



T. Martin

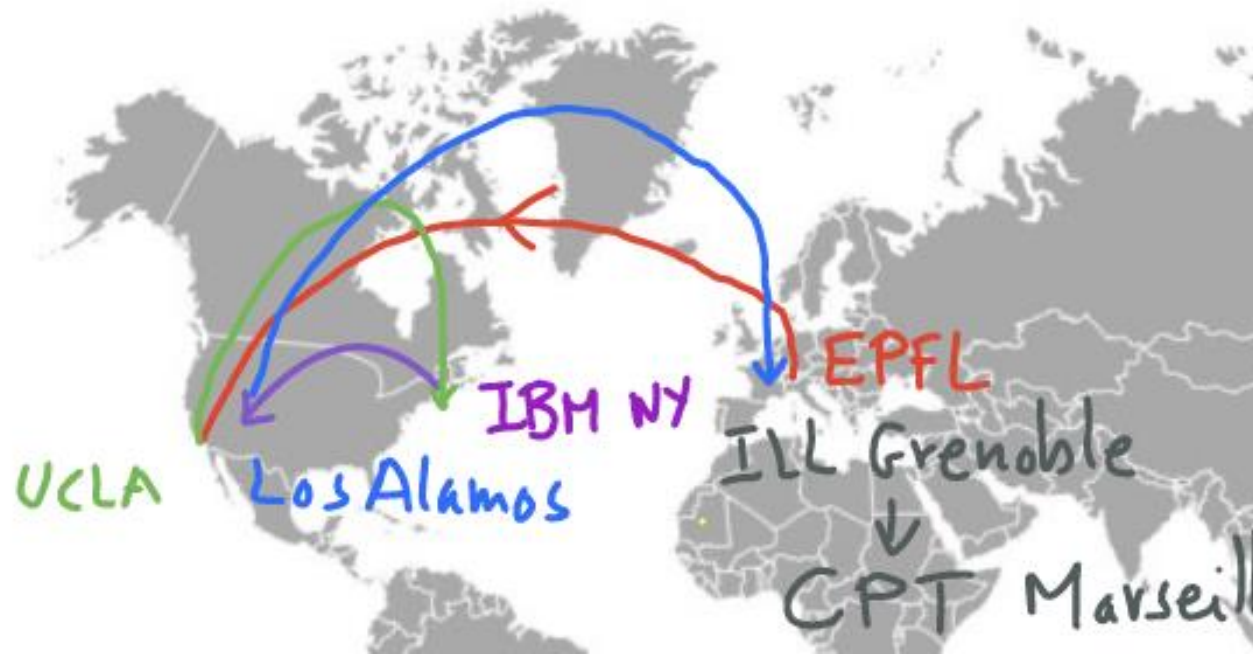
PRCE AMU

Centre de Physique Théorique UMR7332

CNRS-Aix Marseille Université

« **Nobel 2025: circuits supraconducteurs
quantiques et effet Josephson** »

(Hexagone Luminy, 5 mars 2026)





« There is plenty of
room at the
bottom »

R.P. Feynman
Caltech, Pasadena
1966

Certes la physique des hautes énergies est
fascinante.

Mais aux petites échelles de longueur,
basses températures, il y a aussi des
choses intéressantes !

Notre vie de tous les jours est pleine de choses dont « quantique » n'est hélas que le nom...



Many Benefits in 1 Daily Serving

A white bottle of Quantum SuperLysine Immune Support with green and red accents, lying next to a pile of yellow capsules.

- Healthy Immune Response *
- Promotes Collagen Growth*
- Supports Healthy Lips*

*These statements have not been evaluated by Food and Drug Administration. This product is not intended to diagnose, treat, cure, or prevent any disease.

Quantum HEALTH®

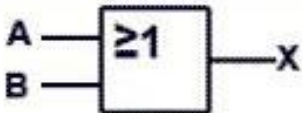
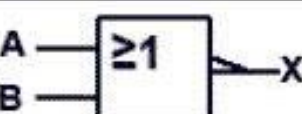
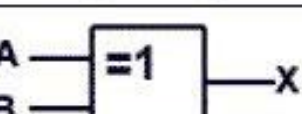
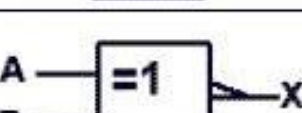
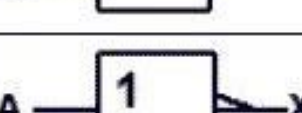
Family-owned in Eugene, Oregon since 1981

For over 40 years, Quantum Health has led the natural products industry with solutions that truly work.

From the start, our focus was to source only the highest quality, research-supported ingredients to ensure product effectiveness.

A collection of various Quantum Health products, including bottles and boxes of supplements and personal care items, arranged on a surface.A stylized illustration of a mountain range with evergreen trees in the foreground, rendered in shades of green and blue.

Les « ordis » fonctionnent avec des opérations de « logique Booléene » : opérations qui à partir de 2 entrés A et B « 0 » ou « 1 » donnent un résultat « 0 » ou « 1 ».

ANSI Symbol	IEC Symbol	NAME
		AND
		OR
		NAND
		NOR
		XOR
		XNOR
		NOT

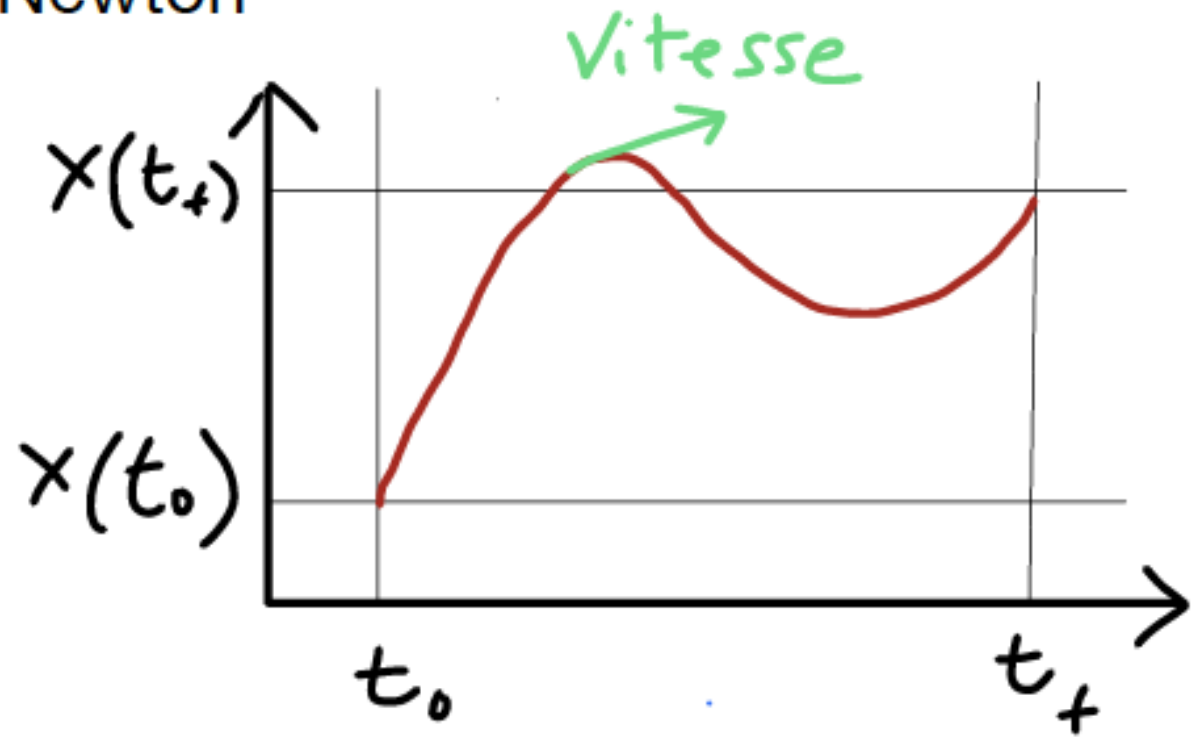
Ordinateur quantiques:
on conçoit des portes logiques « quantiques » où A, B, X, sont une superposition de « 0 » ou « 1 ».

Permet de résoudre des problèmes de manière plus efficace: algorithme de Shor, de Grover, transfo the Fourier...

Est ce qu'un jour les ordis fonctionneront avec la mécanique quantique ?

Pour cela il faut construire $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ un « atome artificiel »

dans le monde qui nous entoure, la mécanique classique convient parfaitement pour décrire le mouvement des objets: équation de Newton



$$m \vec{a} = \vec{F}$$



Ceci est remis en question aux très hautes énergies, aux petites échelles de longueur, et a basse température.

On ne parle pas de trajectoire en physique quantique:
on parle de probabilité de présence, définie comme le module de la
« fonction d'onde ».

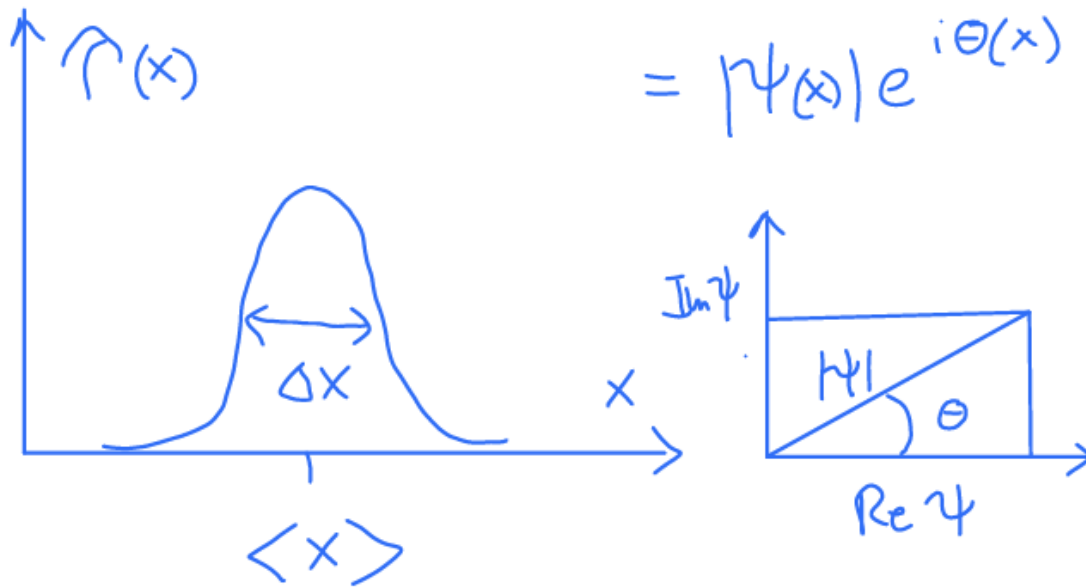
$$dx \mathcal{P}(x) = |\psi(x)|^2 dx$$

Probabilité de trouver la
particule dans $[x; x+dx]$

$$\begin{aligned}\psi(x) &= \text{Re} \psi(x) + i \text{Im} \psi(x) \\ &= |\psi(x)| e^{i\theta(x)}\end{aligned}$$

La fct d'onde est un nombre
complexe déterminé soit par:

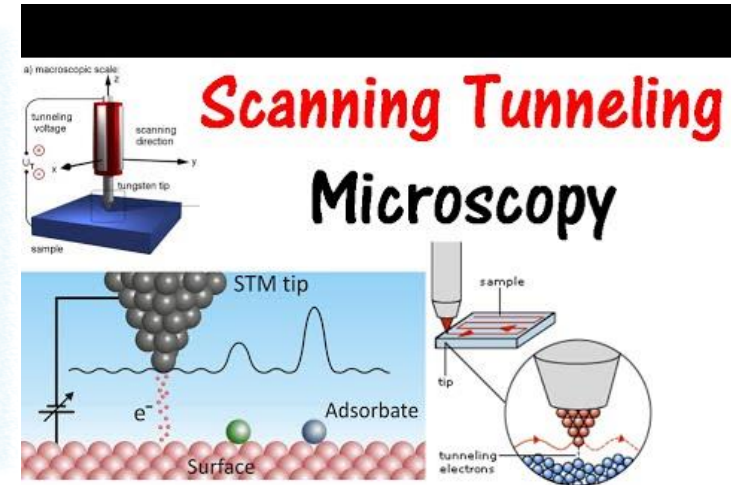
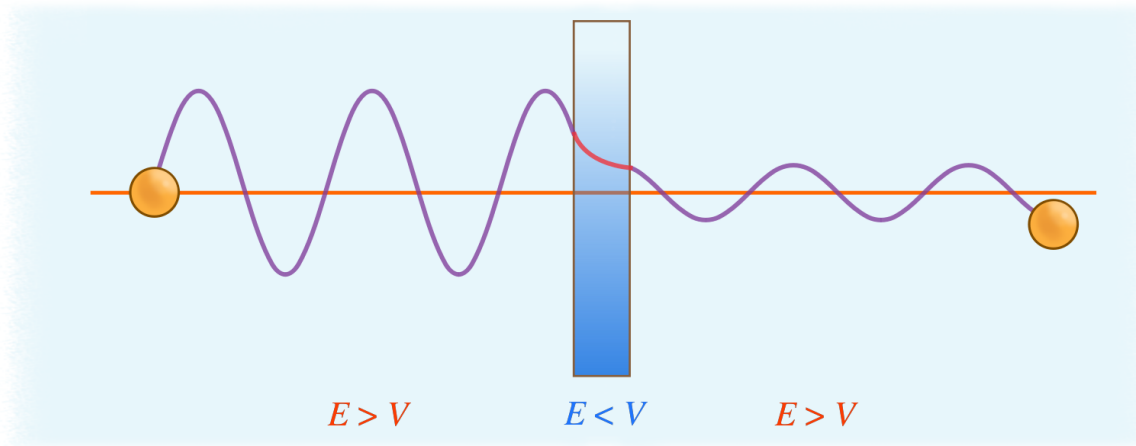
- Une partie réelle/imaginaire
- Une amplitude et un
« angle » c.a.d. une
« phase »



Cette description est utilisée
depuis le XIXe siècle en optique
Vibratoire et en
électrodynamique classique

L'effet tunnel de la mécanique quantique

Quand une particule rencontre un mur elle peut le traverser « un peu »



L'effet tunnel est dû à la dualité onde/corpuscule.

les particules sont des « petites boules, mais elles ont aussi un caractère ondulatoire (fonction d'onde)

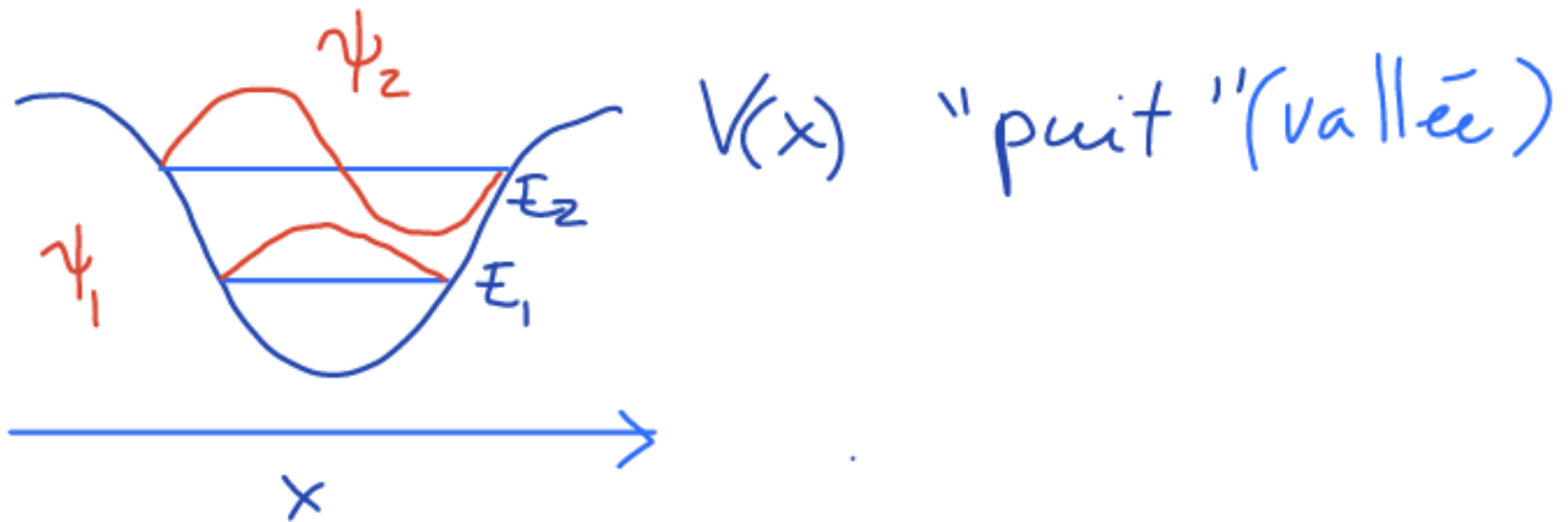
Au milieu du XIX siècle il n'était pas choquant de voir des ondes lumineuses de propager à travers une région évanescence...

Et avec des ondes « de matière » ? Application 1980 (Binnig Rohrer IBM Zurich): microscope à effet tunnel, visualiser les atomes...

1^{er} STM en France: Frank Salvan GPEC Marseille !

Quand on confine une particule dans un potentiel (une vallée),
la particule ne peut avoir que certains niveaux d'énergie discrets (E_1 , E_2)

A chaque énergie E_i (« valeur propre ») correspond
une fonction d'onde ψ_i (« état propre »)



en méca quantique, la position x et l'impulsion $p=mv$,
les variables qui décrivent l'énergie $H(p,x)$ (Hamiltonian),
deviennent des quantités que l'on peut mesurer appelées "observables".

Elles sont représentés par des "opérateurs" (des "objets" qui transforment un état quantique en un autre).

x et p ne commutent pas: $[x ; p] = xp - px = i \hbar$

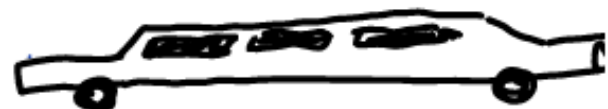
si l'on essayer de les mesurer avec une grande précision, on se heurte
au "principe d'incertitude d'Heisenberg":

si l'on mesure la vitesse/l'impulsion avec un grande précision, on perd l'info
sur la position (et vice versa)

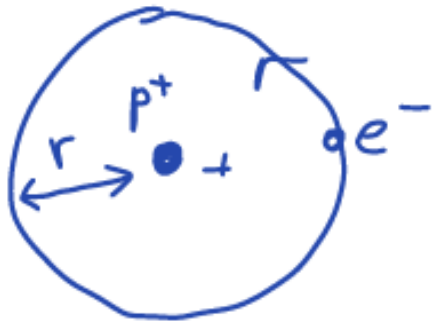
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



Je connais exactement
sa vitesse (grâce à mon
radar Doppler). Mais
est ce une "smart"
ou une limousine?



Comment obtenir le Nobel il y a 1 siècle ? Atome de Bohr pour l'hydrogène



Newton

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

mouvement circulaire
vitesse constante v

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

cinétique Potentielle

La particule est une onde

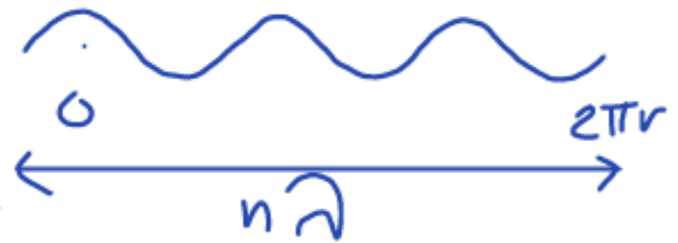
De Broglie $m v = \frac{h i 2\pi}{\lambda}$

impulsion

Constante
de Planck

$$\psi(r) \sim e^{i k r}$$

nombre d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



$$E = - \frac{R_y}{n^2}$$

Résultat
Exact !!!

$$R_y = 13,6 \text{ eV} \\ = 136000^\circ\text{C}$$

En méca quantique, comme en optique, on additionne les amplitudes de ondes → effets d'interférences dûs au « **principe de superposition** »

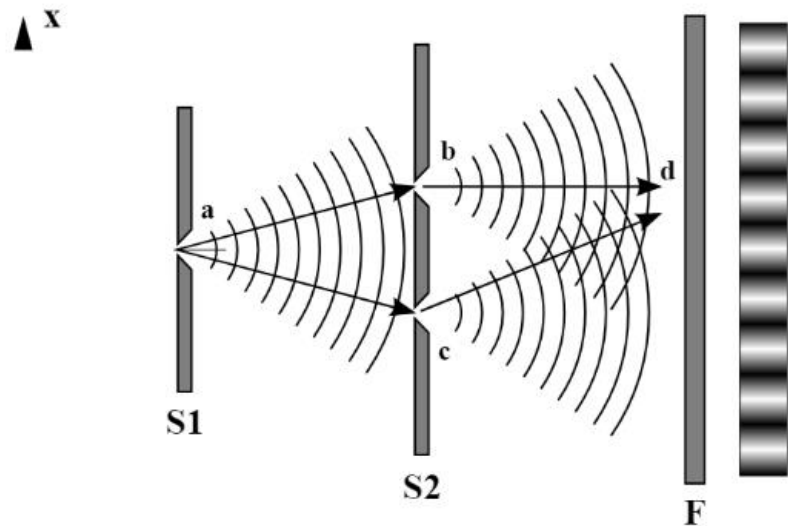
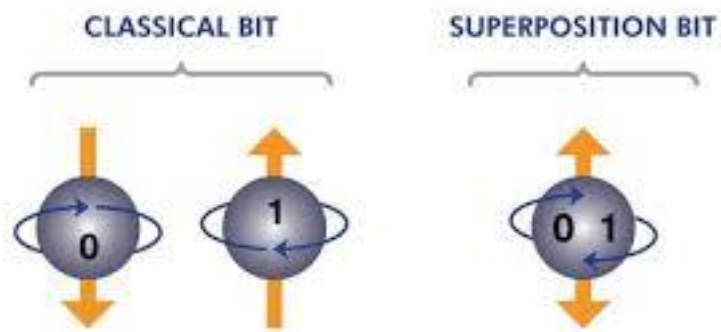


Fig 1: Interference patterns of light obtained after passing light through two slits.



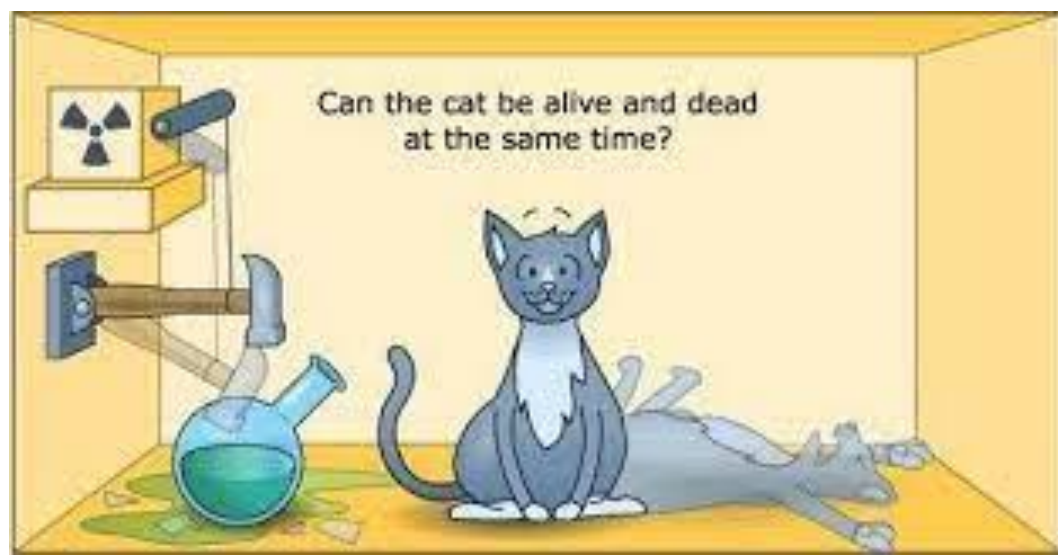
shutterstock.com · 2621511891

Le chat de Schrödinger est à la fois vivant et mort (aussi longtemps que l'on a ps ouvert la boîte)

état quantique constitué de la somme de 2 états différents

$$\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

A l'échelle macroscopique: chat de Schrodinger ?

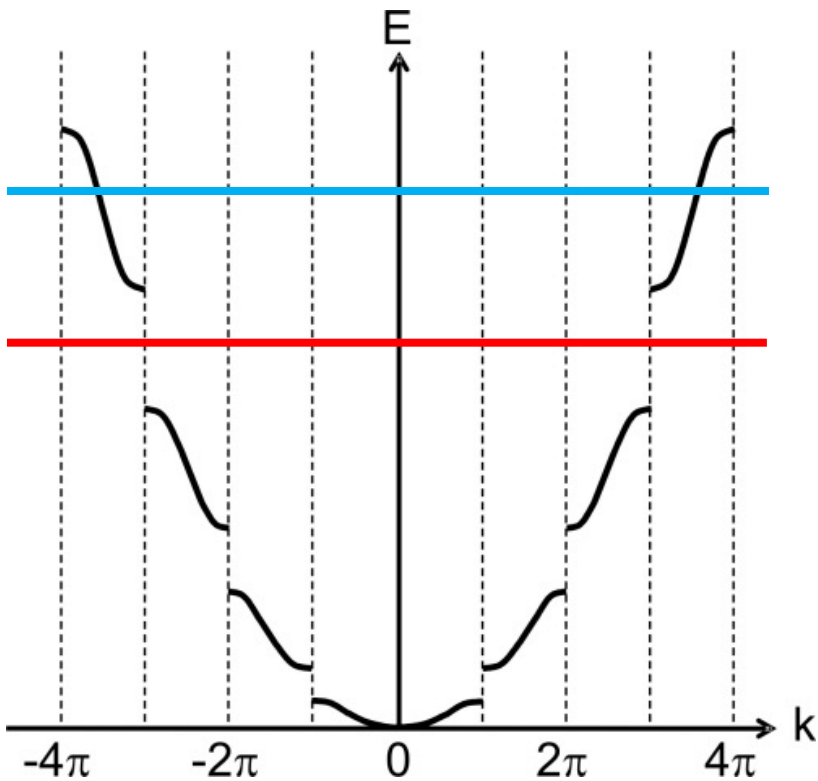
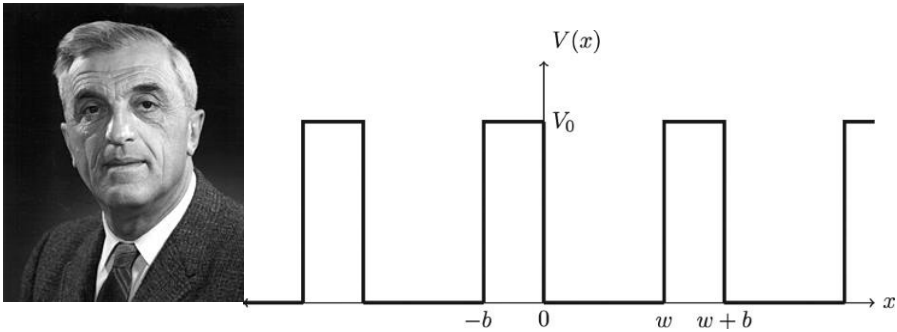
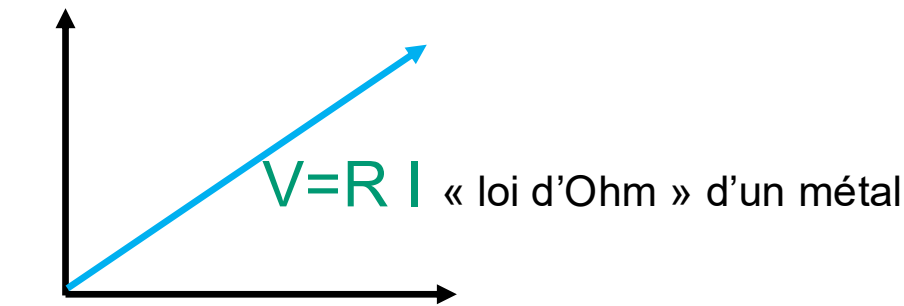


Les métaux et les isolants

Vous aimez votre téléphone portable ?
(sans la méca quantique il n'y en aurait pas !)

Les électrons dans un cristal occupent des bandes d'énergies « autorisées » séparées par des bandes « interdites » (F. Bloch 1927).
 E_F énergie de Fermi (énergie « MAX »)
→ métal ou isolant ou semiconducteur

Rouge isolant
Bleu métal



Avec des semiconducteurs « dopés d'e- » on fabrique des transistors et des ordinateurs (classiques)

Introduction to NPN Transistor

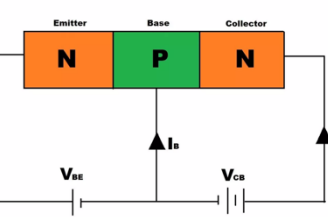
NPN transistor is a bipolar junction transistor (BJT), composed of 3 semiconductor layers in a way that one P-doped layer (Base) is sandwiched between two N-doped layers (Emitter & Collector) and is mainly used for current amplification and fast switching.

Majority Charge Carriers are Electrons.

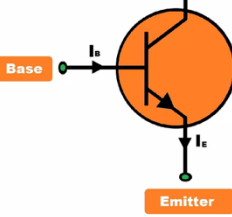


1. Base
2. Collector
3. Emitter

NPN Transistor Package



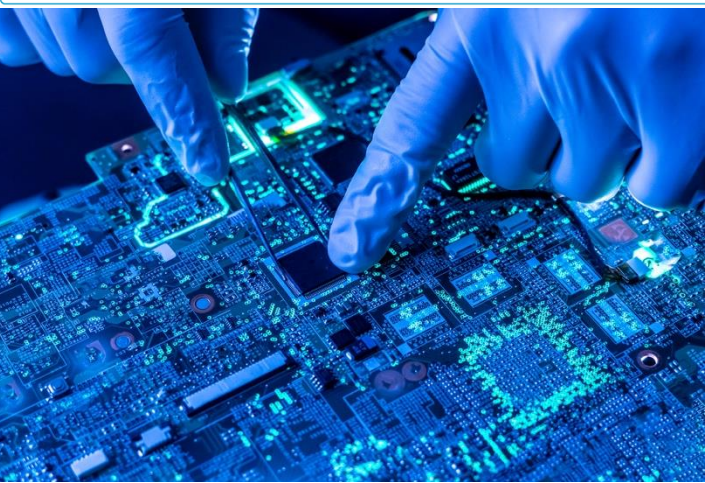
NPN Transistor Circuit



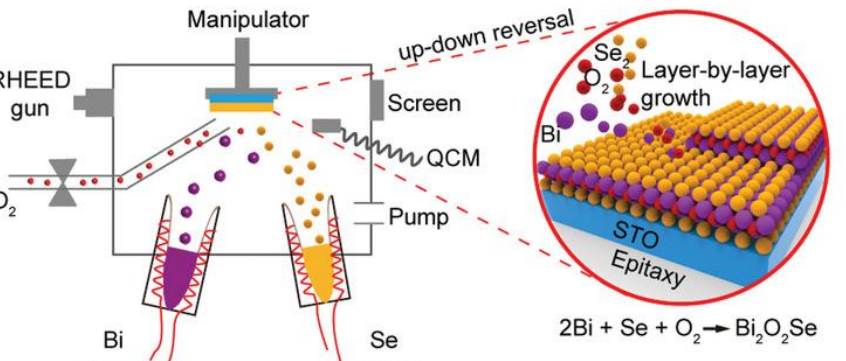
NPN Transistor Symbol



Le transistor permet de calibrer des courants qui correspondent à « 0 » et « 1 », et ensuite on fait des « portes logiques » (Booléennes)



a



Manipulator

RHEED gun

Screen

QCM

Pump

Bi source

Se source

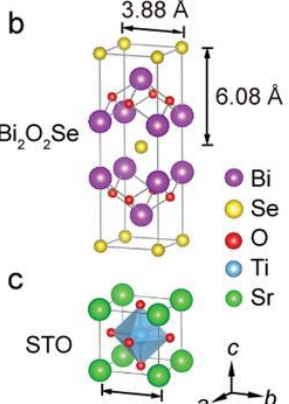
up-down reversal

Layer-by-layer growth

STO Epitaxy

$2\text{Bi} + \text{Se} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$

b



$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$

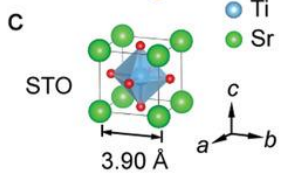
3.88 Å

6.08 Å

3.90 Å

Legend: Bi, Se, O, Ti, Sr

c



STO

3.90 Å

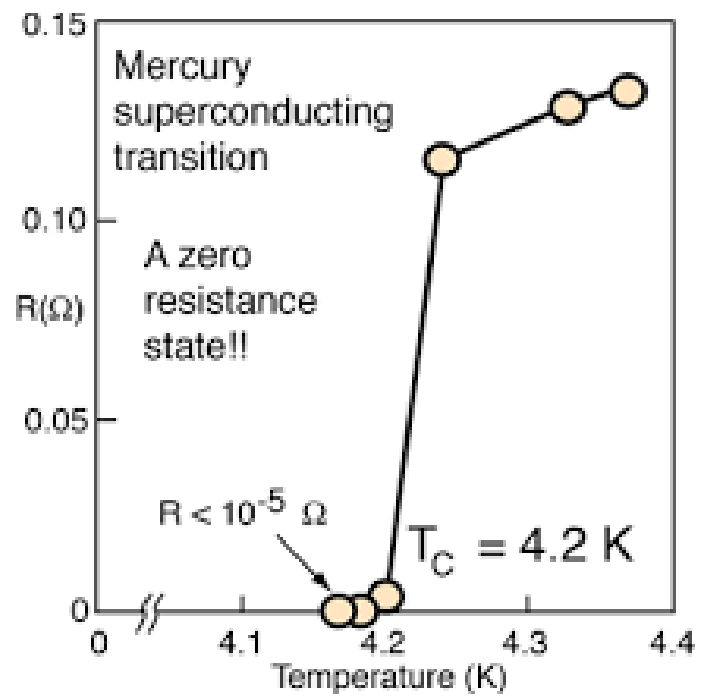
Legend: Sr, Ti, O

De nos jours, on

- réduit la taille des transistors
- on les construit en empilant des monocouche atomique

afin de les débarrasser de leurs impuretés et d'accroître leur mobilité v/E

Certains métaux « violent » la loi d'Ohm: pour $T < T_c$ (température critique) leur résistance = 0 ! ETAT SUPRACONDUCTEUR (K. Onnès 2011)



mais ce n'est pas tout!
le « supra » chasse le champ magnétique en générant un courant de surface:

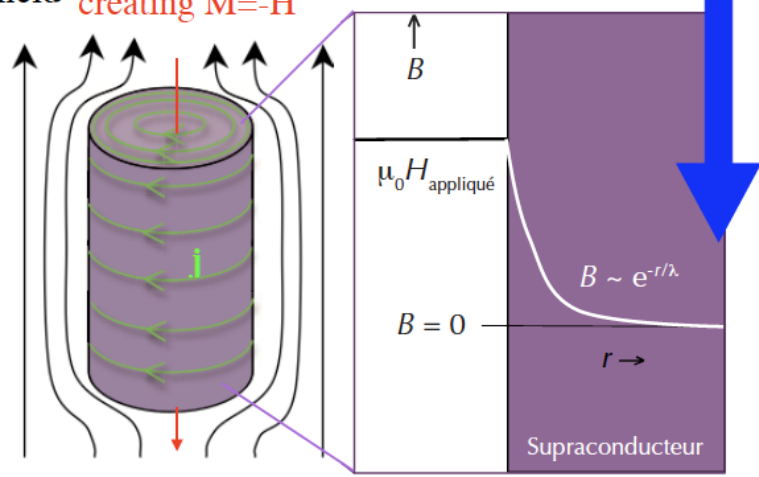
longueur de pénétration de LONDON

General properties: λ_L

Meissner-Ochsenfeld effect discovered in 1933

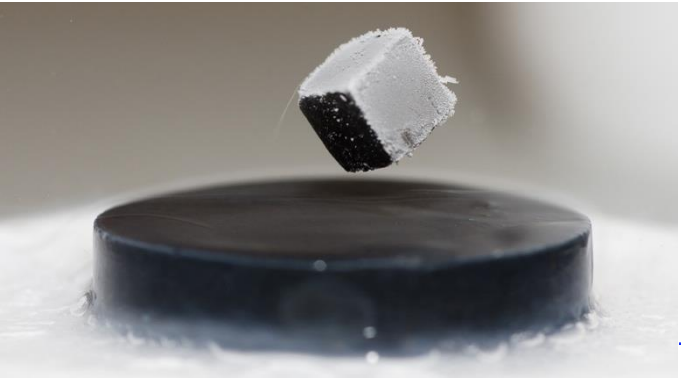
Screening super-current with spatial extension of London penetration depth λ_L

Applied magnetic field H creating super-current j resulting induction $B = \mu_0(H - M) = 0$



$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}}$$

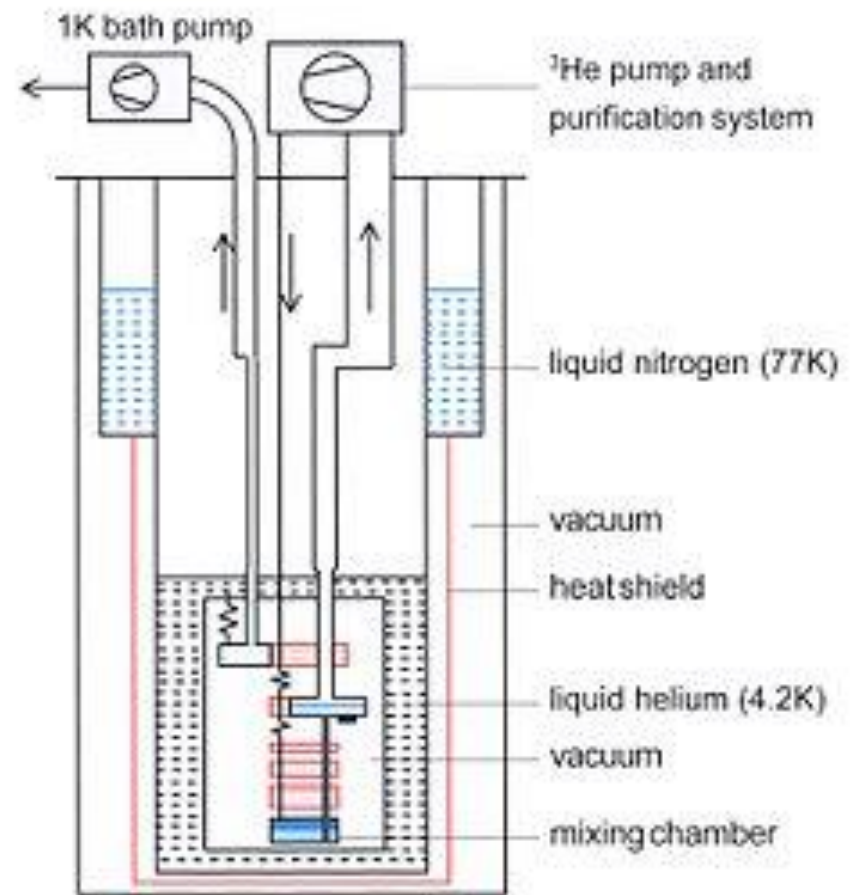
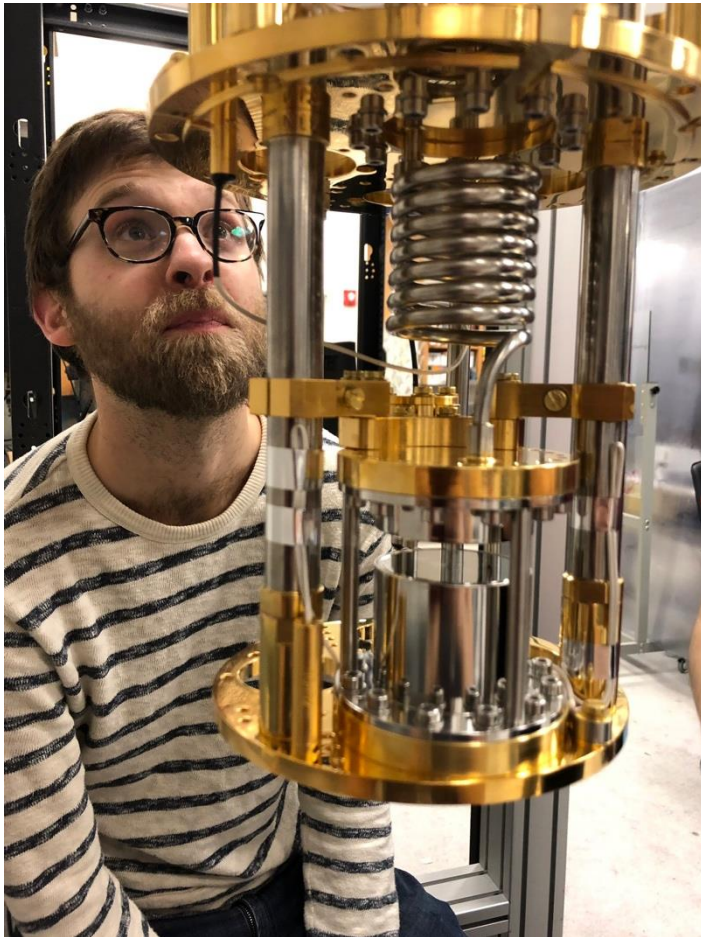
Ceci permet de faire de la lévitation magnétique !



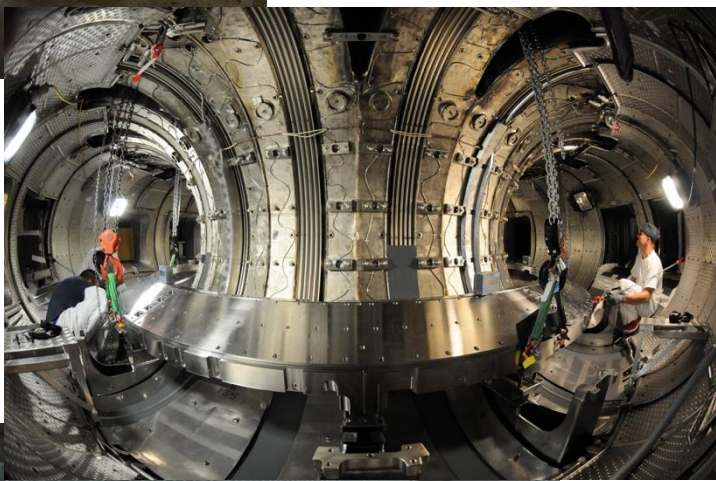
Et pour tout cela il faut du « froid »...

À quoi ressemble un manip à -272°C ?

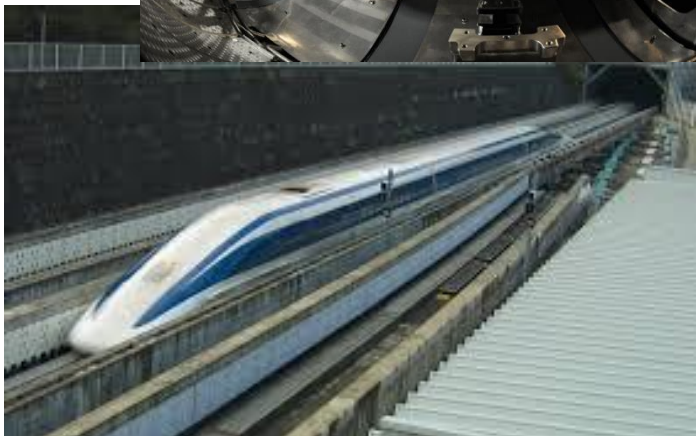
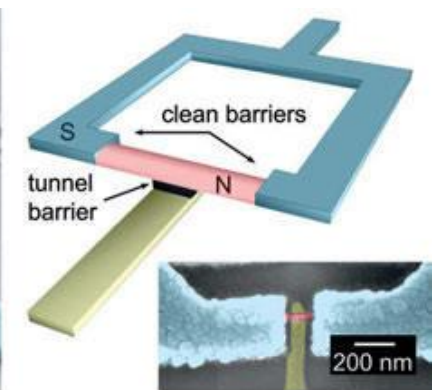
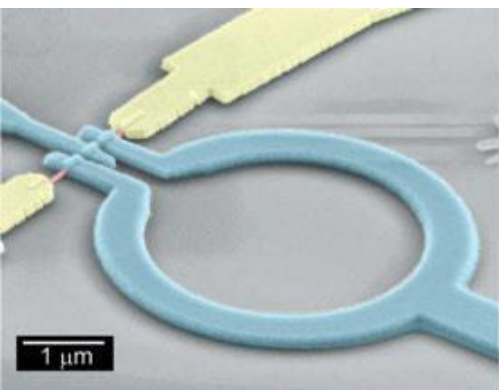
On a besoin d'un « frigo à dilution » (He ou « sec »)



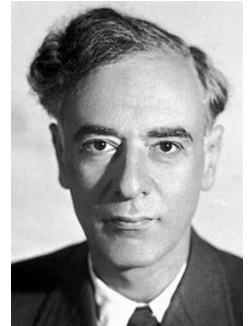
Applications actuelles des supraconducteurs: surtout pour faire des aimants très puissants



Pour: l'imagerie médicale; le LHC au CERN,
le tokamak d'ITER à Cadarache; faire des trains
qui lèvitent, mais aussi
pour détecter des petits champs magnétiques
... et c'est tout ! ☹ ☹ ☹

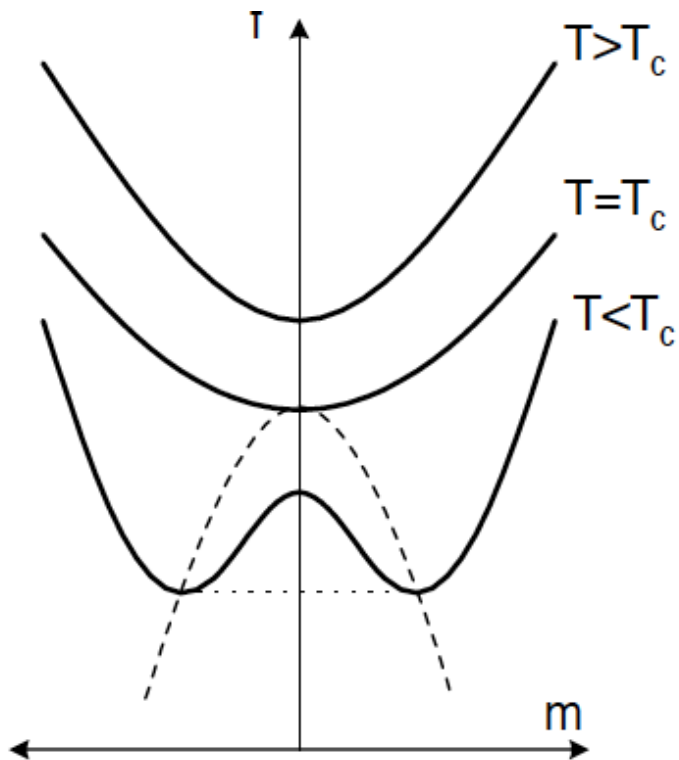


La théorie de Landau des transitions avec un « paramètre d'ordre » (L.D. Landau, 1930 pour l'aimantation)



$$f \simeq f_0(T) + a(T - T_c)m^2 + \frac{1}{2}bm^4$$

$$\bar{m} \simeq \left(\frac{a}{b}\right)^{1/2} (T_c - T)^{1/2} \quad \text{for } T < T_c$$



En supra, une partie des e^- sont « supraconducteurs », ils forment des paires de Cooper

Modification de la théorie de Landau due à V. Ginzburg:

a) le paramètre d'ordre est une fonction complexe $\psi(x)$ (origine quantique de la supra ?) qui dépend de la position.

b) en présence d'un champ magnétique l'impulsion (qui en méca Q est un "opérateur") $\hat{p} = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}$ est décalée par le potentiel vecteur $\vec{A}$
 $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \rightarrow \vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$
 $\vec{\nabla}$ GRADIENT

modif a) --> apparition d'une nouvelle échelle de longueur ξ appelée longueur de cohérence. L'énergie libre devient une intégrale sur la position

$$F = \int dx \left(\frac{1}{2m} |\hat{p} \cdot \psi|^2 + \frac{a}{2} (T - T_c) |\psi|^2 + \frac{\beta}{4} |\psi|^4 \right)$$

modif b) -->

$$\hat{p} \rightarrow \left(\hat{p} - \frac{e}{c} \vec{A}(x) \right)$$

$$F' = F + \int dx \frac{B^2(x)}{8\pi}$$

énergie
magnétique

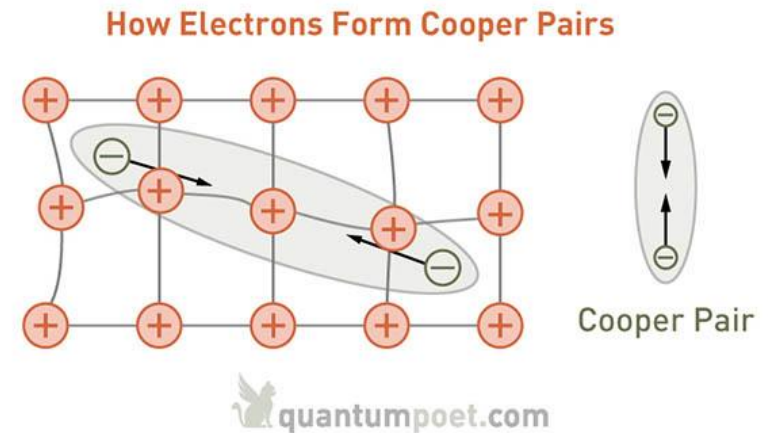
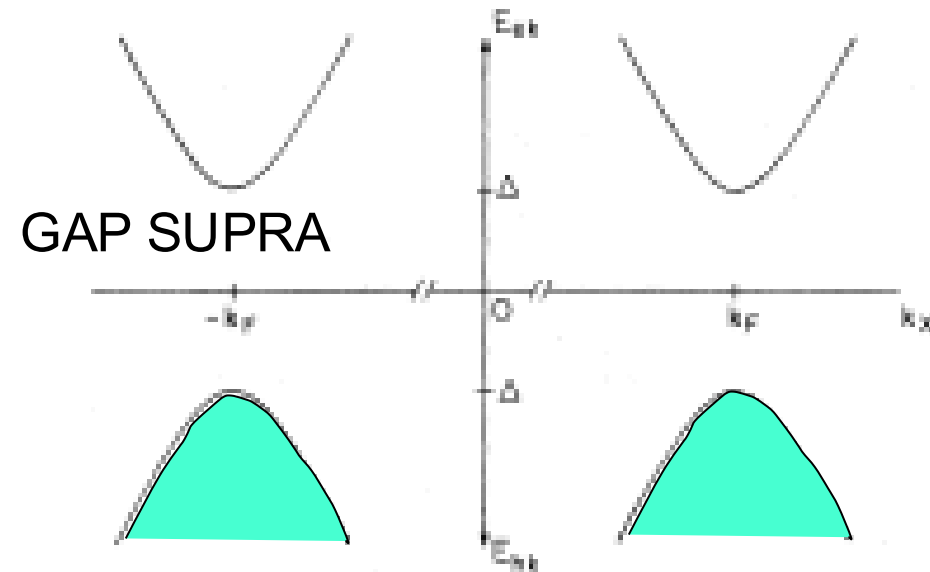
Il y a donc 2 longueurs pour le "supra": λ, ξ

Réaction de Landau: Vitali tu es "nul", et tu ne publieras pas ce résultat !

Théorie microscopique du « supra » (BCS 1957, Bogoliubov 1958)

Les e- près de E_F (énergie MAX) s'attirent et forment des « paires de Cooper » de taille « ξ » cohérence.

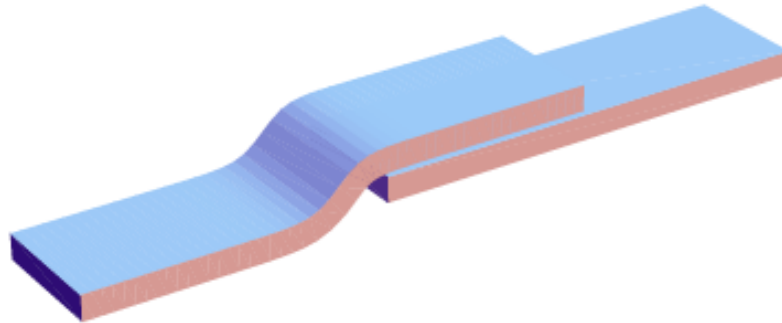
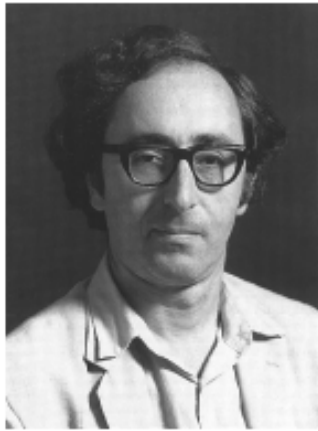
Le « supra » a une « bande interdite » 2Δ : états « occupés » (bas) des états vides (haut). Les excitations sont des mélanges d'e- et de « trous » h^+



L'état fondamental est un état de superposition de 2 e- de « spin » (moment magnétique) et d'impulsion opposés (paires de Cooper) sous forme d'un état « quantique intriqué »: un « singulet »

$$|\Psi_{BCS}^{(\pm\vec{k})}\rangle \sim u_k v_k \left(c_{\vec{k}\uparrow}^\dagger c_{-\vec{k}\downarrow}^\dagger - c_{\vec{k}\downarrow}^\dagger c_{-\vec{k}\uparrow}^\dagger \right) |0\rangle$$

Josephson Effect



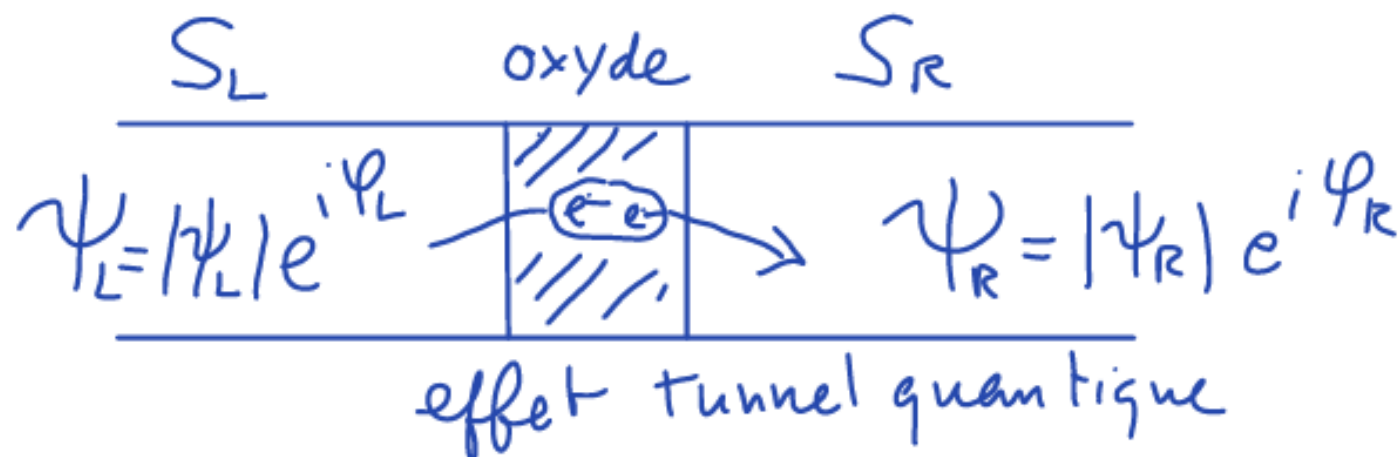
Josephson (1962), tunneling of Cooper pairs

$$I = I_c \sin \phi$$

Si 2 « supras » ont une « phase » différente, et sont séparés par une couche d'oxide (barrière tunnel), les paires de Cooper effectuent un effet tunnel.

Le courant est proportionnel au **sinus de la différence de phase**. Le préfacteur est le **courant critique**.

Il faut donc "encore" généraliser la théorie de Vitali Ginzburg à 2 "supras"



2 RELATIONS DE JOSEPHSON

$$I = I_c \sin(\varphi_R(t) - \varphi_L(t))$$

$$\frac{d}{dt} (\varphi_R(t) - \varphi_L(t)) = \frac{2eV(t)}{\hbar}$$

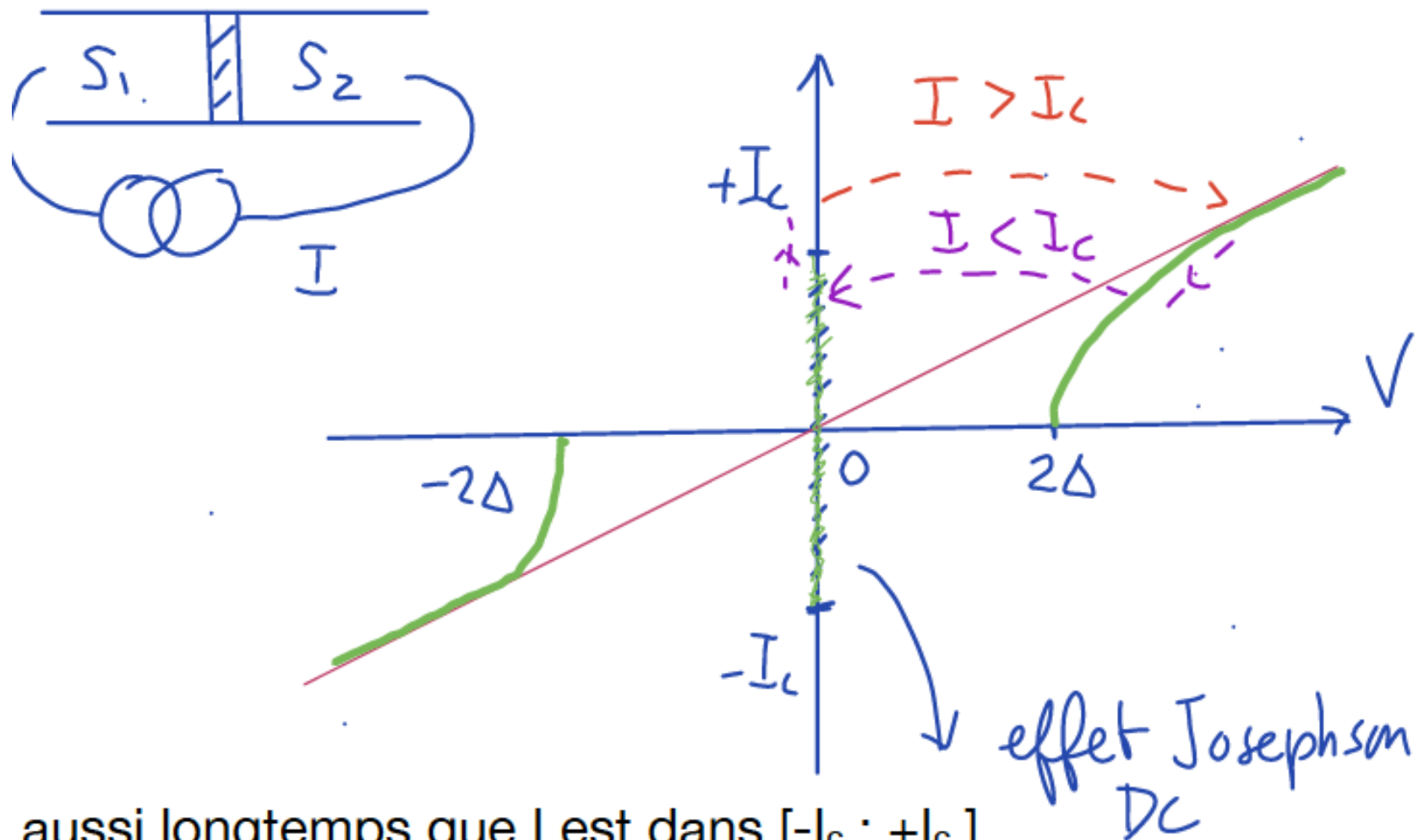
$V(t)$ est la tension appliquée aux bornes de la jonction.

Si $V(t)=0$, "effet Josephson DC" un courant constant de paires de Cooper circule à travers l'oxyde.

$$I = I_c \sin \Delta\varphi \quad \Delta\varphi \equiv \varphi_R - \varphi_L$$

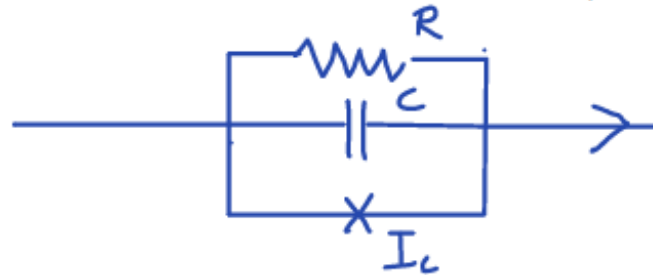
(violation de la loi d'Ohm...)

"Caractéristique courant-tension" d'une jonction Josephson polarisée en courant: on impose le courant !



aussi longtemps que I est dans $[-I_c ; +I_c]$,
le courant possède $V=0$ (courant de paires de Cooper)
mais si on impose $I > I_c$ ou $I < -I_c$, la jonction "accède" à un
régime $V \neq 0$ (courant dissipatif)

LE MODÈLE SHUNTÉ DE LA JONCTION JOSEPHSON: ANALOGIE AVEC L'ÉQUATION D'UN PENDULE



$$I_{imp} = I_c \sin \Delta\varphi + C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R}$$

3 éléments en parallèle:

Josephson, condensateur, Ohm

2ème relation Josephson

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d^2 \Delta\varphi}{dt^2}$$

Equation de Newton

$$\frac{\hbar C}{2e^2} \frac{d^2 \Delta\varphi}{dt^2} + \frac{C}{R} \frac{d\Delta\varphi}{dt} = I_{imp} - I_c \sin \Delta\varphi$$

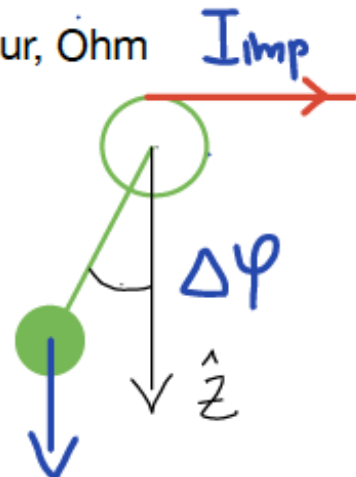
$$= - \frac{\partial}{\partial \Delta\varphi} \underbrace{(I_{imp} \Delta\varphi - I_c \cos \Delta\varphi)}_{V(\Delta\varphi) \text{ "Potentiel"}}$$

$$V(\Delta\varphi)_{I_{imp}=0}$$

particule piégée

$$V(\Delta\varphi)_{I_{imp} \neq 0}$$

particule qui
"dévalle la pente"



Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction

Michel H. Devoret,^(a) John M. Martinis, and John Clarke

Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720, and Materials and Molecular Research Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California 94720

(Received 26 July 1985)

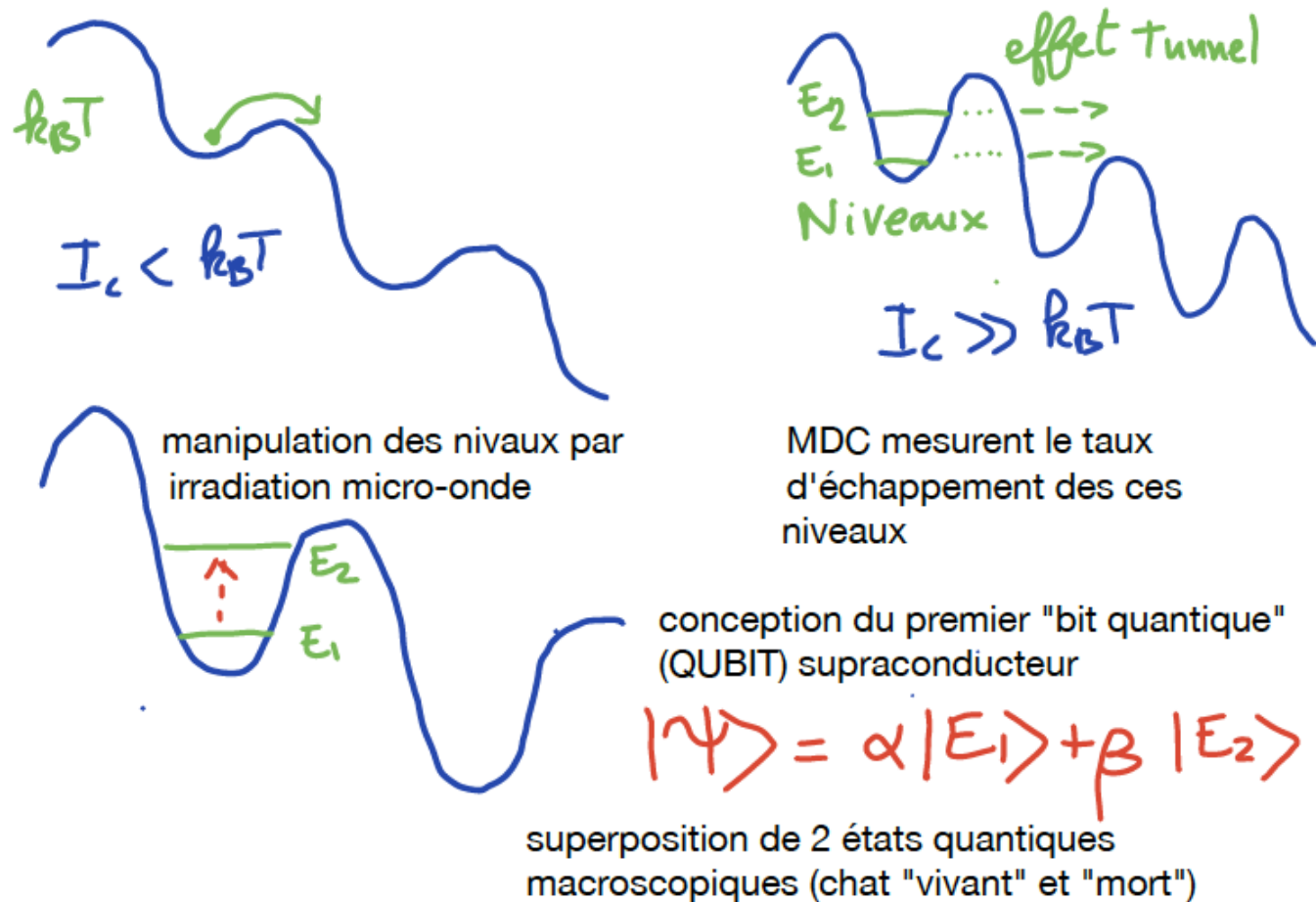
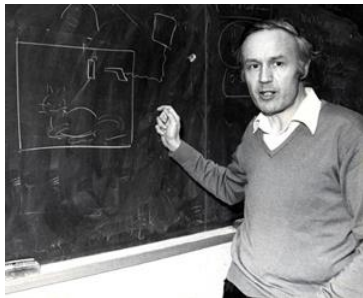
The escape rate of an underdamped ($Q \approx 30$), current-biased Josephson junction from the zero-voltage state has been measured. The relevant parameters of the junction were determined *in situ* in the thermal regime from the dependence of the escape rate on bias current and from resonant activation in the presence of microwaves. At low temperatures, the escape rate became independent of temperature with a value that, with no adjustable parameters, was in excellent agreement with the zero-temperature prediction for macroscopic quantum tunneling.



Idée de A.J. Legett: le circuit adopte les lois de la méca Q à basse température

Si I_c est « petit » → activation thermique
→ comportement classsique de la jonction Josephson

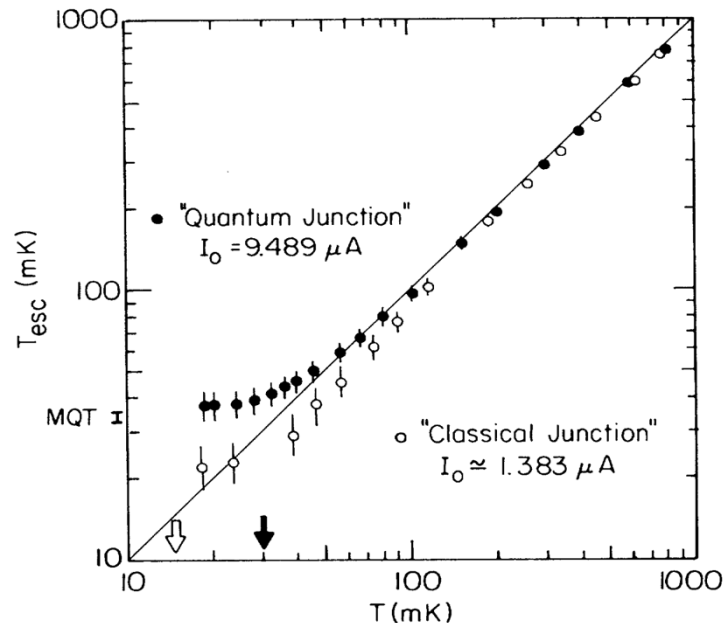
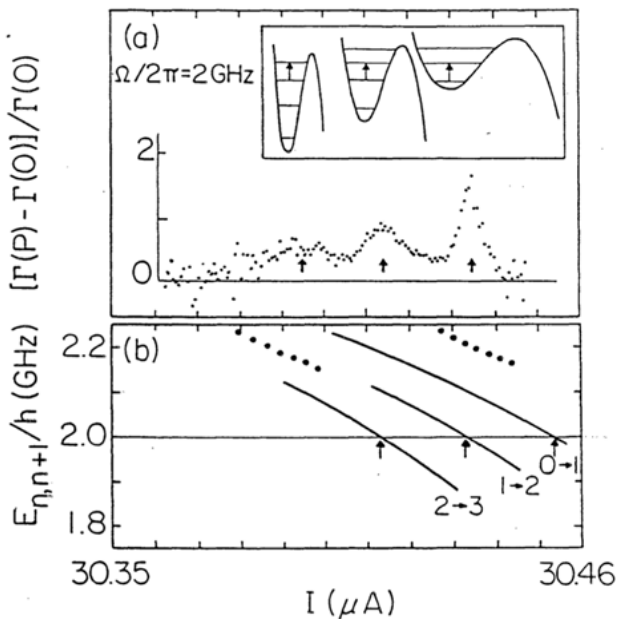
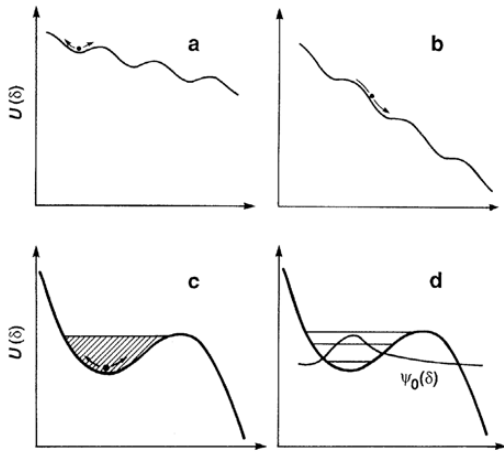
Si I_c est « grand » → apparition de niveaux d'énergie quantifiés
→ comportement quantique du circuit supraconducteur, pourtant macroscopique !!!



Images issues du papier à l'origine du Nobel 2025 de physique:

Si le courant critique est « petit » le taux d'échappement décroît quand on décroît T (classique)

Si le courant critique est « grand », il sature à basse température (quantique)



« effet tunnel » pour une variable ($\Delta\phi$) associée à un circuit supraconducteur constitué de « millions » d'atomes d'Aluminium !!!

Autres QUBITS ?

QUBIT de phase (celui du Nobel)

$$H = \frac{1}{2C} \hat{Q}^2 - \frac{I_0 \Phi_0}{2\pi} \cos \hat{\delta} - \frac{I \Phi_0}{2\pi} \hat{\delta}$$

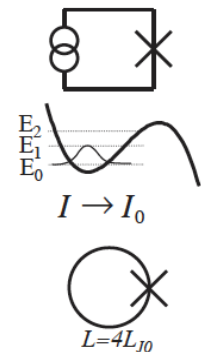
QUBIT de flux: superposition de 2 états de courants opposés dans une boucle

$$H = \frac{1}{2C} \hat{Q}^2 - \frac{I_0 \Phi_0}{2\pi} \cos \hat{\delta} + \frac{1}{2L} \left(\Phi - \frac{\Phi_0}{2\pi} \hat{\delta} \right)^2$$

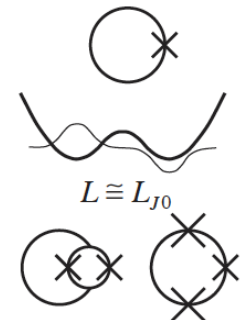
$$[\hat{\delta}, \hat{Q}] = 2ei$$

La phase et la charge aux bornes de la jonction h-jouent le même rôle que la position et l'impulsion d'une particule

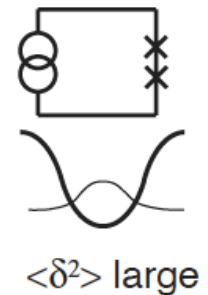
(a) Phase



(b) Flux



(c) Charge

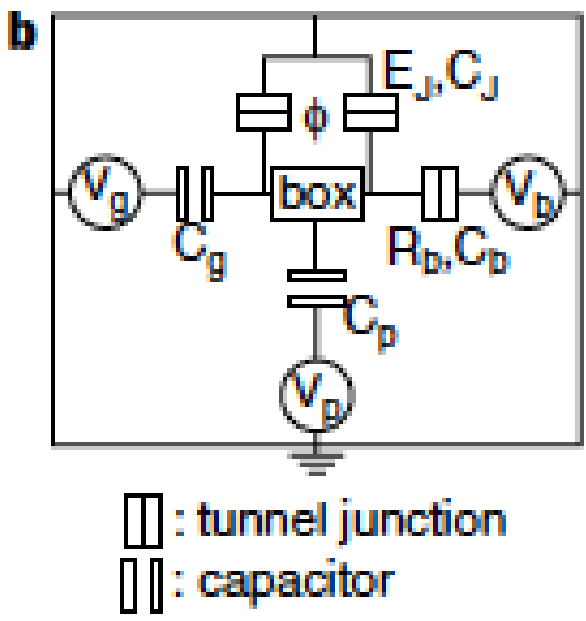
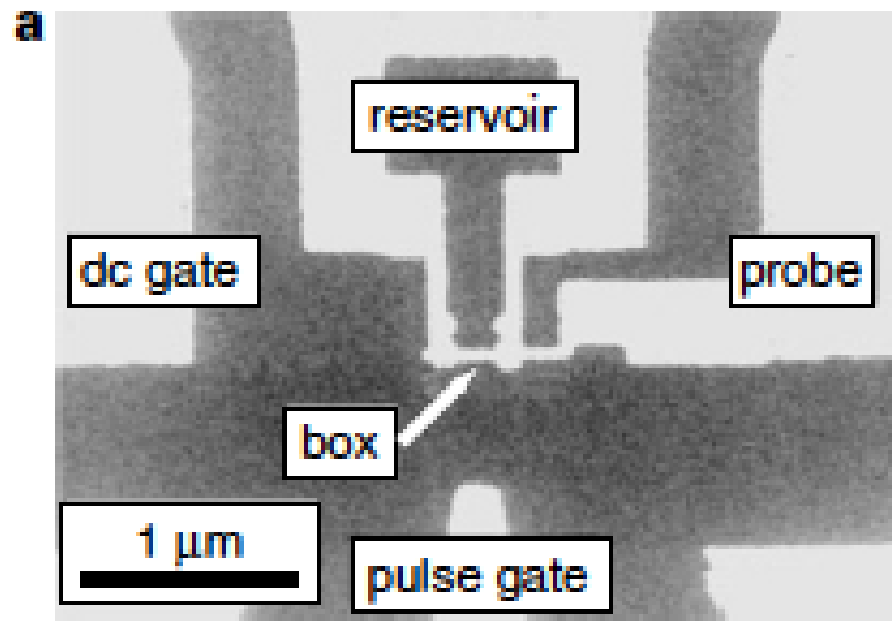
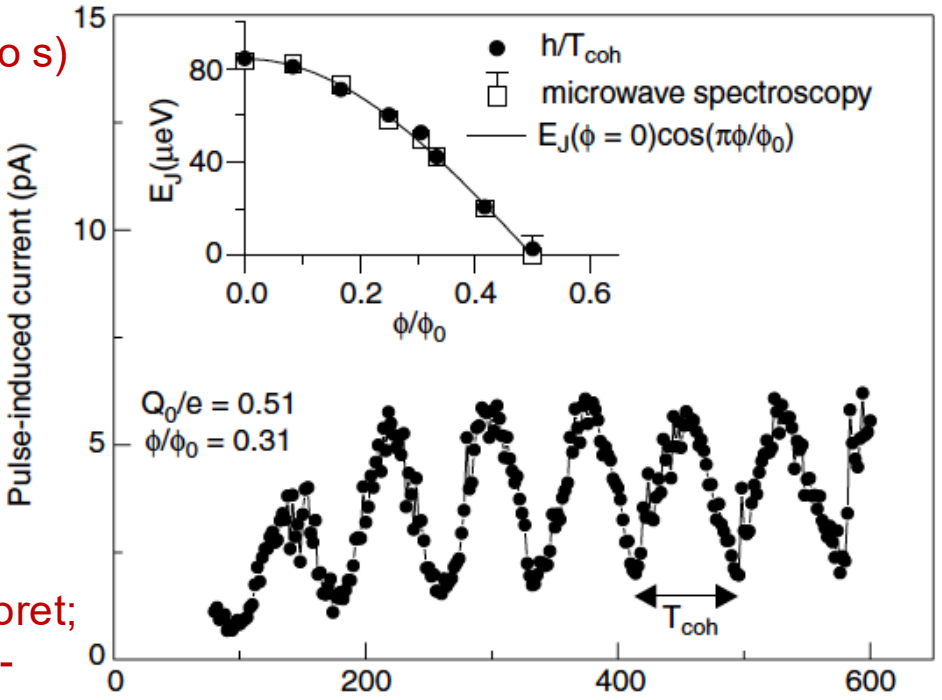


Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box

Y. Nakamura*, Yu. A. Pashkin† & J. S. Tsai*

* NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8051, Japan
† CREST, Japan Science and Technology Corporation (JST), Kawaguchi,
Saitama 332-0012, Japan

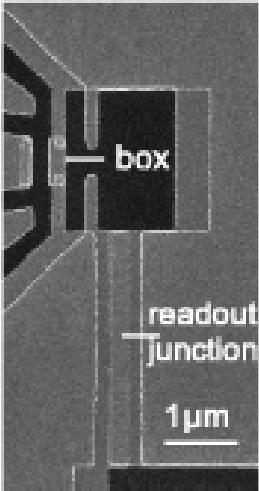
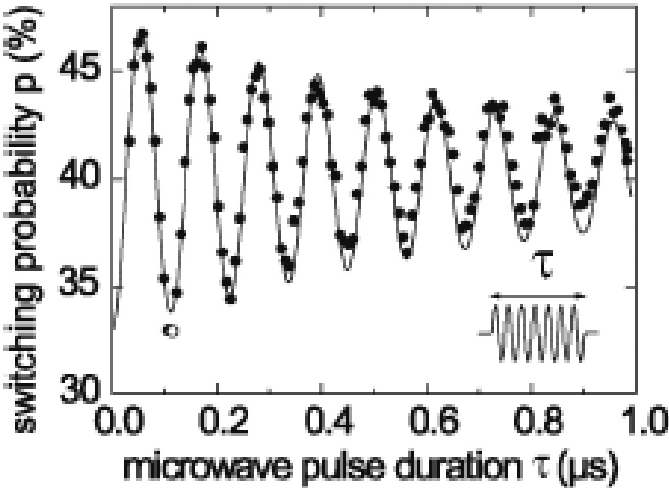
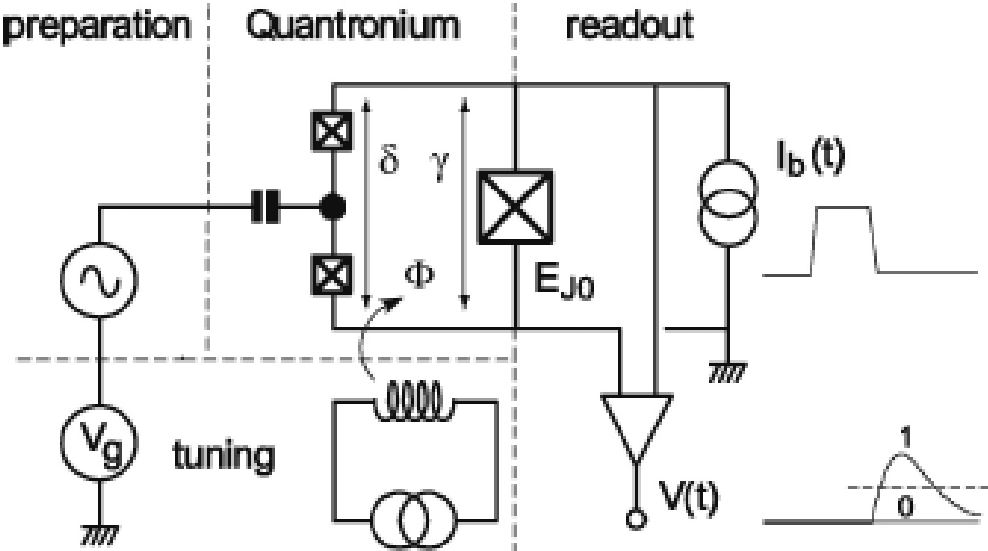
Basé sur le transistor à paire de Cooper de Devoret;
L'îlot supra ne peut accueillir que des paires d'e-



Circuit « all »
supra avec 1
« boîte » (box)
Energie de charge →
État quantique
superposé
 $\alpha |N\rangle + \beta |N+1\rangle$

$\square$: tunnel junction
 $\parallel$: capacitor

Le SPEC du CEA « riposte » en 2000 ! quantronium QUBIT (Esteve, Devoret, Vion, Urbina, Pothier, Joyez) amélioration de la cohérence !



Conclusions:

- La supra est guidée par les expériences ! 50 ans de recherche **fondamentale** pour comprendre et 75 ans pour fabriquer le premier QUBIT.
- 2 signatures supra: **résistance chute $T < T_c$** et **champ magnétique chassé**
- Applications: super aimants, détection de champs magnétiques par interférence (SQUID), CERN, ITER,...
- Le Nobel 2025: comportement quantique macroscopique d'un circuit supra. la phase devient une « variable quantique » (Heinsenberg)
- De nos jours
 - a) QUBITs de phase, de charge, de flux (états superposés quantiques)
 - b) on « couple » plusieurs qubits, pour faire des portes logiques quantiques.
 - c) tenter de battre les ordis classiques ? « suprématie quantique »
- Les ordis quantiques sont imparfaits (redondance, correction: nécessaires...)

Il faut tenter notre chance et investir dans les technos quantiques avec différents domaines.

Optique quantique, Physique atomique, atomes froids, optique quantique et (ici) Physique Mésoscopique/ Nanophysique (Matière Condensée)

