

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025

"for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit"

John Clarke



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

Michel H. Devoret



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

John M. Martinis



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

100 YEARS OF QUANTUM IS JUST THE BEGINNING

The 2025 International Year of Quantum Science and Technology (IYQ) recognizes 100 years since the initial development of quantum mechanics. Join us in engaging with quantum science and technology and celebrating throughout the year!

La storia in breve

1925 Nasce ufficialmente la Meccanica Quantistica

1935-1980 Dubbi, paradossi e prime applicazioni quantistiche 1.0

1970-1990 Strumenti teorici e tecnologici per la fase 2.0

1990-2005 Svolta 2.0 e costruzione di oggetti quantistici macroscopici

2005-2025 Impatto della **seconda rivoluzione quantistica**

2025 International Year of Quantum Sciences and Technologies

2025 Premio Nobel per la Fisica a J. Clarke, M.H. Devoret e J.M. Martinis

Parte 1: i Paradossi

La **Meccanica Quantistica** (MQ) spiega con successo il mondo **microscopico**.

Però descrive un mondo "bizzarro":

- Collasso della funzione d'onda (misura/osservazione)
- Sovrapposizione (essere in più posti/stati)
- Entanglement (connessioni a distanza)
- Tunneling (attraversare le barriere)
- Livelli Discreti (energie quantizzate)
- e non finisce qui...

Nel **macroscopico** la **Fisica Classica** emerge.

Perché? Questi effetti vengono cancellati dalla **decoerenza**

- l'interazione con l'ambiente (calore, luce, aria...) "misura" costantemente l'oggetto
- la coerenza (base di sovrapposizione e entanglement) viene distrutta "istantaneamente"
- resta una "mistura" classica stati quantistici: il mondo come lo vediamo

Parte 1: i Paradossi

La **Meccanica Quantistica** spiega con successo il mondo **microscopico**

... ma per molti è filosoficamente non accettabile (inclusi Schrödinger e Einstein).

Gli aspetti "bizzarri" nel mondo microscopico (e quindi non osservabili direttamente) portano a formulare dei paradossi ormai famosi:

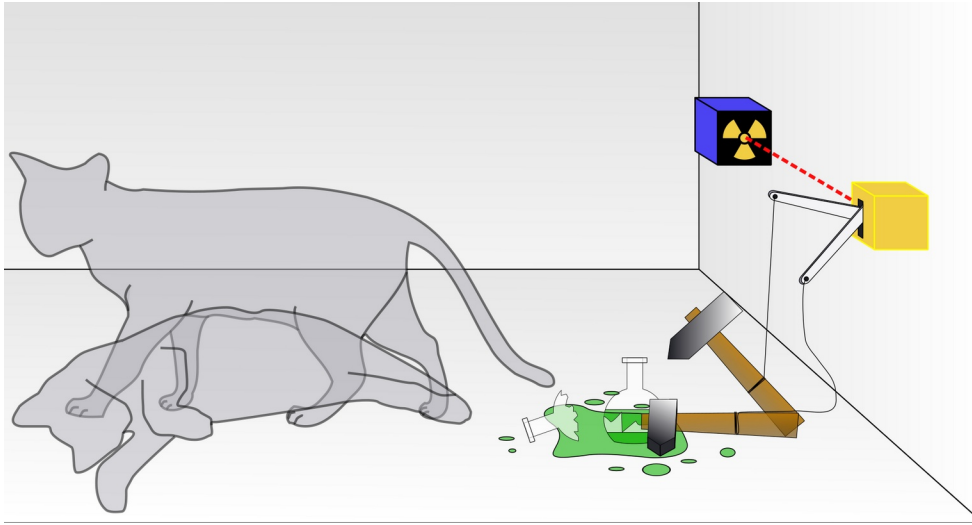
- Paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)
- Paradosso del Gatto di Schrödinger

Per 40 anni sono rimasti solo speculazioni filosofiche (*gedankenexperimente*).

Il Paradosso del Gatto di Schrödinger

il decadimento di un nucleo provoca l'avvelenamento del gatto

il decadimento del nucleo è un processo quantistico con una sua probabilità



tempo ↓

$$\begin{aligned} & |\text{cat alive}\rangle |\text{nucleus stable}\rangle \\ & |\text{cat alive}\rangle |\text{nucleus stable}\rangle + |\text{cat dead}\rangle |\text{nucleus decayed}\rangle \\ & |\text{cat dead}\rangle |\text{nucleus decayed}\rangle \end{aligned}$$

dove sta il paradosso?

- il sistema nucleo-gatto è descritto da uno **stato quantistico entangled e sovrapposto**
- solo l'osservatore esterno (misura) può riportare tutto alla normalità "classica"
- lo stato quantistico sembra ragionevole per il nucleo ma non per il gatto
- possibile che un essere vivente sia in sovrapposizione fino all'osservazione?
- ma soprattutto: **dov'è il confine quantistico-classico?**

Il Paradosso del Gatto di Schrödinger

il decadimento di un nucleo provoca l'avvelenamento del gatto

il decadimento del nucleo è un processo quantistico con una sua probabilità



tempo

$$\begin{array}{l} | \text{cat} 1 \rangle | \text{radio} 0 \rangle \\ | \text{cat} 1 \rangle | \text{radio} 0 \rangle + | \text{cat} 0 \rangle | \text{radio} 1 \rangle \\ | \text{cat} 0 \rangle | \text{radio} 1 \rangle \end{array}$$

dove sta il paradosso?

- il sistema nucleo-gatto è descritto da uno **stato quantistico entangled e sovrapposto**
- solo l'osservatore esterno (misura) può riportare tutto alla normalità “classica”
- lo stato quantistico sembra ragionevole per il nucleo ma non per il gatto
- possibile che un essere vivente sia in sovrapposizione fino all'osservazione?
- ma soprattutto: **dov'è il confine quantistico-classico?**

La rivoluzione quantistica 1.0 all'opera

Mettendo da parte i dubbi filosofici, la MQ può essere sfruttata: rivoluzione quantistica 1.0

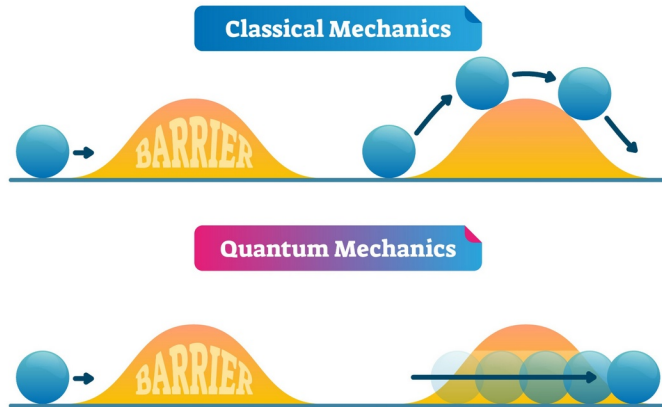
Le celle di memoria dei dischi a stato solido funzionano grazie al **tunneling quantistico**[†].

Un elettrodo isolato viene caricato e scaricato (stato 0 e 1) favorendo il passaggio quantistico (incoerente) di un gran numero di elettroni attraverso la barriera isolante.

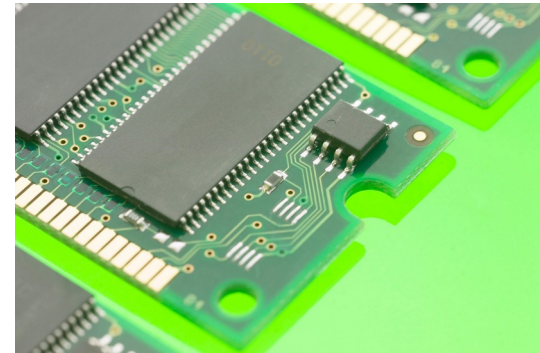
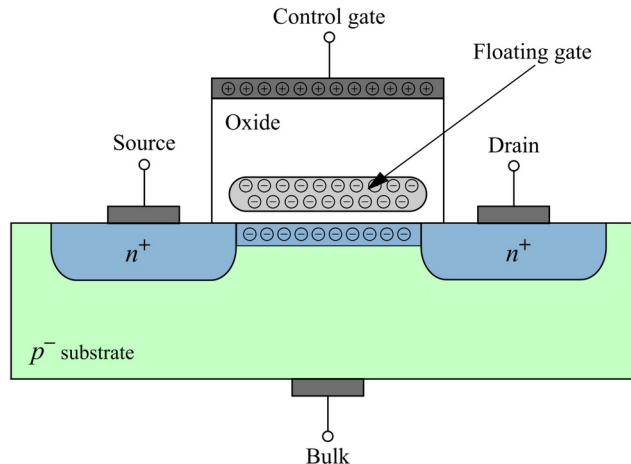
Il processo è **quantistico** ma il risultato finale è **classico**: stato 0 o stato 1.

Incoerenza: gli elettroni passano attraverso la barriera indipendentemente.

Tunneling quantistico



Floating Gate MOSFET

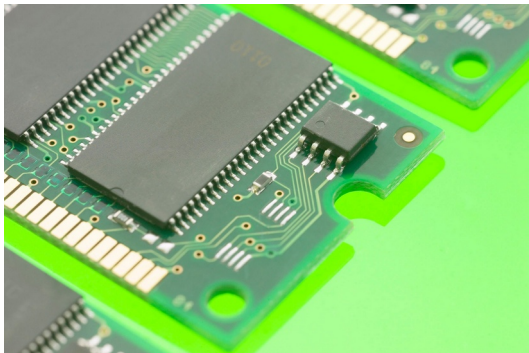
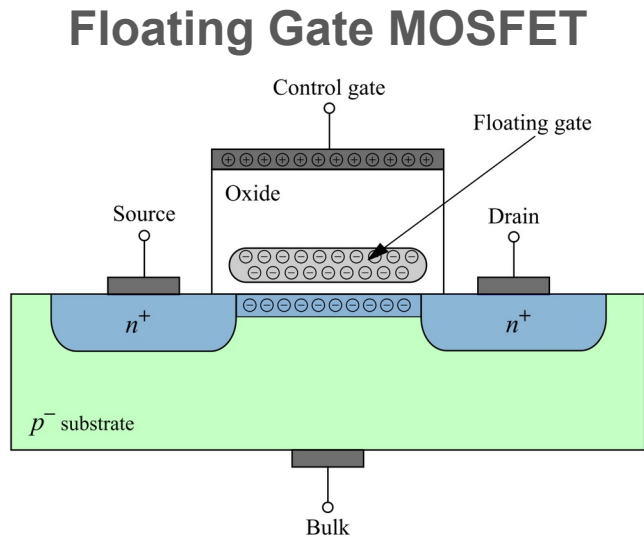
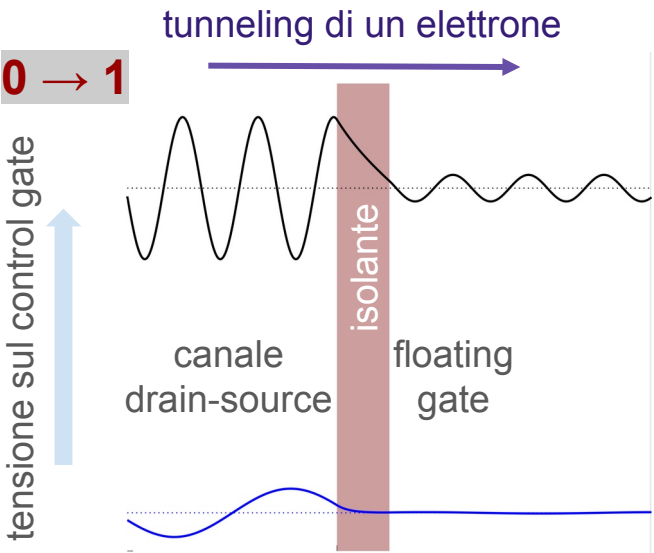


[†] L. Esaki, Nobel 1973

La rivoluzione quantistica 1.0 all'opera

Mettendo da parte i dubbi filosofici, la MQ può essere sfruttata: rivoluzione quantistica 1.0

Le celle di memoria dei dischi a stato solido funzionano grazie al **tunneling quantistico**[†].
Un elettrodo isolato viene caricato e scaricato (stato 0 e 1) favorendo il passaggio quantistico (incoerente) di un gran numero di elettroni attraverso la barriera isolante.
Il processo è **quantistico** ma il risultato finale è **classico**: stato 0 o stato 1.
Incoerenza: gli elettroni passano attraverso la barriera indipendentemente.



[†] L. Esaki, Nobel 1973

Parte 2: La fine della Filosofia

In 40 anni la **teoria** fa passi avanti:

- diseguaglianze di Bell
- teoria della misura quantistica e come superare SQL
- sistemi quantistici aperti e decoerenza

Ma anche la **tecnologia**.

Negli anni '70-'80 gli strumenti diventano sensibili a sufficienza per **testare i paradossi**:

- Haroche e Wineland (Nobel 2012) creano e osservano **cat states** (sovrapposizioni di stati quantistici) con atomi e fotoni: esplorano il confine classico/quantistico e studiano “dal vivo” la decoerenza.
- Aspect, Clauser e Zeilinger (Nobel 2022) risolvono il **paradosso EPR** (Nobel 2022): usando i fotoni dimostrano che la *spooky action at a distance* è reale.
L'entanglement è una risorsa!

Strumenti “vecchi” per nuovi esperimenti sul limite classico/quantistico

Resta da stabilire se anche **oggetti macroscopici** possano comportarsi secondo la MQ
I gatti sicuramente no, ma altri oggetti macroscopici in condizioni particolari?

Nel 1978 **A. Leggett** (premio Nobel 2003 per l'elio superfluido) propone come fare
l'esperimento del gatto con superconduttori o superfluidi.

Ingredienti base

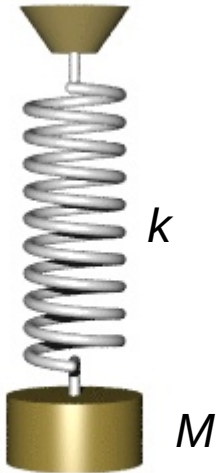
- l'oscillatore armonico
- la superconduttività (e la giunzione Josephson)

L'Oscillatore Armonico

È il "mattoncino base" della fisica: semplice, **completamente risolvibile** (classico o quantistico), da cui costruire infiniti modelli.

Moto di una variabile di posizione in un potenziale parabolico.

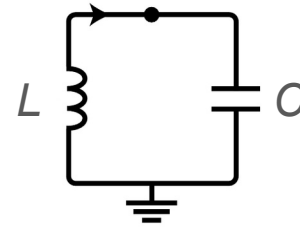
oscillatori armonici
meccanici



$$E = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2$$



$$E = \frac{1}{2}C\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2L}\phi^2$$



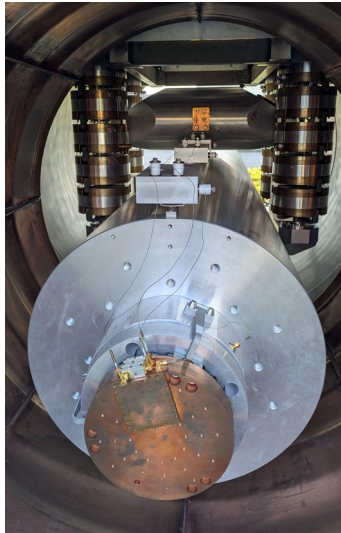
circuito elettrico
risonante



L'Oscillatore Armonico meccanico quantistico

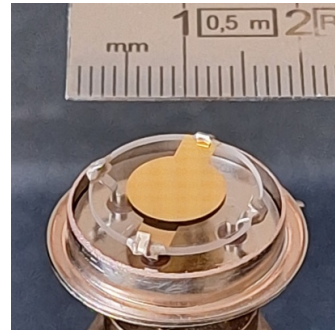
- Il "confine" classico/quantistico (il Gatto) riappare come problema pratico nella misura quantistica ed è di particolare interesse negli anni '80 per la ricerca delle **onde gravitazionali**.
- Il **Principio di indeterminazione di Heisenberg** non è solo teoria: impone un "rumore" di misura inevitabile (*quantum back-action*).
- Questo rumore crea un limite fisico: il **Limite Quantistico Standard (SQL)**.
- Per i rivelatori di Onde Gravitazionali l'SQL non è filosofia, è il limite pratico che impedisce di misurare forze piccolissime. La sfida è riuscire a misurare *sotto* questo limite quantistico.

Antenna
Gravitazionale
NAUTILUS

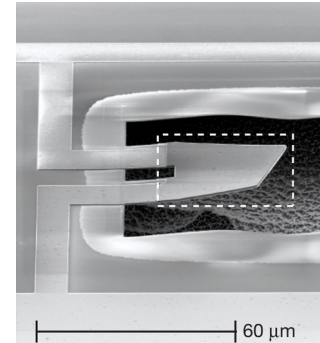


kHz

Antenna gravitazionale
di BAUSCIA



MHz



oscillatore
meccanico
quantistico

GHz

L'ingrediente fondamentale: la Superconduttività

Fenomeno spiegato nel 1957 dalla teoria BCS (Nobel nel 1972, un altro successo della MQ).

ASSENZA DI DISSIPAZIONE

- A basse T , i metalli superconduttori hanno **resistenza nulla** (hanno anche diamagnetismo perfetto, quantizzazione del flusso magnetico...).
- L'assenza di R elimina la dissipazione interna, una fonte primaria di decoerenza.

STATO QUANTISTICO MACROSCOPICO

- Gli elettroni formano Coppie di Cooper.
- Tutte le coppie (10^{23}) "condensano" in un unico stato quantistico.
- L'intero **stato macroscopico** è descritto solo dalla fase δ (una coordinata collettiva).
- Il gradiente di $\delta \rightarrow$ movimento coerente (supercorrente).

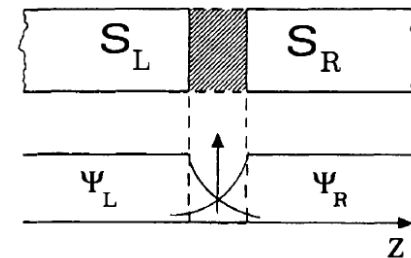
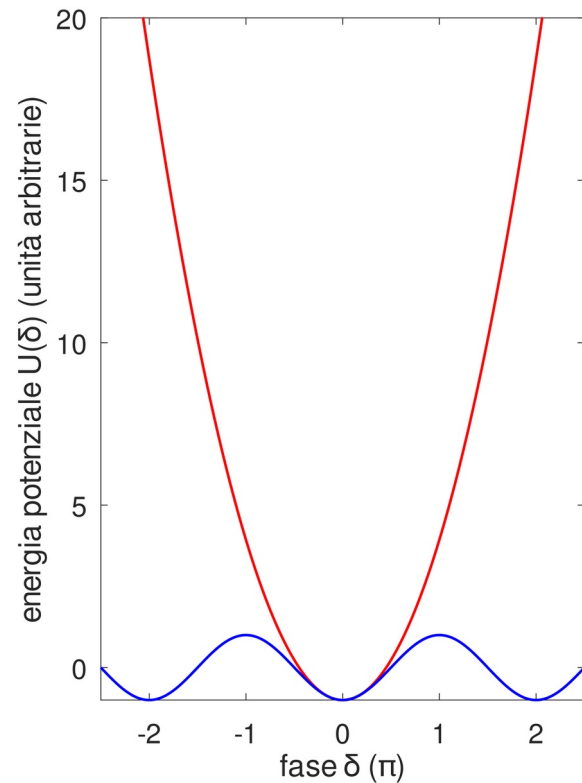
APPLICAZIONE

Un circuito LC superconduttore ($R=0$, descritto da δ)
è un **Oscillatore Armonico ideale, senza dissipazione.**

La frequenza caratteristica $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ è facilmente nelle microonde (1-10 GHz): con $T < hf_0/k_B$ (ovvero $T \ll 0.1\text{K}$) l'oscillatore va trattato come un sistema quantistico macroscopico.

Oltre il principio di corrispondenza: l'Oscillatore Anarmonico

A bassa T un circuito LC superconduttore è un oscillatore armonico quantistico con **livelli energetici discreti** in un potenziale parabolico ($U(\delta) \propto \delta^2$), ma equispaziati e “vicini”: la dinamica di δ è in **corrispondenza** con quella di un oscillatore classico. E' difficile vedere effetti quantistici.



La soluzione è la giunzione Josephson

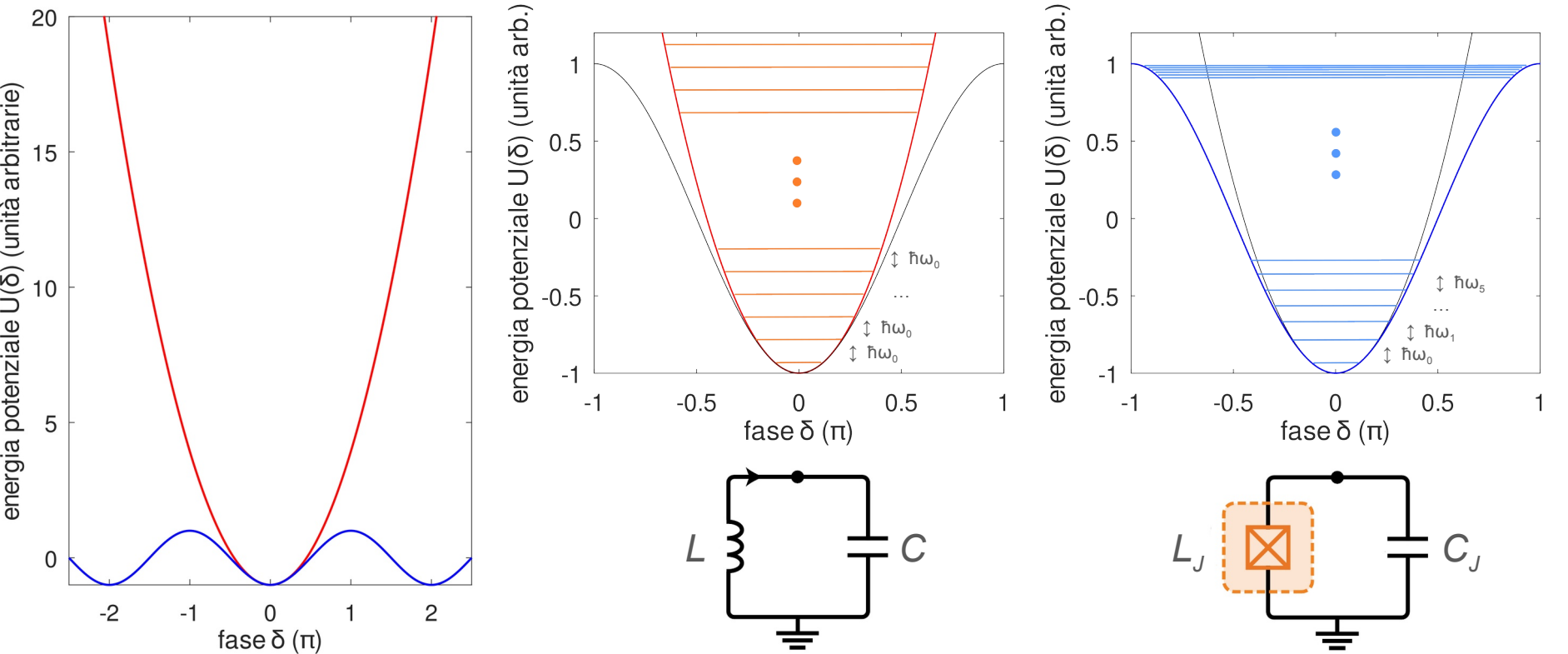
2 superconduttori separati da una barriera isolante sottilissima. Le coppie di Cooper l'attraversano senza danneggiare la coerenza dei 2 condensati (tunneling quantistico) le cui fasi si legano (la fase δ che conta ora è la loro differenza).

Si comporta come un **induttore non lineare** $L=L(I)$ con una C in parallelo.

La Giunzione Josephson è come un circuito LC, ma ha un potenziale $U(\delta) \propto \cos(\delta)$

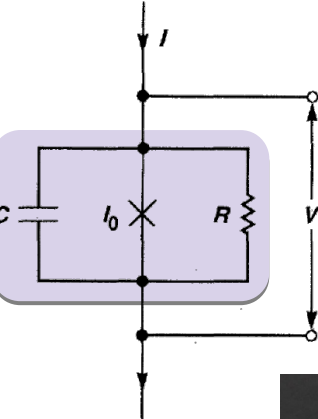
Oltre il principio di corrispondenza: l'Oscillatore Anarmonico

A bassa T un circuito LC superconduttore è un oscillatore armonico quantistico con **livelli energetici discreti** in un potenziale parabolico ($U(\delta) \propto \delta^2$), ma equispaziati e “vicini”: la dinamica di δ è in **corrispondenza** con quella di un oscillatore classico. E' difficile vedere effetti quantistici.

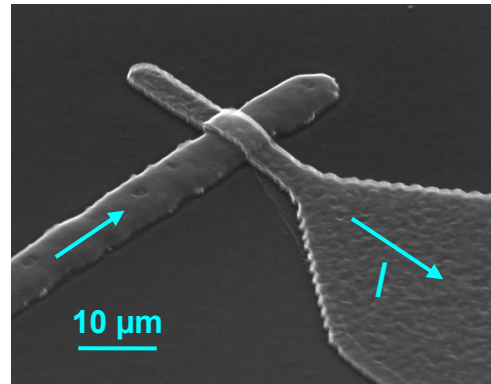


Gli esperimenti del Nobel: giunzione Josephson polarizzata in corrente

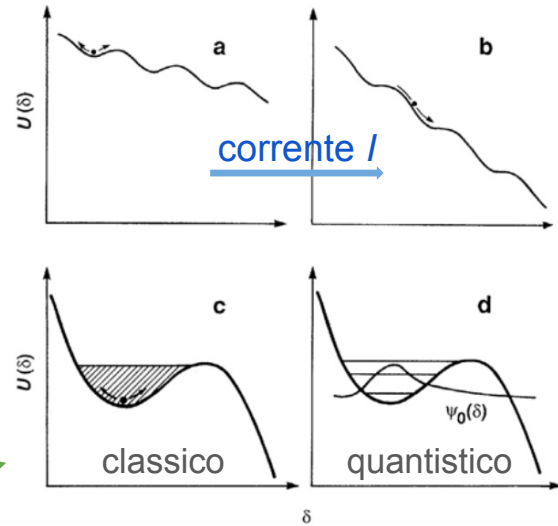
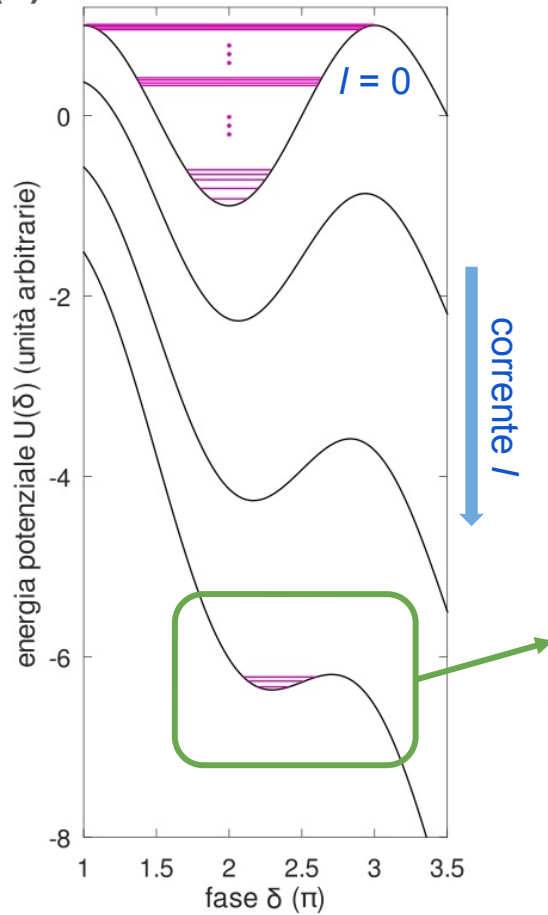
Con la corrente I si regola il potenziale $U(\delta)$ fino ad avere un sistema quantistico con pochi **livelli discreti di energia**



$V = 0$ finché il sistema rimane su uno dei livelli discreti



(questo è un fake)



Obiettivo: dimostrare i livelli discreti e il tunneling quantistico

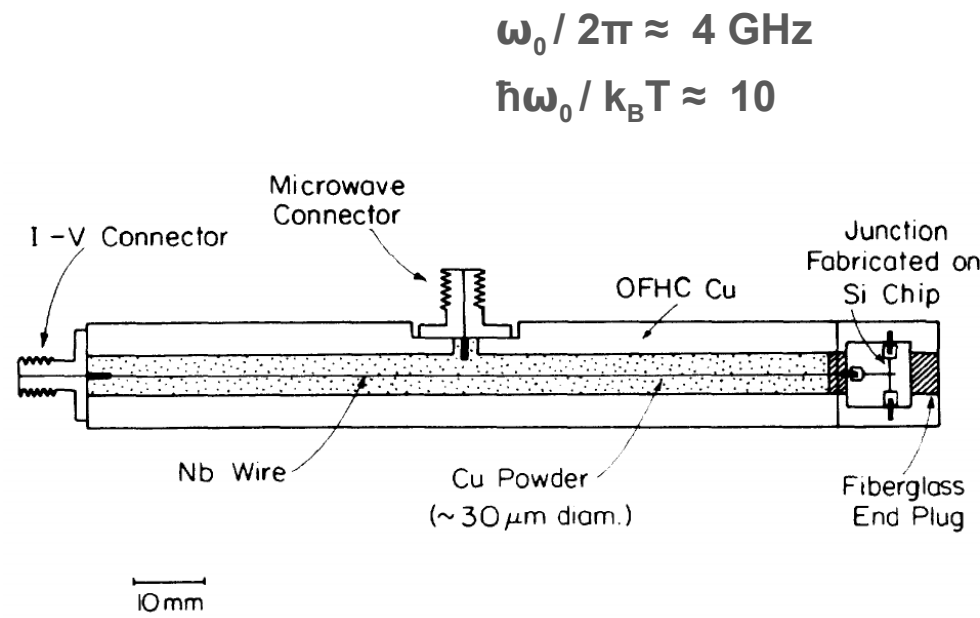
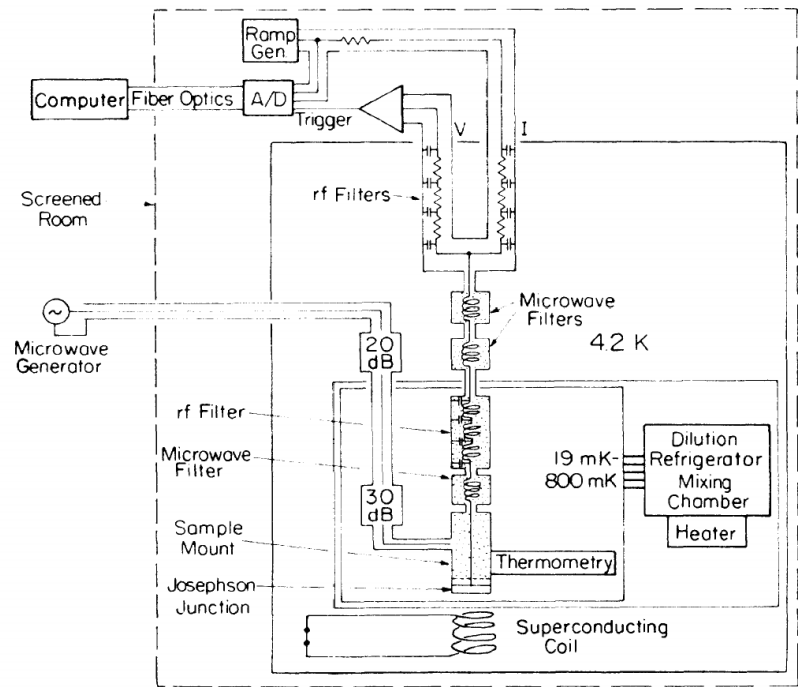
Gli esperimenti del Nobel: come battere la decoerenza

La superconduttività elimina la **dissipazione** ($R=0$), la prima causa di decoerenza.

Il collegamento al mondo esterno per "osservare" il sistema introduce nuova decoerenza.

Soluzione da Nobel: **temperature bassissime** (10 mK) e nuove tecniche di isolamento estremo.

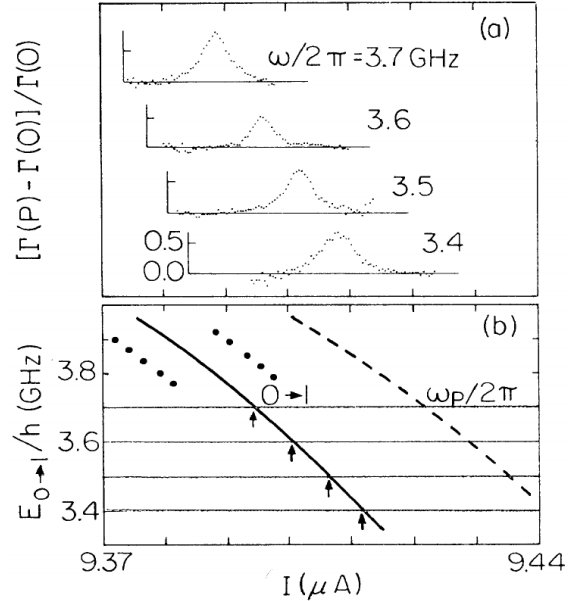
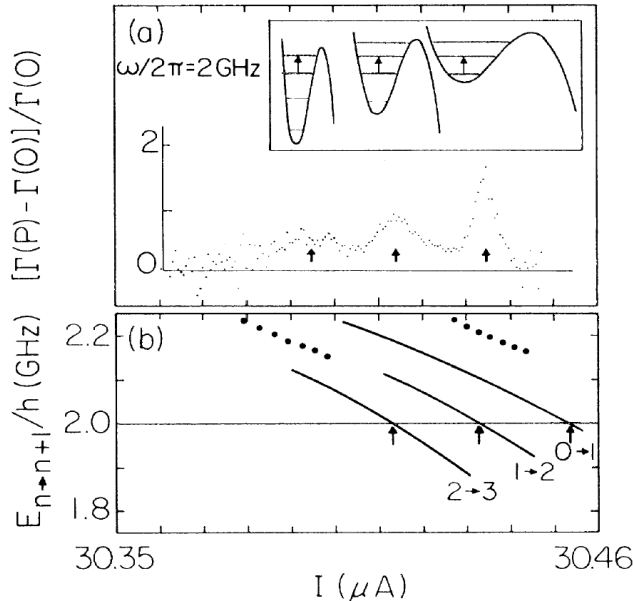
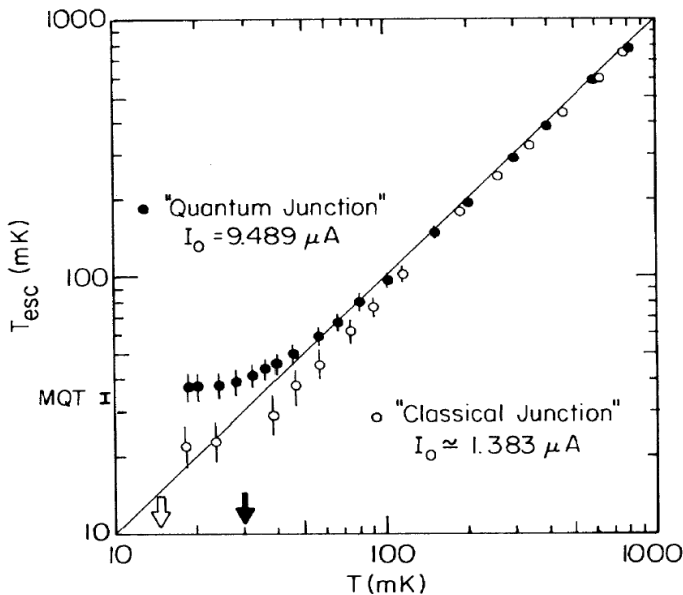
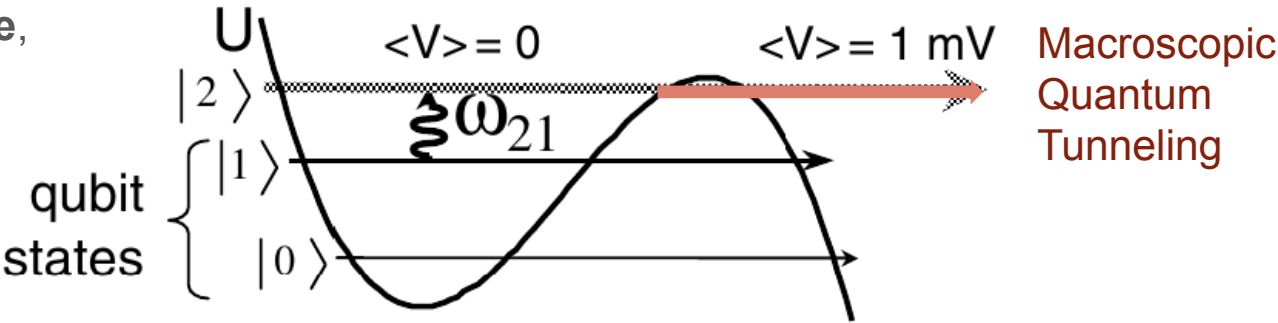
Si ottiene un tempo di **coerenza di ~10 ns**, sufficiente per dimostrare che il sistema è quantistico



$$\omega_0 / 2\pi \approx 4 \text{ GHz}$$
$$\hbar\omega_0 / k_B T \approx 10$$

Gli esperimenti del Nobel: Macroscopic Quantum Tunneling e spettroscopia

E' come un **atomo artificiale**,
ma con i livelli "regolabili".
E' ingegnerizzabile e viene
chiamato **phase qubit**.



La Prova Definitiva: Le Oscillazioni di Rabi

Come si prova di aver creato una sovrapposizione tra stati macroscopici?

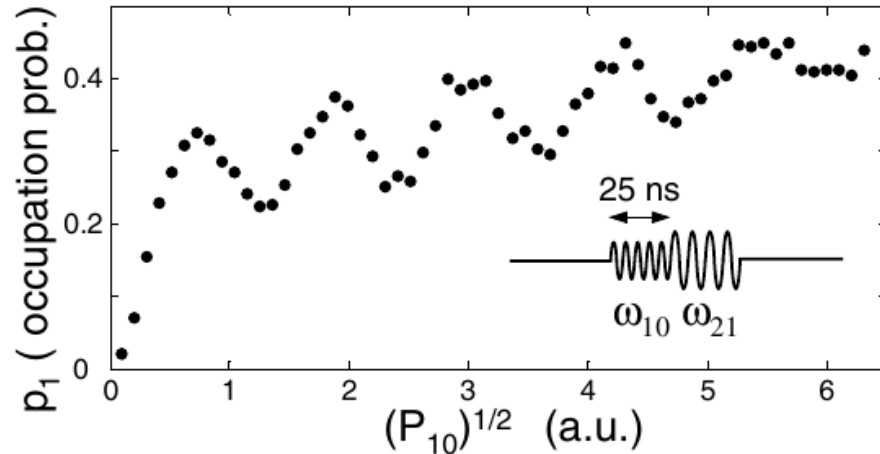
Si “colpisce” l’atomo (qubit) con un impulso a **microonde**.

Variando la durata o l’ampiezza dell’impulso, lo stato **oscilla coerentemente tra $|0\rangle$ e $|1\rangle$** .

Questa è la firma della manipolazione quantistica.

Un impulso corto (un impulso “ $\sqrt{\pi/2}$ ”) crea lo stato di **sovrapposizione** perfetto: $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$.

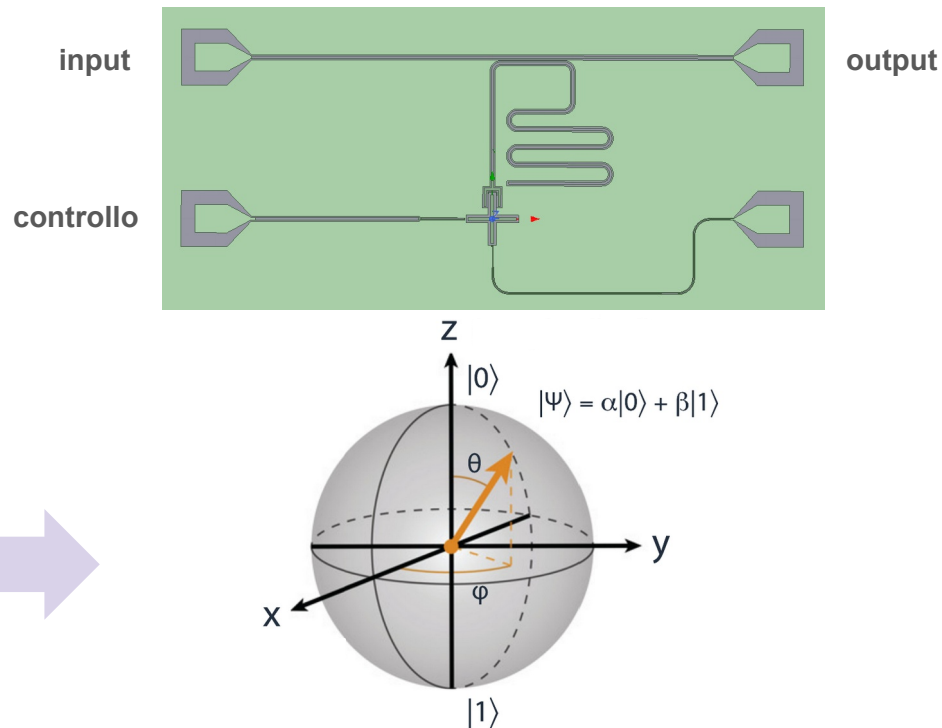
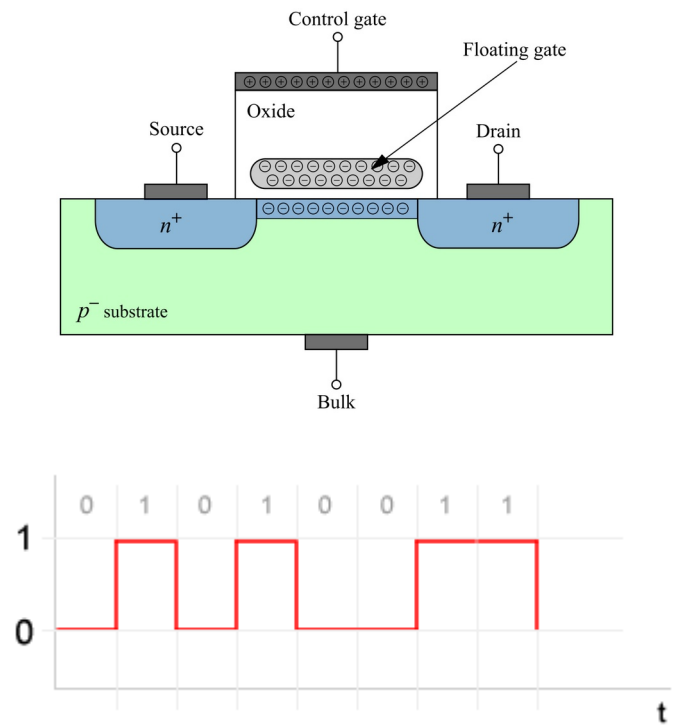
Questa è la nascita del **qubit superconduttore** come strumento pratico.



il sistema rimane coerente per soli 10 ns...
per questo non si osserva l’oscillazione completa
si farà di meglio: oggi quasi 1 ms!

Dai bit ai qubit

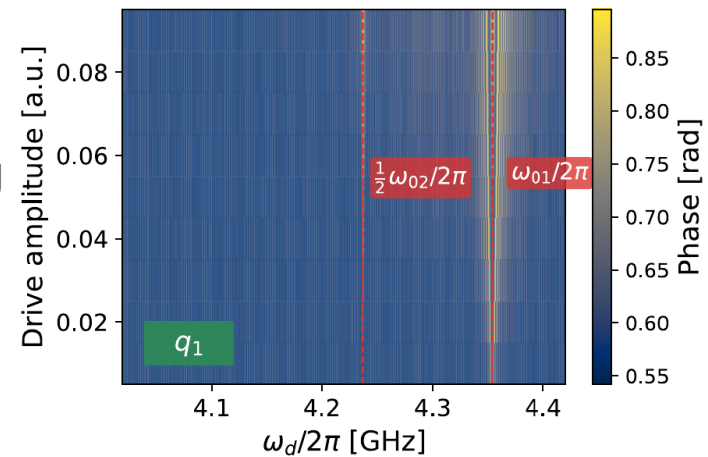
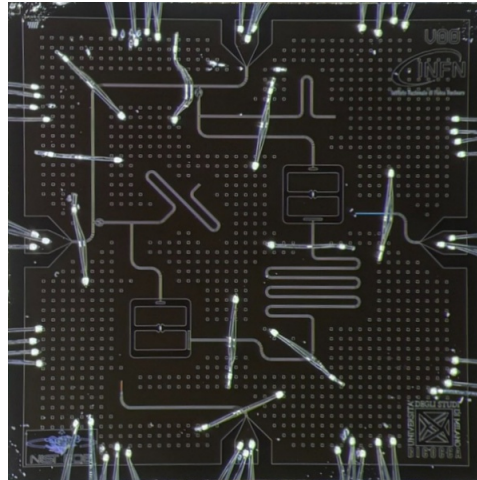
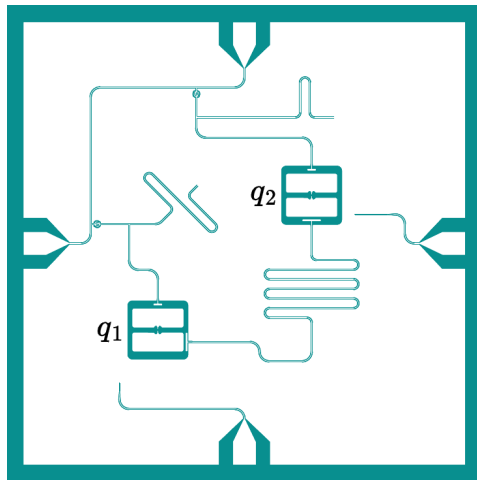
Oggi i circuiti superconduttori sono una delle piattaforme più avanzate per realizzare **qubit**.
Nuovi design, nuovi materiali e altro permettono tempi di coerenza fino a 1 ms.
Al via i primi computer quantistici per simulazioni e calcolo, ma anche sensori ultra-sensibili.



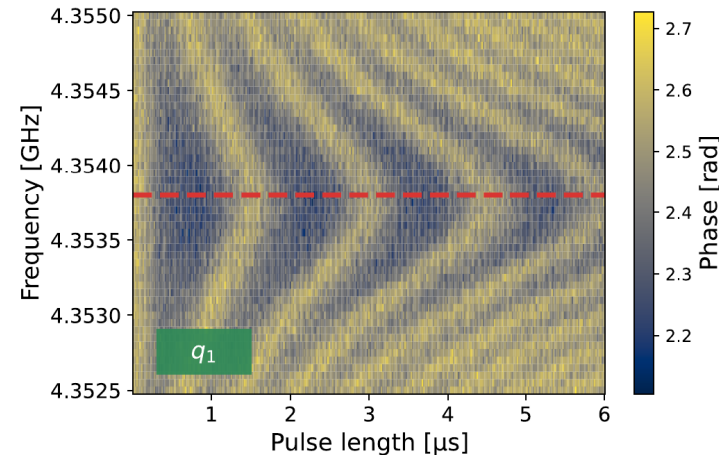


E cosa facciamo noi in Bicocca?

sviluppiamo circuiti superconduttori quantizzati per applicazioni di **quantum simulation** e **quantum sensing**



livelli energetici quantizzati



sovrapposizione (oscillazioni di Rabi)



Bibliografia

[1] M. H. Devoret, J. M. Martinis, and J. Clarke, "Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, no. 18, pp. 1908–1911, Oct. 1985, doi: 10.1103/PhysRevLett.55.1908.

[2] J. M. Martinis, M. H. Devoret, and J. Clarke, "Energy-Level Quantization in the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 55, no. 15, pp. 1543–1546, Oct. 1985, doi: 10.1103/PhysRevLett.55.1543.

[3] D. Esteve, M. H. Devoret, and J. M. Martinis, "Effect of an arbitrary dissipative circuit on the quantum energy levels and tunneling of a Josephson junction," *Phys. Rev. B*, vol. 34, no. 1, pp. 158–163, Jul. 1986, doi: 10.1103/PhysRevB.34.158.

[4] J. M. Martinis, M. H. Devoret, and J. Clarke, "Experimental tests for the quantum behavior of a macroscopic degree of freedom: The phase difference across a Josephson junction," *Phys. Rev. B*, vol. 35, no. 10, pp. 4682–4698, Apr. 1987, doi: 10.1103/PhysRevB.35.4682.

[5] J. Clarke, A. N. Cleland, M. H. Devoret, D. Esteve, and J. M. Martinis, "Quantum Mechanics of a Macroscopic Variable: The Phase Difference of a Josephson Junction," *Science*, vol. 239, no. 4843, pp. 992–997, Feb. 1988, doi: 10.1126/science.239.4843.992.

[6] M. H. Devoret, D. Esteve, H. Grabert, G.-L. Ingold, H. Pothier, and C. Urbina, "Effect of the electromagnetic environment on the Coulomb blockade in ultrasmall tunnel junctions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, no. 15, pp. 1824–1827, Apr. 1990, doi: 10.1103/PhysRevLett.64.1824.

[7] M.H. Devoret - Quantum Fluctuations in Electrical Circuits. In "Quantum Fluctuations" (Les Houches Session LXIII). Elsevier, Amsterdam, 1997

[8] A. J. Leggett, "Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 14, no. 15, pp. R415–R451, Apr. 2002, doi: 10.1088/0953-8984/14/15/201.

[9] A. J. Leggett, "Superconducting Qubits--a Major Roadblock Dissolved?," *Science*, vol. 296, no. 5569, pp. 861–862, May 2002, doi: 10.1126/science.1071703.

[10] J. M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, and C. Urbina, "Rabi Oscillations in a Large Josephson-Junction Qubit," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, no. 11, p. 117901, Aug. 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.89.117901.

[11] J. M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, K. M. Lang, and C. Urbina, "Decoherence of a superconducting qubit due to bias noise," *Phys. Rev. B*, vol. 67, no. 9, p. 094510, Mar. 2003, doi: 10.1103/PhysRevB.67.094510.

[12] A. J. Leggett, "Schrödinger's cat and her laboratory cousins," *Contemporary Physics*, vol. 50, no. 1, pp. 243–258, Jan. 2009, doi: 10.1080/00107510902734748.

[13] A. J. Leggett, "Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement," *Progress of Theoretical Physics Supplement*, vol. 69, no. 0, pp. 80–100, May 2013, doi: 10.1143/PTP.69.80.