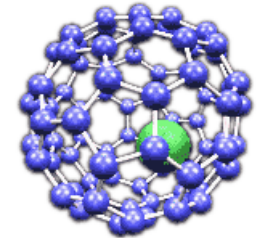
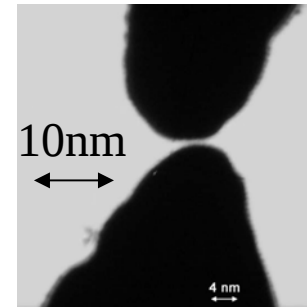
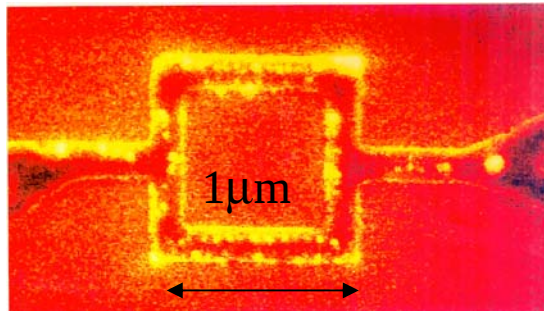


Transport électronique à l'échelle de la cohérence quantique : du microcircuit à la molécule



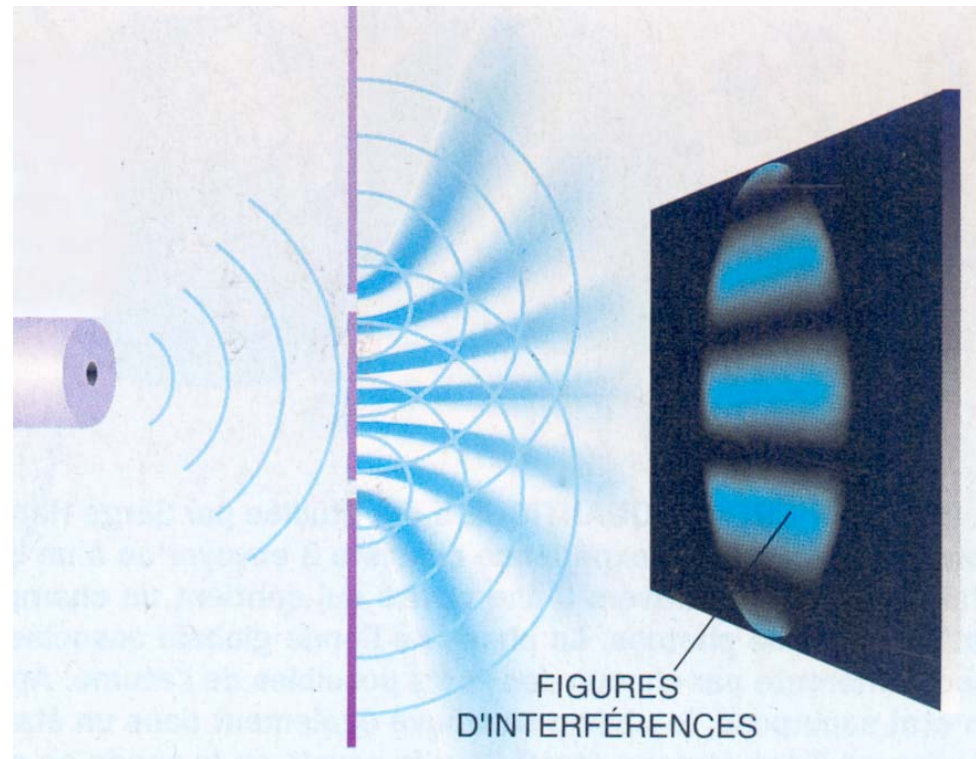
M.Ferrier, R.Deblock ,S. Guéron,

B. Reulet, A. Kasumov, H. Bouchiat (LPS Orsay)

- Corrections quantiques aux lois classiques de l'électricité
- Courants permanents et réponse de conducteurs mésoscopiques **isolés**
- Limite du **conducteur moléculaire 1D**:
Nanotubes de carbone

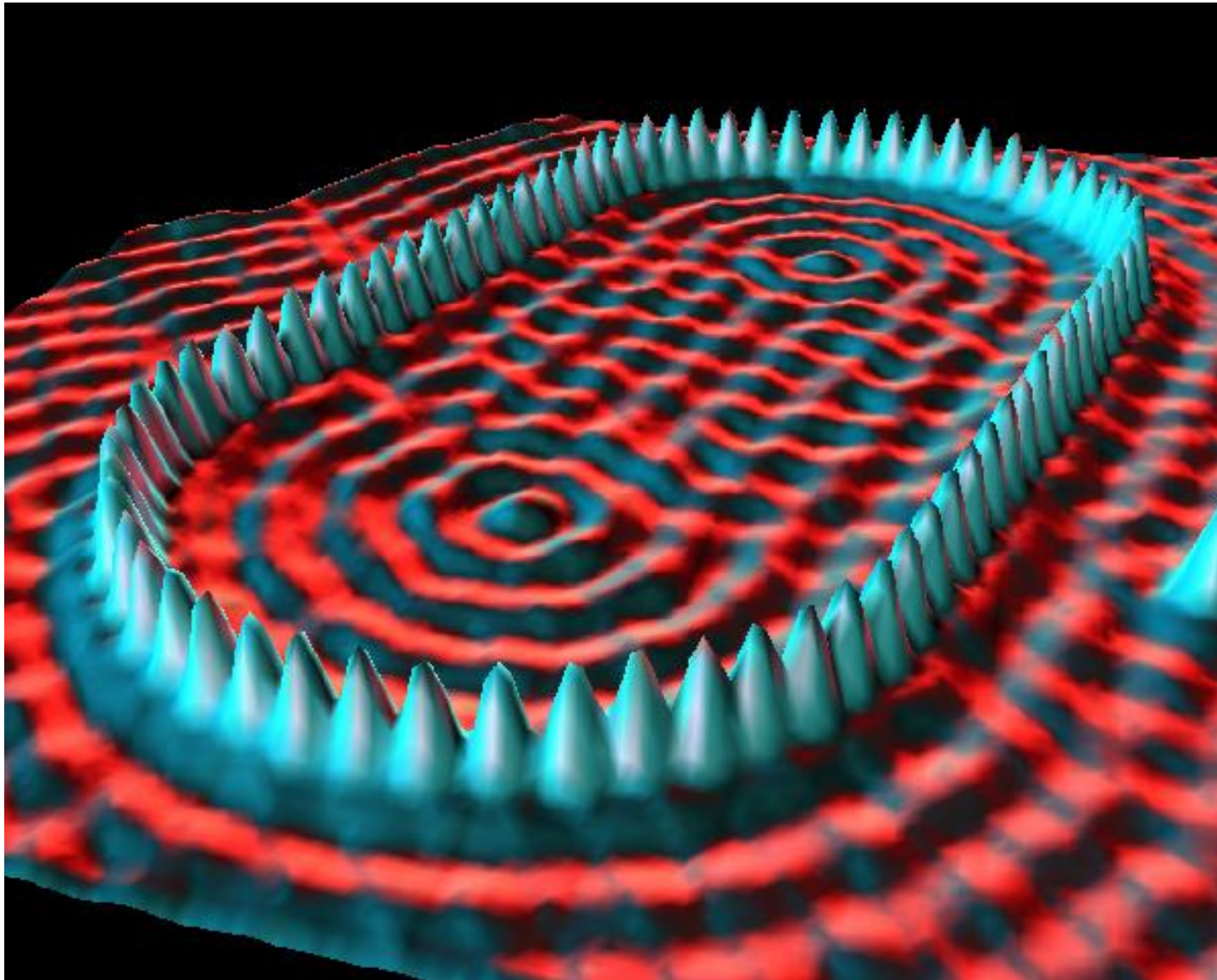
Comportement ondulatoire des électrons dans le vide

Faisceau cohérent
d'électrons



Dans un métal?

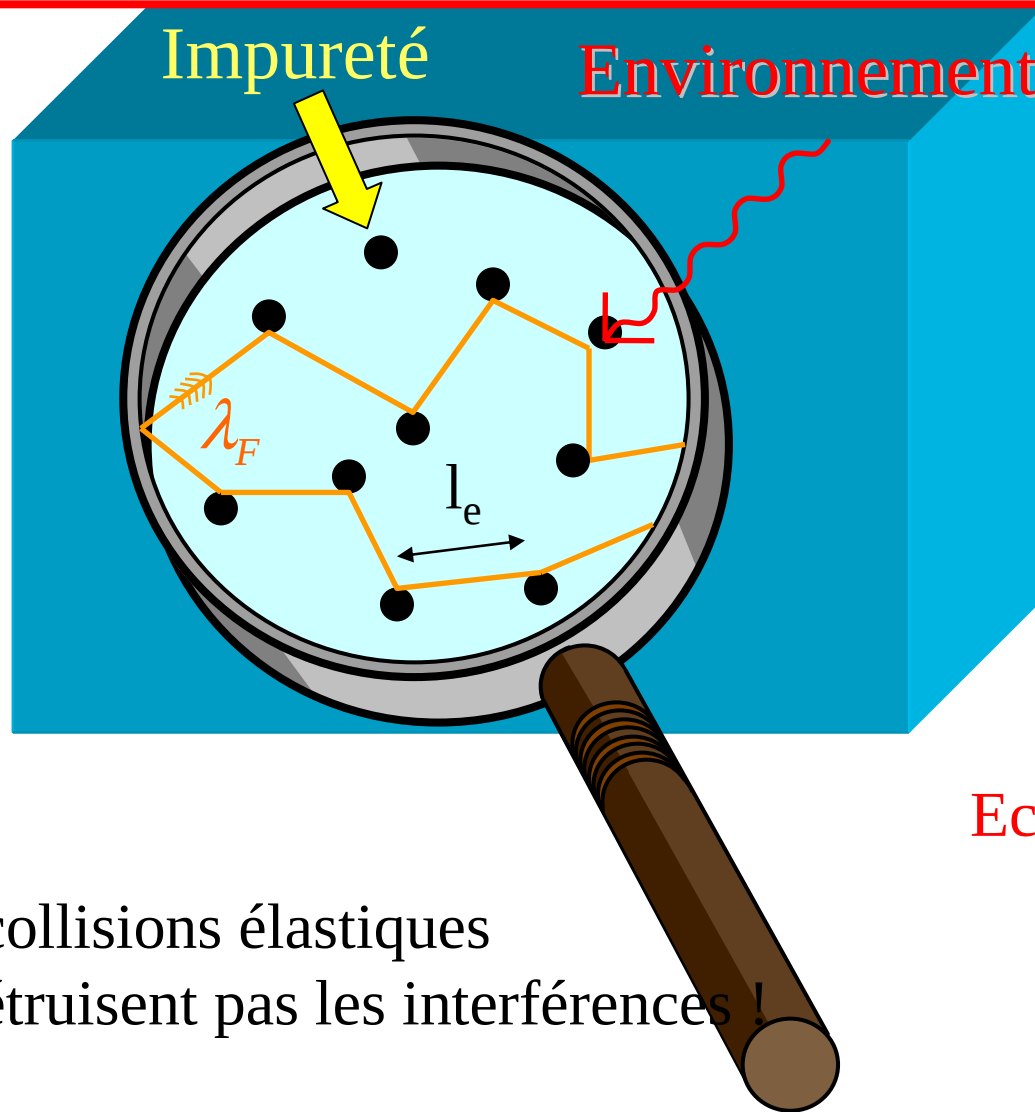
Interférences électroniques dans un « coral quantique »



Don Eidler
IBM

Microscopie par effet tunnel

Diffusion des électrons dans un métal désordonné



Collisions inélastiques

Les collisions élastiques
ne détruisent pas les interférences !

Echelle de cohérence de phase

$$L_\phi \gg l_e$$

q.q. nm (T ordinaire)

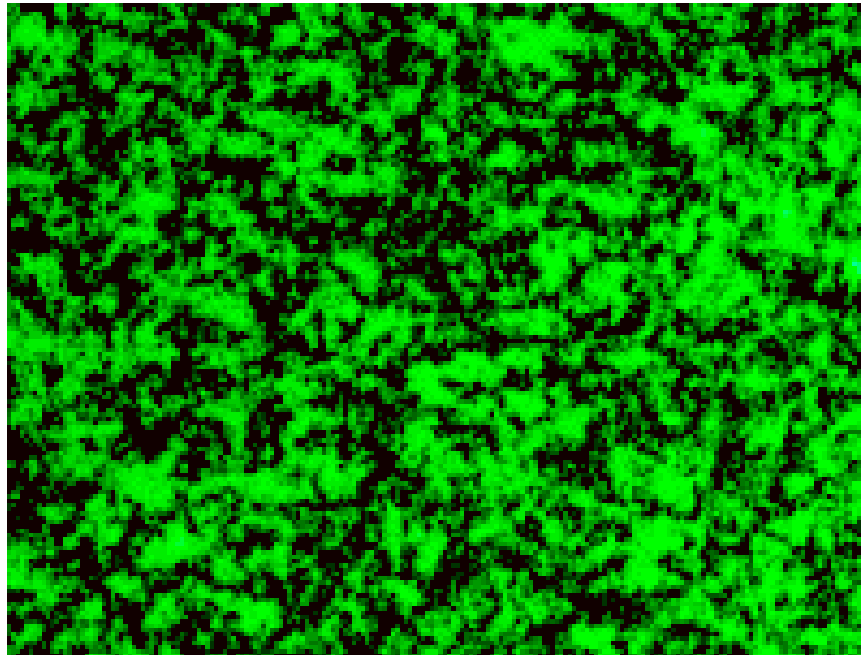
q.q. microns (T = 0.1K!!)

Régime mésoscopique

$$L < L_\phi$$

Diffusion d'une lumière cohérente par un milieu désordonné

(speckel optique)



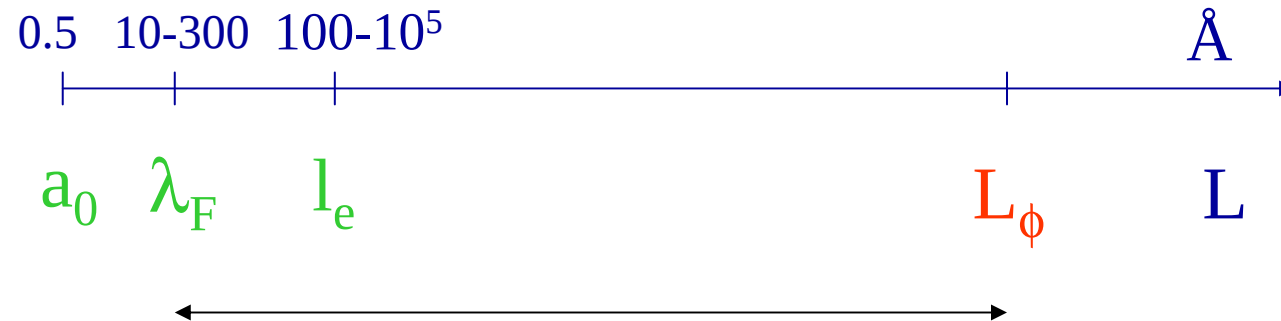
De l'atome au solide macroscopique...

Atomique

$$L \approx a_0$$

Macroscopique

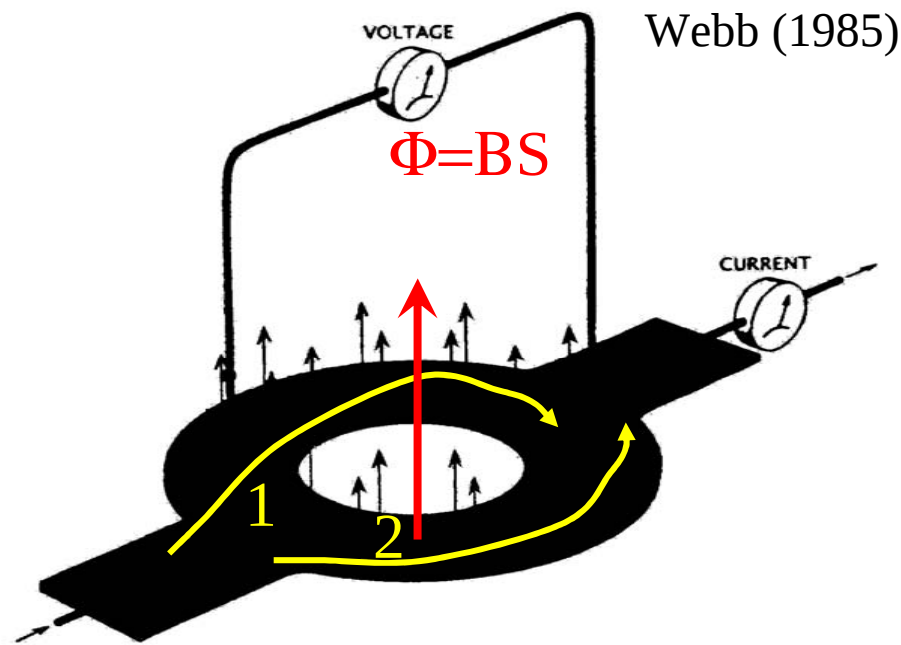
$$L \gg L_\phi$$



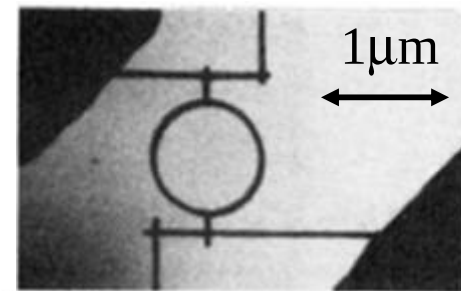
Mésoscopique

$$L_\phi \approx 1\mu m \quad T \approx 100mK$$

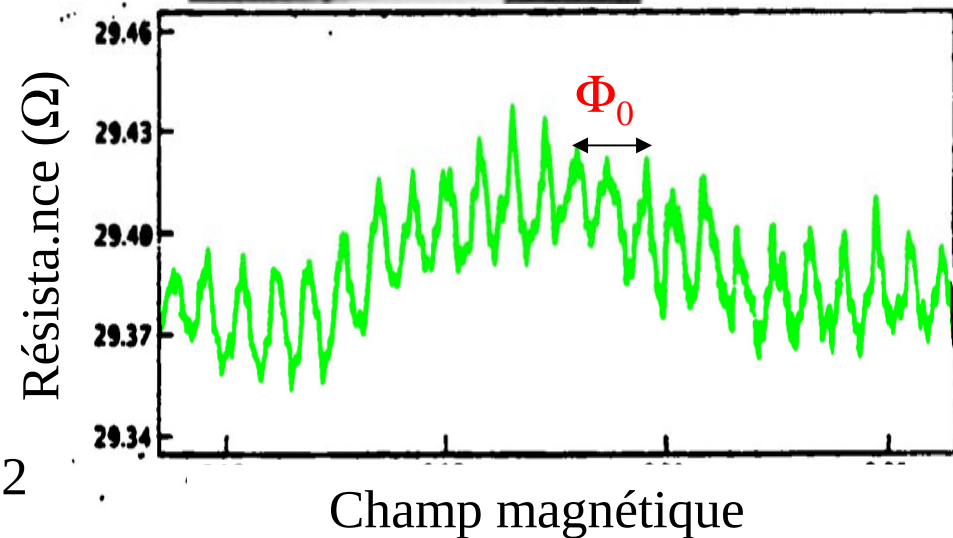
Le flux magnétique: un outil pour jouer sur la phase électronique



Webb (1985)



Anneau d'or



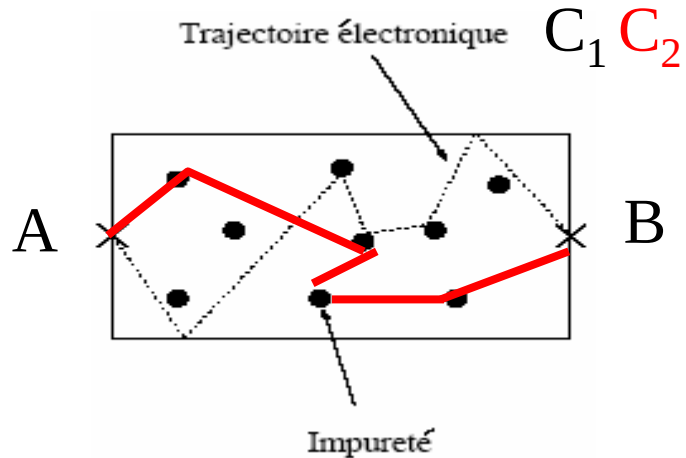
Différence de phase entre les chemins 1 et 2

$$\phi_1 - \phi_2 = 2\pi e/h \left(\int_1 \vec{A} \cdot d\vec{l} - \int_2 \vec{A} \cdot d\vec{l} \right) = 2\pi \Phi / \Phi_0 \quad \Phi_0 = h/e \text{ quantum de flux}$$

La conductance contient une contribution des interférences

$$G = 1/R \sim \left| \sum_{\text{chemins } k} t_k \exp(i\phi_k) \right|^2 = \underbrace{G_{\text{class}}}_{\propto I_e} + \delta G_{\text{int}}(\Phi)$$

Magnétoconductance mésoscopique



$$G_{AB} \approx P_{AB} = |\sum_C A(C)|^2$$

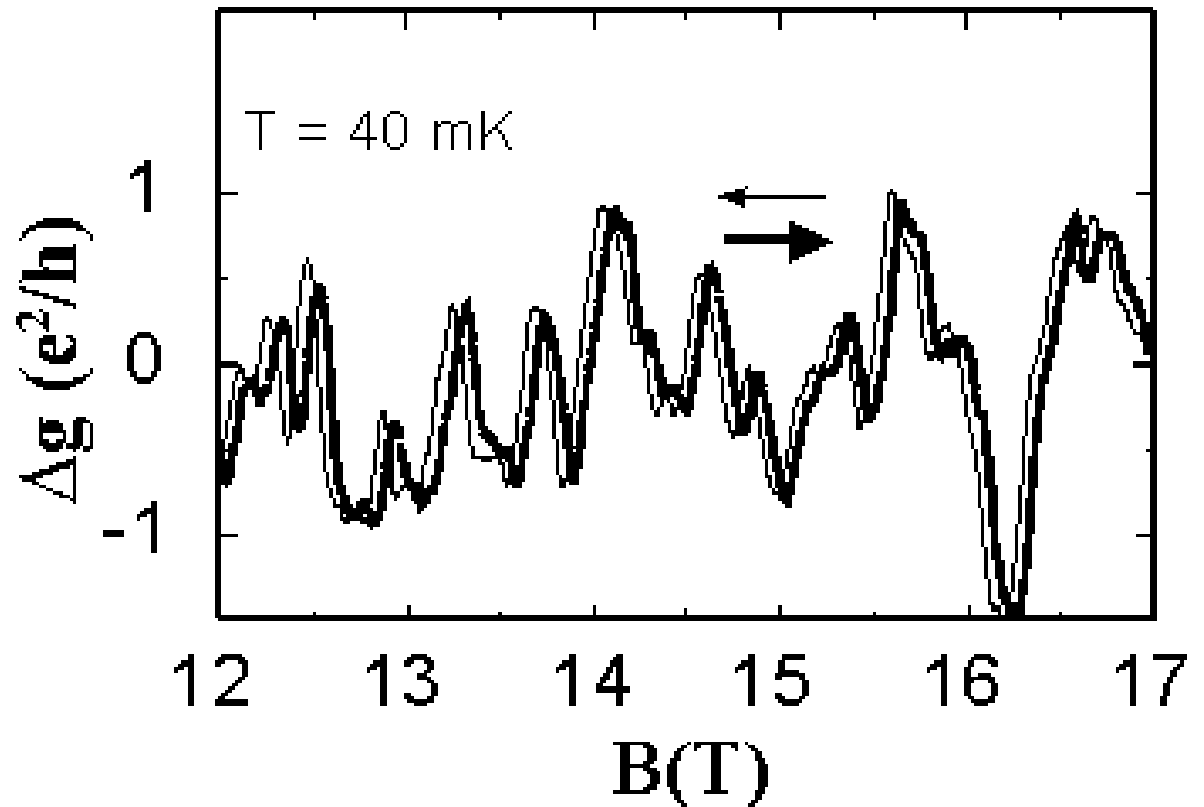
$$P_{AB} = \sum_{C_1 C_2} |A(C_1)| |A(C_2)| \exp i (\phi(C_1) - \phi(C_2))$$

En présence d'un champ magnétique:

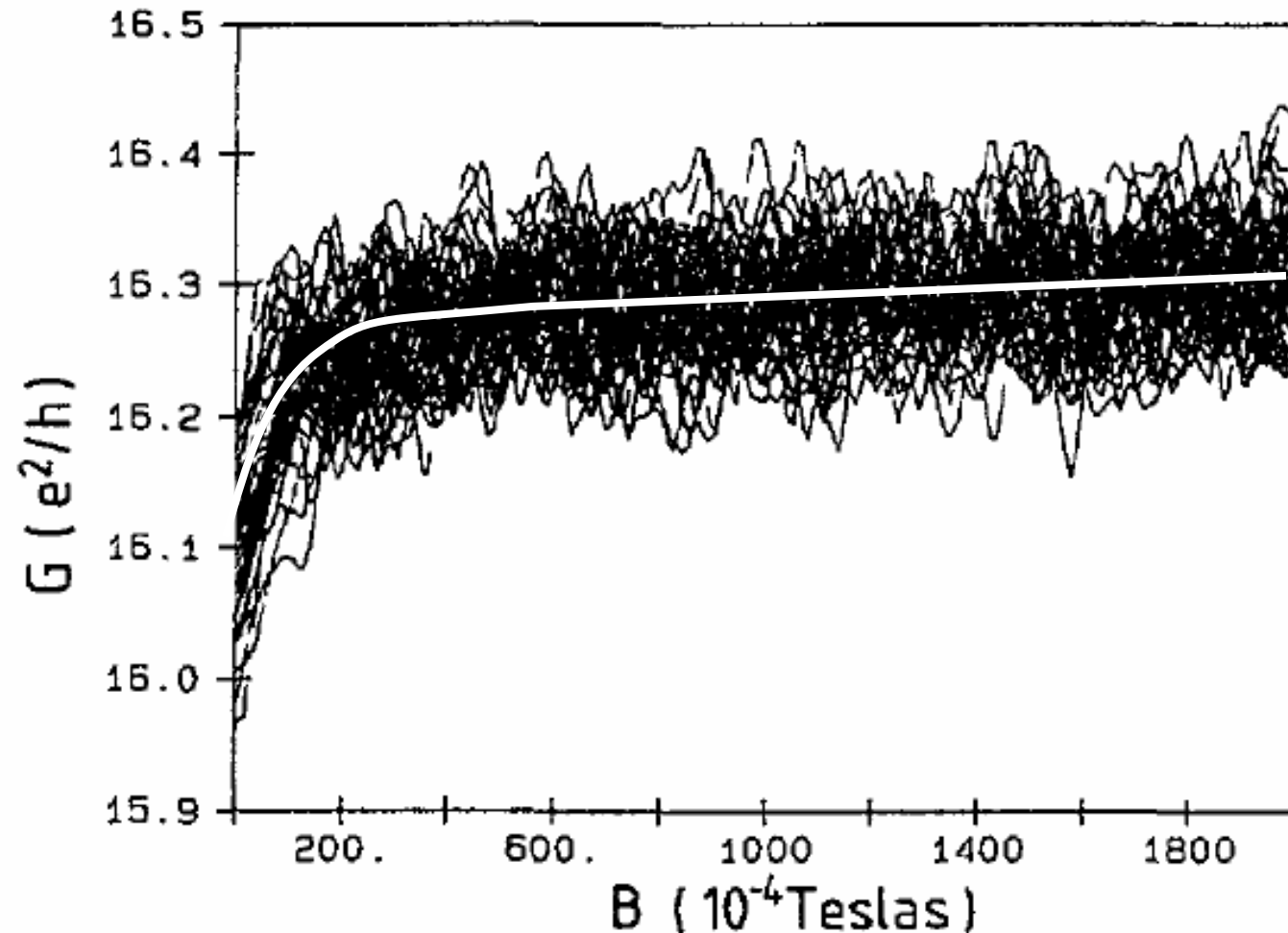
$$\delta\phi(C_1) - \delta\phi(C_2) = 2\pi \Phi_{C_1 C_2} / \Phi_0$$

« Empreinte digitale magnétique »

Caractéristique d'une configuration particulière des impuretés



Empreintes digitales magnétiques mésoscopiques

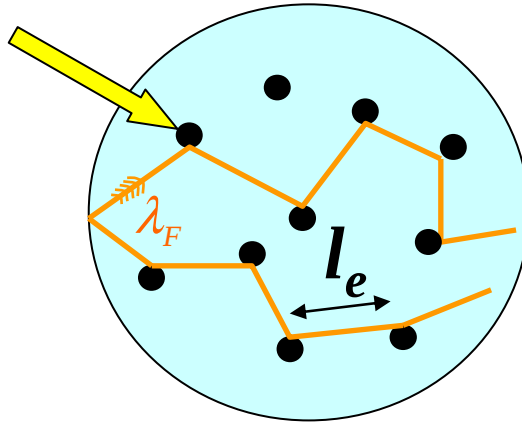


M.Sanquer
D.Mailly
J.de Physique 1991

Courbes reproductibles de magnétoconductance d'un échantillon mésoscopique pour différentes réalisations de désordre (obtenues en appliquant un pulse de courant sur l'échantillon)

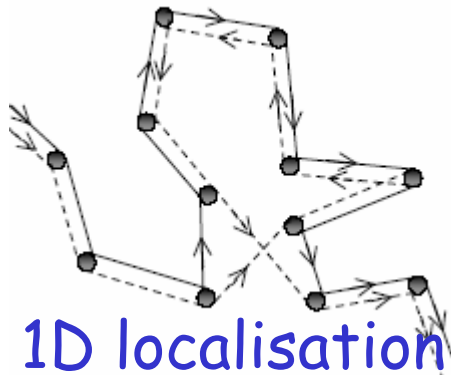
^e Ondes électroniques et désordre

Impureté



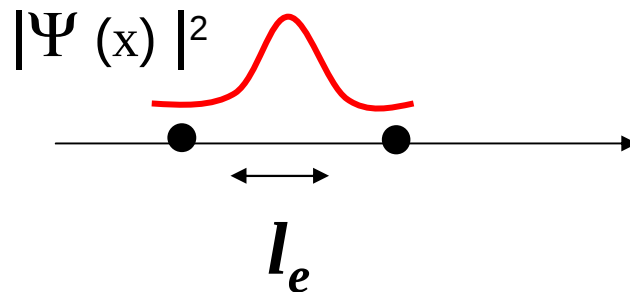
Collisions caractérisées par
 l_e : libre parcours moyen
entre deux chocs

- À 2 D et 3D Transport diffusif à l'échelle $L \gg l_e$



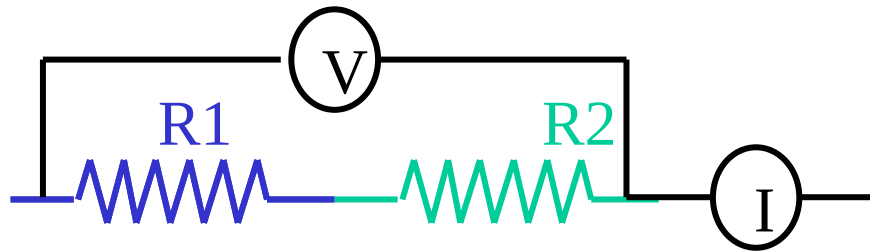
Trajectoires contenant des boucles renversées
Par le sens du temps interfèrent constructivement!
Localisation faible

- A 1D localisation des ondes électroniques pas de diffusion !

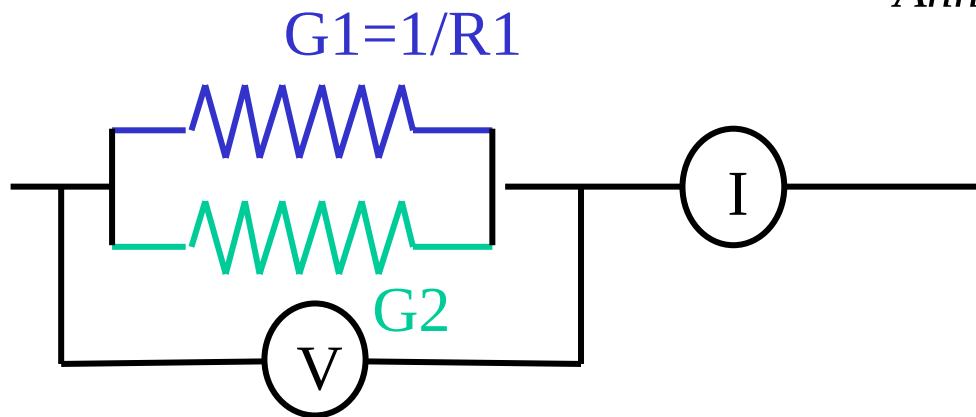


$$l_{loc} \approx l_e$$

Les lois classiques de l'électricité ne sont plus valables A l'échelle de la cohérence de phase!

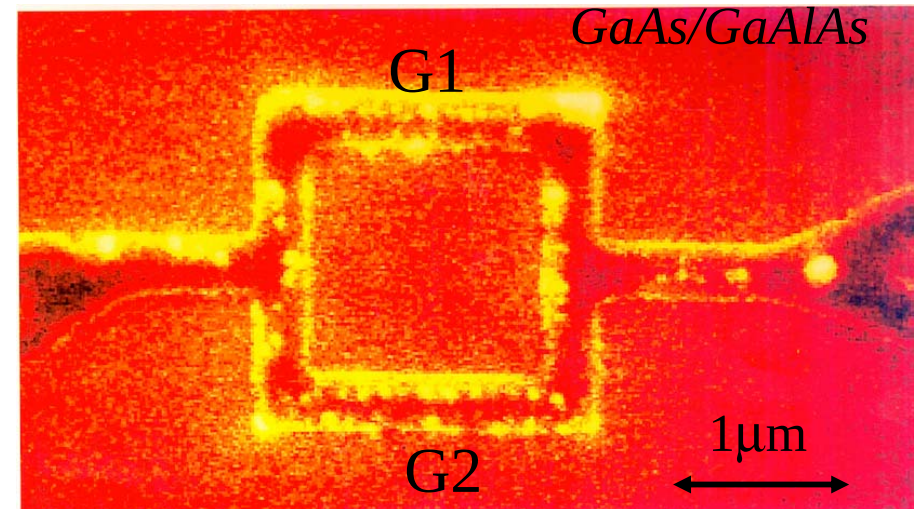


À l'échelle mésoscopique:
 $V \neq R I$ avec $R = R1 + R2$



$I \neq G V$ avec $G = G1 + G2$

Anneau gravé dans une couche semiconductrice



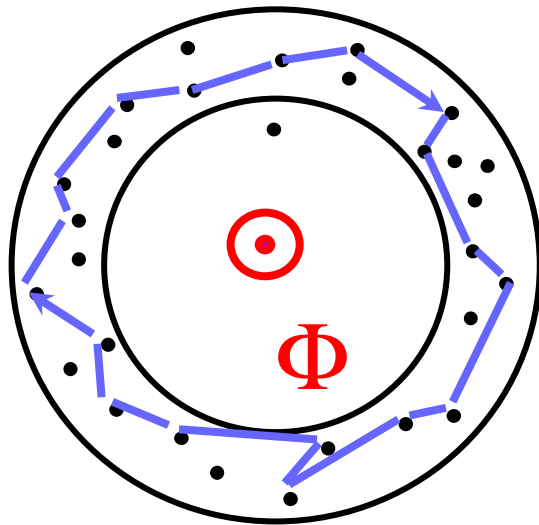
Correction quantique à la conductance

Petite pour: -Nombres canaux de conduction
-Contacts macroscopiques

Système isolé? Système 1D?

$$\frac{\delta G}{G} \sim \frac{1}{N_{traj}} \ll 1$$

Effet Aharonov Bohm sur un anneau Isolé



Déphasage sur une trajectoire fermée :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0}$$

Φ : flux magnétique dans la surface de l'anneau

$\Phi_0 = h/e$: quantum de flux

Facteur de phase sur les conditions aux limites périodiques

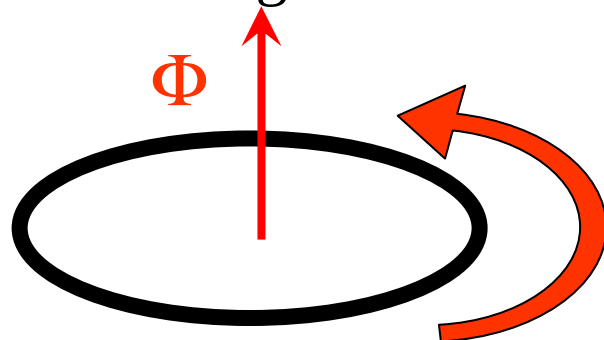
$$\psi(x + L) = \psi(x) \exp(i\Delta\varphi)$$



Fonctions d'onde Ψ_n

Energies propres E_n fonctions periodiques du flux

Energie totale : $E = \sum_{n \text{ occupé}} E_n$ oscille avec le flux

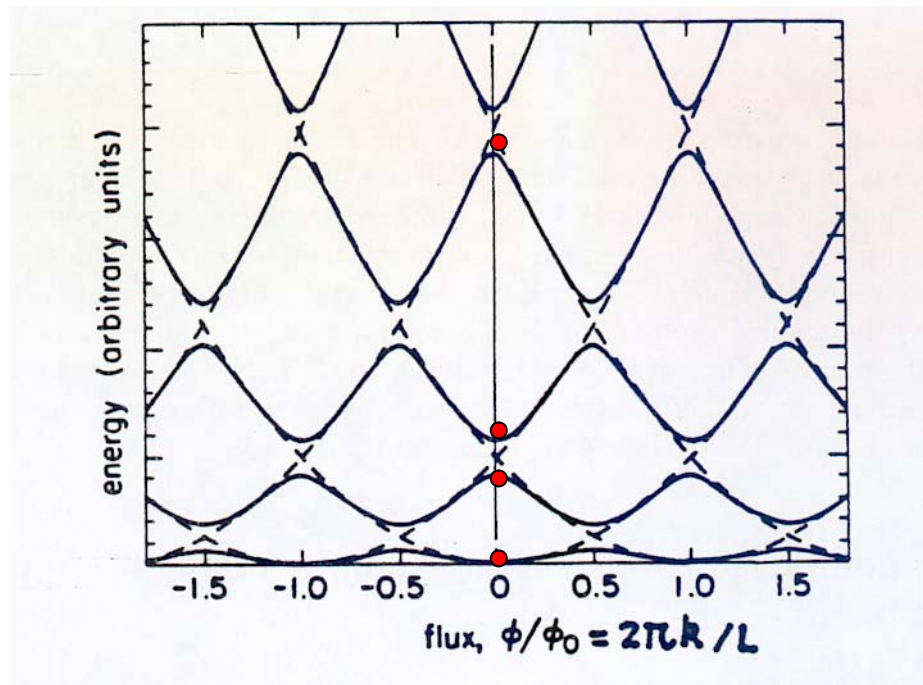


Courant permanent

$$I = -\frac{\partial E}{\partial \Phi}$$

Moment magnétique $M = -dE/dB = IS$

Spectre d'un anneau 1D



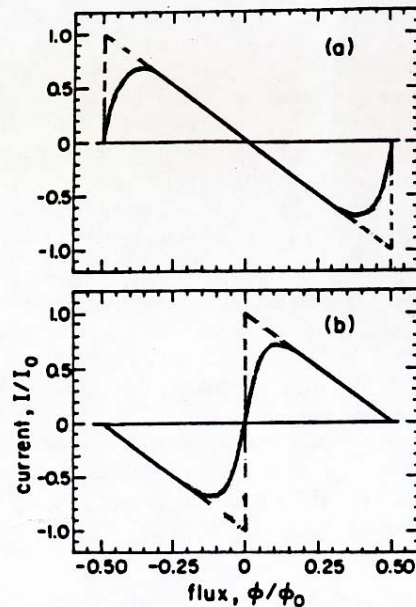
Ondes de Bloch dans un potentiel de période $L=2\pi R$

Molécules Aromatiques!

Courant permanent

$$I = -\frac{\partial E}{\partial \Phi}$$

$$\sim e v_F / L$$

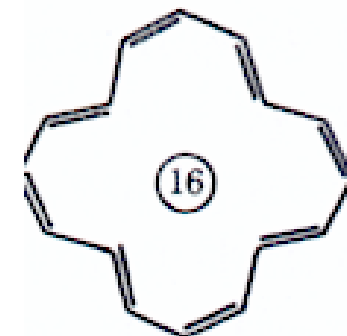
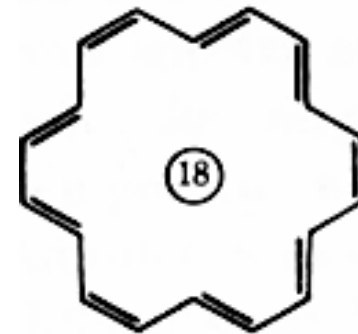


$$N=4n+2$$

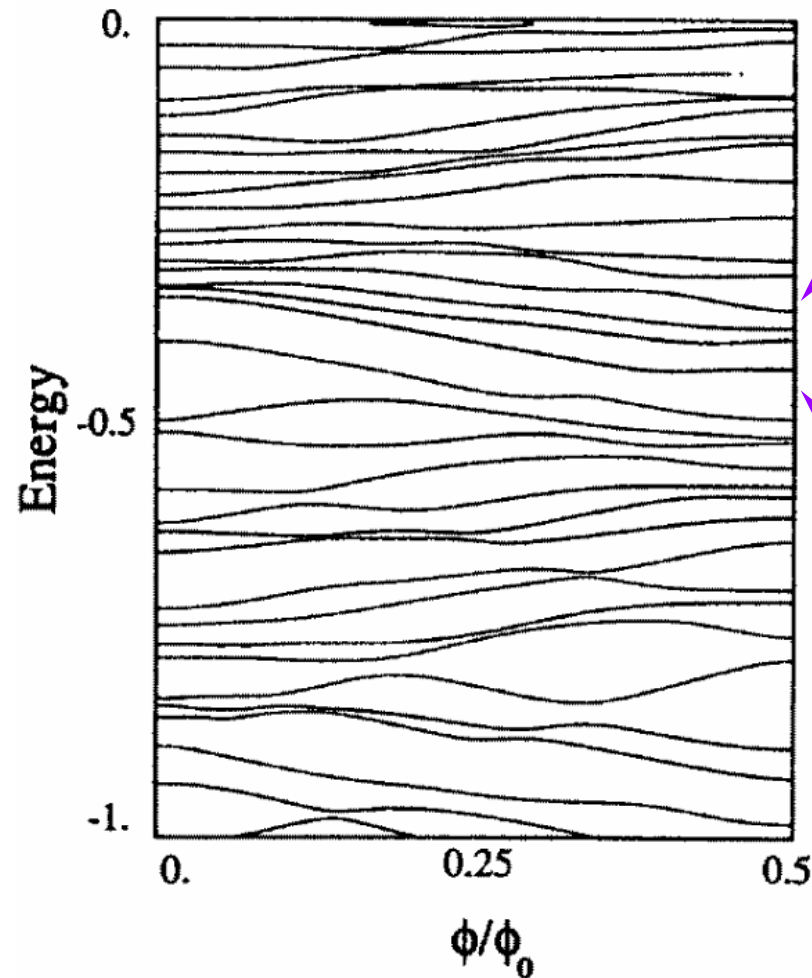
Diamagnétisme

$$N=4n$$

Paramagnétisme



Courant permanent dans un anneau désordonné



Spectre corrélé

$E_c = h / \tau_D$ énergie de Thouless

$\tau_D = L^2/D$ temps de diffusion autour de l'anneau

Courant permanent variable aléatoire

$I \sim e / \tau_D \sim 1 \text{ nA}$

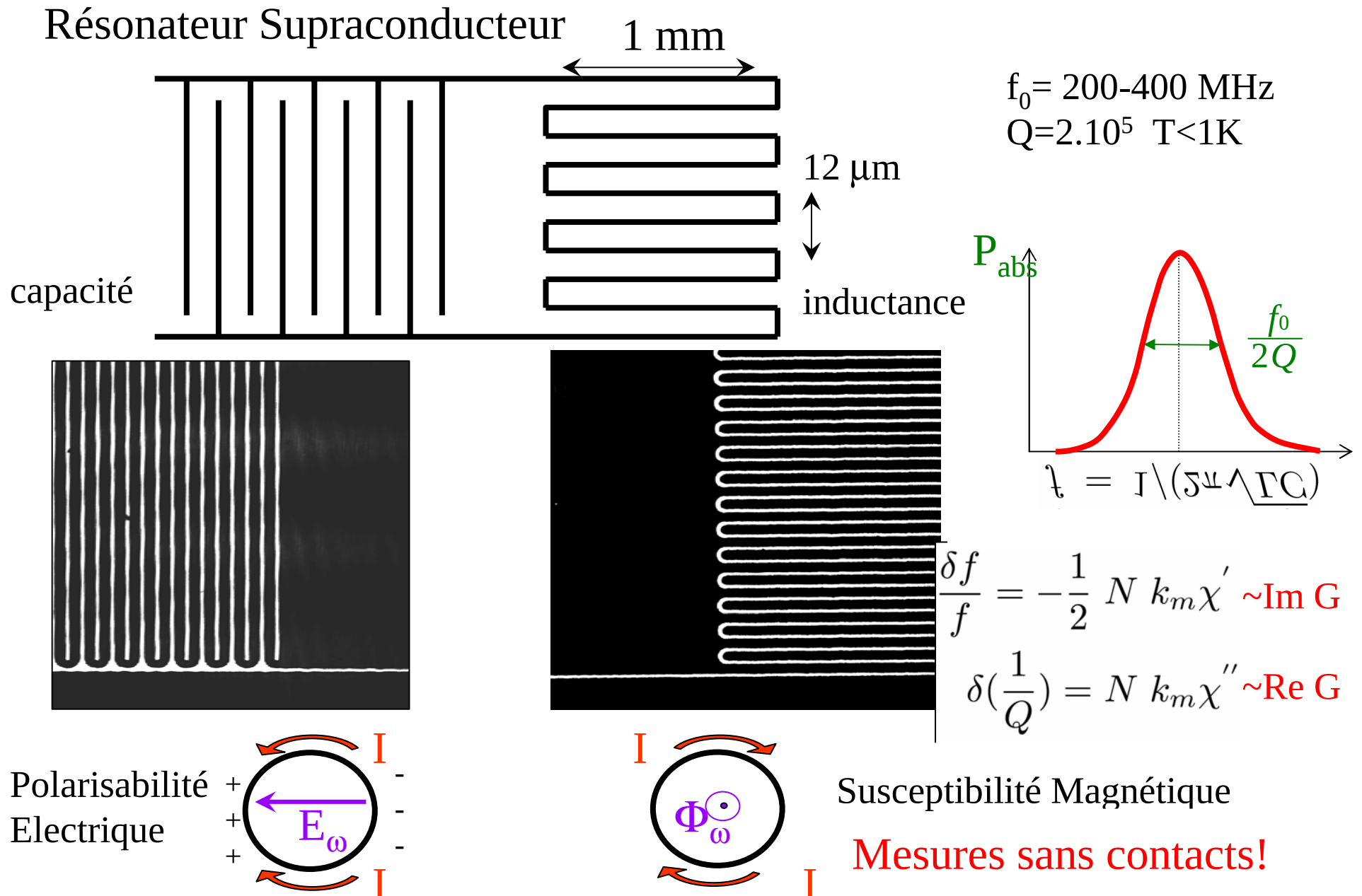
Resiste au désordre

Existe dans un anneau de résistance finie

$$E_c = h D / L^2$$

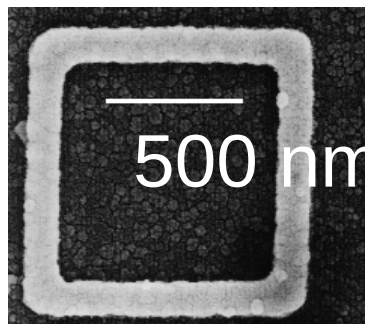
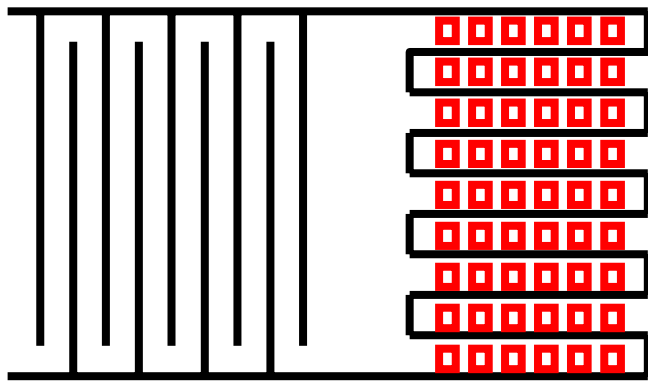
Moment magnétique associé : $M = IS \sim 100$ spins mesurable!

Mesures ac sur des anneaux isolés



Réponse magnétique d'Anneaux d' Argent

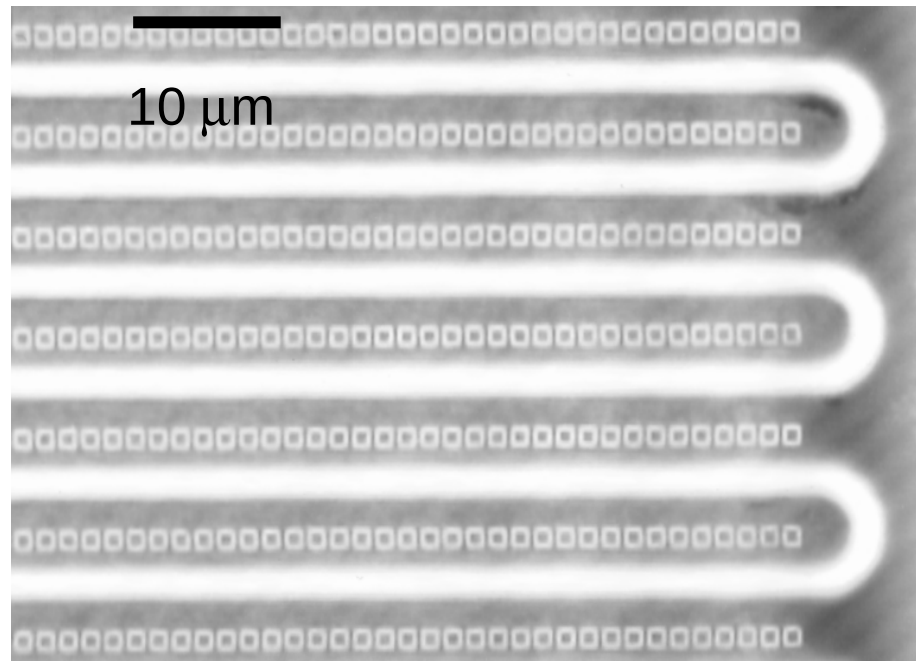
résonateur



Deblock et al. 2001

anneaux
d'argent

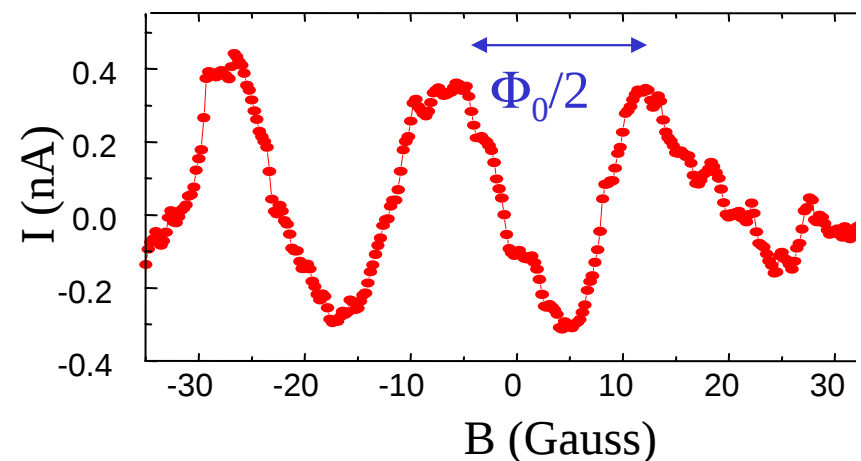
500 nm



T= 40mK

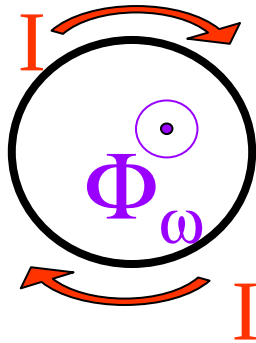
Susceptibilité magnétique : $\chi_m = dI/d\phi$

- périodique en $\Phi_0/2$
- diamagnétique à bas champ
- amplitude : $I = 0.3 \text{ nA} = e/\tau_D$

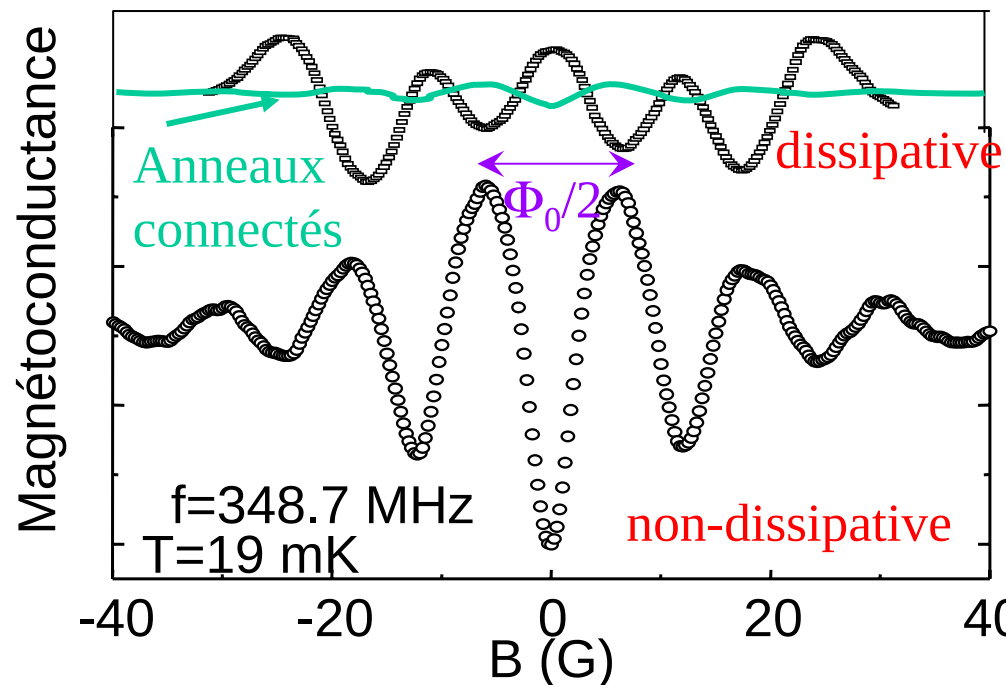
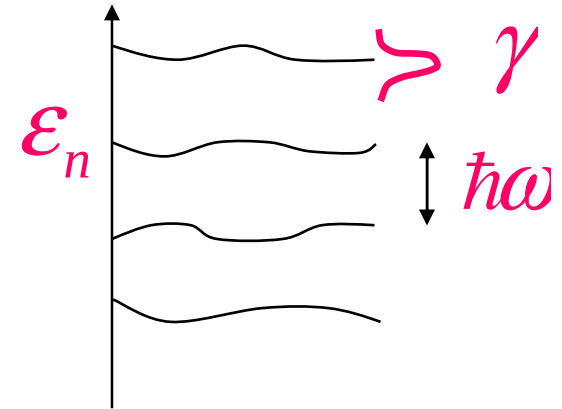
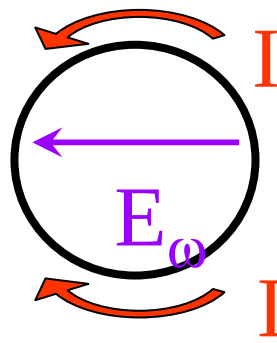


Influence du couplage avec l'appareil de mesure: Mesures sans contact !

réponse magnétique



réponse électrique

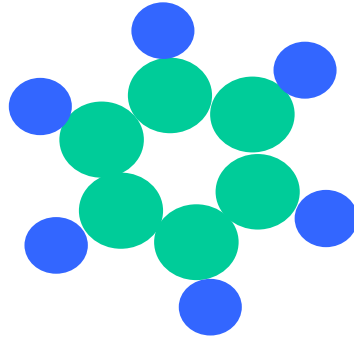


Anneaux GaAs couplés
à un résonateur

~Réponse électromagnétique
d'une grosse molécule

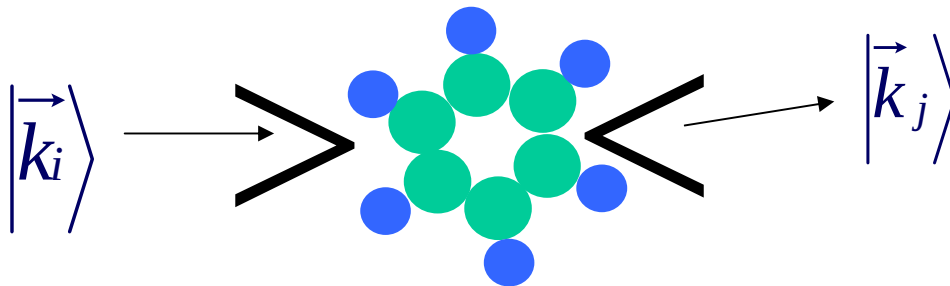
Différences entre systèmes connectés et isolés

Molécule



• Connectée

Spectre *continu*

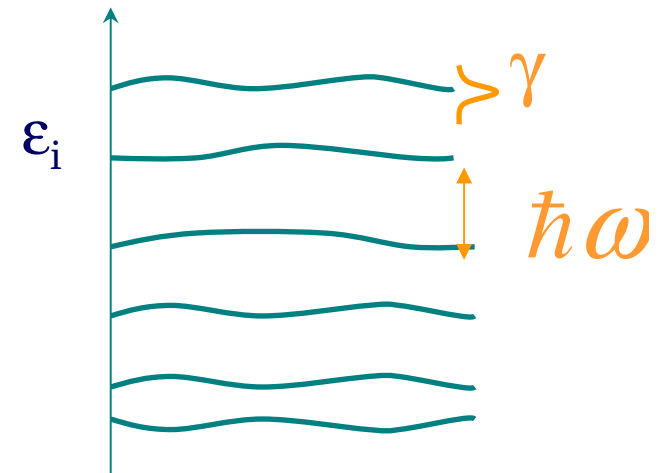


Transmission (Landauer)

$$G = \sum_{ij} |t_{ij}|^2 \neq 0$$

• Isolée

Spectre *discret*



* Absorption (Kubo)

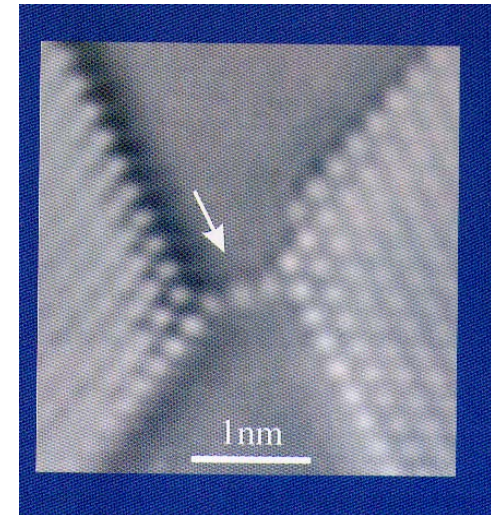
$$R(G) = 0$$

Basse fréquence

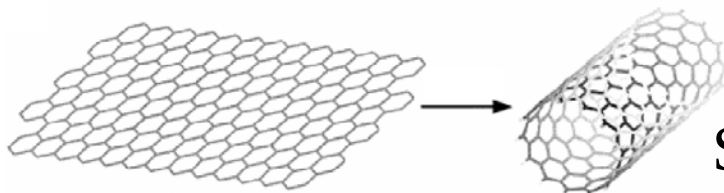
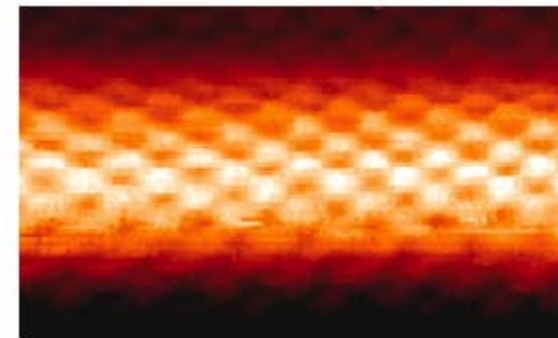
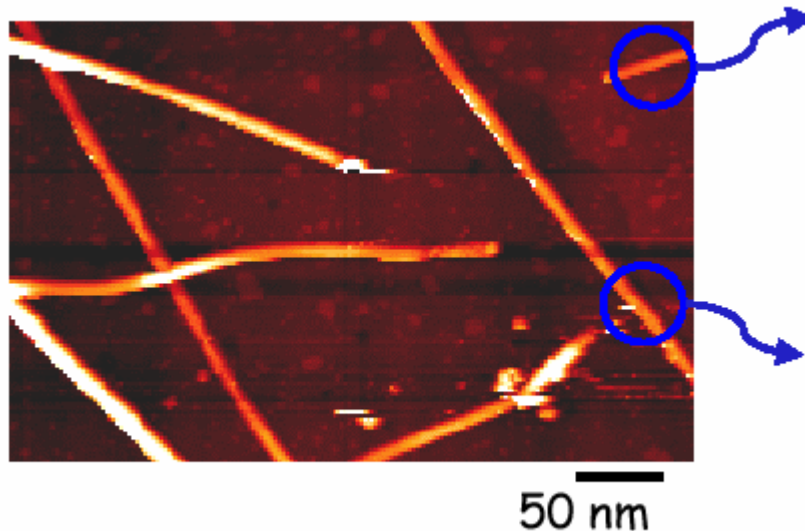
Vers la limite du fil quantique 1D

Contact atomique: chaîne d'atomes

Yoshizo et al. 2001



Dekker et al.



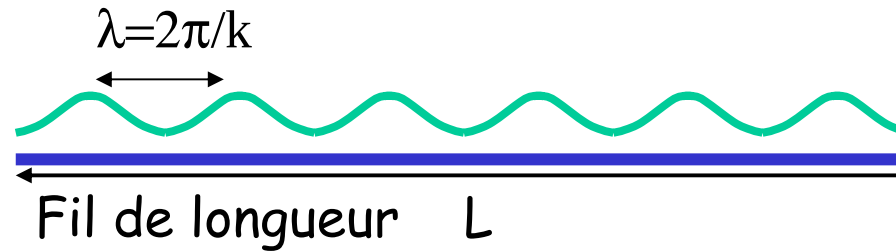
Nanotubes de carbone

Structure atomique cylindrique

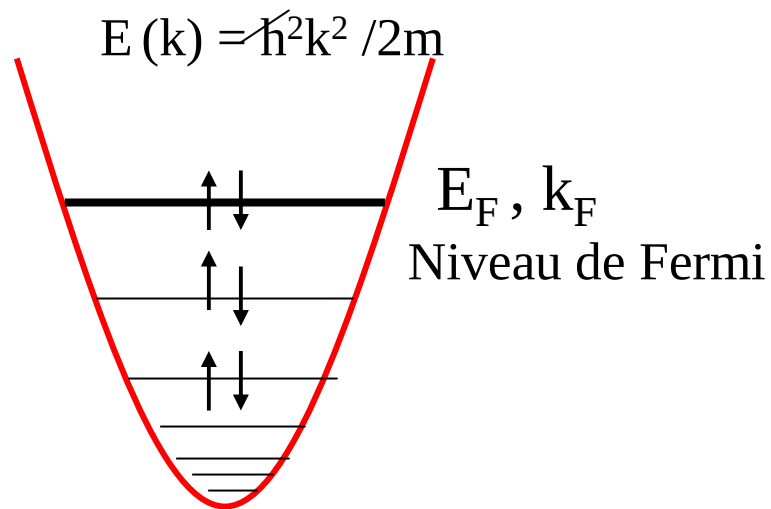
Structure électronique

2 modes de conduction seulement!

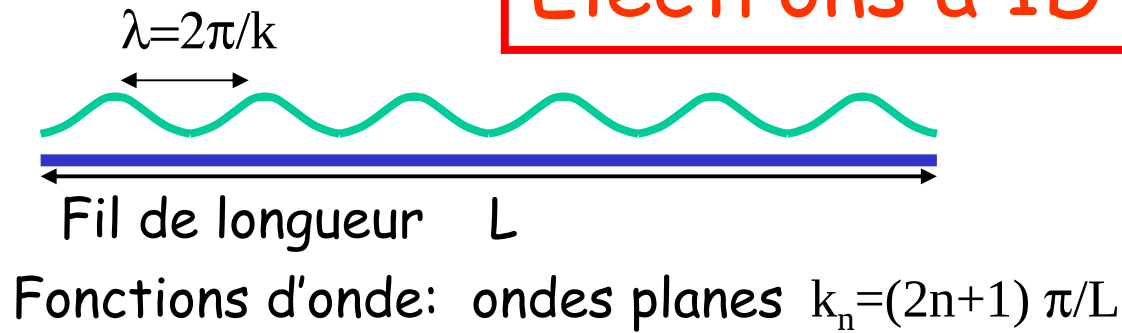
Electrons à 1D



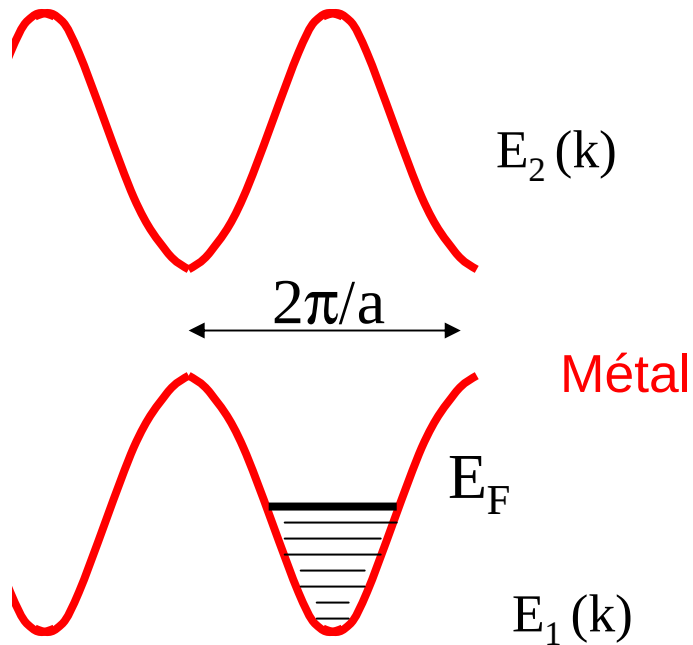
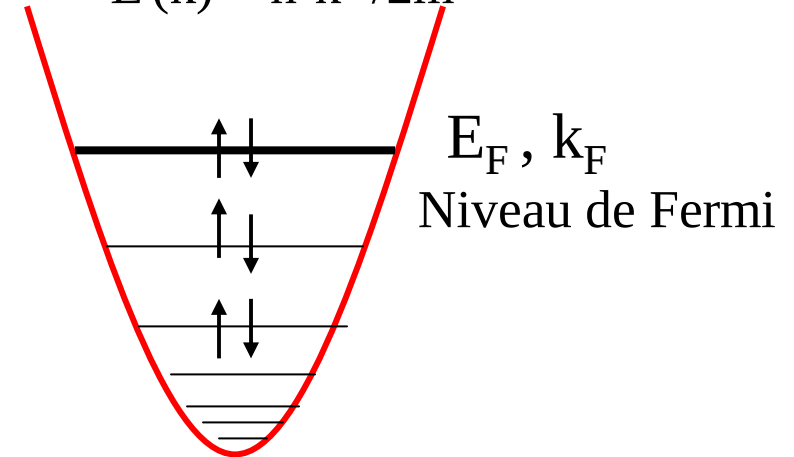
Fonctions d'onde: ondes planes $k_n = (2n+1) \pi/L$



Electrons à 1D

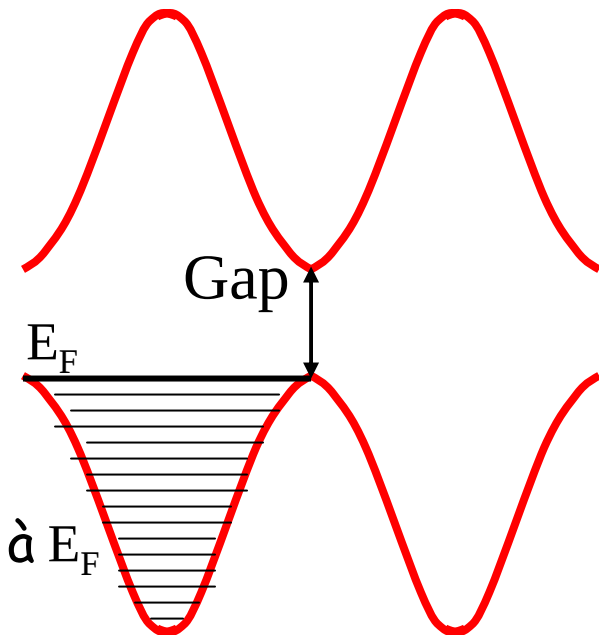


$$E(k) = \hbar^2 k^2 / 2m$$

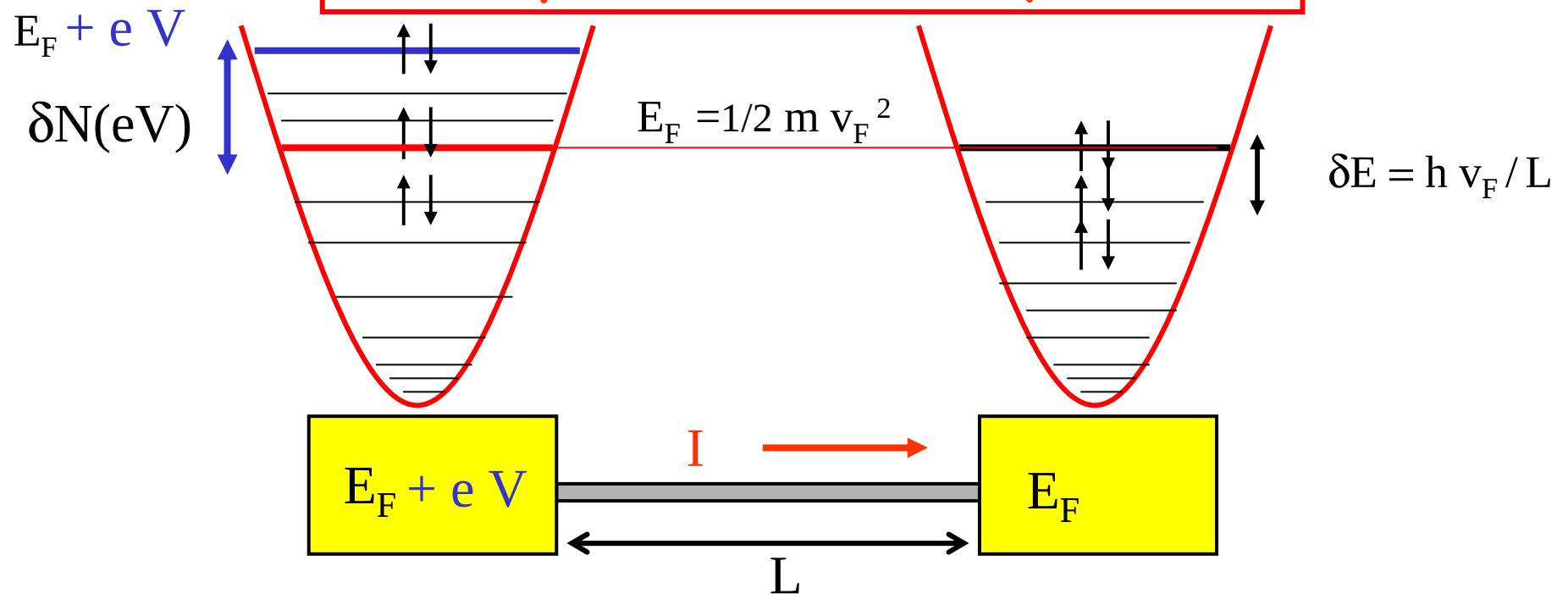


Isolant à basse température:

Pas d'états libres à E_F



Transport électronique à 1D



Fil 1D entre deux réservoirs

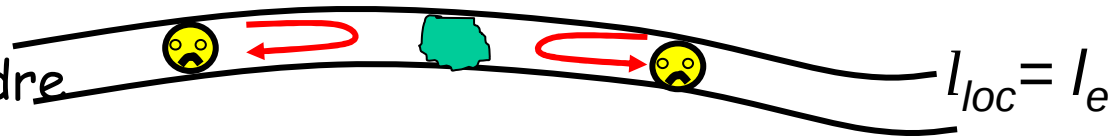
$$I = \underbrace{\left[\frac{dN}{dE} \right]_{E_F}}_{\delta N(eV)} (eV) \underbrace{\left(\frac{e v_F}{L} \right)}_{i(1 \text{ elec})}$$

$$\left[\frac{dN}{dE} \right]_{E_F} = 2 / \delta E = 2 L / h v_F \longrightarrow G = I / V = 2 e^2 / h = 1/R_Q$$

quantum de conductance !

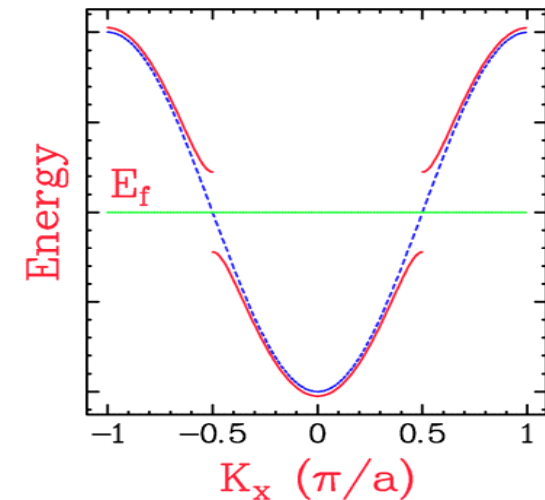
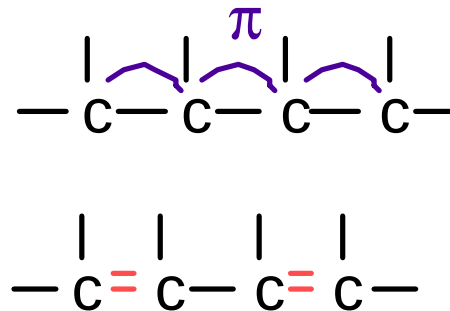
Un fil unidimensionnel peut-il être conducteur?

- Localisation par le désordre

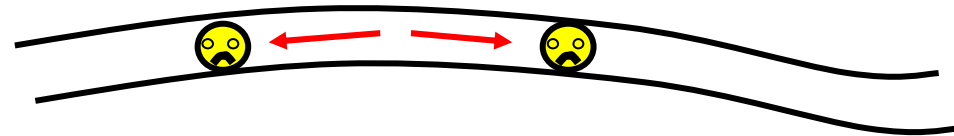


- Instabilités structurales

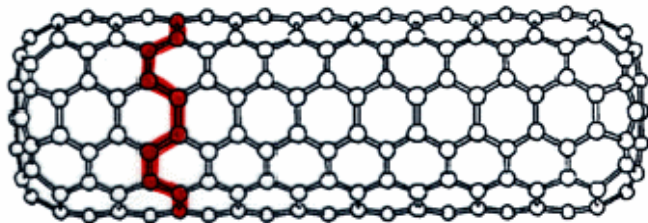
Ouverture d'un gap
au niveau de Fermi!



- Répulsion coulombienne

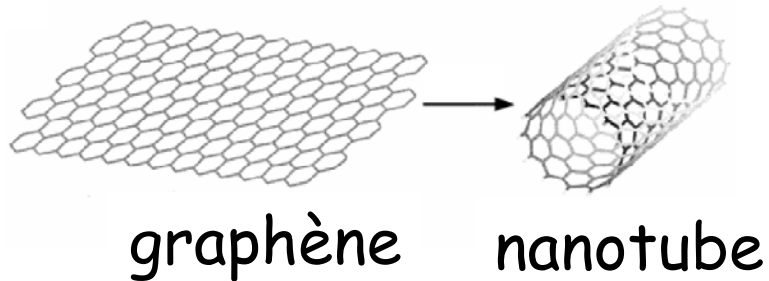


Il existe pourtant des fils moléculaires nanométriques conducteurs !
Nanotubes de carbone!



Peuvent transporter des courants de qq μA !

Nanotubes de Carbone

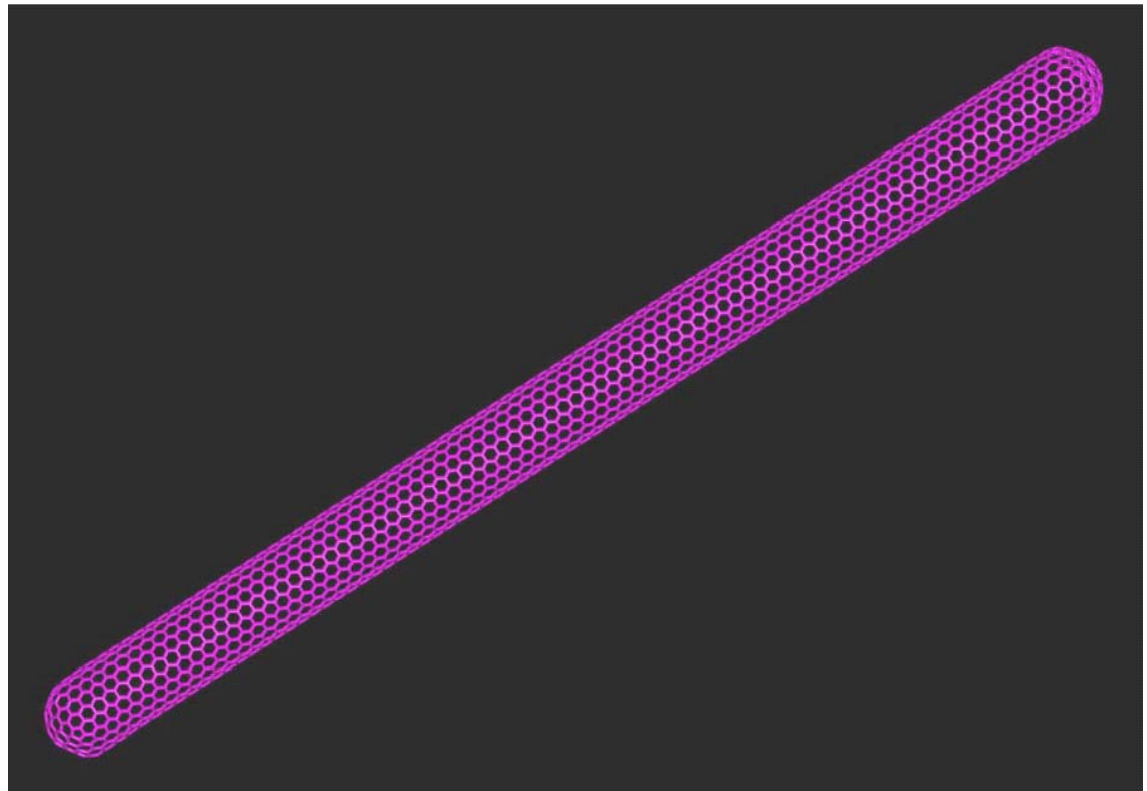


Découverts par Ijima (1991)

Fabrication:

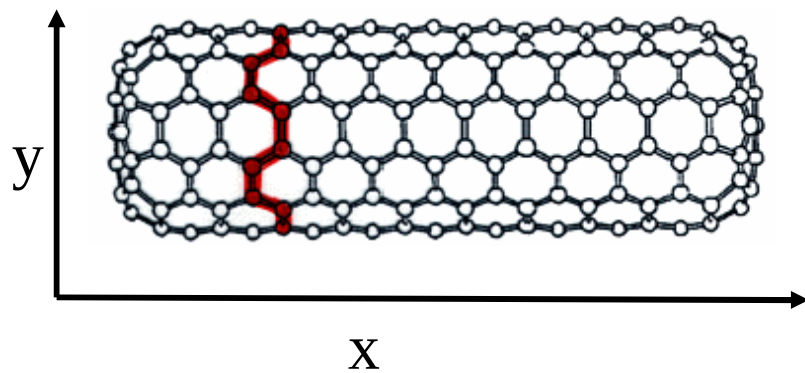
- Arc électrique
- Ablation Laser
- Décomposition méthane

nm ↕



Des molécules macroscopiques rigides!

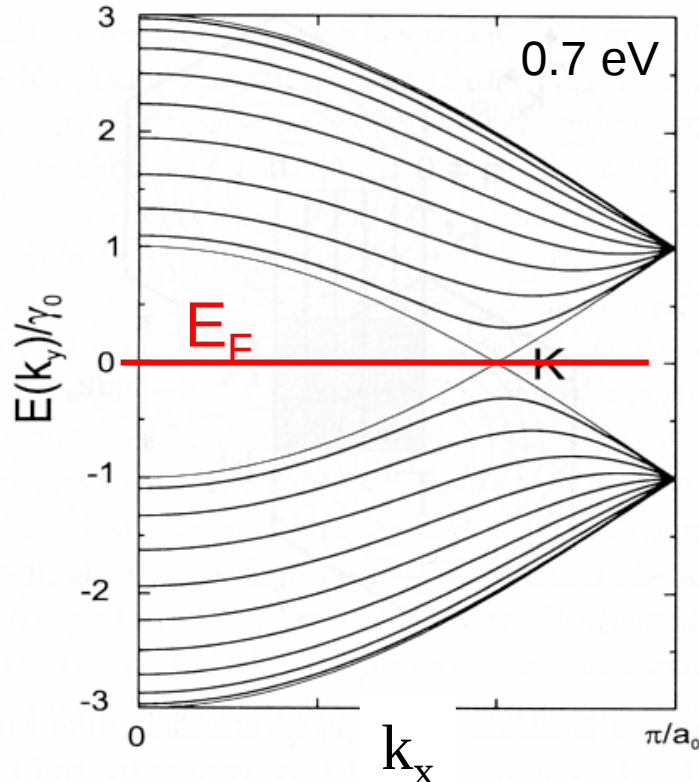
Nanotube « Armchair »



Nanotube de carbone: conducteur unidimensionnel modèle

→ Seulement 2 modes participent à la conduction

Structure de bande $k_y = 2n\pi / L_y$
 $N_y = L_y / \lambda_F$



- Pas de transition structurale

- $v_F \sim 10^6$ m/s

Faiblement désordonné

Libre parcours moyen entre 2 Collisions:

$l_e \sim 1 \mu\text{m}$

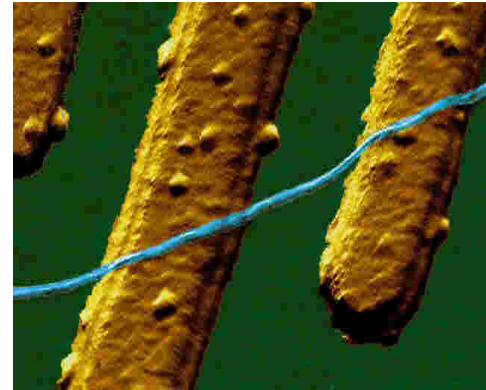
→ Resistance minimum

$$R_{\min} = R_Q / 2 = h / 4e^2 = 6.5 \text{ k}\Omega / \text{tube}$$

Comment contacter les nanotubes?

Contacts Tunnel

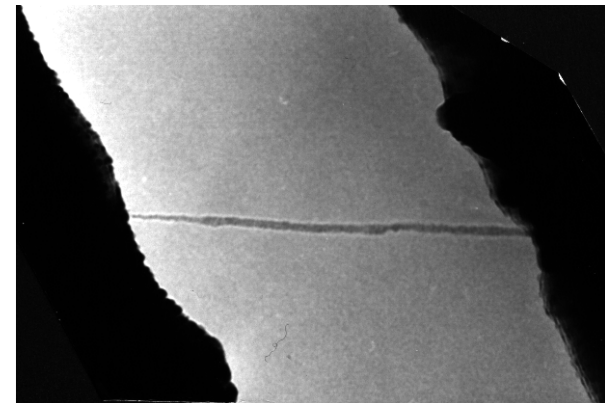
Tubes déposés sur de petites électrodes
peu invasives $R_c \gg R_Q = h/e^2$:
deviennent isolants à basse température
 $I(V)$ non linéaire



Tans et al.

Contacts Ohmiques

Tubes soudés sur des grosses électrodes
très invasives $R_c \ll R_Q$
conduisent à basse température
 $I(V)$ est linéaire

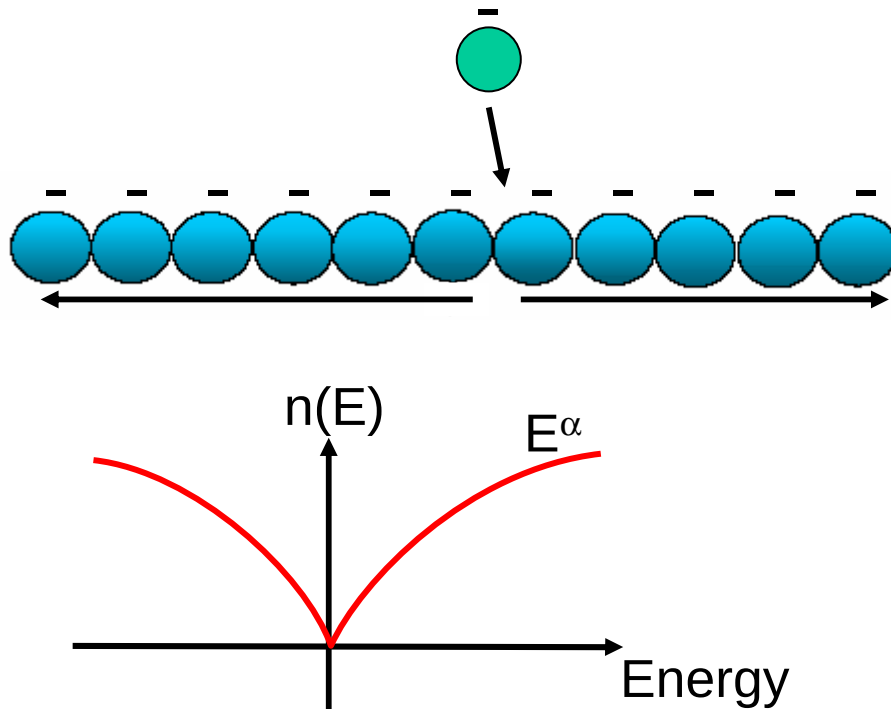


Kasumov et al.

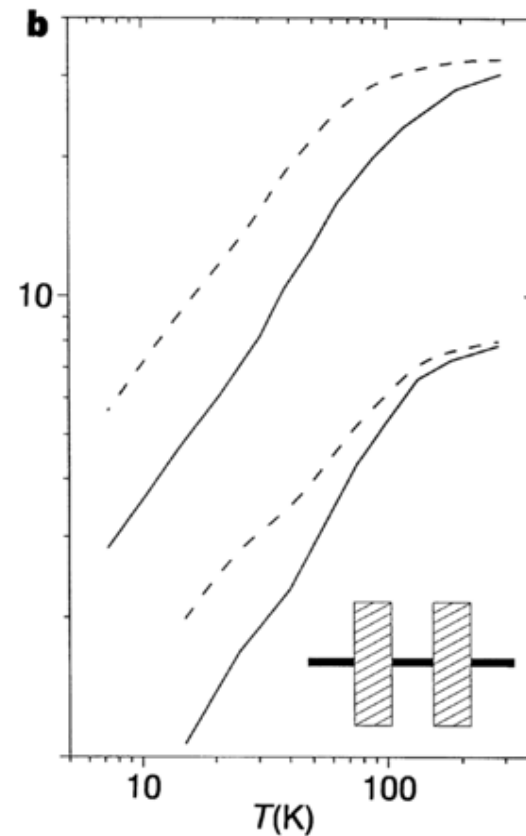
Ces 2 types de contacts permettent d'explorer des situations physiques différentes

Nanotubes sur contacts tunnel

Conductance diminue à basse température
Signature d'interactions répulsives?



Densité d'états tunnel d'un fil 1D
avec interactions répulsives



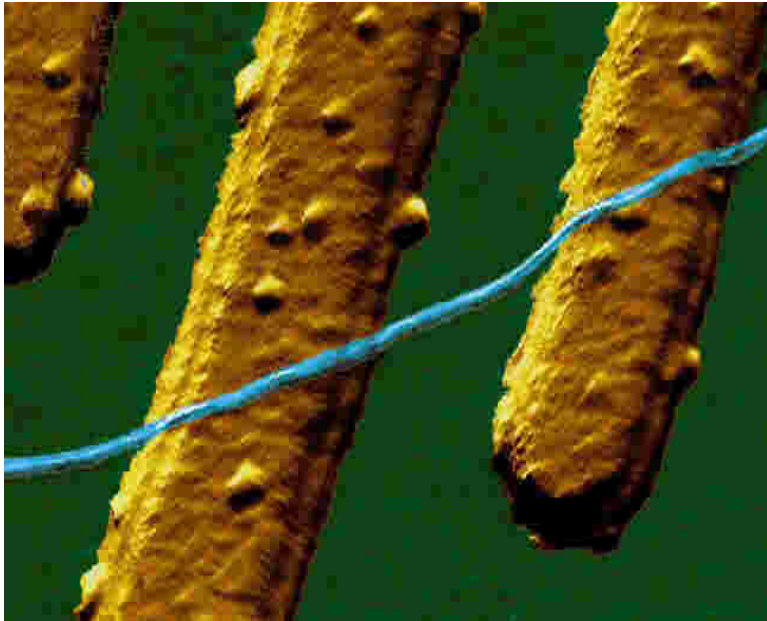
Bockrath et al.,
Nature (1999)

$$G(T) = 1/R(T) \sim T^{-0.3}$$

Les nanotubes sont-ils isolants à basse température?

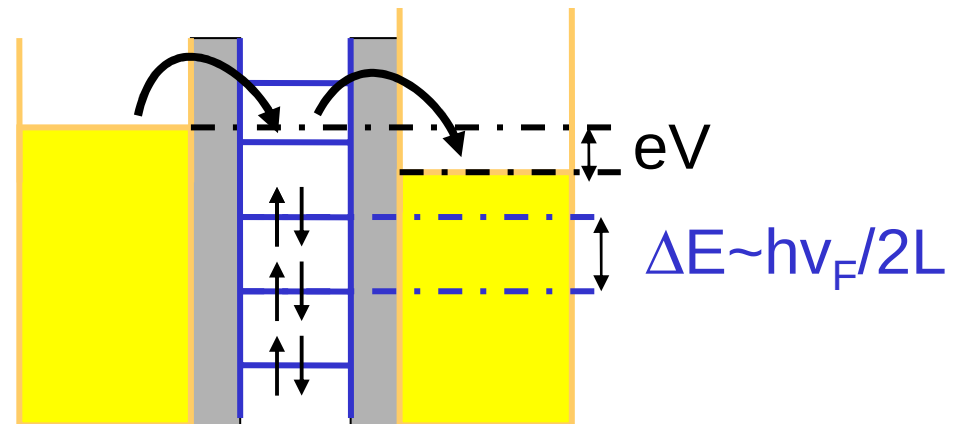
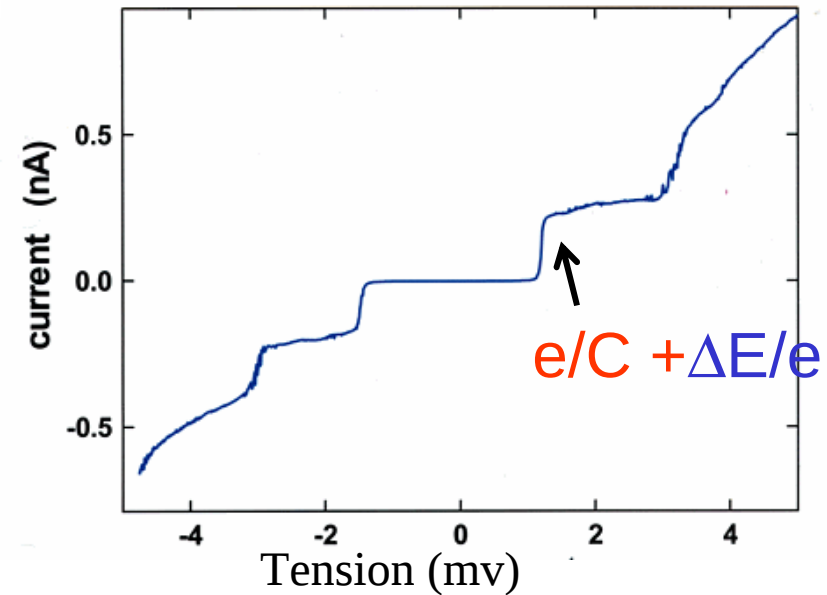
Nanotubes sur contacts Tunnel $R \gg R_Q$: Energie de charge $E_C = e^2/C \sim 10K$

$T \ll E_C$ Blocage de Coulomb



Tans et al., Nature **386** (1997)

Spectroscopie des niveaux d'énergie



Soudure des nanotubes de carbone

Pulse Laser UV Focalisé

$\Lambda=0.3\mu\text{m}$, $\tau=10^{-8}\text{s}$, $P=10^4\text{W}/\text{cm}^2$

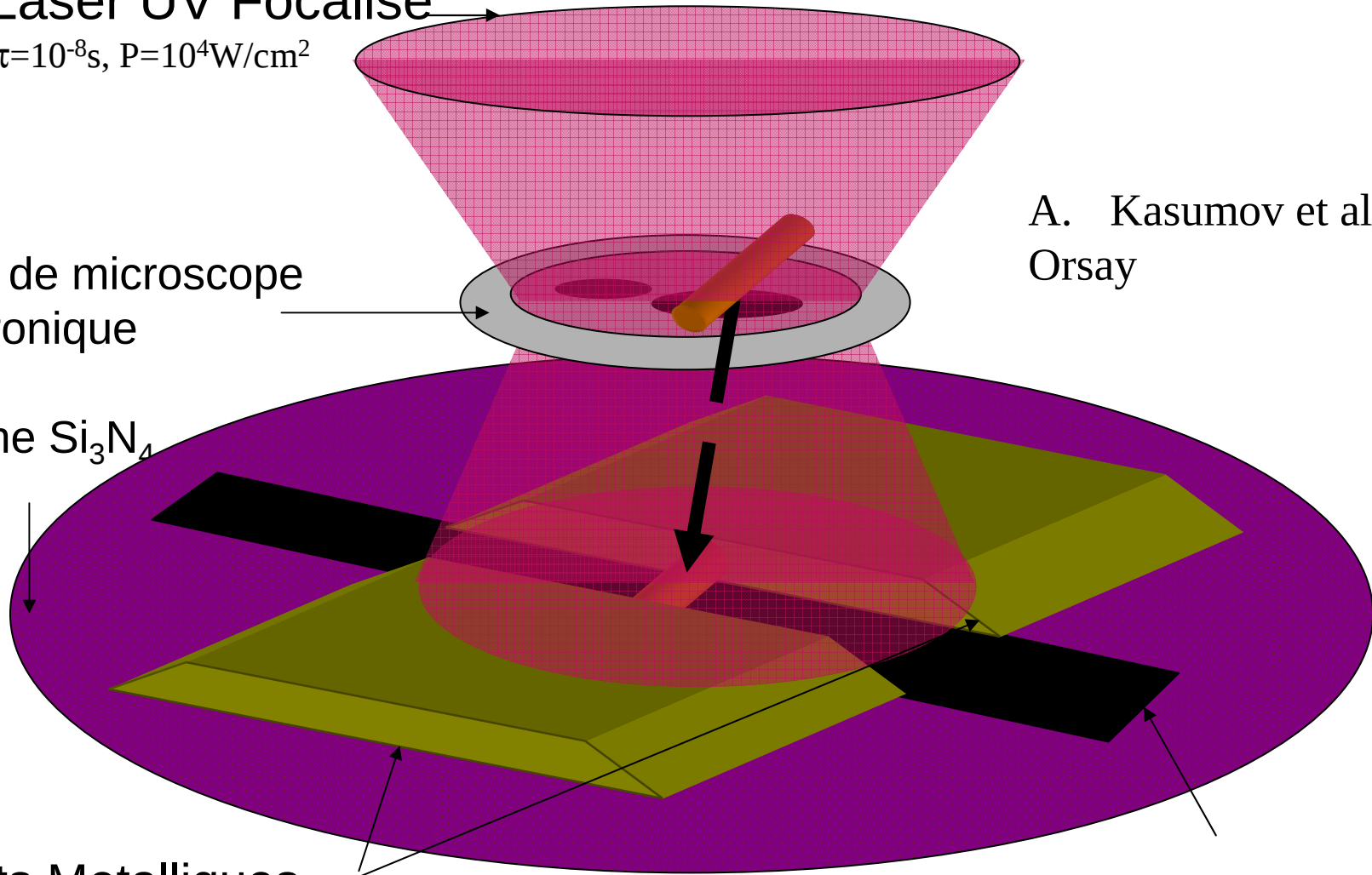
Grille de microscope électronique

A. Kasumov et al.
Orsay

Membrane Si_3N_4

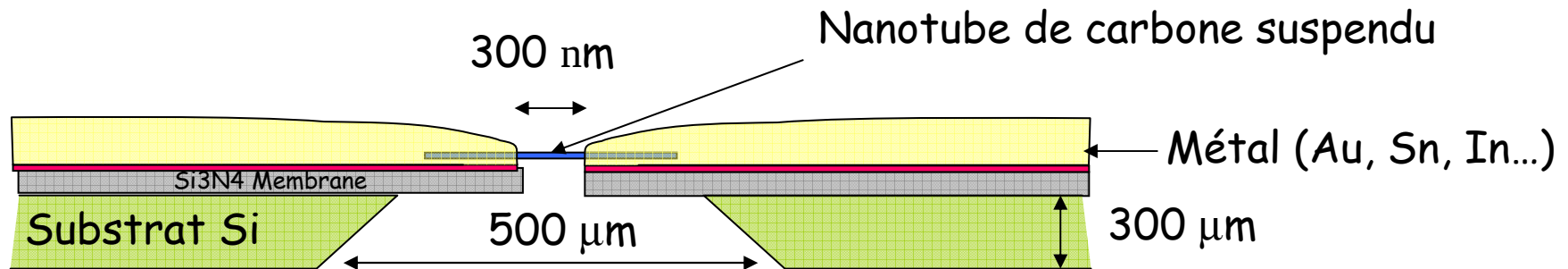
Contacts Metalliques
Au-Re, Sn, Au-Ta, Au-Pt...

Fente $100*1\mu\text{m}$



Resistance d'un nanotube individuel $\sim 10,20\text{ k}\Omega$

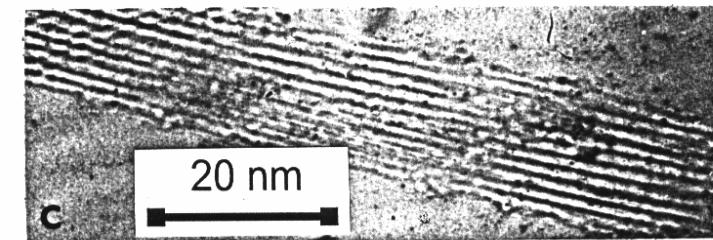
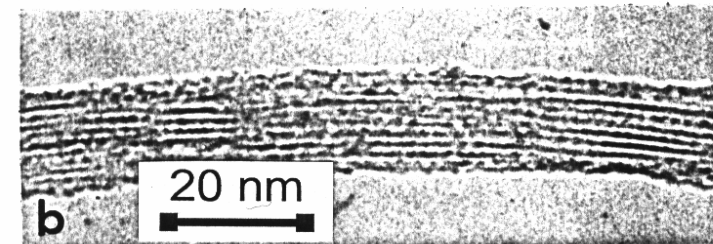
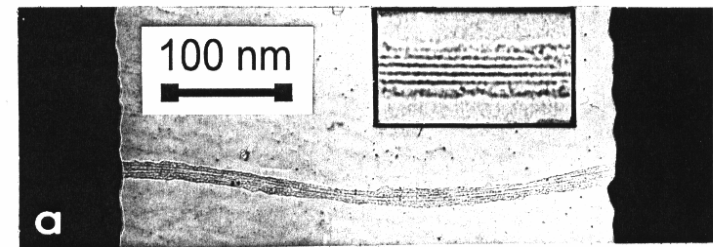
Nanosoudure des nanotubes de carbone



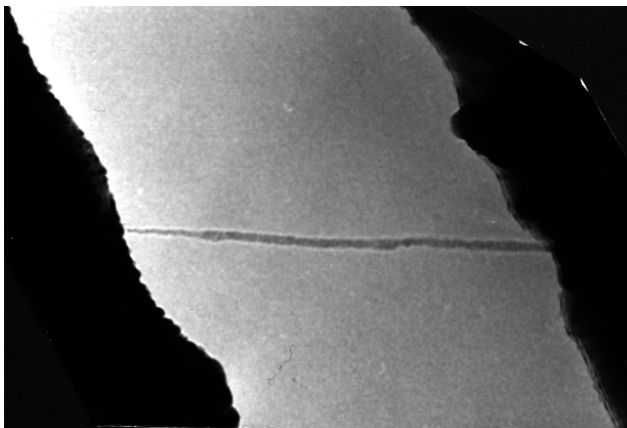
Caracterisation en Microscopie Electronique en Transmission :

Paramètres Structuraux
analyse chimique

Faisceau de SWNTs suspendu

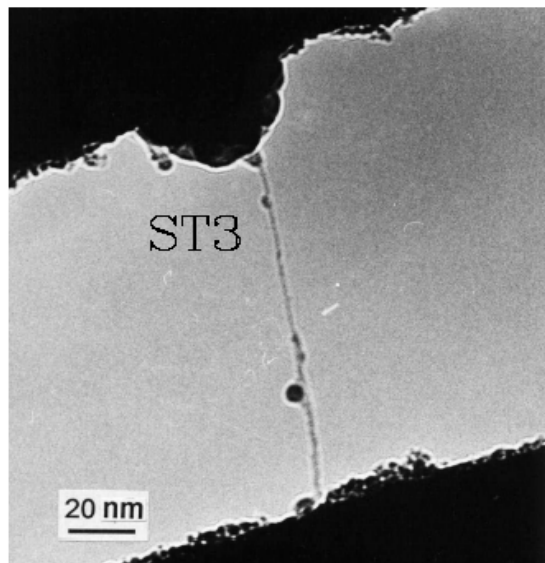
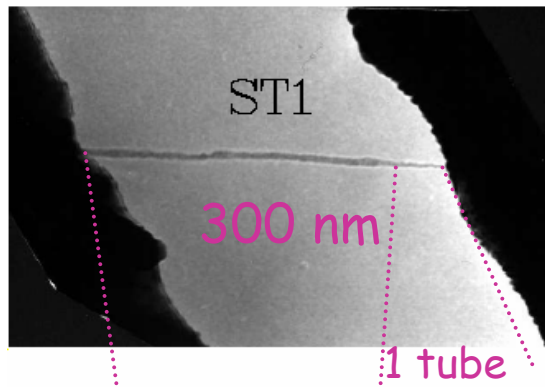
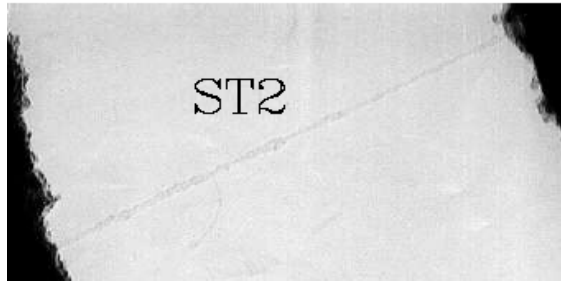


SWNT individuel suspendu

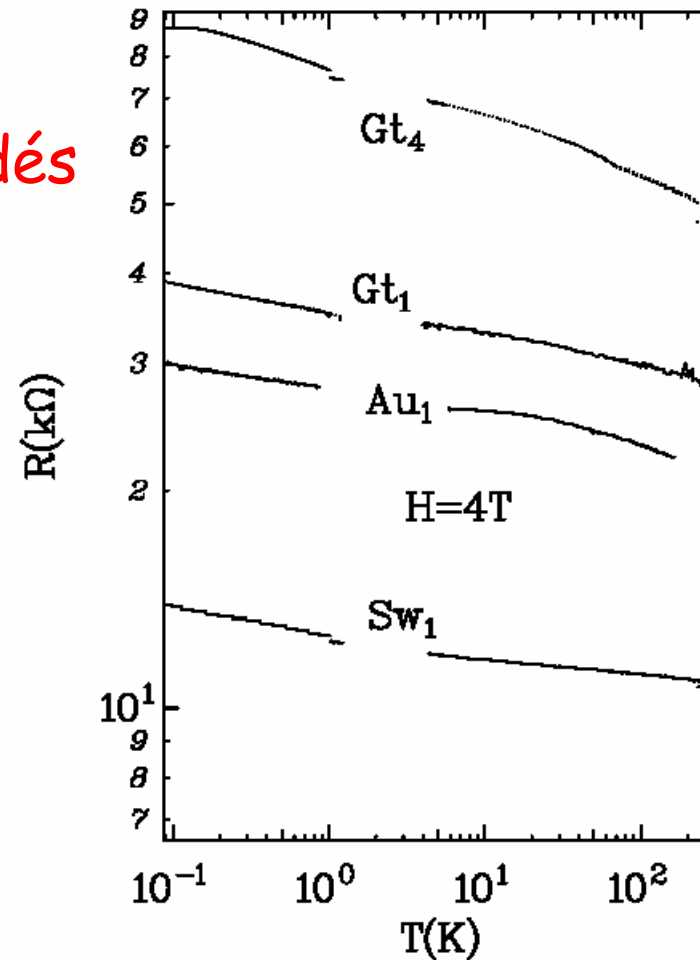


Kasumov et al.

Nanotubes mono-feuillets individuels



Soudés

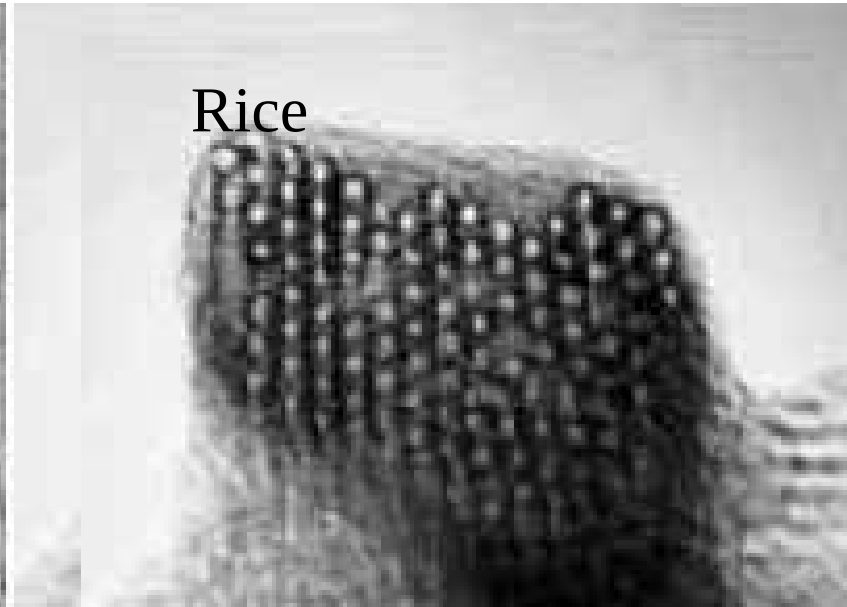
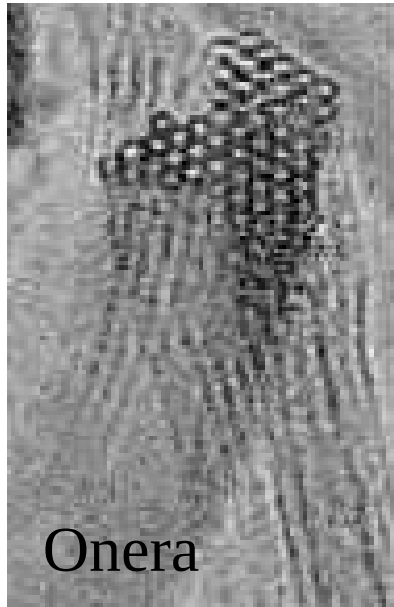
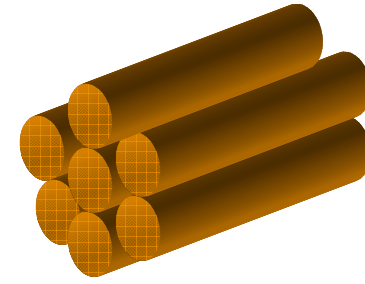


$R(T) \sim T^{-0.03 \text{ to } -0.1}$ ($R(T) \sim -\ln T$):

Faible dépendance en température

Caractéristique courant tension linéaire:
pas de blocage de Coulomb

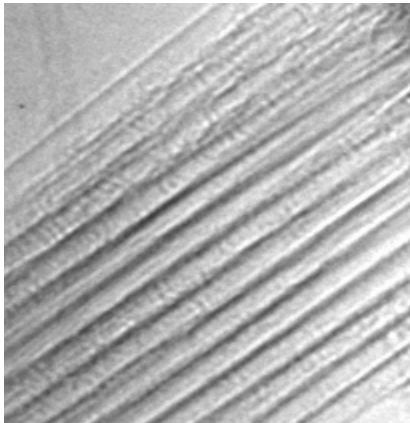
Les faisceaux de nanotube



distance inter-tube $0.3 \text{ nm} \ll$ diamètre d'un tube 1.2 nm

En moyenne chaque tube a :

- 2 tubes métalliques premiers voisins
- 12 tubes métalliques second voisins



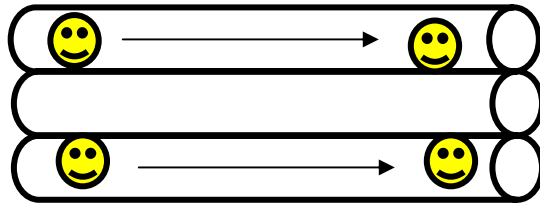
→ Ecrantage des interactions coulombiennes!

LPS Orsay **Observation de supraconductivité!**

Nature du transport électronique dans un faisceau

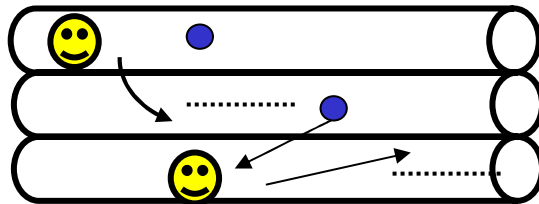
Tubes avec Hélicité différente

Sans désordre: transport balistique



Pas de transfert inter-tube

Corde désordonnée: transport diffusif



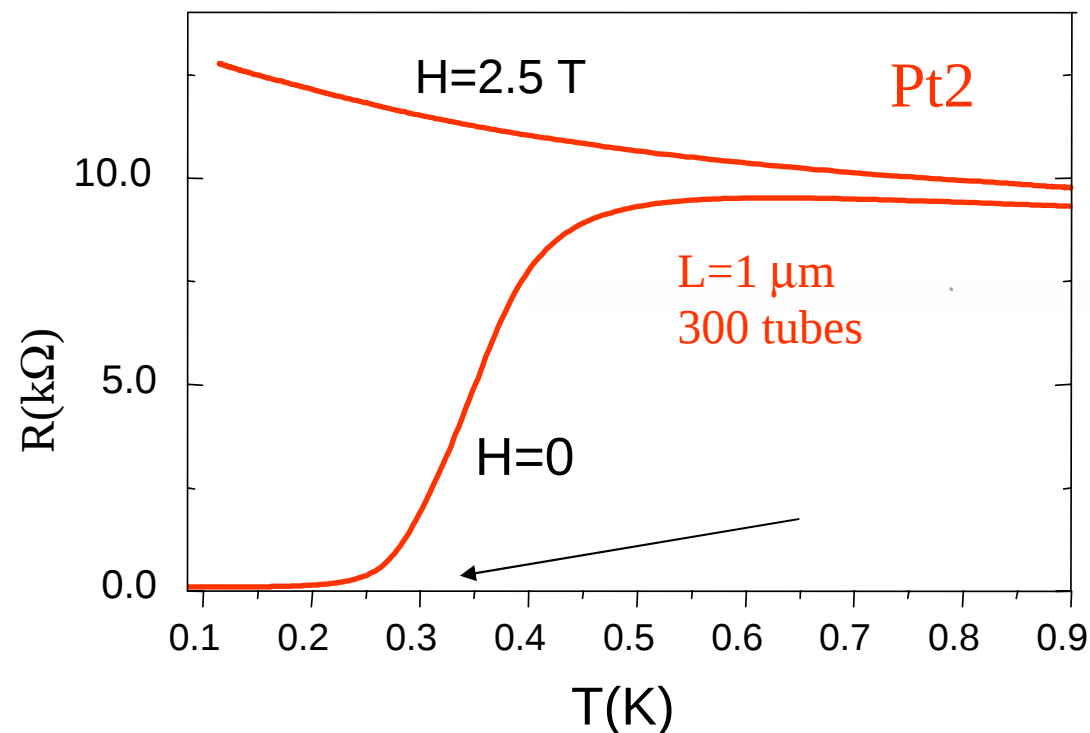
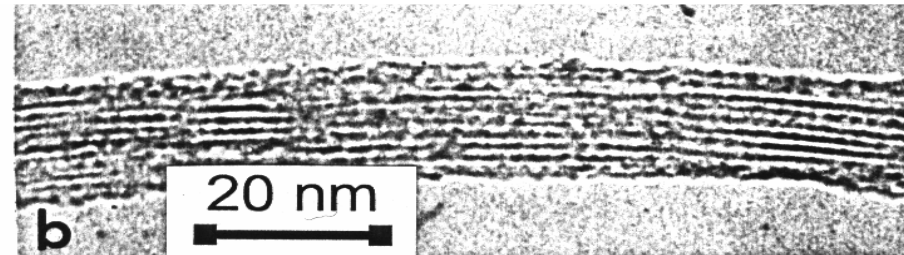
Transfert inter-tube
médié par les impuretés

$$R = R_Q / 2N * L / l_e$$

l_e = libre parcours moyen

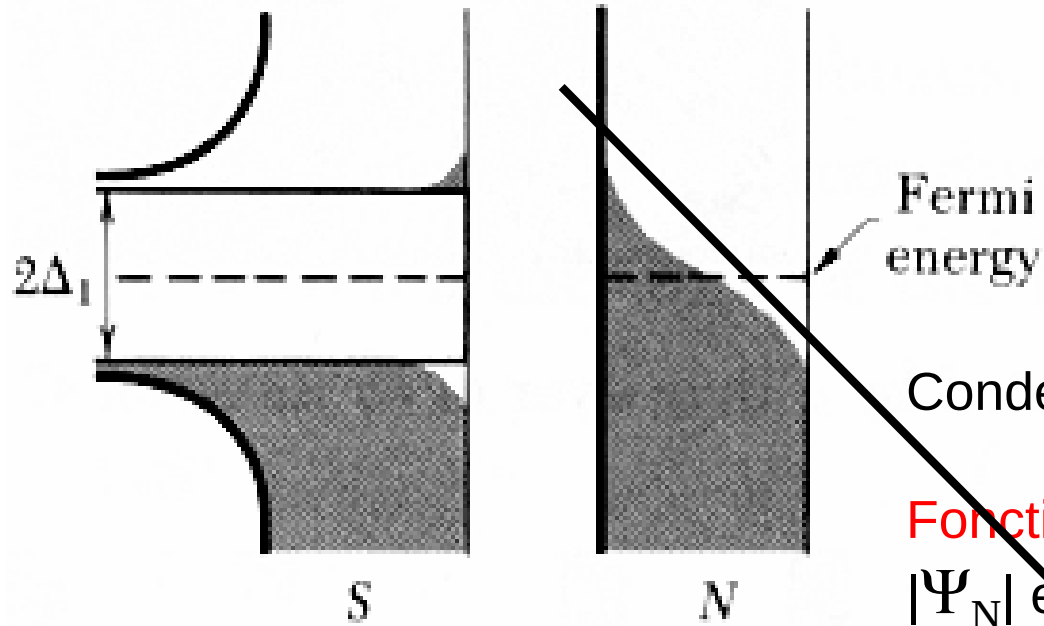
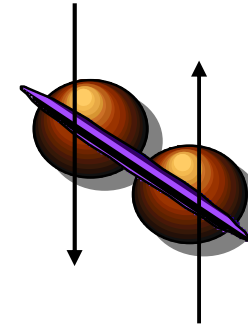
Supraconductivité dans des faisceaux de nanotube

Faisceau de 200 nanotubes
sur contacts normaux



Supraconductivité quasi 1D !

SUPRACONDUCTIVITE



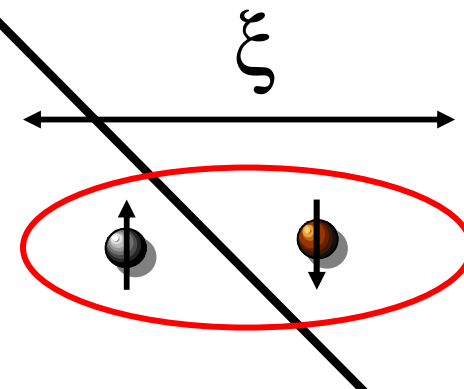
Condensation des électrons en paires

Fonction d'onde cohérente à N particules:

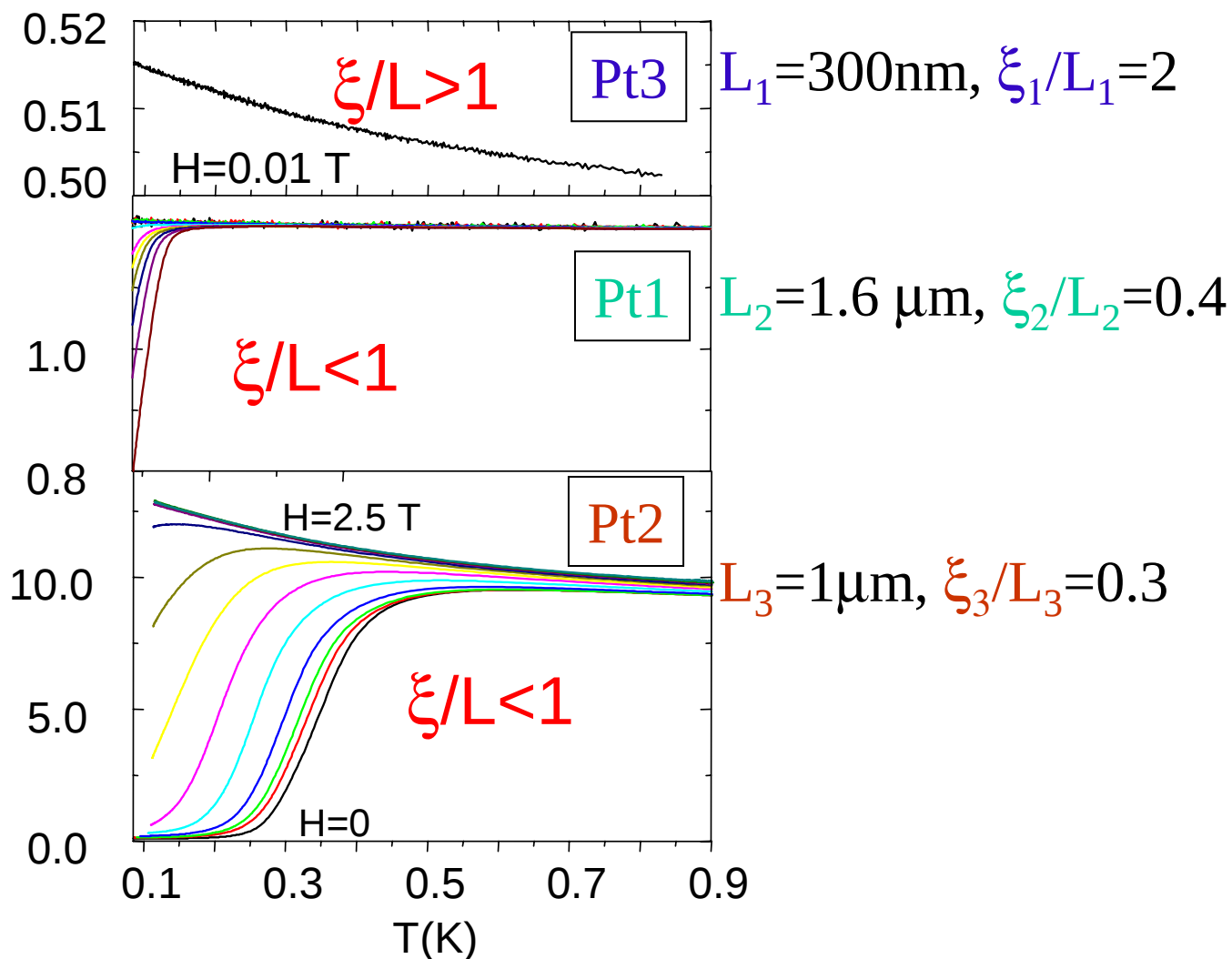
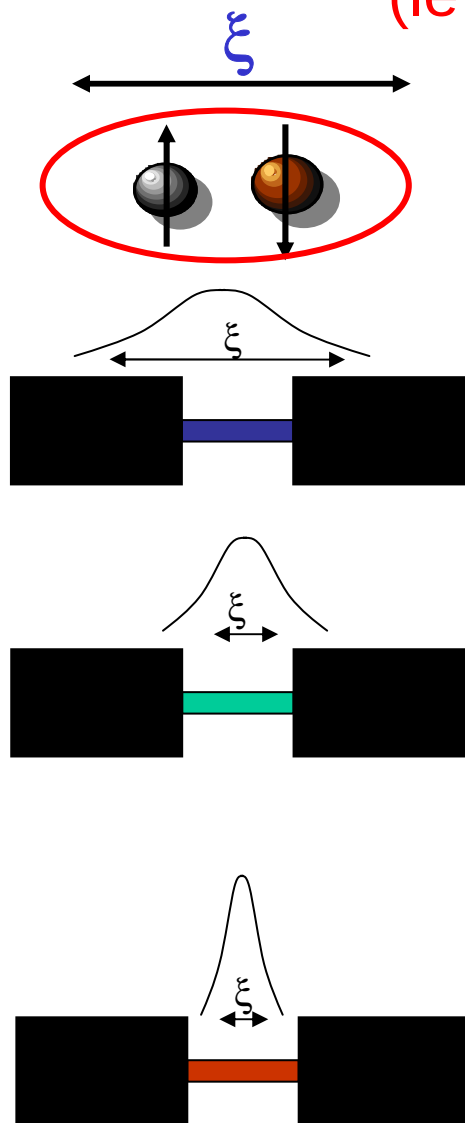
$|\Psi_N| e^{i\Phi}$ paramètre d'ordre

Energie caractéristique: $\Delta \sim k_B T_c$

Longueur caractéristique $\xi = \hbar v_f / \Delta \gg \lambda_f$

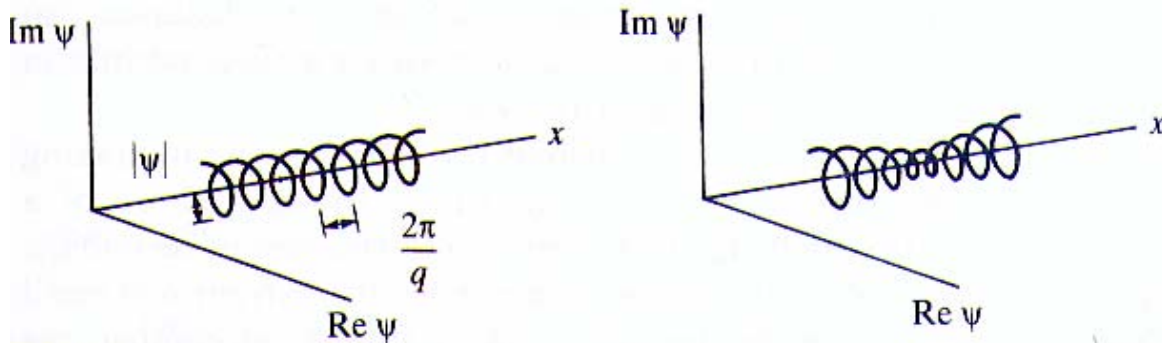


Supraconductivité détruite par les contacts normaux (le plus petit supraconducteur du monde!)



On observe une transition seulement si $\xi / L > 1$

Transport non linéaire et supra 1D

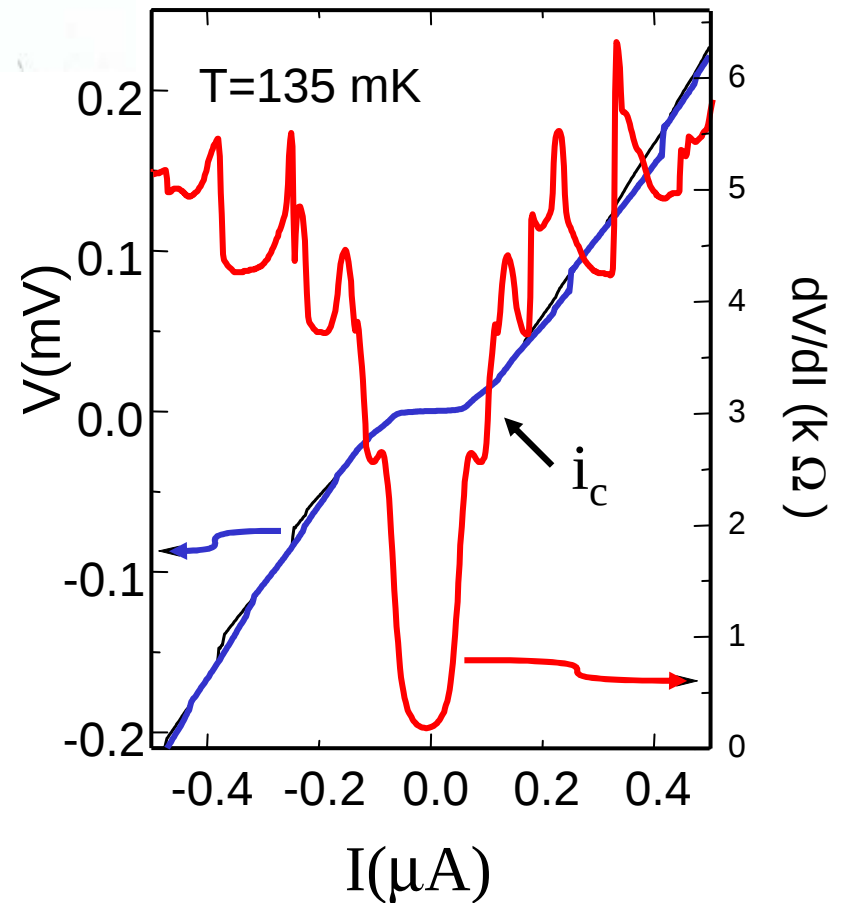


Sauts de phase du paramètre d'ordre

Nucléation de zones normales de taille ξ

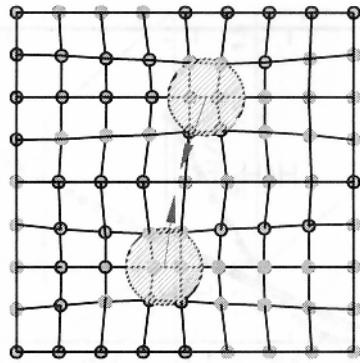


Sauts hystérétiques dans $V=f(I)$



Supraconductivité: mécanisme microscopique

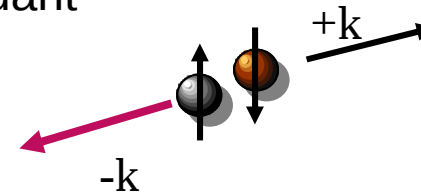
-Existence d'une interaction **attractive** entre électrons médiée par les phonons



Polarisation du réseau par un électron

→ Potentiel attractif pour un second électron

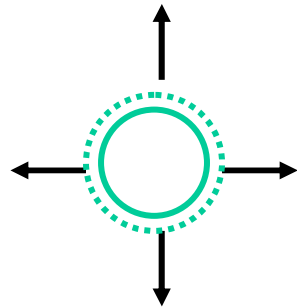
-Condensation des électrons en paires constituant
un état cohérent à $2N$ particules:



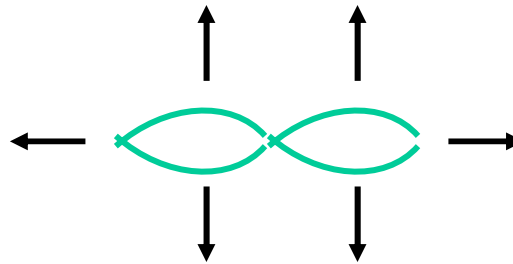
Pourquoi de la supraconductivité dans les nanotubes?

- Interactions coulombiennes répulsives fortes dans un tube unique

Mais aussi interactions attractives médiées par les phonons!



Modes de respiration



Modes de compression de basse énergie

- Transfert de paires plus favorable que transfert d'électrons
- Transition dépend du nombre de tubes dans le faisceau.
- Rôle du désordre, peut favoriser la supraconductivité!
- Rôle du caractère suspendu

Nanotube de carbone: La molécule à tout faire...

Physique fondamentale avec les nanotubes de carbone
Mais aussi composants électroniques...

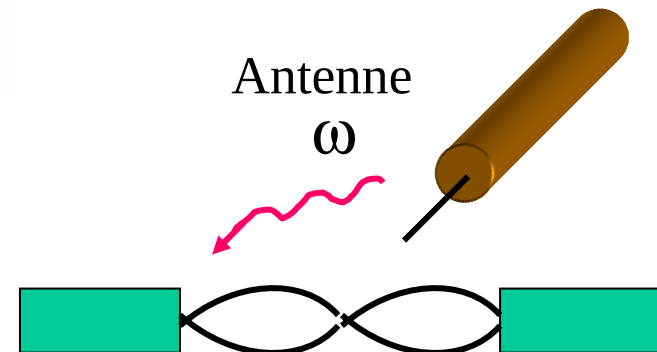
Transistor à effet de champ

Transistor à un électron

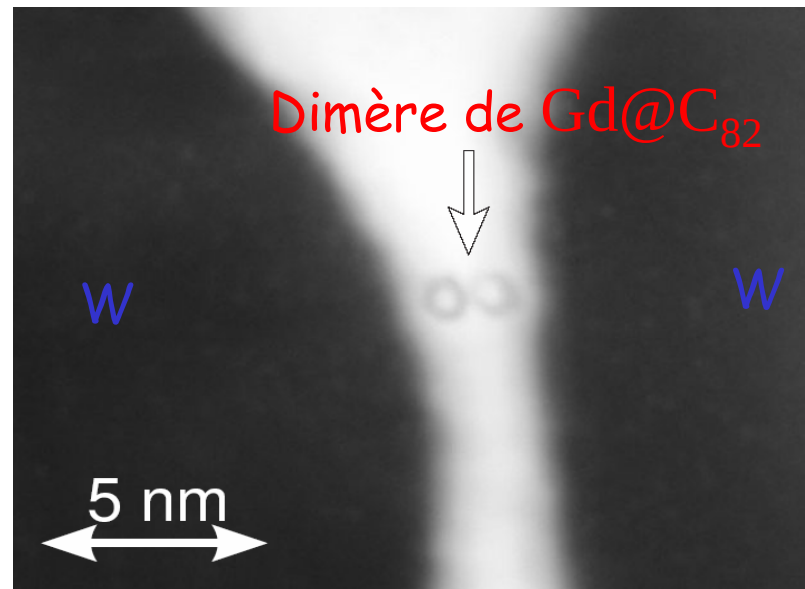
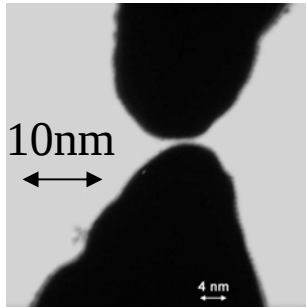
Transistors à effet Josephson.



Dispositifs électromécaniques
Résonateurs



Vers une électronique moléculaire ?



Conductance de l'ordre de e^2 / h !

Transport à l'échelle de la cohérence de phase

Conductance et Interférences quantiques:

Effet du flux magnétique

Grande sensibilité à la configuration microscopique du désordre

Existence de courants permanents à l'échelle mésoscopique :

Influence du couplage appareil de mesure $\longleftrightarrow$ système étudié :

Limite du conducteur 1D:

Nanotubes de carbone: bons conducteurs à basse température

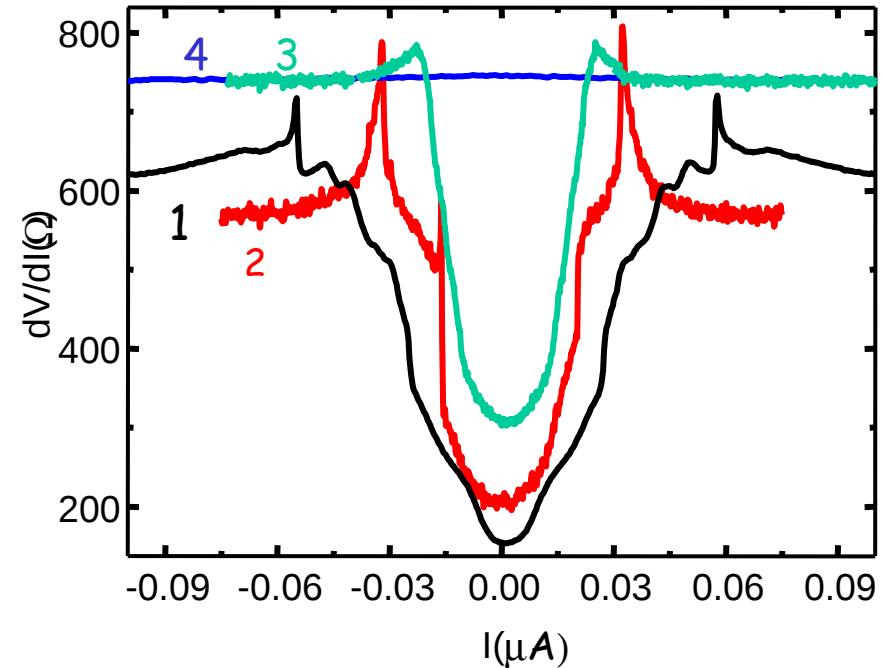
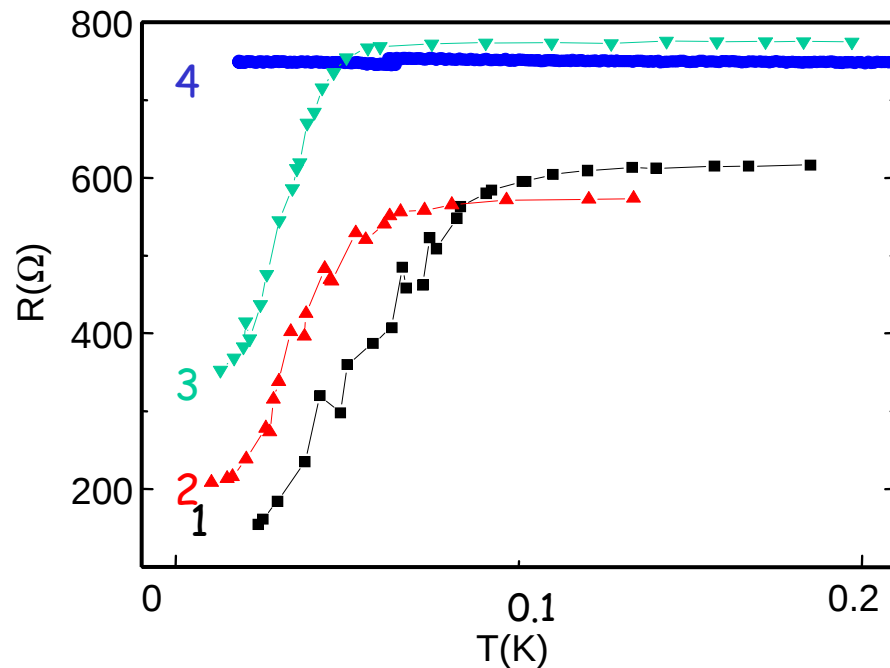
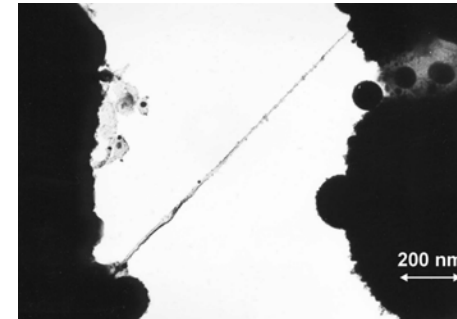
Supraconductivité observée dans des faisceaux

(Pour la science numéro spécial décembre 2001, Images de la physique 2003-2004)

La supraconductivité des nanotubes est-elle due au caractère suspendu?

Modification de la supraconductivité par engluement des tubes

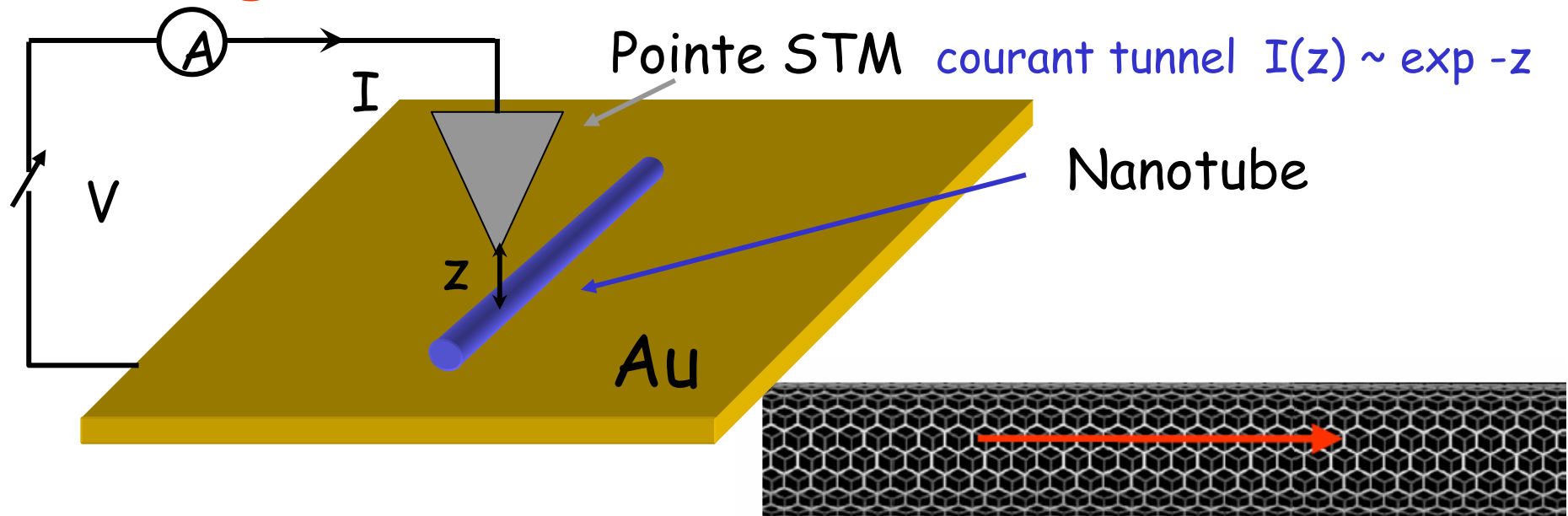
- 1) Echantillon faiblement supraconducteur (40 nanotubes)
- 2) 3) Dépôt de plexiglass (PMMA)
- 4) Fente complètement recouverte de PMMA



T_c et I_c diminuent

Expériences de spectroscopie Raman (A.M. Bonnot et al.) ont montré une atténuation des modes de respiration de nanotubes suspendus après dépôt de PMMA.

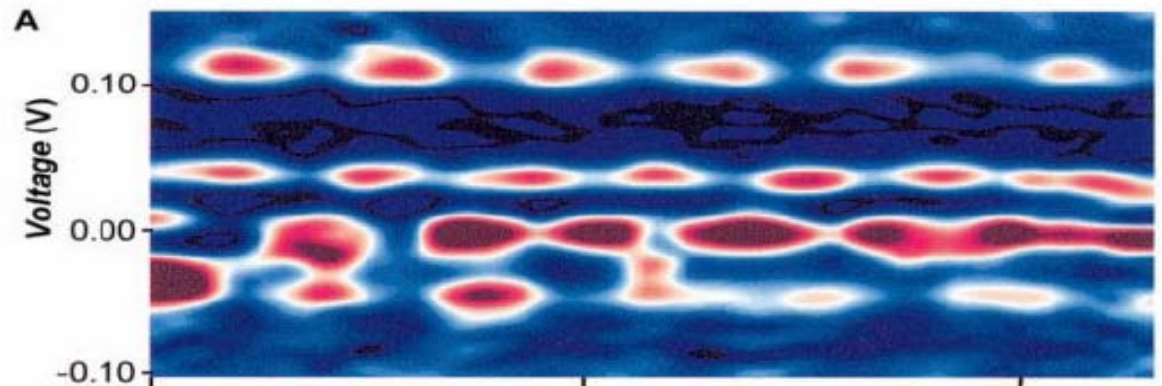
Imagerie STM des fonctions d'onde 1D



Ondes stationnaires

$$|\psi(x)|^2 = A \sin^2(2\pi x/\lambda_F)$$

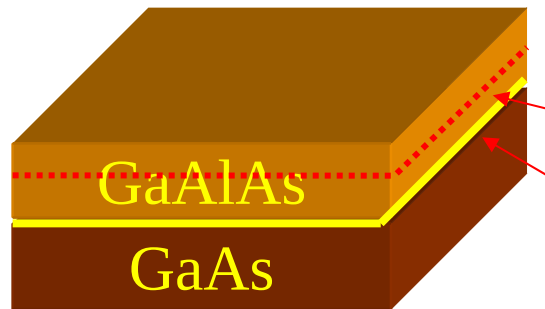
Venema *et al.*, Science (1999)



Pour un nanotube armchair :

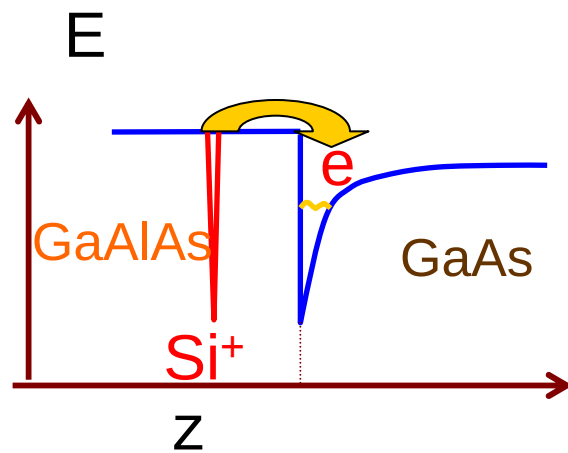
$$\lambda_F = \sim 0.74 \text{ nm}$$

Quantification de la conductance dans une constriction

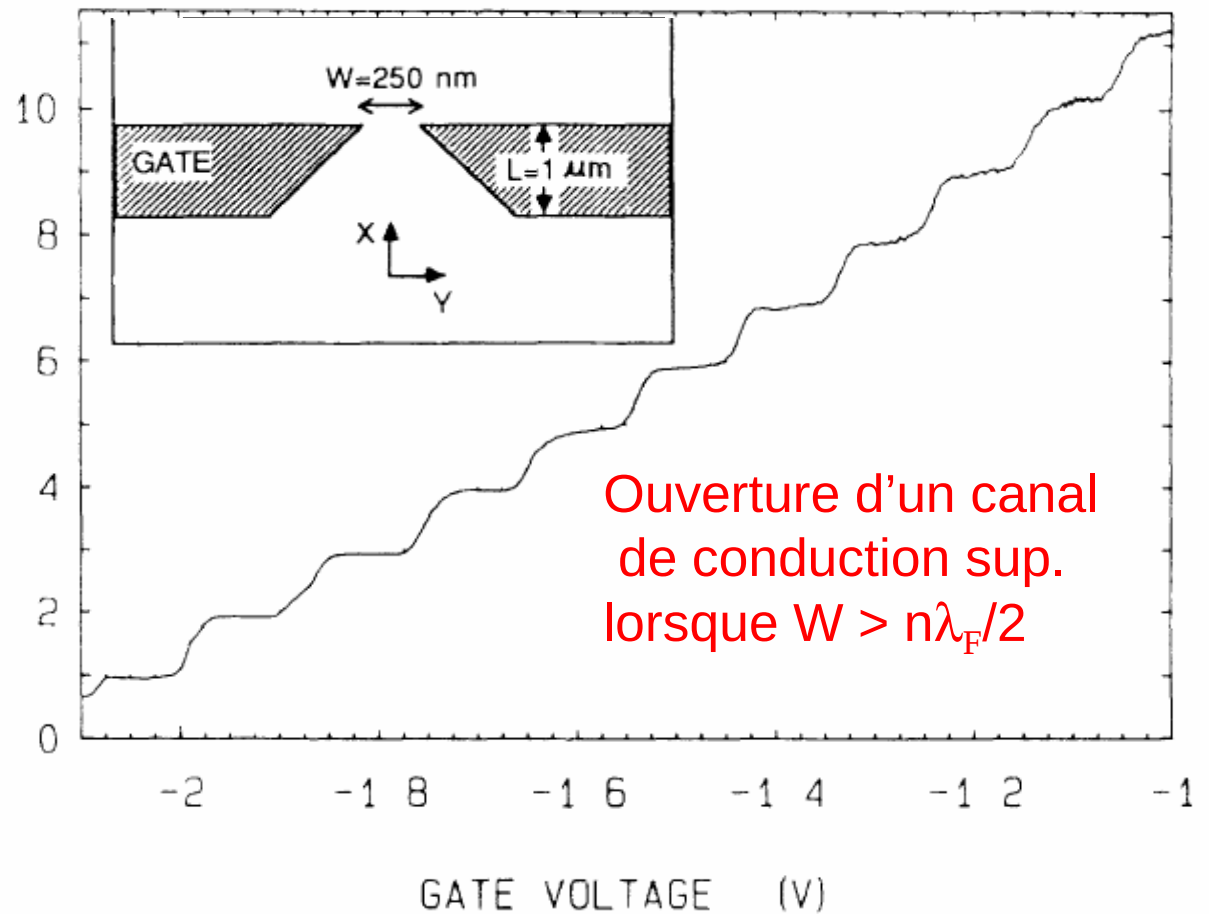


Si⁺

Gaz bidimensionnel d'électrons
déplété localement par des grilles électrostatiques



CONDUCTANCE ($e^2/\pi h$)



(Van Wees et al)1988