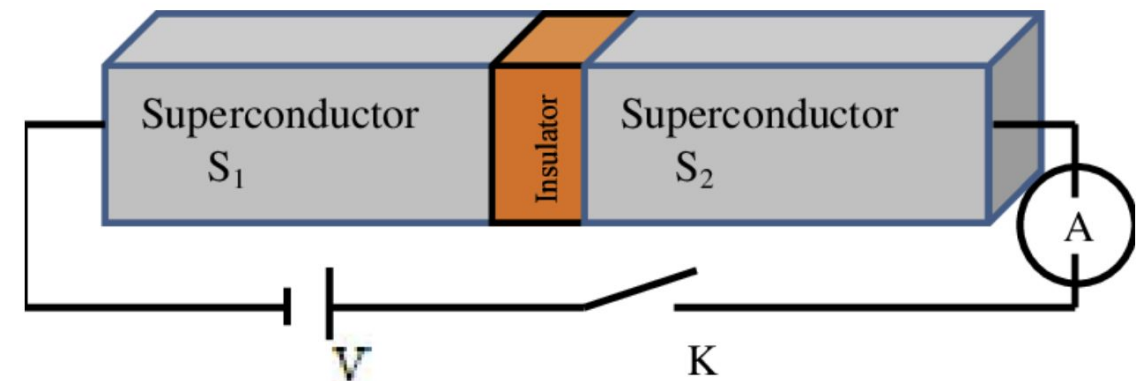
corrente: $I = I_c \sin \phi$

La seconda equazione di Josephson

Ora applichiamo una tensione V tra i due superconduttori.

La differenza di fase non resta costante, ma evolve nel tempo:

$$\hbar \frac{d\phi}{dt} = 2eV$$



Questa è la *seconda equazione di Josephson*.

Significato fisico:

- la tensione controlla la velocità di evoluzione della fase quantistica;
- **tensione elettrica** $\leftrightarrow$ **dinamica della fase**.
- **La fase diventa una variabile dinamica osservabile.**

La giunzione Josephson come circuito

Una giunzione Josephson si comporta come un elemento circuitale quantistico con:

corrente:

$$I = I_c \sin \phi$$

energia potenziale:

$$U(\phi) = -E_J \cos \phi$$

La **fase ϕ** diventa una **vera coordinata dinamica**, analoga alla posizione di una particella.

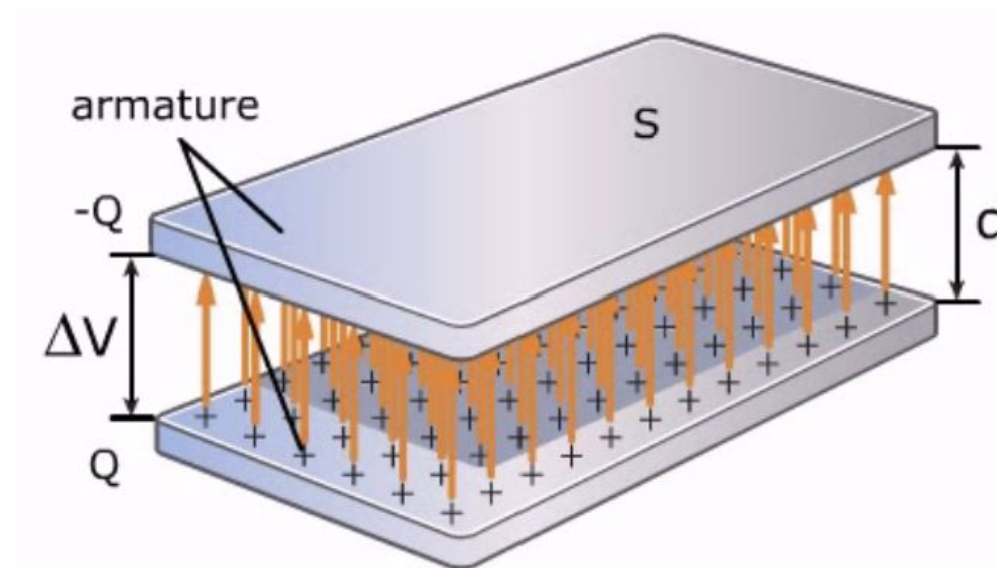
Aggiungendo la capacità nasce un sistema quantistico!!

Ma cos'è una capacità?

Una capacità nasce ogni volta che hai due conduttori separati da un isolante.

Se accumuli carica $+Q$ su un lato e $-Q$ sull'altro, compare una differenza di potenziale V .

Per definizione: $Q = CV$



Caricare il condensatore richiede lavoro: **energia elettrostatica immagazzinata nel campo elettrico:**

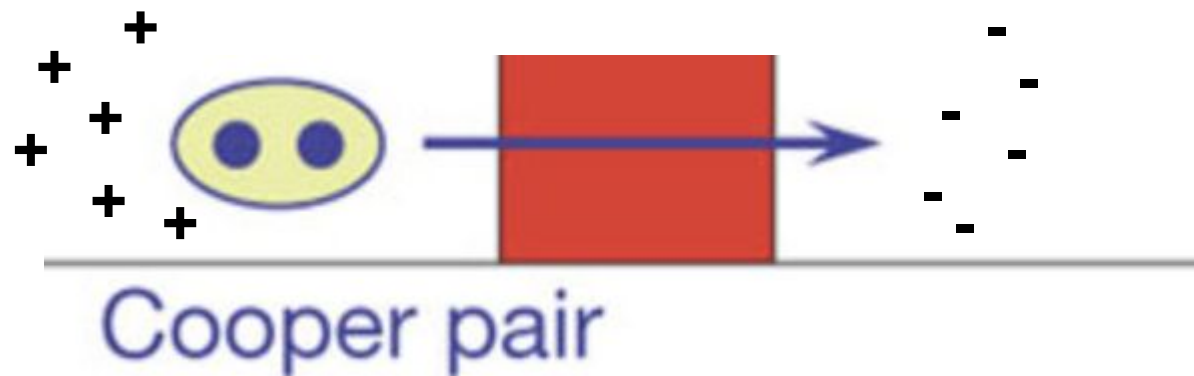
$$E = \frac{Q^2}{2C}$$

Perché la giunzione Josephson ha una capacità?

La giunzione è:

superconduttore - **isolante** - superconduttore

Quando n coppie di Cooper passano da un lato all'altro i due lati non sono più neutri:



DIFFERENZA DI CARICA Q $\longrightarrow$ TENSIONE $\longrightarrow$ ENERGIA CAPACITIVA

$$Q = CV \longrightarrow E = Q^2 / 2C$$

... ecco dove emerge la quantistica

In termini dell'energia capacitiva per unità di carica elettrica (E_C)

l'energia totale (Hamiltoniana quantistica) è:

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

MA perché è quantistica?

Il sistema è descritto da due variabili naturali:

- fase ϕ
- numero di coppie trasferite n

Queste NON sono indipendenti.

Esattamente come posizione x e quantità di moto p nel principio di Heisenberg:

$$\Delta\phi \Delta n \gtrsim 1$$

... ecco dove emerge la quantistica

In termini dell'energia capacitiva per unità di carica elettrica (E_C)

l'energia totale (Hamiltoniana quantistica) è:

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

**Energia capacitiva
(tipo cinetica)**

... ecco dove emerge la quantistica

In termini dell'energia capacitiva per unità di carica elettrica (E_C)

l'energia totale (Hamiltoniana quantistica) è:

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

**Energia capacitiva
(tipo cinetica)**

**Energia Josephson
(tipo potenziale)**

... ecco dove emerge la quantistica

In termini dell'energia capacitiva per unità di carica elettrica (E_C)

l'energia totale (Hamiltoniana quantistica) è:

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

**Energia capacitiva
(tipo cinetica)**

**Energia Josephson
(tipo potenziale)**

Meccanica

Giunzione

posizione x

fase ϕ

impulso p

numero n

$p^2/2m$

$4E_C n^2$

$U(x)$

$-E_J \cos \phi$

... ecco dove emerge la quantistica

In termini dell'energia capacitiva per unità di carica elettrica (E_C)

l'energia totale (Hamiltoniana quantistica) è:

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

**Energia capacitiva
(tipo cinetica)**

**Energia Josephson
(tipo potenziale)**

Il circuito si comporta come una particella quantistica in un potenziale

Conseguenza inevitabile

Un sistema quantistico confinato in un potenziale $\Rightarrow$

energie discrete

come:

- oscillatore armonico
- atomo
- particella in buca di potenziale.

Un oggetto macroscopico quantizzato

L'esperimento premiato con il Nobel ha mostrato che:

circuiti macroscopici (~ 1 cm !!!) possono possedere livelli energetici quantizzati.

In altre parole:

- la fase del superconduttore può oscillare;
- queste oscillazioni hanno energie discrete;
- il circuito si comporta come un sistema quantistico controllabile.

Non è più solo teoria: è un oggetto elettronico reale.

Milioni di elettroni agiscono come un unico oggetto quantistico coerente e ingegnerizzato.

Dalla giunzione Josephson al qubit superconduttivo

La Hamiltoniana quantistica del circuito

$$H = 4E_C n^2 - E_J \cos \phi$$

descrive una particella quantistica su un anello con potenziale periodico

$$\text{massa efficace} \sim \frac{1}{8E_C}$$

$$U(\phi) = -E_J \cos \phi.$$

Risolvendo:

$$H\psi(\phi) = E\psi(\phi)$$

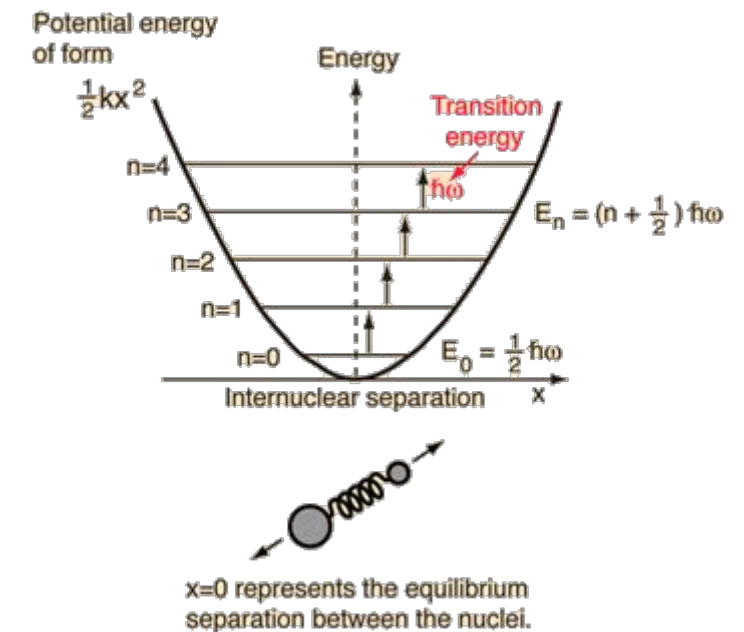
si ottengono livelli discreti:

$$E_0, E_1, E_2, \dots$$

Il potenziale (coseno) non è quadratico -> i livelli energetici non sono equispaziati !

Dalla giunzione Josephson al qubit superconduttivo

In un potenziale di tipo oscillatore armonico i livelli energetici sono equispaziati:



Questo sistema non è utile come qbit, se si eccita la transizione

$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$

con frequenza $\omega = \frac{E_{01}}{\hbar}$

si eccitano anche altre transizioni $|1\rangle \rightarrow |2\rangle, \dots$

Dalla giunzione Josephson al qubit superconduttivo

Invece una giunzione Josephson ha uno “*spettro leggermente anarmonico*”

$$E_{12} \neq E_{01}$$

Utilizzando una frequenza:

$$\omega_{01} = \frac{E_1 - E_0}{\hbar}$$

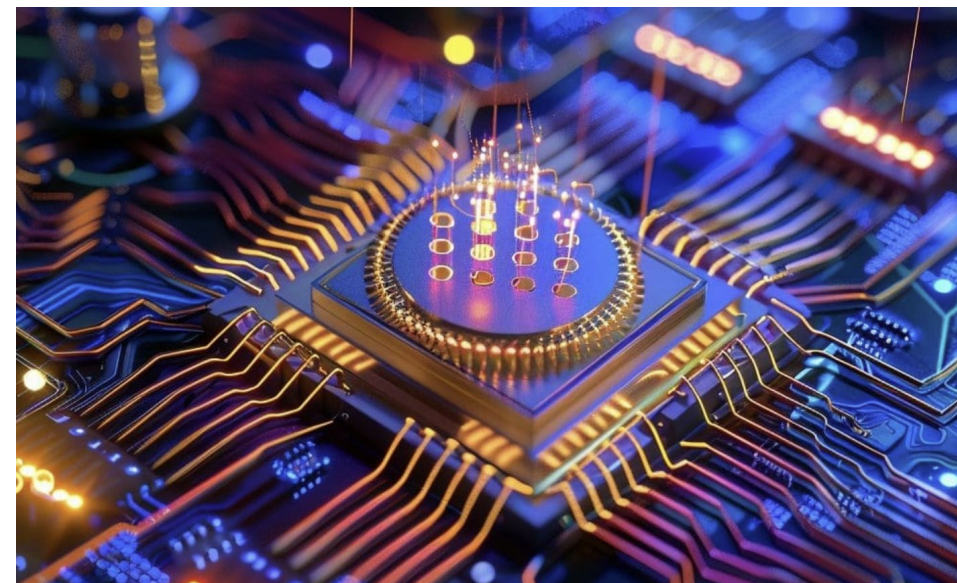
si eccitano solo transizioni fra i due livelli fondamentali

$$|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$$

E' nato il qubit superconduttivo!

$|0\rangle$ = ground state

$|1\rangle$ = primo eccitato



**con transizioni
controllate da microonde**

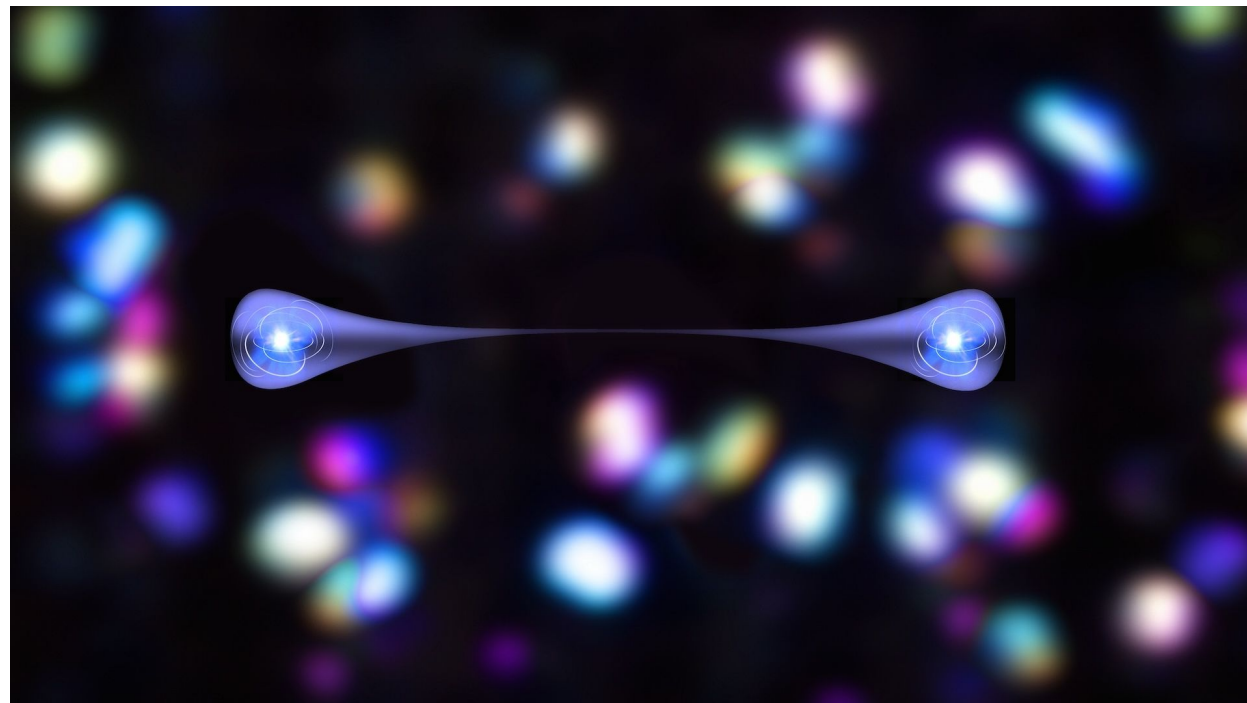
Principio di sovrapposizione e problema della misura, verso la teoria unificata

La linearità dell'equazione di Schrödinger $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$

è il motivo del modo unico in cui si calcola la probabilità in meccanica quantistica :

$$|\text{somma delle ampiezze}|^2$$

Nel mondo quantistico gli oggetti vivono in una sovrapposizione dei loro possibili stati



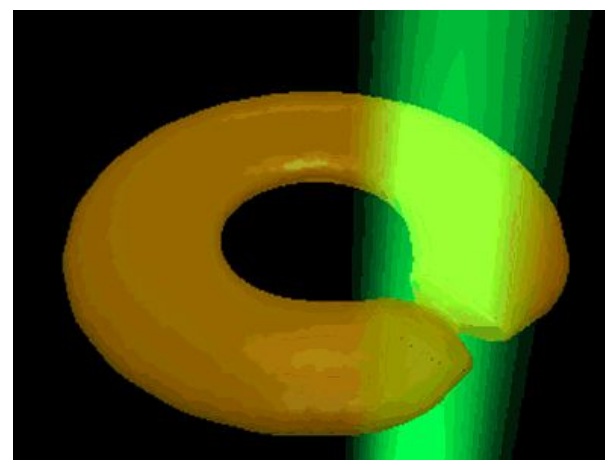
Principio di sovrapposizione e problema della misura, verso la teoria unificata

Nella transizione dal mondo quantistico a quello classico
(macroscopico) la sovrapposizione viene distrutta

questa transizione (decoerenza) non è codificata nella Meccanica
Quantistica, ma nelle **teorie unificate di gravità e quantistica**

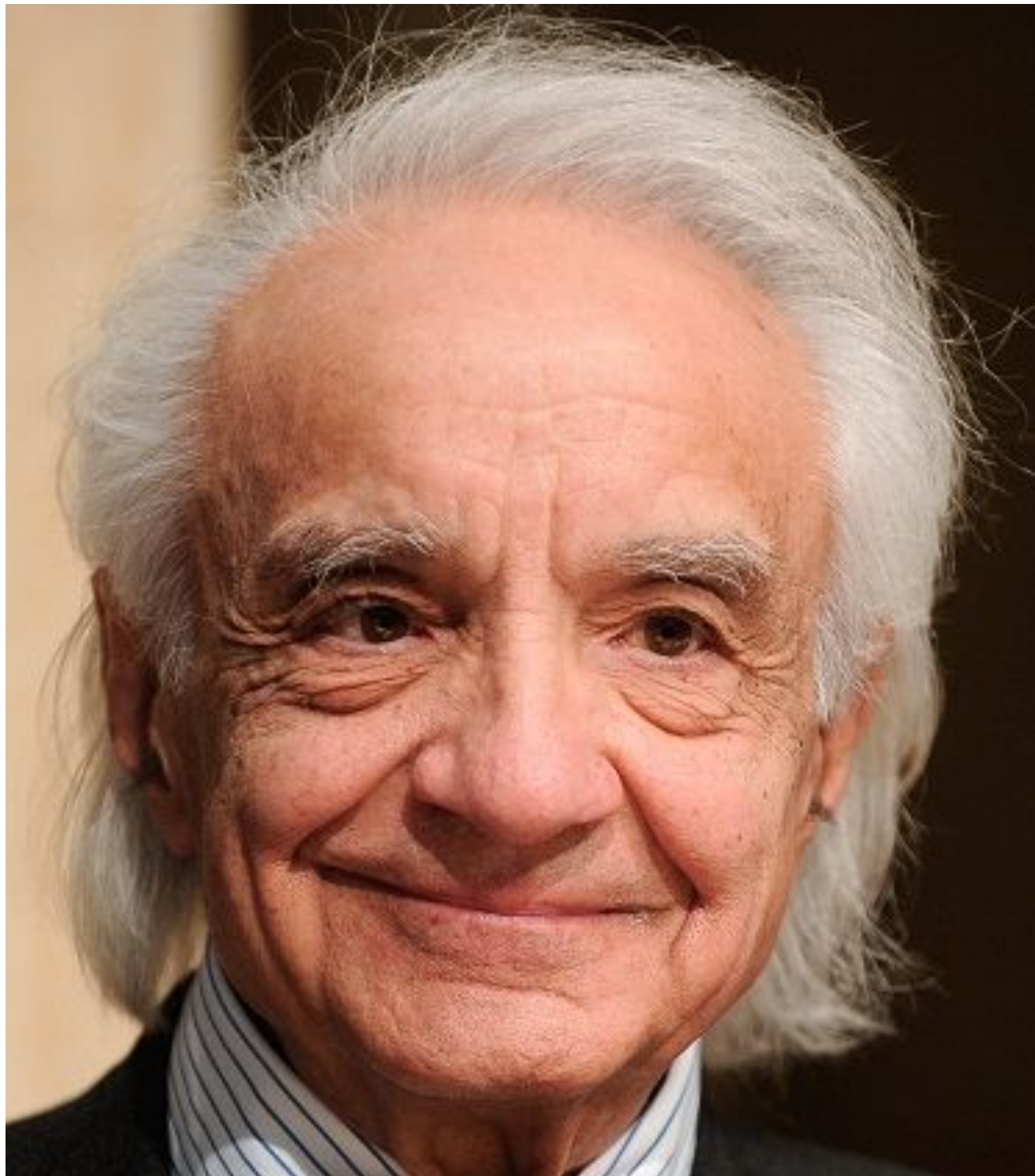
collasso, quantum gravity, post-quantum theory of classical gravity ...

**Gli SQUIDS (superconducting quantum interference device) evoluzione
della tecnologia di Clarks, Devoret Martinis**



**potrebbero permettere di verificare se e come la gravità si accoppia al
mondo quantistico aiutando a guidarci verso una teoria unificata.**

In memoria del Prof. Antonino Zichichi



GRAZIE !!