

Les nanosciences: l'exploitation du monde de l'atome

Présentation

- Définition de nanoscience
- Quelques Nano-objets, leur origines et leurs applications
- Comment observer et manipuler ces objets

Nano?



TATA NANO



iPod NANO

Nano est un terme populaire!

07-10-2008

Histoire

- Le terme nano-technology provient de Norio Taniguchi lors d'une conférence en 1974 à propos du contrôle des couches minces dans les semiconducteurs.
- Populaires depuis années 90...
 - Buzzword: nano-(science, technologie, fluide...)
 - Populaire Financement
 - Centres et Groupe de recherche nano (Nano Québec)
- Vieille science dans certains cas:
 - Crème solaire, pigment peinture, certain catalyseur
- La science fiction se fait rattraper tranquillement

07-10-2008

Prix Nobel de 2007

Albert Fert



Photo: B. Fert, Invisuphoto

Peter Grünberg

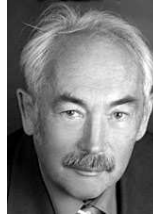


Photo: © Forschungszentrum Jülich

Découverte de la magnétorésistance géante

1988

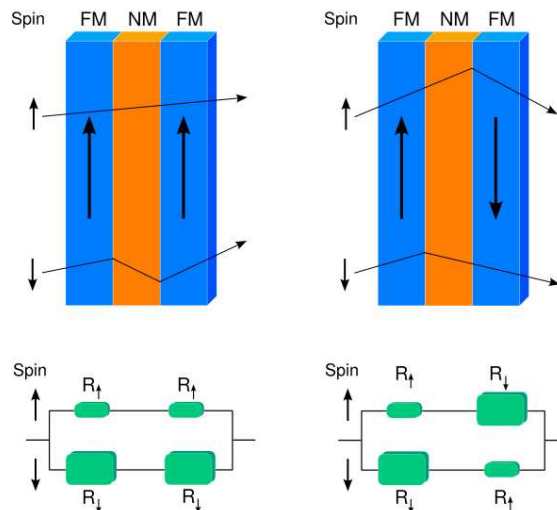
Multicouches magnétique/non-magnétique : spintronique

Tête de lecture des disques durs moderne

(1er disponible en 1997 par IBM, 16.8 GB)

07-10-2008

GMR



GNU Free Documentation License

07-10-2008

Vision du futur

Le 29 décembre 1959, Richard P. Feynman a fait une présentation très connue à Caltech:

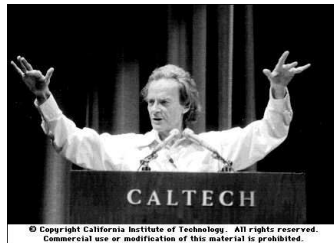
There's Plenty of Room at the Bottom

An Invitation to Enter a New Field of Physics

Peut-être lu à:

<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

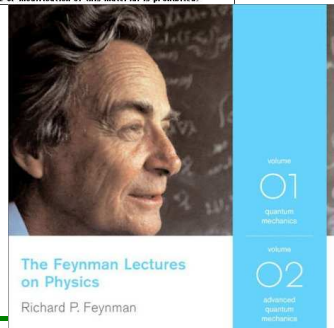
Richard P. Feynman



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.



Vision du futur

- Plusieurs prédictions/suggestions de Feynman sont devenues réalité
- 1959: premier circuits intégrés (dizaine de transistors)
- 2007: on atteint les milliards de transistors et des dimensions de 45 nm (loi de Moore: densité double tous les 24 mois)
- Années 80s : microscopes à balayage de sonde (SPM) – outils atomiques
- Années 90s : C60, nanotubes ...

07-10-2008

9

Nanoscience?

- Définition de nano-: échelle du nanomètre (nm)
 10^{-9} m
- Définition de micro-: échelle du micromètre (μm , micron) 10^{-6} m
- Autre unités:
 - Ångström (Å) 10^{-10} m: espace inter-atomique, rayon-X
 - Picomètre 10^{-12} m: utiliser en microscopie tunnel
 - Femtomètre 10^{-15} m: dimension du noyau atomique, des proton/neutron, quarks, physique des particules... Détecteur d'ondes gravitationnels

07-10-2008

10

Nanoscience?

- Définition de nanoscience, nanotechnologie:
 - Ce qui a au moins une dimension de l'ordre du nanomètre (nanotube, C60, ADN)
 - La plupart des molécules sont de l'ordre du nanomètre alors toute la chimie est nano?
 - Un peu de design de la structure
 - Pas de définition exacte ou précise.
 - Utilisation de phénomène quantique (confinement)
 - Dimension donne de grande surface \Rightarrow catalyse, supracondensateur ...

Dimension nm

- Miniaturisation n'est pas nécessairement de la nano (électronique à 45 nm)
- Miniaturisation ultime : atome / électron
 - Mémoire à un atome (~ 0.2 nm)
 - Transistor à électron unique -- Single electron transistor (SET)
- Miniaturisation nucléaire ?
 - Non (Seul objet macro fait seulement de nucléon est l'étoile à neutron : pas dans ma cours)

Science interdisciplinaire

- Physique (quantique, surface, état solide ...)
- Chimie (croissance d'échantillon, surfaces, ...)
- Génie (techniques du silicium, miniaturisation, ...)
- Science des matériaux
- Biochimie (machines moléculaires, médicaments, ...)

Théorie

- Équation de base connue (comme pour toute le domaine de la matière condensée):
 - Équation de Schrödinger
 - Force électromagnétique seulement (pas de force faible, forte ou gravité)
- Problème est la quantité de particules qui interagissent → rend calcul difficile ou impossible
- Phénomène quantiques important: confinement (atome artificiel), nombre d'électrons importants, effet tunnel...

Nanoscience dangereuse?

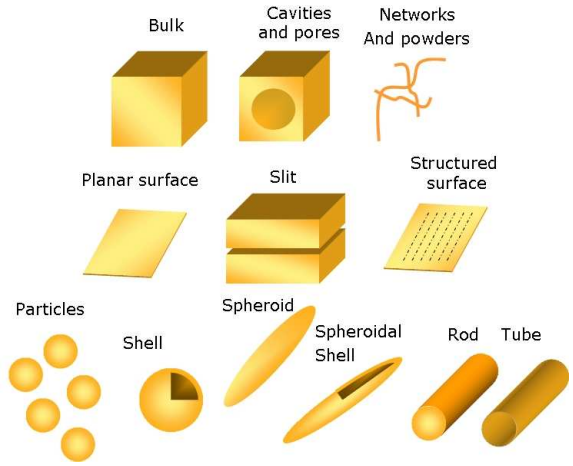
- Problème possible de toxicité
 - Petites particules
 - Effet semblable à l'amiante
- Nano-usine en folie
 - « GREY GOO »
 - Science-fiction présentement

Matériaux


Pour étudier nano, doit avoir objet nano. Il y a deux techniques de construction possible :

- Macroscopique
- Assemblage atomes par atomes (manuellement ou éventuellement avec usine auto-assemblage --- comme les cellules vivantes) : peu utilisé pour l'instant

Formes d'objets nano

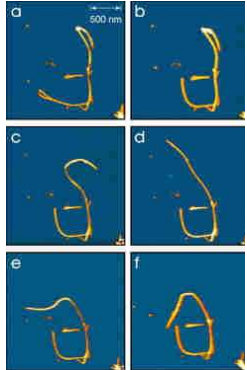


Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

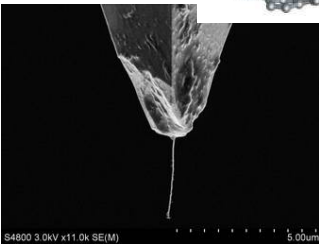
07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE
17

Nanoscience: exemples

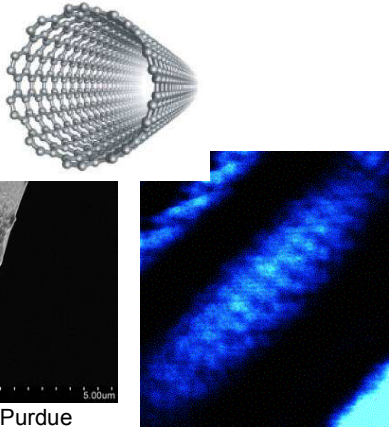
- Nanotubes de carbone




Manipulation d'un nanotube
<http://www.research.ibm.com/nanoscience/manipulation.html>



Arvind Raman, Purdue

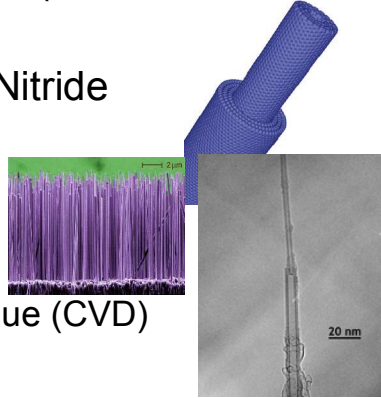


Alex Zettl, Berkeley

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE
18

Nanoscience: exemples

- Nanotubes à plusieurs parois (MWNT comparer à SWNT (single))
- Nanotubes de GaN, Boron-Nitride
- Techniques de productions
 - Décharges d'arc
 - Ablation laser
 - Dépôt par vapeur chimique (CVD)
 - Cendres de combustion
- Dimensions (diamètre ~ 1.5 nm, inter-atom 1.4 Å, longueur ...)



Nanotubes GaN, produit ultraviolet

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

19

Utilité des Nanotubes

- Électronique
 - Transistors
 - Optique
 - Transport de chaleur
- Catalyseur
- Ascenseur spatial
 - Plus fort que l'acier
 - Léger
 - Nécessite un câble (pas encore fonctionnel)
 - Science-fiction

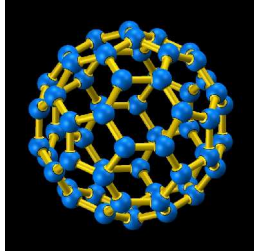
07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

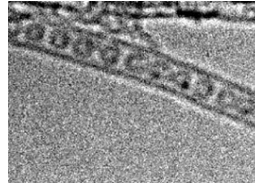
20

Nanoscience: exemples

- Fullerène (bucky-balls) C60...

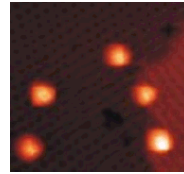


C60
<http://sbchem.sunysb.edu/msl/fullerene.html>



Nanopod (fullerène dans un nanotube)
 A. Khobystov, Univ. of Nottingham

C60 par STM
<http://katana.dimes.tudelft.nl/1999/c4/41-nanoics-03.htm>

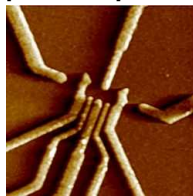
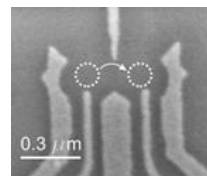


07-10-2008

21

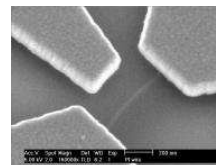
Nanoscience: exemples

- Point quantiques (quantum dots)
- Des atomes artificiels
- Techniques semiconductrices
- Ordinateur quantique



<http://qt.tn.tudelft.nl/research/spinqubits/>

<http://qt.tn.tudelft.nl/research/nanotubes/>

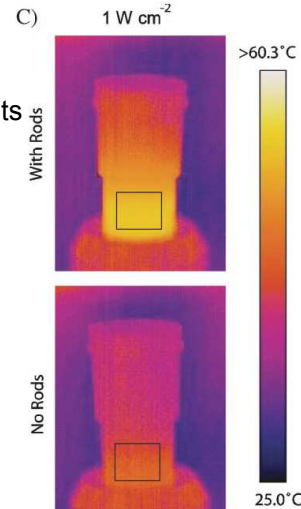
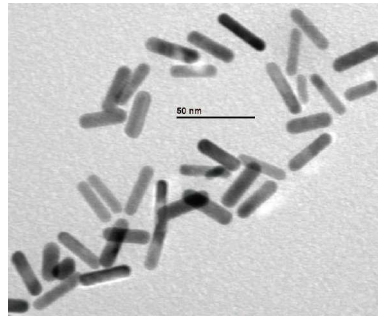


07-10-2008

22

Nanoscience récente

- Nanotige d'or (30x10nm)
- Absorbe l'infrarouge
- Aide au traitement contre le cancer
- augmente l'effet cytotoxique des médicaments contre le cancer



T.S. Hauck *et al.*, *Advanced Materials* **20**, 1 (24 sept 2008)

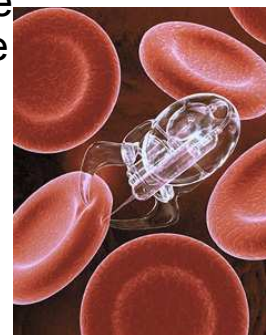
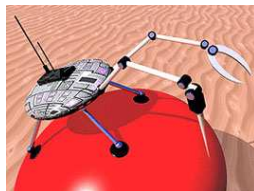
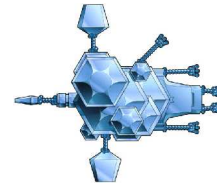
07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

23

Nanoscience : mauvais exemples

- Nanites (star trek)
- Nanocytes (stargate sg-1)
- Micromachine réparant un globule rouge (gagnant Vision of Science 2002 pour nanotechnology)



07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

24

Caractérisation

Caractérisation

- Quelle information est voulue?
 - La structure global (forme)
 - La structure interne (structure cristalline, agencement moléculaire)
 - Spectroscopie
 - États énergétiques
 - Vibrations(Phonons), Rotations, magnétisme...
 - Interactions avec des surfaces, catalyseurs... (chimie)

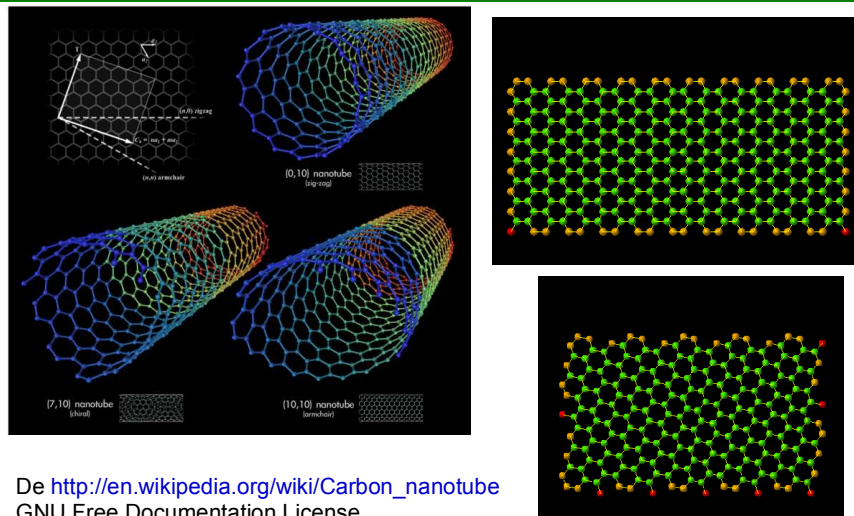
Caractéristiques des Nanotubes

- longueur, diamètre, plie
- Chiralité (structure interne)
 - Armchair (10-10) est métallique
 - Zigzag (10-0) isolant
- Conductance électrique, effet quantiques
- Contrôle de la croissance
 - Faire pousser un tube à l'endroit voulu
 - Contrôler ses dimensions

07-10-2008

27

Caractérisation: exemple



07-10-2008

28

Outil de caractérisation

- Outils on toute les tailles

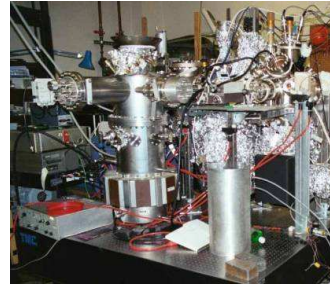
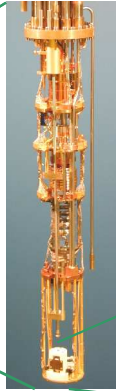
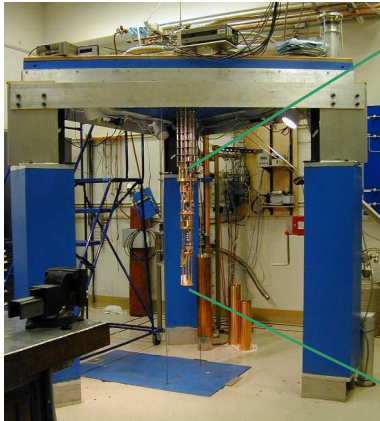
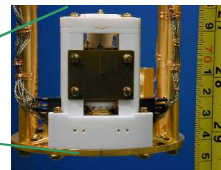


Table: VT-UHV-STM, Zettl, Berkeley



Microscope STM à très basse température, Berkeley

07-10-2008

29

Outil de caractérisation

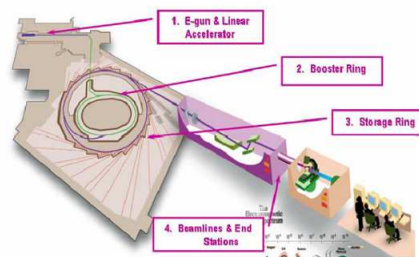
- Outils on toute les tailles (source de lumière)



ESRF source synchrotron, Grenoble

ILL réacteur nucléaire, Grenoble

CLS, source de lumières synchrotron
Canadienne



07-10-2008

30

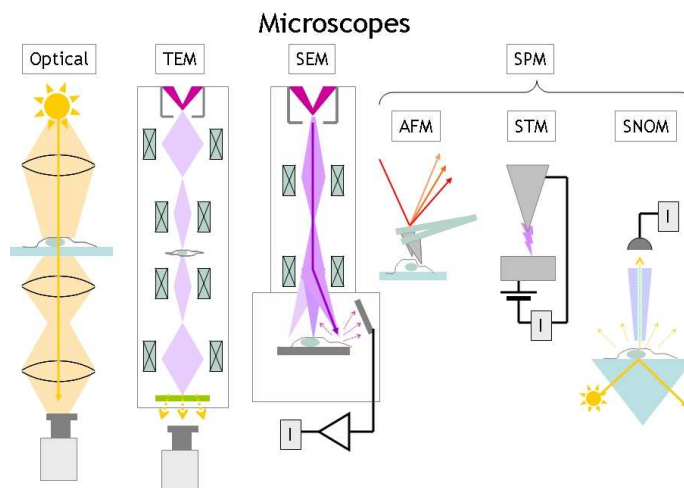
Caractérisation : voir les atomes

- Seulement quelques techniques permettent de voir les objets / atomes
- Possiblement même les manipuler
- Nom général : Microscope

07-10-2008

31

Outils d'observation



Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

07-10-2008

32

Problème de l'optique

- Les photons (particules de lumières) sont des ondes
- Toute onde à une longueur d'onde et celle-ci limite la résolution qui peut être atteinte (~500 nm pour le visible).
- Problème de physique quantique (incertitude d'Heisenberg)
 - L'effet de mesurer a un effet majeur sur l'objet mesuré
 - peut pas connaître avec précision complète la position et la vitesse d'une particule en même temps.

Physique quantique

- Par contre toutes les particules sont aussi des ondes
- Donc les électrons (facilement contrôlés) ont aussi une longueur d'onde
- Elle est fait plus facilement petite que la lumière (rayon-X)
- Les électrons peuvent servir de microscope.

Microscopie Électronique

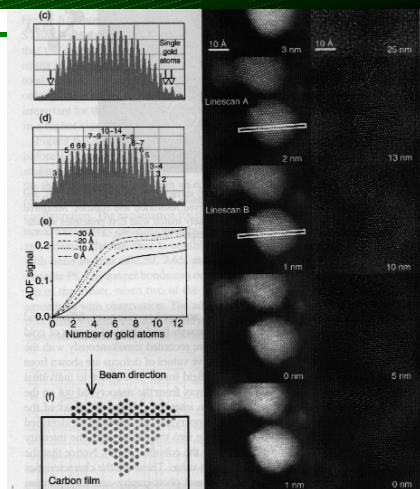
- Longueur d'ondes des électrons propice à la résolution atomique
- Lentille électromagnétique
- Plusieurs modes de fonctionnement
 - Balayage (réflexion, rayon-X, électron secondaires ...): images, analyse chimiques ...
 - Transmission (peut atteindre résolution atomique)
 - Transmission à balayage (peut atteindre résolution atomique)

07-10-2008

35

Contraste d'image

Image de particules d'or sur graphite
 Différence entre Z-ADF et BF
 Z-ADF capable de détecter un atome d'or
 pas d'inversion de contraste
 permet de trouver structure 3D
 BF effet du substrat,
 inversion de contraste
 Même chose que MET



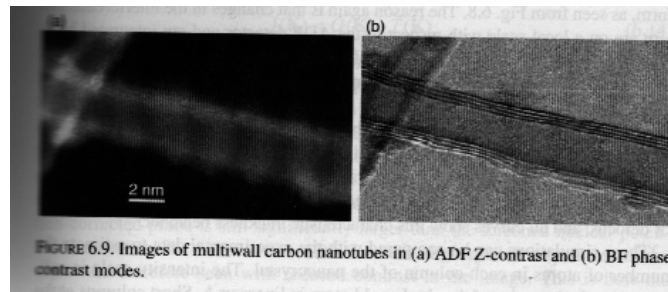
FIGURES 6.8. Selected images of gold nanoparticles supported on a thin carbon film taken from a through-focal series of (a) ADF Z-contrast images and (b) simultaneously collected BF phase contrast images, showing their very different characteristics. Defocus is shown in the lower right corner of each frame. Line scan A across the Z-contrast image shows single gold atoms (c). Line scan B can be quantified to give the number of gold atoms per column (d), based on image simulations (e), and allow the approximate 3D shape of the nanocrystal to be estimated (f) [adapted from ref. 30].

Scanning Microscopy for Nanotechnology,
 page 164

07-10-2008

36

Nanotube à plusieurs parois



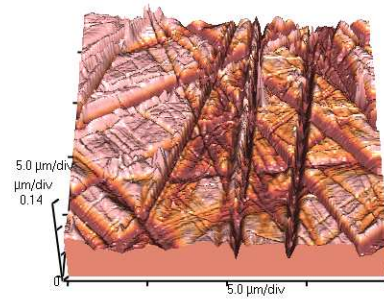
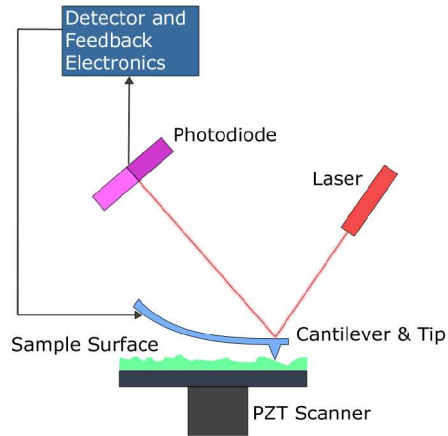
Carbone pas très sensible pour contraste Z mais fonctionne bien en BF.

Scanning Microscopy for Nanotechnology, page 165.

Microscope à balayage de sondes (SPM)

- **STM** : scanning tunneling microscopy (effet tunnel)
- **AFM** : Microscope à force atomique
- **MFM** : Microscope à force magnétique
- **LFM** : Microscope à force latéral
- **FFM** : Microscope à force de friction
- **EFM** : Microscope à force électrostatique
- **SNOM** : Microscope à champ proche (near)
- Et plusieurs autres ...

Schéma d'un microscope à force atomique (AFM)

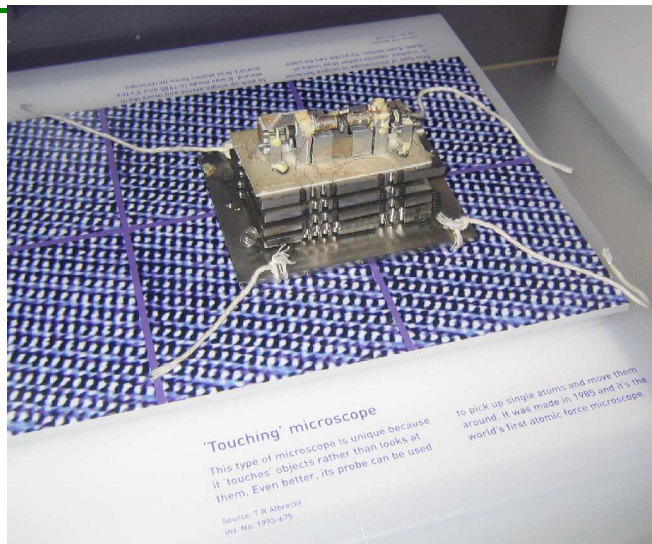


Surface de verre vu par AFM

07-10-2008

39

Le premier AFM



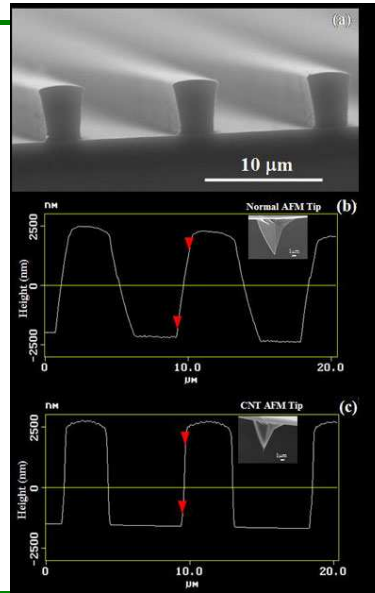
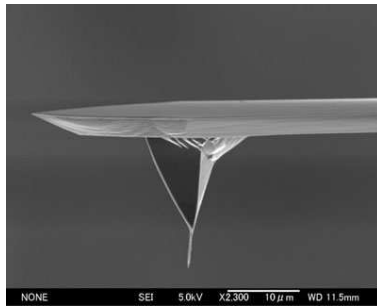
Empilement
pour les vibrations

GNU Free Documentation License

07-10-2008

40

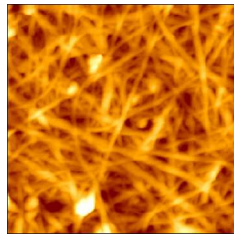
Pointes d'AFM avec nanotube



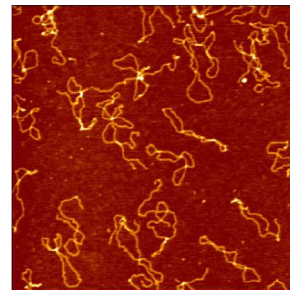
07-10-2008

41

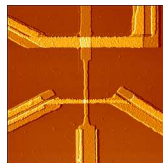
Nanotubes / ADN / circuit



860 nm: Nanotubes



ADN

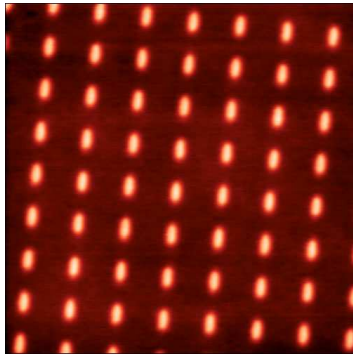


Junction Josephson (circuit supraconducteur)

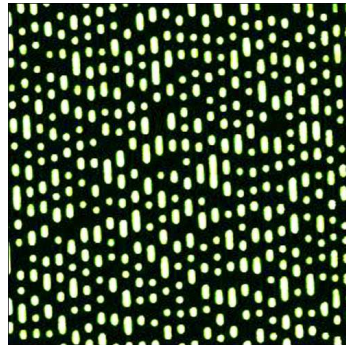
07-10-2008

42

CD-R / DVD

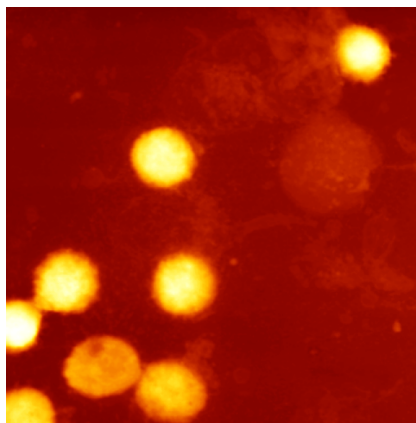


CDR 7 μ m



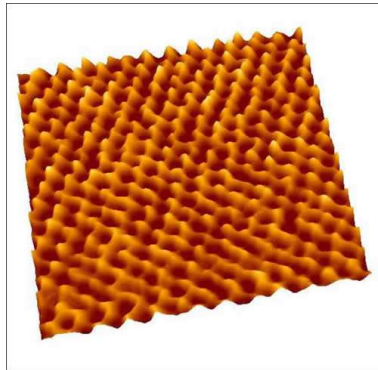
DVD 20 μ m

Globules rouges



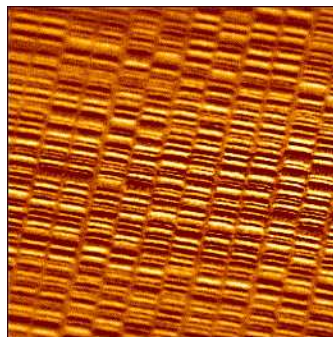
46 μ m

Atomes Mica

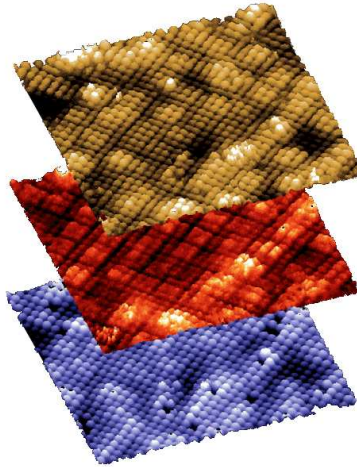


4.6 nm (mica= silicate d'aluminium et potassium)

MFM sur un disque dur



STM/STS etc...

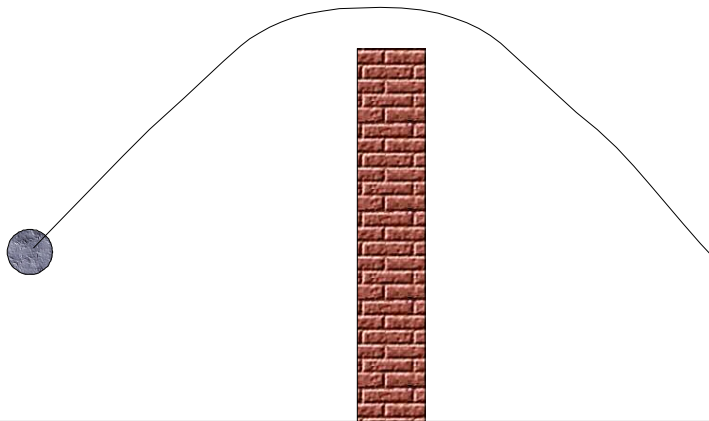


07-10-2008

47

Effet Tunnel

Grande énergie : Classique et Quantique

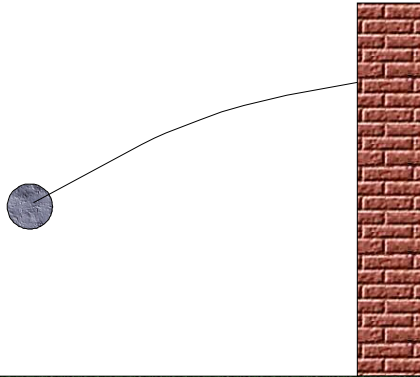


07-10-2008

48

Effet Tunnel

Petite énergie : Classique

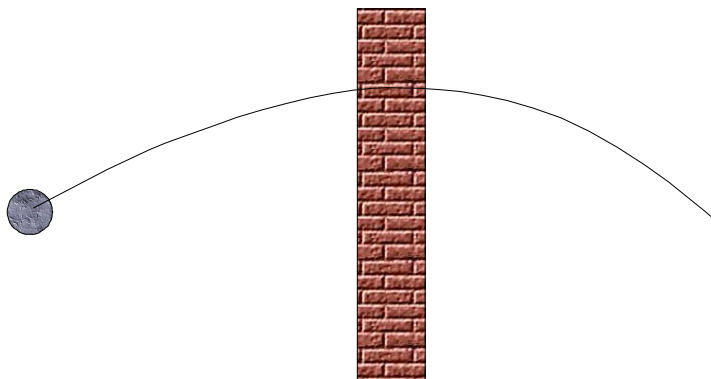


07-10-2008

49

Effet Tunnel

Petite énergie : Quantique



07-10-2008

50

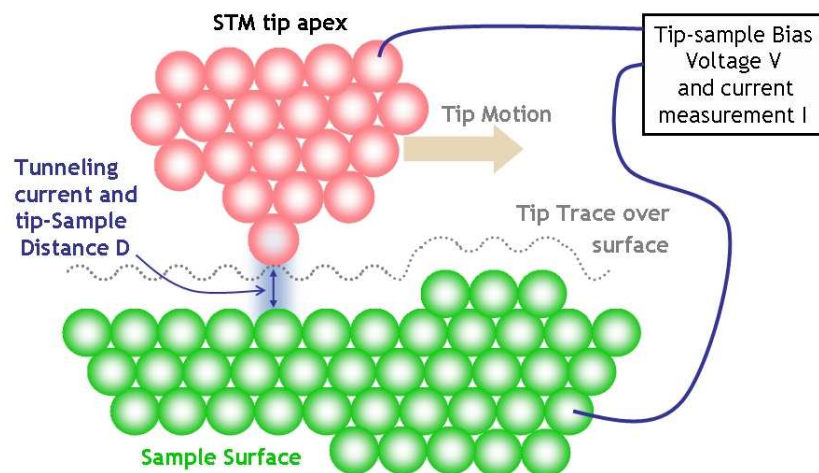
Effet Tunnel

- Phénomène quantique
- Une particule (électron ici) traverse un mur (potentiel) infranchissable classiquement
- Très sensible (exponentiel) sur la hauteur du mur et sur son épaisseur (distance)
- Pour STM le mur est le vide entre l'échantillon et la pointe

07-10-2008

51

Fonctionnement STM

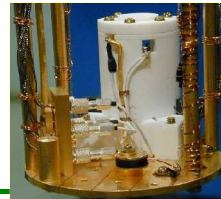
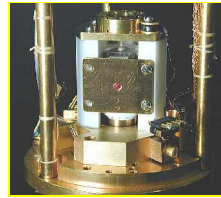
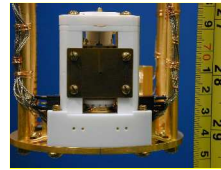
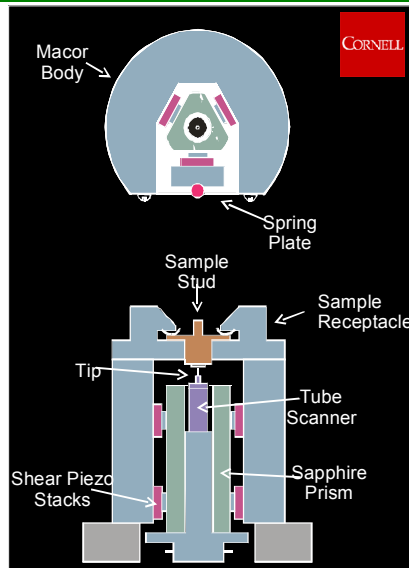


Ref: Opensource Handbook of Nanoscience and Nanotechnology
<http://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology>

07-10-2008

52

Design de l'instrument pour STM/STS



07-10-2008

Besoin : mK, pièce avec écran acoustique/RF



53

Microscope



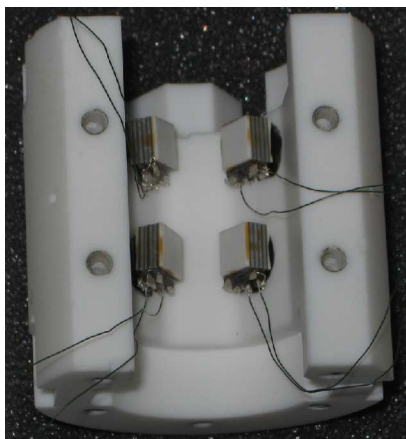
Un microscope en morceaux...

07-10-2008

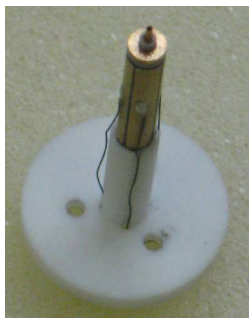


54

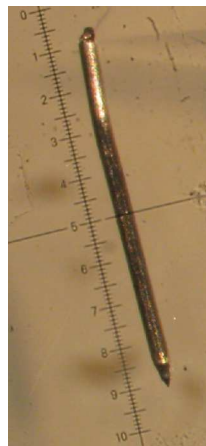
Microscope



Corps du marcheur



Coeur du microscope
Piezo XYZ et
porte-pointe



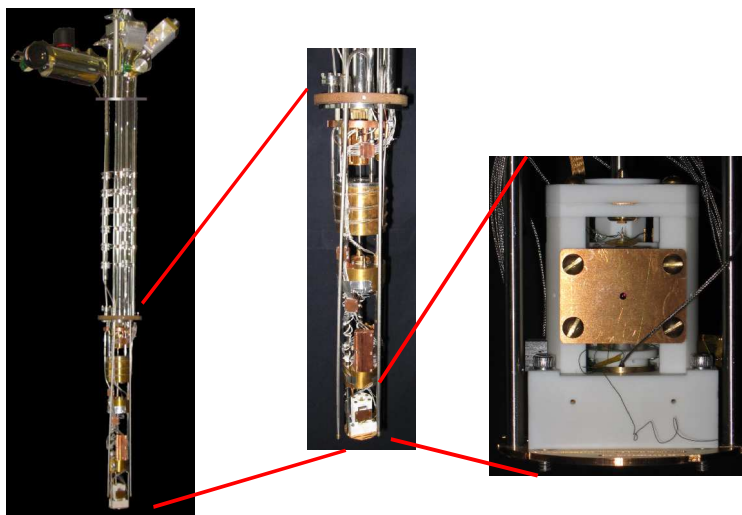
Pointe de Tungstène
8mm

07-10-2008

55

Microscope assemblé

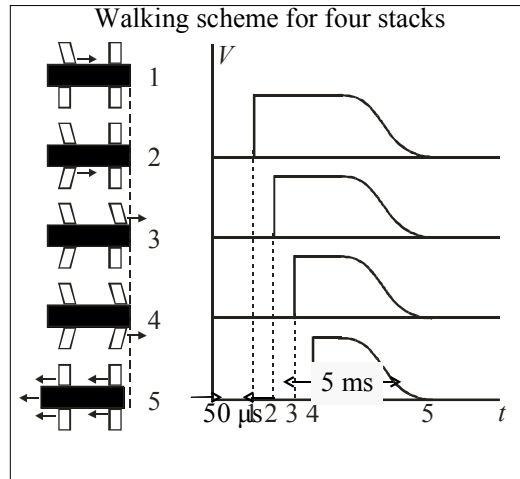
Cryostat



07-10-2008

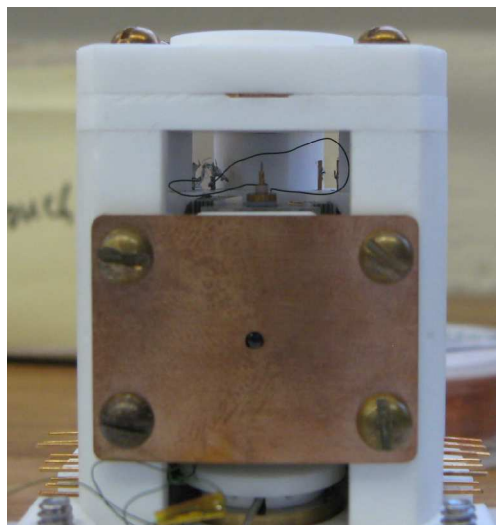
56

Approche grossière

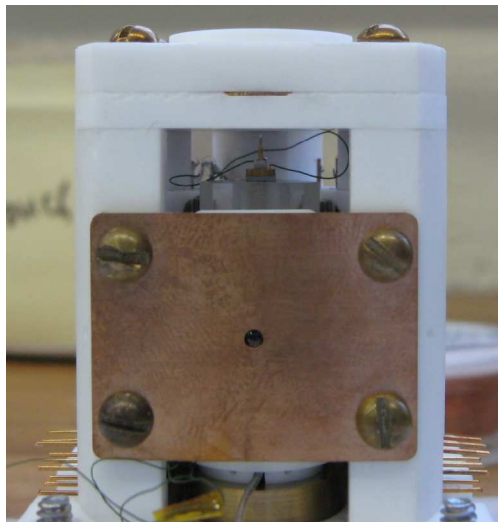


1 pas = 250 Å à BT
 Déplacement Total = 5 mm
 Reproductibilité horizontale = 100 Å

Déplacement Marcheur (bas)



Déplacement Marcheur (haut)



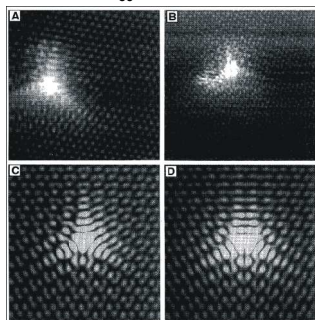
07-10-2008

 UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

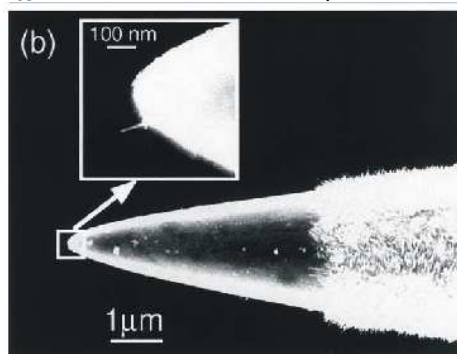
59

Qu'est ce qui est sur la pointe?

Pointe avec C_{60} / défauts sur le graphène

K.F. Kelly, Science: **273**, 1371 (1996)

Nanotube crû sur la pointe

Y. Shingaya, Physica B **323**, 153 (2002)

Pointes standard :

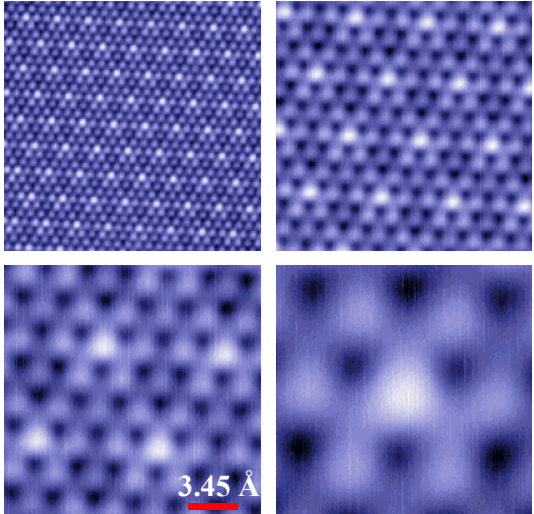
- Fils coupé de PtIr
- Tungstène formé électrochimiquement, émission de champs

07-10-2008

 SHERBROOKE

60

...Très Haute Résolution



3.45 Å

Zoom sur NbSe₂

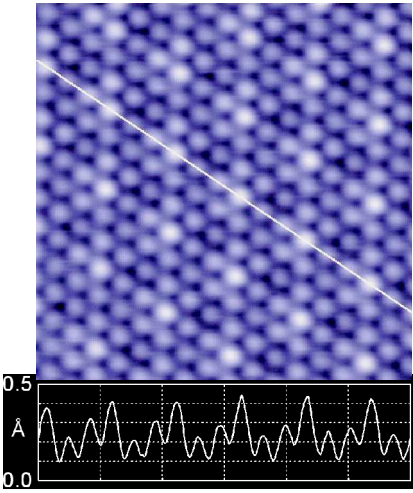
250 mK
50 pA, 50 mV

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

61

STM Image les densité d'électrons – pas les atomes



NbSe₂: Onde de densité de charge

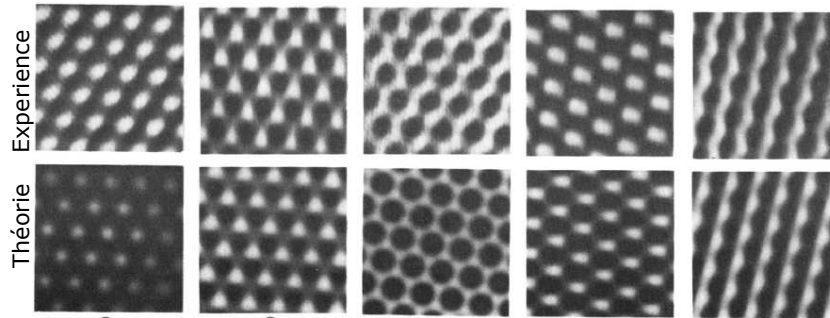
250 mK
50 pA, 50 mV

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

62

Graphite (pointes différentes)



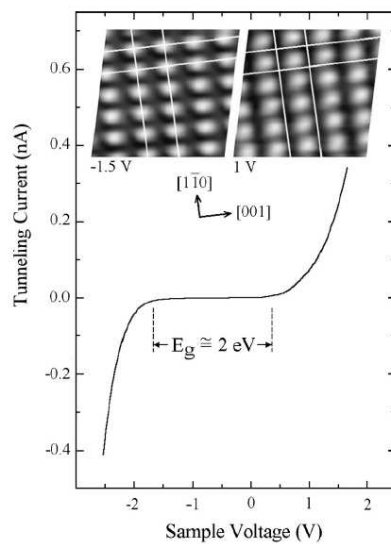
H.A. Mizes *et al.*, PRB **36**, 4491 (1987)

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

63

GaAs 110 (semiconducteur)



- Grands voltages ($\sim V$):
- Effets de la pointe (pliage de bande)
- Ne mesure plus une densité d'état

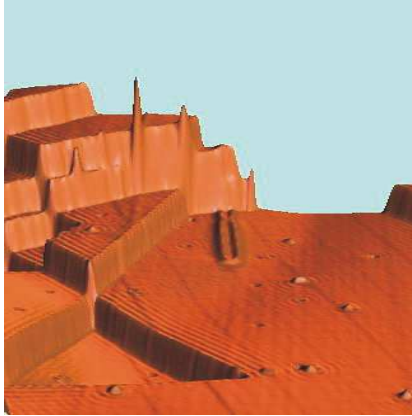
A. Depuydt *et al.*, PRB **60**, 2619 (1999)

07-10-2008

UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

64

Cuivre (111)



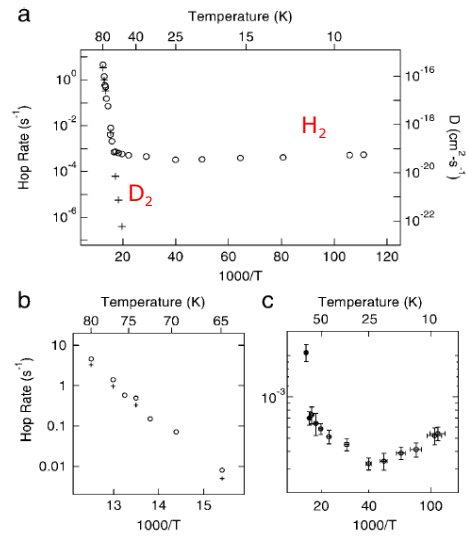
- Terraces
- Oscillations de Friedel :
 - Bord des marches
 - Impuretés

Oscillations = vagues d'électrons

M.F. Crommie , CP Lutz DM Eigler, Nature **363**, 524-527 (1993)

Déplacement Atomique

Diffusion d'Hydrogène sur Cu(001)

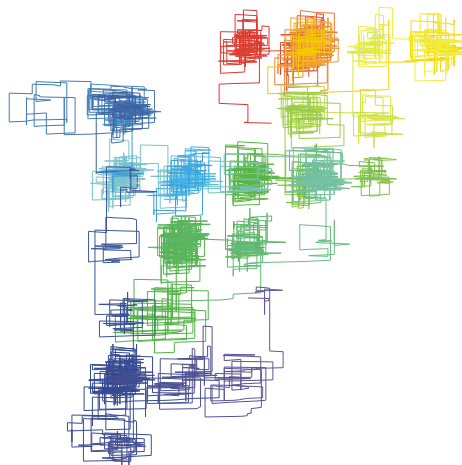


07-10-2008

L. J. Lauho and SHERBROOKE UNIVERSITÉ DE 85 4566 (2000)

67

Traque d'un atome d'Hydrogène



07-10-2008

SHERBROOKE UNIVERSITÉ DE

68

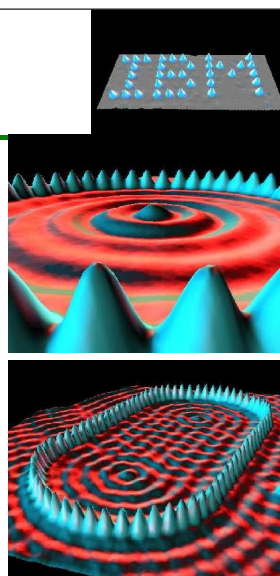
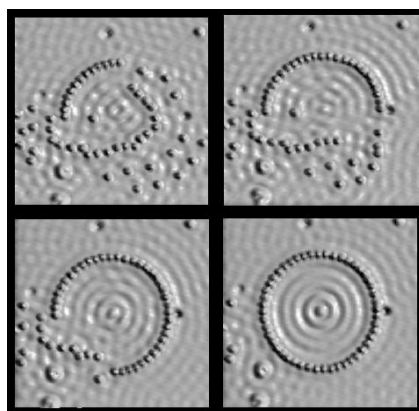
manipulations atomique

07-10-2008

 UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

69

M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler



Fe sur Cu(111)

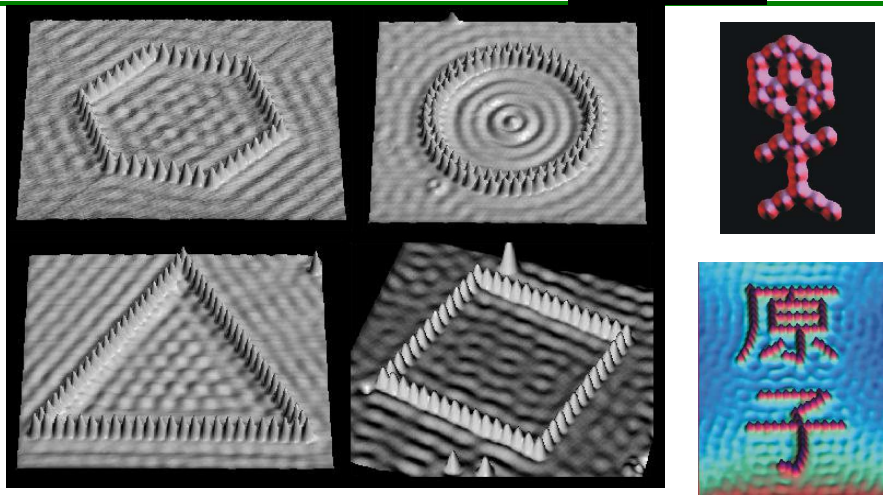
Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface.
Science 262, 218-220 (1993).

07-10-2008

 UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

70

M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler, E.J. Heller



Waves on a metal surface and quantum corrals.
Surface Review and Letters 2 (1), 127-137 (1995).

07-10-2008

71

Autres Manipulations / pointes

07-10-2008

72

Chimie par STM

O₂ sur Pt(111)

Dissociation by Tunneling Electrons

B. C. Stipe *et al.*, PRL **78**, 4410(1997)

Sur Ag(111)

Fe+CO \rightleftharpoons FeCO
Fe(CO)₂

H. J Lee and W. Ho, Science **286**, 1719 (1999)

07-10-2008
 UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
73

STM et rotation moléculaire

O₂ sur Pt(111)

Reversible Rotation by Tunneling Electrons

B. C. Stipe, M. A. Rezaei, W. Ho, Science **279**, 1907 (1998)

Single Molecule Reversible Rotation

Isolated Oxygen Molecule Oxygen Molecule Next to Defect

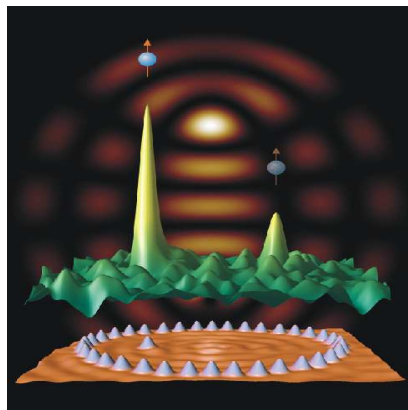
07-10-2008
 UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
74

Spectroscopie et carte dl/dV

07-10-2008

75

Mirage quantique : combinaison topographe et carte dl/dV



H. C. Manoharan, C. P. Lutz & D. M. Eigler, Nature 403, 512 (2000).

07-10-2008

76

Mirage Quantique

Cu(111)/Co

Topo

Co : état Kondo

Mirage

Carte dI/dV

H. C. Manoharan, C. P. Lutz & D. M. Eigler, Nature 403, 512 (2000).

07-10-2008 UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE 77

C'était la nanoscience...

- Un monde de physique quantique
- À une échelle minuscule
- Qui aura de plus en plus de répercussion dans la vie de tous les jours...

07-10-2008 UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE 78