SQUID et électromètre

C. URBINA

DRTBT 1991 – 17

DETECTION DE LA CHARGE ELECTRIQUE ①
ET DU FLUX MAGNETIQUE ...

AVEC

... "LES SUBQUANTAMETRES"

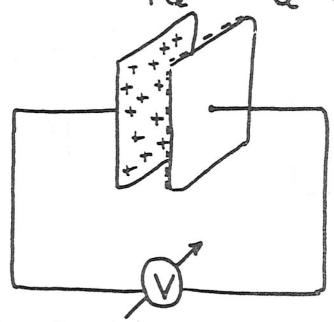
C. URBINA , GROUPE QUANTRONIQUE , SPEC , CE-SACLAY

SQUIDS		SET
R. FEYMMAN : LECTURES ON PHYS. VOL III	← DIFFICULTE →	LES IMAGES DE LA PHYSIQUE CNRS 1991
J. CLARKE : - SUPERCONDUCTING DEVICES (ACADEMIC PRESS, 1990) ed. RUGGIERO, RUDMAN		SINGLE ELECTRON TUNNELING & MESOSCOPIC DEVICES ed. KOCH, SPRINGER-VERLAG 91
- PHYSICS TODAY, MARCH 86		SINGLE CHARGE TUNNELING LES HOUCHES, 91 March. ED. GRABERT & DEVORET PLENUM 92
T. TINKHAM : INT. TO SUPERCONDUCT.		
BARONE & PATERNO : PHYSICS AND APPLICATIONS OF THE JOSEPHSON EFFECT (WILEY)		

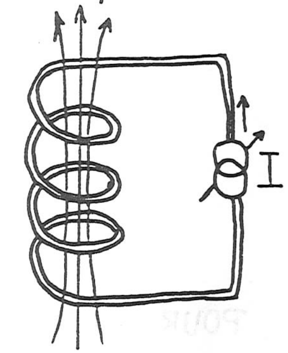
CHARGE ET FLUX ②

CHARGES ET FLUX CONTINUS :

$+Q \quad -Q \in \mathbb{R}$



$\phi \in \mathbb{R}$



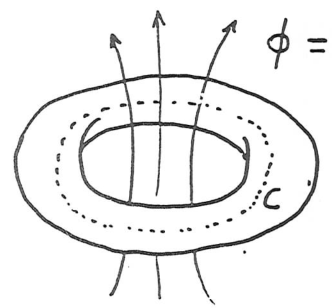
CHARGES ET FLUX QUANTIFIES :

ILE METALLIQUE ISOLEE

$Q = ne$

ANNEAU SUPRACONDUCTEUR

$\phi = n\,\phi_0$



$n \in \mathbb{Z}$

$$Q = \iint_{S_v} \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{\sigma} = ne$$

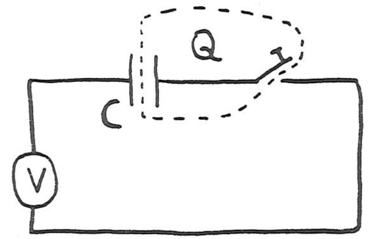
$$\phi = \iint_{S_c} \vec{B} \cdot d\vec{\sigma} = n\,\phi_0$$

$e = 1{,}60219 \times 10^{-19}\ C$

$\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.07 \times 10^{-15}\ Wb$

LA BOITE A QUANTA DE CHARGE

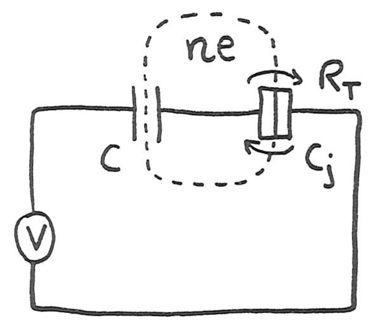
UNE ÎLE METALLIQUE



$Q = ne$

n FIXE

POUR CHANGER LA CHARGE DE L'ILE ON FERME PRESQUE COMPLETEMENT L'INTERRUPTEUR. ON FORME ALORS UNE JONCTION TUNNEL, A TRAVERS LAQUELLE LA CHARGE PEUT PASSER, MAIS SOUS FORME DE PAQUETS ELEMENTAIRES : LES ELECTRONS

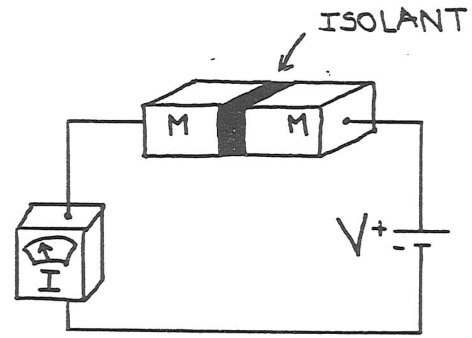


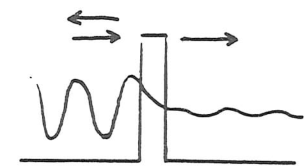
BOITE A ELECTRONS

JONCTION TUNNEL

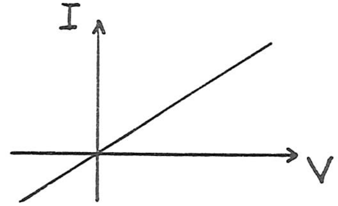
FUITE DISCRETE

LA JONCTION TUNNEL





COEF. DE TRANSMISSION τ



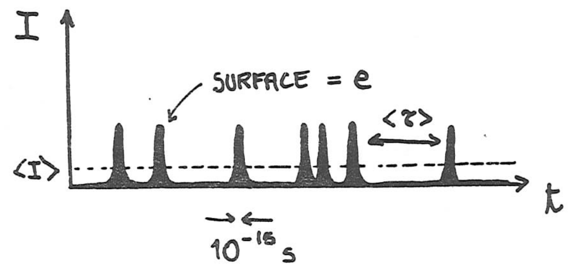
"RESISTANCE" TUNNEL

$$I = \frac{V}{R_T}$$

$$R_T = \frac{1}{4\pi}\frac{h}{e^2}\frac{1}{\tau}$$

$\hookrightarrow R_K \sim 26\,k\Omega$

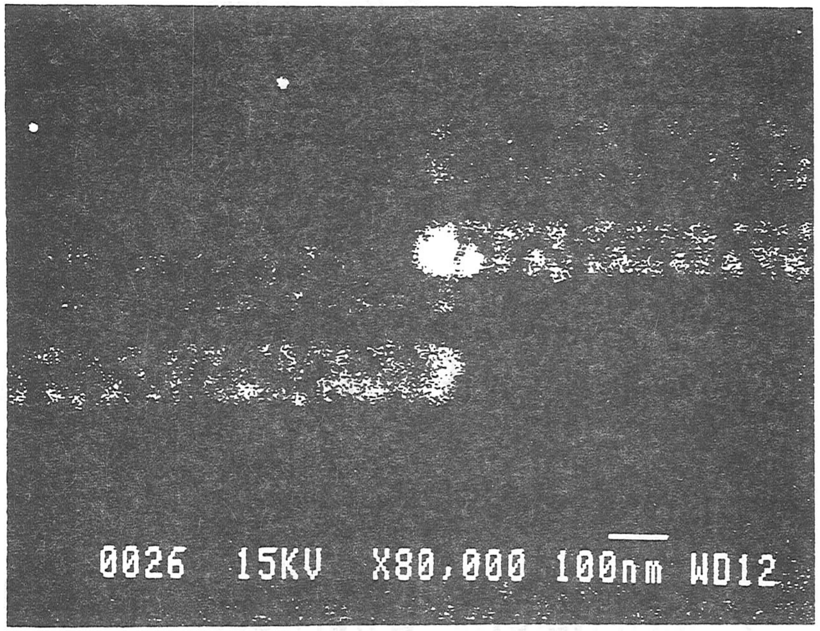
SI $R_T \gg R_K$ ($\tau \ll 1$), LES ELECTRONS SONT D'UN COTE OU DE L'AUTRE (PAS DE COHERENCE)



"BRUIT DE GRENAILLE"

$$\langle\tau\rangle = R_T \frac{e}{V}$$

(5) NANOJONCTION $Al - Al_2O_3 - Al$



NANOLITHOGRAPHIE PAR FAISCEAU ELECTRONIQUE

\+

EVAPORATION A TRAVERS UN MASQUE SUSPENDU

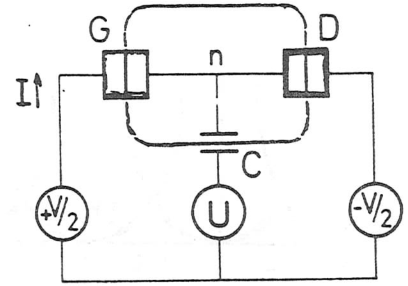
(J. Dolan)

L'ELECTROMETRE A PETITES JONCTIONS (6)

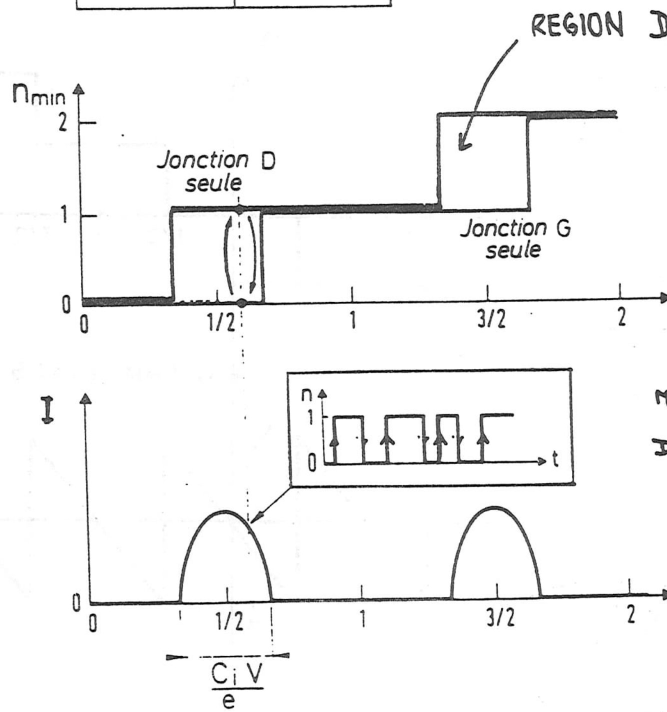
(FULTON & DOLAN, P.R.L. 59, 109, 1987) Single Electron Transistor

UNE BOITE AVEC ENTREE-SORTIE DISTINCTES

LES ELECTRONS ENTRENT PAR LA JONCTION DE DROITE ET SORTENT PAR LA JONCTION DE GAUCHE, UN A UN.



$Q_{ext} = CU$



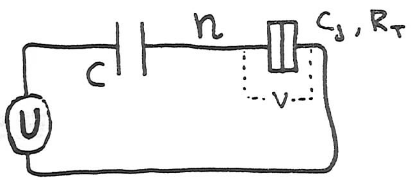
⇓

$I \neq 0$

MODULATION DU DEBIT PAR LE SIGNAL

LE COURANT DANS L'ELECT. EST PERIODIQUE EN Q : PERIODE e

LA BOITE A ELECTRONS



ENERGIE ELECTROSTATIQUE

$$E = \frac{(ne - Q_{ext})^2}{2C_T}$$

$C_T = C_J + C$

$Q_{ext} = CU$

LE CIRCUIT ADOPTE L'ETAT D'ENERGIE MIN. SI :

$$\frac{e^2}{2C_T} \gg k_B T$$

(SUPRESSION DES FLUCT. THERMIQUES)

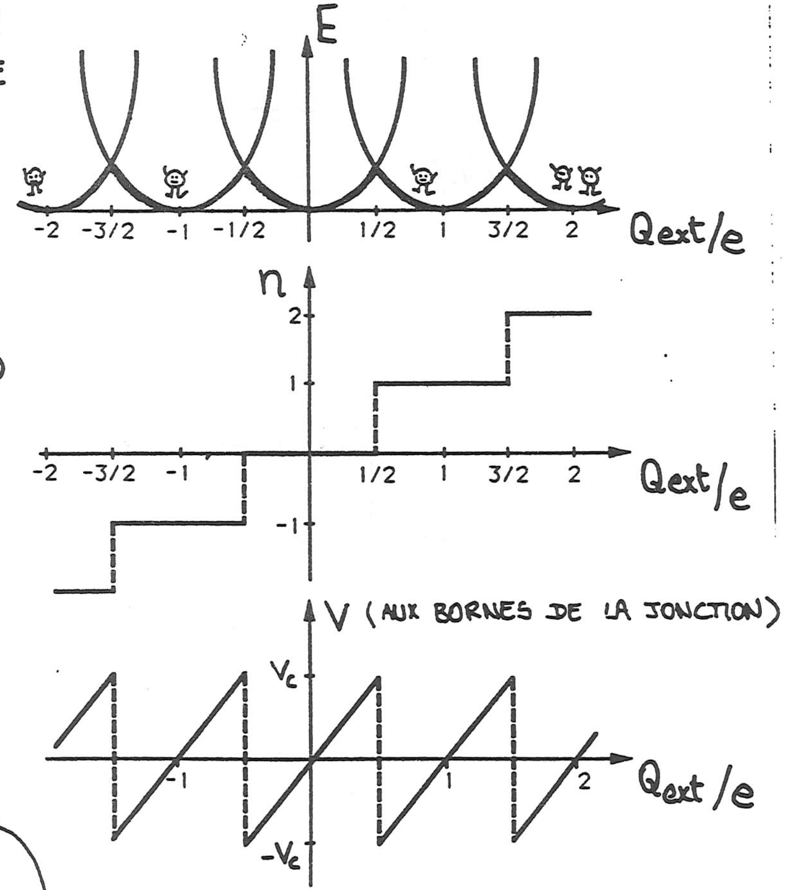
ET SI :

$$R_T \gg R_K$$

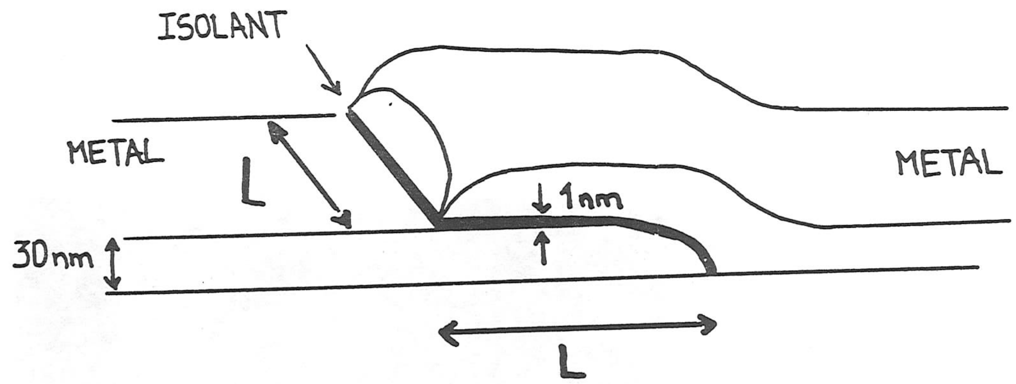
(PAS DE FLUCT. QUANTIQUES)

⇓

$C_T \sim 1\,fF$ SI $T \sim 20\,mK$



LA JONCTION TUNNEL

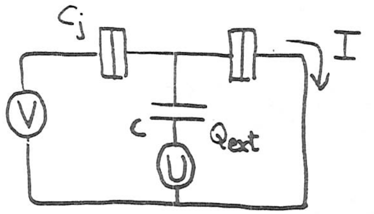


POUR AVOIR DE L'EFFET TUNNEL : BARRIERE ISOLANTE ~1nm

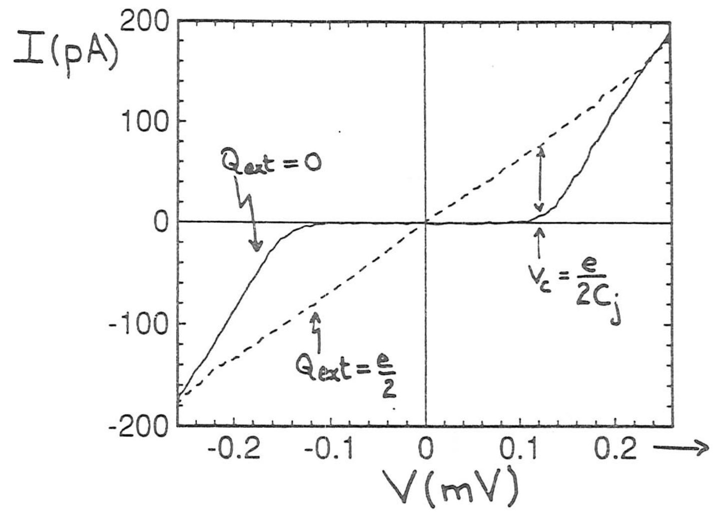
POUR AVOIR DU BLOCAGE DE COULOMB: CAPACITE $\lesssim 10^{-15}$ F

⟹ DIMENSIONS LATERALES $L \lesssim 100$ nm

CARACTERISTIQUES EXPERIMENTALES



$C_j \sim 0{,}6$ fF
$C \sim 80$ aF
$T \sim 20$ mK



SENSIBILITE MESURE DU COURANT

$\sim 0{,}05\ pA/\sqrt{Hz}$

@ 1kHz

AU POINT OPTIMUM P:

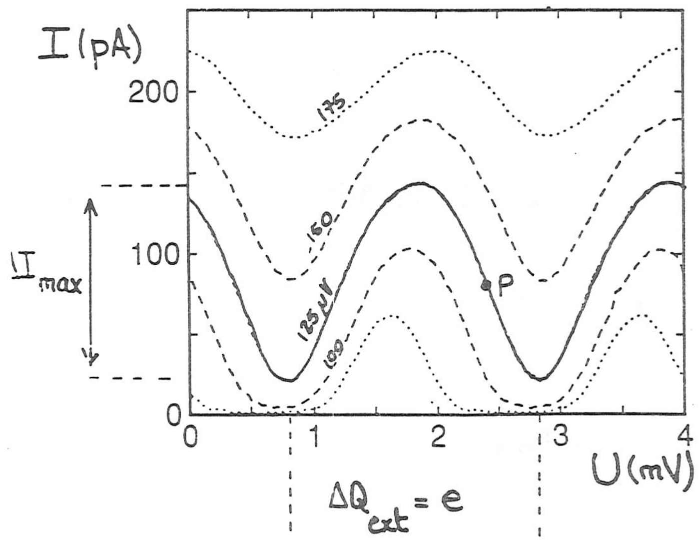
$\frac{\partial I}{\partial Q_{ext}} \sim 400\, pA/e$

⇓

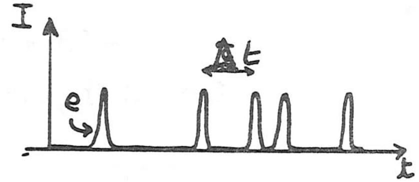
SENSIBILITE EN CHARGE

$\sim 1{,}2 \times 10^{-4}\, e/\sqrt{Hz}$

@ 1kHz.



SENSIBILITE ULTIME DE L'ELECTROMETRE (T=0)

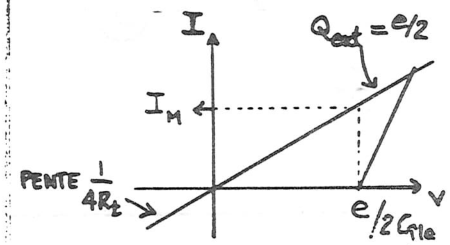


PHENOMENE POISSONIEN

$\langle \Delta t \rangle = 4\, R_t C_{île}$

SPECTRE EN PUISSANCE DU BRUIT DE GRENAILLE (SORTIE)

$S_I = 2eI$



$I_M = \dfrac{e/2C_{île}}{4R_t}$

$\tau = R_T C_{île}$ seul ct de temps

AU POINT DE POLARISATION OPTIMALE ($V = e/2C_{île}$, $Q_{ext} = e/4$)

$I = I_M/2 = \dfrac{e}{8\tau}$, $\langle \Delta t \rangle = 8\tau$

FONCTION TRANSFERT : $\dfrac{\partial I}{\partial Q_{ext}} = I_M/e/2 = 1/2\tau$

BRUIT EN CHARGE A L'ENTREE : $S_Q = \dfrac{S_I}{(\partial I/\partial Q)^2} = 2e^2 R_t C_{île} = e^2 \tau$

SENSIBILITE EN ENERGIE : $\varepsilon = \dfrac{S_Q}{2C_{île}} = \dfrac{e^2 R_t}{2}$

POUR QUE LES FLUCTUATIONS QUANTIQUES NE DETRUISENT PAS LA QUANTIFICATION DE LA CHARGE DE L'ILE $\Rightarrow \dfrac{e^2}{2C_{île}} > \dfrac{\hbar}{\langle \tau \rangle}$ $\left(R_t > \frac{R_K}{4\pi}\right)$

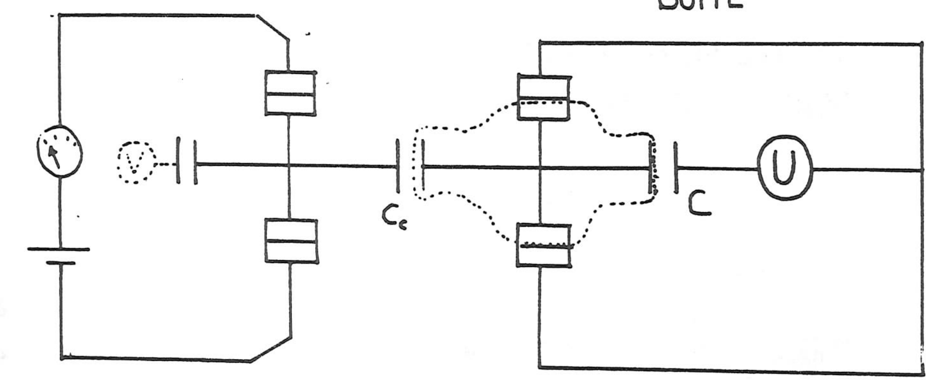
LIMITE ULTIME $\varepsilon > \hbar$

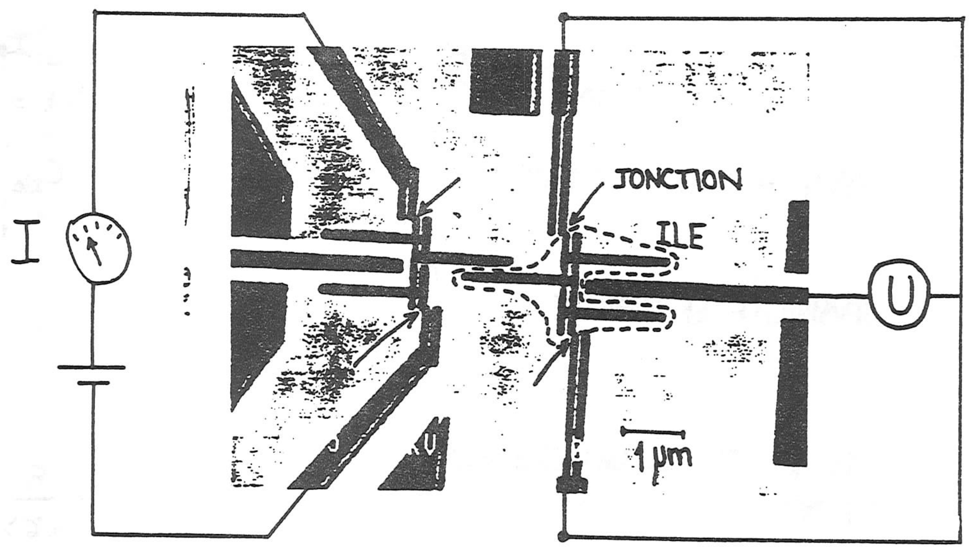
(11)

EXPERIENCE

$C_J \sim 0.7$ fF

$C \sim .08$ fF, $C_c \sim .07$ fF



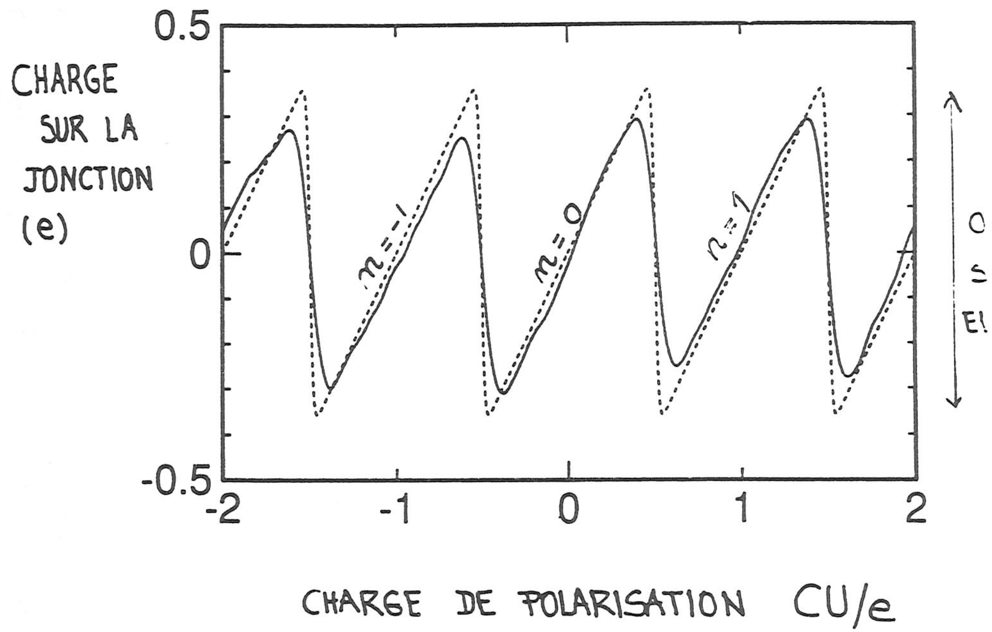


(12)

1, 2, 3, ...

CHARGE SUR LA JONCTION DE LA BOITE

MESURÉE AVEC L'ELECTROMETRE A DOUBLE JONCTIO



T ≃ 20 mK

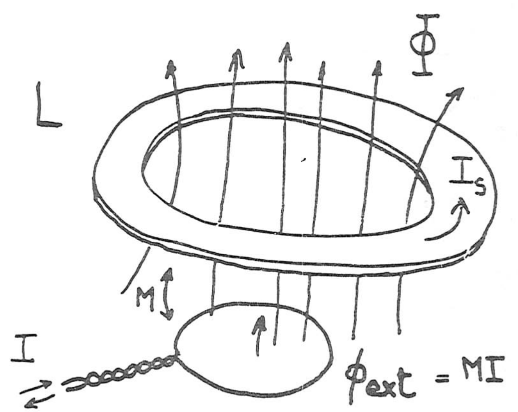
(LAFARGE et. al. Z. Phys. B (92))

6

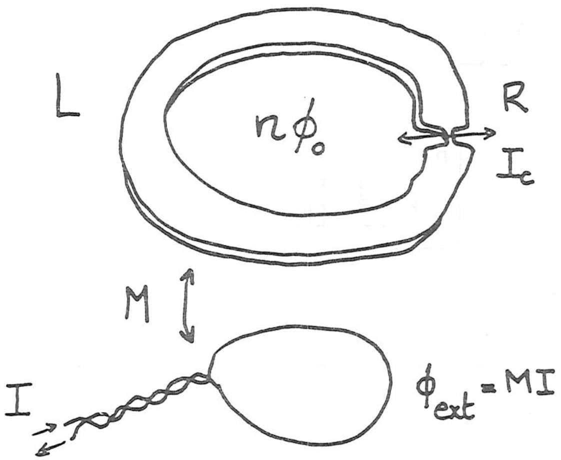
LA BOITE A QUANTA DE FLUX

UN ANNEAU SUPRACOND. PARFAIT

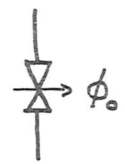
$$\Phi = n\,\Phi_0$$



POUR CHANGER LE FLUX DANS L'ANNEAU ON OUVRE CELUI-CI PRESQUE COMPLETEMENT EN UN POINT. ON FORME ALORS UN MICROPONT, A TRAVERS LEQUEL LE FLUX PEUT PASSER, MAIS SOUS FORME DE PAQUETS ELEMENTAIRES: LES FLUXONS.

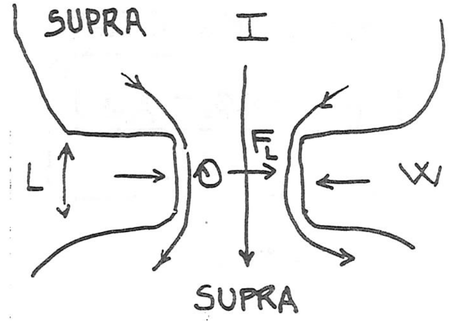


MICROPONT



FUITE DISCRETE

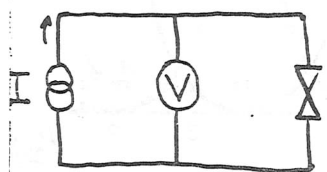
LE MICROPONT SUPRACONDUCTEUR

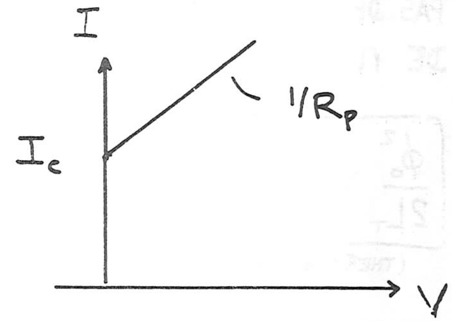


○: VORTEX Φ_0

F_L = FORCE DE LORENT

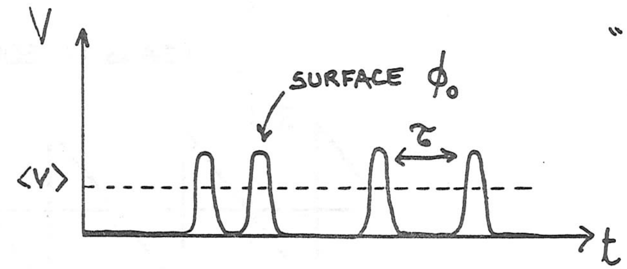
$L, W < \xi$





I_c = COURANT CRITIQUE (CREER UN VORTEX ET LE DEPIEGER

R_p = RESISTANCE (FROTTEMENT VISQUEUX)

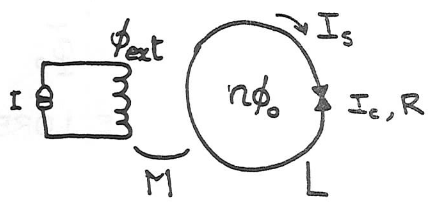


" BRUIT DE GRENAILLE

$$\langle \tau \rangle = \frac{\phi_0}{R_p(I-I_c)}$$

INDUCTANCE EQUIVALENTE: $L_p = \frac{\phi_0}{2\pi}\frac{1}{I_c}$

LA BOITE A FLUXONS



ENERGIE MAGNETIQUE

$$E = \frac{(n\phi_0 - \phi_{ext})^2}{2L_T}$$

$L_T = L + L_p$

PAS DE FLUCTUATIONS DE n SI :

$$\frac{\phi_0^2}{2L_T} \gg k_B T$$

(THERMIQUE)

ET SI :

$$R \ll R_K$$

(QUANTIQUE)

⇓

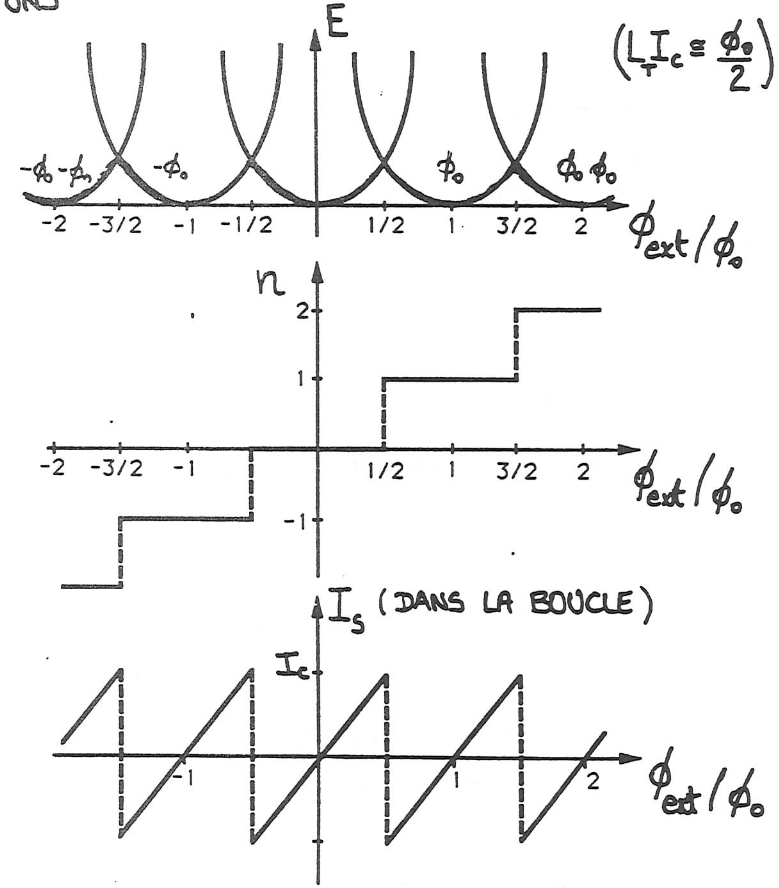
$L_T \ll 30\,nH$

$T \sim 4K$

COMME $L \sim \mu_0 r$

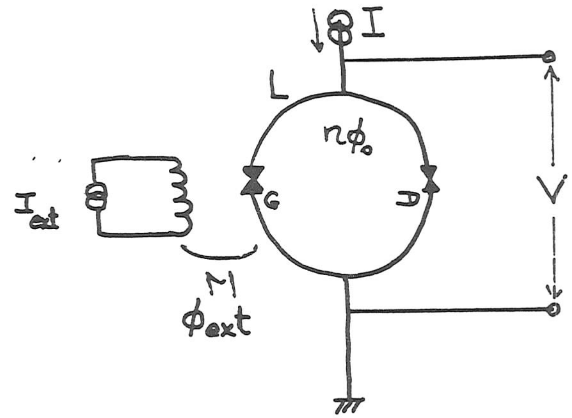
⇒ rayon $r \ll 1cm$

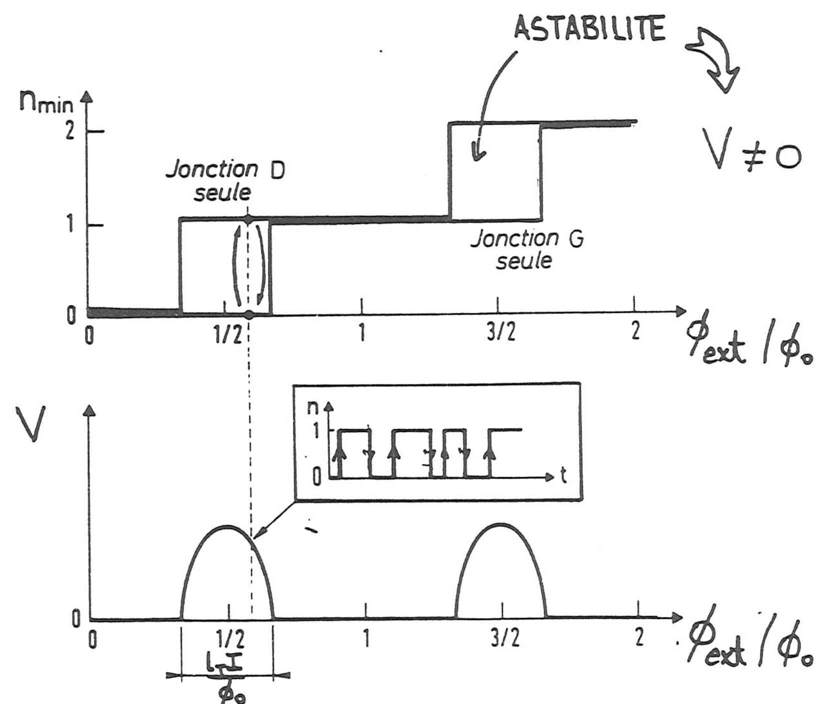
$I_c \gg 30\,nA$



LE SQUID (dc)

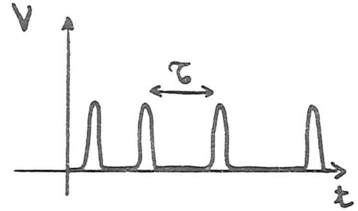
UNE BOITE A FLUXONS AVEC ENTRÉE ET SORTIE DISTINCTES



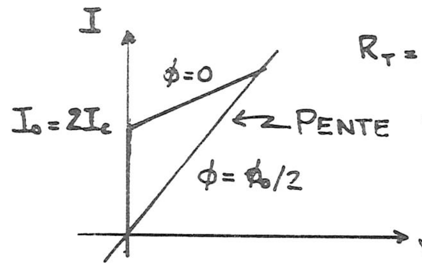


LA TENSION V AUX BORNES DU SQUID EST PERIODIQUE EN ϕ_{ext}

SENSIBILITE ULTIME DU SQUID d.c. (T=0)



A COURANT CONSTANT $\langle\tau\rangle$ (ET DONC V) EST MODULÉ PAR ϕ



LE COURANT CRITIQUE EST MODULE PAR ϕ
(ON CHOISIT $L_T I_c = \phi_0/2$)

LE POINT DE POLARISATION OPTIMUM EST $I = I_0$, $\phi_{ext} = \phi_0/4$

$\Rightarrow \langle\tau\rangle \sim \frac{L_T}{R_T} \Rightarrow V \sim \phi_0 \frac{L_T}{R_T}$

COURANT POISSONNIEN DE ϕ_0s $\Rightarrow$ BRUIT EN V $S_V = 2\phi_0 V$

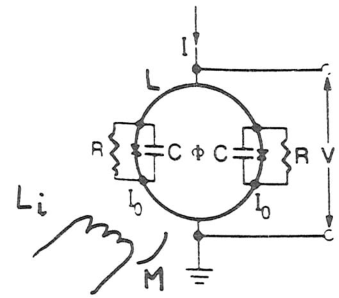
COEF. DE TRANSFERT $\left(\frac{\partial V}{\partial \phi}\right) \simeq \frac{R_T}{L_T} \Rightarrow$ BRUIT EN FLUX $\boxed{S_\phi = S_V / (\partial V/\partial\phi)^2}$

SENSIBILITE EN ENERGIE $\boxed{\mathcal{E} = \frac{S_\phi}{2L_T} \approx \phi_0^2/R_P}$

POUR QUE LES FLUCT. QUANT. NE DETRUISENT PAS LA QUANTIFICATION DU FLUX $\Rightarrow \frac{\phi_0^2}{2L_T} > \frac{\hbar}{\langle\tau\rangle}$ $(R_P < \frac{\pi}{2} R_K)$

LIMITE QUANTIQUE $\mathcal{E} > \hbar$

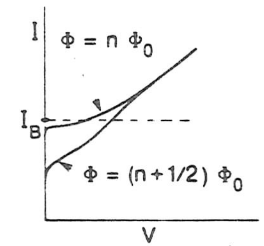
LE SQUID A JONCTIONS JOSEPHSON



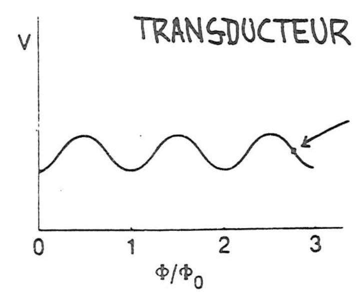
x : JONCTION TUNNEL SOPRA

TYPIQUEMENT
$I_0 \sim 5 \mu A$
$R \sim 8\,\Omega$
$C \sim 0.5$ pF
$L \sim 0.4$ nH

MODULATION DU I_c



TRANSDUCTEUR FLUX-TENSION



$\frac{\partial V}{\partial \phi} \approx \frac{R}{L} \sim 15\mu$

BRUIT EN SORTIE : $S_V \approx 16 k_B T R$ (REGIME THERMIQUE)

BRUIT EN FLUX A L'ENTREE $S_\phi = \frac{S_V}{(\partial V/\partial\phi)^2}$

SENSIBILITE EN ENERGIE $\mathcal{E} = \frac{S_\phi}{2L} \approx 9 k_B T \frac{L}{R}$

TYPIQUEMENT A 4K $\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} S_\phi^2 \simeq 2\times10^{-6}\, \phi_0/\sqrt{Hz} \\ \mathcal{E} \approx 400\,\hbar \end{array} \right\}$

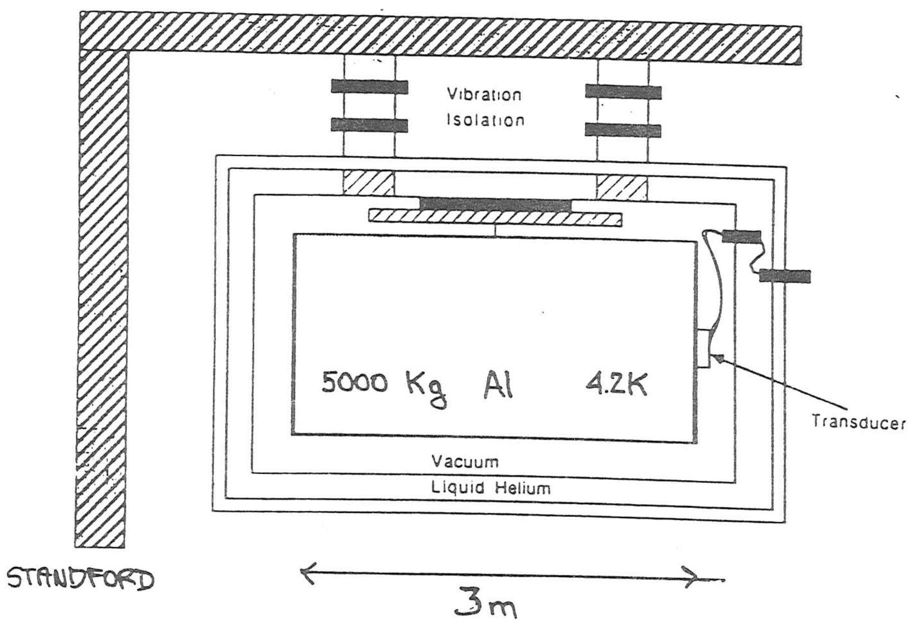
LIMITE QUANTIQUE (PETIT L, BASSE T) $\mathcal{E} \sim \hbar$

(21)

DETECTION D'ONDES GRAVITATIONNELLES

ANTENNE DE WEBER (Michelson et al. Science 237, 150, 1987)

PULSE ($\tau \sim 1ms$) EMIS PAR UNE ETOILE QUI S'EFFONDRE METS EN OSCILLATION LA BARRE D'AL.



MODE FONDAMENTAL

$\frac{\omega}{2\pi} \sim 842\ Hz$

$Q \sim 5 \times 10^6$

SENSIBILITÉ $\frac{\langle \delta\ell^2 \rangle^{1/2}}{\ell} \sim 10^{-18}$

POURRAIT DETECTER DES EVENT. DANS NOTRE GALAXIE (PAS FREQUENTS!)

'IMITE QUANTIQUE

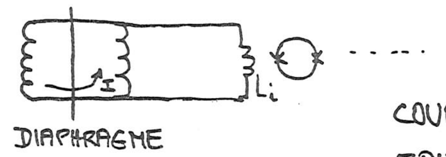
$\frac{\langle \delta\ell^2 \rangle^{1/2}}{\ell} \sim 3 \times 10^{-21} \Rightarrow T \approx 40\,nK$!

EN FAIT $T_{eff} \approx \tau\omega\, T/Q$

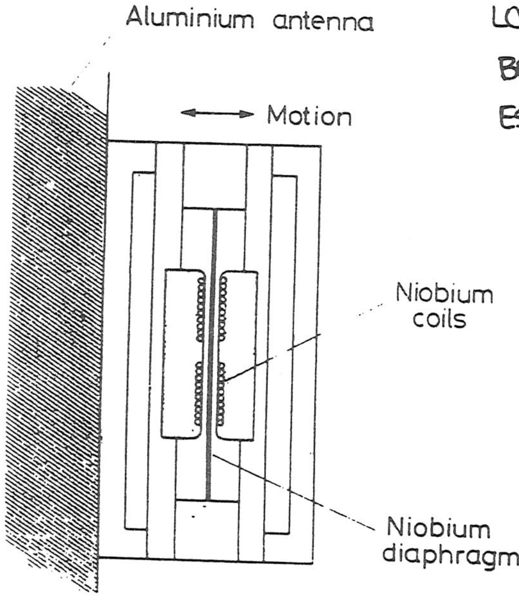
$\Rightarrow T \sim 40\,mK$ OUF !

(22)

TRANSDUCTEUR LIMITE QUANTIQUEMENT



ON PIEGE UN COURANT I DANS LA BOUCLE DE GAUCHE. LORSQUE LE DIAPHRAGME BOUGE, UN SIGNAL EST DEVIE SUR L_i



AVEC ANTENNE + SQUID LIMITES QUANTIQUEMENT ON POURRAIT DETECTER DES EVENEMENTS DANS L'AMAS DE LA VIERGE : 1 PAR MOIS ?