

Explorer les matériaux quantiques

Université Paris Diderot - Paris 7

Au XX^e siècle, une physique révolutionnaire émerge, indispensable pour décrire la matière à petite échelle. C'est la physique quantique, fondée sur la dualité onde corpuscule. Façonner la matière à des échelles nanométriques (dimensions de l'ordre de 10^{-9} m) permet d'exploiter les effets quantiques pour créer de nouveaux matériaux et dispositifs.



Dispositif quantique de piégeage d'ions strontium. Un substrat porte des électrodes en cuivre doré et des condensateurs (cubes). Les champs électriques générés par les électrodes piègent les ions au-dessus du substrat. Ces ions piégés sont des objets quantiques qui pourraient remplacer les bits de nos ordinateurs classiques.

© Bino DUBOST/LMPQ/CRS Physique



Image de graphène observée par microscopie électronique à transmission. Le graphène est formé d'une couche unique d'atomes de carbone. Sa conductivité électrique exceptionnelle en fait un candidat sérieux pour les dispositifs électroniques du futur.

© Damien Alloyeau/LMPQ

Limitations de l'œil et des instruments optiques

Au plus près de l'œil, un humain discerne des détails de 100 microns (0,1 mm). A travers une loupe ou un microscope, il discerne des détails 500 fois plus petits, soit 0,2 micron. Cette augmentation artificielle de la résolution de l'œil est limitée par la longueur d'onde de la lumière (entre 0,4 et 0,7 μ m), trop grande pour observer des objets nanométriques.

Les microscopes quantiques : une résolution jusqu'à l'ångström (10^{-10} m)

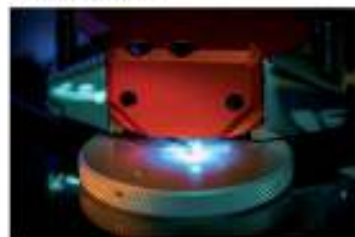
Les microscopes électroniques : des faisceaux d'électrons remplacent la lumière

Vers 1925, les physiciens découvrent que les électrons, imaginés jusque-là comme des grains, se comportent comme des ondes. Dans un microscope électronique, leur longueur d'onde, 100 000 fois plus petite que celle de la lumière, permet de différencier deux atomes voisins dans un solide. Le faisceau d'électrons peut être réfléchi par l'échantillon (*Microscope Électronique à Balayage*) ou le traverser (*Microscope Électronique à Transmission*).

Les microscopes « à champ proche » : des effets quantiques pour voir et concevoir

Les microscopes à effet tunnel et à force atomique sont conçus dans les années 1980. Au moyen d'une pointe, ils renseignent sur les propriétés physiques locales, fournissent des images du relief à l'échelle atomique et permettent même de manipuler la matière atome par atome.

Microscope à force atomique, en démonstration



© LMPQ/Paris Diderot



Premier microscope à force atomique, exposé aujourd'hui au Science Museum à Londres. Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, ingénieurs d'IBM, conçoivent le microscope à « effet tunnel » en 1981, ce qui leur vaut le prix Nobel en 1986.

© John Dalton

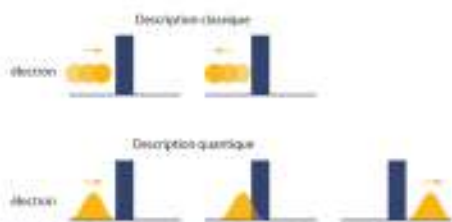
Le microscope à force atomique a été inventé en 1985 à Stanford (Californie) par Gerd Binnig, Calvin Quate and Christoph Gerber.

Le microscope à effet tunnel

Scanning Tunneling Microscope (STM)

2

Université Paris Diderot - Paris 7



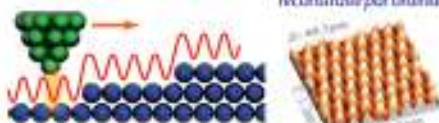
Dans la théorie classique, l'électron rebondit sur la barrière. Dans la théorie quantique, il peut la traverser : c'est l'effet tunnel. © Schéma Martelle Vargès/Universcience

L'effet tunnel : un effet quantique

Selon la physique classique du XIX^e, une particule ne peut pas franchir une barrière d'énergie si elle n'a pas une énergie supérieure à celle de la barrière. La dualité onde corpuscule, au cœur des théories quantiques, confère aux particules (des électrons par exemple) une certaine étendue, de l'ordre de leur longueur d'onde. En conséquence, la description quantique prévoit la possibilité de détecter une particule au-delà de la barrière, alors que son énergie n'est pas suffisante « classiquement » : c'est l'effet tunnel.



Image en 3D de la surface reconstruite par ordinateur



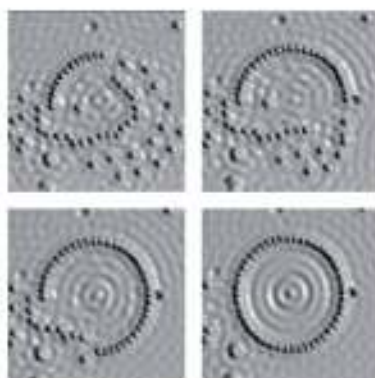
Principe du microscope à effet tunnel © Wikowski/INSP

Voir les atomes avec un microscope à effet tunnel

L'effet tunnel se réalise à faible distance : moins d'un nanomètre entre la pointe du microscope STM et la surface du métal qu'elle balaye ! Les électrons qui s'échappent de la surface se dirigent vers la pointe (ou inversement) sous l'effet d'une tension électrique. Ils forment le « courant tunnel », de l'ordre d'un nanoampère.

Lorsque la pointe s'approche de la surface, un plus grand nombre d'électrons sont détectés : le courant tunnel est plus intense. Garder le courant tunnel constant, en approchant ou en éloignant la pointe de la surface, permet d'épouser le relief de l'échantillon.

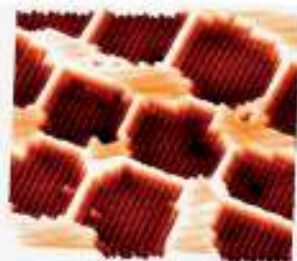
Ainsi, les mouvements de la pointe permettent de reconstituer la surface de l'échantillon à l'échelle de l'atome (10^{-10} m).



Quatre images successives de la création d'un motif circulaire d'atomes de fer sur une surface de cuivre © IBM

Et bien plus

Les modifications de l'intensité du courant tunnel en fonction de la tension électrique appliquée renseignent sur les propriétés électroniques des échantillons. La pointe du microscope à effet tunnel peut aussi servir à déplacer des atomes un par un.



Réseau de fils de cuivre séparés par des chaînes d'atomes d'azote (15x15 nm) © Vincent Repain/LMPO

Le microscope à force atomique

Atomic Force Microscope (AFM)

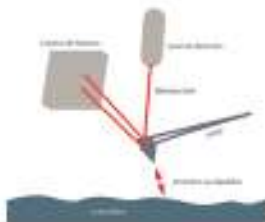
Université Paris Diderot – Paris 7



Image d'un levier et de sa pointe grossie 600 fois.

La pointe mesure quelques micromètres et son rayon de courbure 10 à 20 nanomètres.

© DR



Principe du microscope à force atomique
© Schena Mariella Vergari Université



Ensemble expérimental de recherche de l'université de Paris Diderot
© Vincent Repain/LMPO

Atomes de plomb (Pb), d'étain (Sn) et de silicium (Si) imagés par microscope à force atomique

© Serge Morlat Université d'Osaka

Une pointe de très petite dimension est approchée à quelques nanomètres ou au contact d'un échantillon. Les forces entre la pointe et la surface de l'échantillon, très faibles (de l'ordre du nanonewton), sont mesurées par la déformation d'un ressort (levier) de taille micrométrique. La déformation du levier est mesurée à l'aide d'un faisceau laser.

Des forces attractives et répulsives

Lorsque la pointe est à environ 10^{-10} m de la surface de l'échantillon, elle est repoussée. Cette interaction dite « de cœur dur » est principalement décrite par la physique quantique selon le principe d'exclusion de Pauli (deux électrons ne peuvent se trouver dans le même état quantique). A plus grande distance (10^{-9} m), la pointe est attirée par la surface en raison de forces électrostatiques entre les atomes comparables à celles qui existent entre les molécules d'eau (forces de van der Waals).

Un microscope à tout faire

Voir la surface d'un échantillon à petite échelle : on balaye la pointe sur la surface, de façon à rester constamment en contact. Dans des conditions de laboratoire (sous vide, température stable, réduction des sources de bruit...), il est possible d'observer les atomes de tous les matériaux (isolants et conducteurs).



a) Domaines magnétiques de cobalt © Vincent Repain/LMPO
b) Molécules d'ADN imagées par microscope à force atomique © Jean Carlos Lopez Belmonte/Institut Jozef Salk
c) Copolymère de styrène-butadiène (1µm x 1µm) © Prof. Margerita/Université de technologie de Chemnitz, Allemagne



a) Image de la surface d'un disque compact (CD) © Vincent Repain/LMPO
b) Molécule entre deux électrodes © Vincent Repain/LMPO

Mesurer différentes propriétés : selon les pointes utilisées et leur distance à la surface, on mesure des forces de natures différentes qui renseignent sur l'élasticité, l'aimantation, la répartition des charges électriques à l'échelle nanométrique.



a) Nanotube de carbone entouré d'une couche moléculaire © Equipe TELEM/LMPO
b) Couche de pentacène entrant dans la composition d'un transistor organique © Salah Benabou/Master DD - Paris Diderot

Nanosciences et nanotechnologies

Le microscope à force atomique aide les chercheurs et les étudiants du master « Dispositifs Quantiques » de l'université Paris Diderot à développer et caractériser de nouveaux matériaux et dispositifs quantiques qui seront à la base des futures technologies.

La salle Blanche du LMPO

Université Paris Diderot – Paris 7

4

La salle blanche est une plateforme technologique indispensable, qui permet aux chercheurs de passer rapidement de la conception à la réalisation de nouveaux matériaux et dispositifs quantiques.

Les conditions de propreté, de température et d'humidité sont parfaitement contrôlées. Dans la salle blanche de l'université de Paris Diderot, le nombre de particules de diamètre supérieur à $0,5\mu\text{m}$, par cm^3 , est inférieur à 60 !

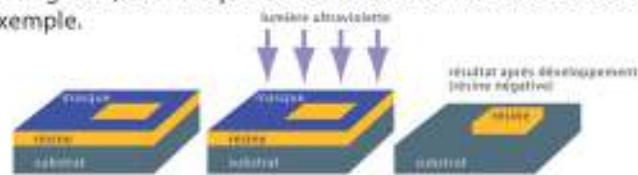


© Hervé de Bruil

La salle blanche de l'université est équipée, entre autres, de matériels permettant :

La lithographie optique ou électronique

Pour dessiner un masque dans une résine (polymère organique), on l'irradie par endroits avec un faisceau de lumière UV ou d'électrons. L'action chimique d'un développeur permet de dissoudre les zones irradiées (résine positive) ou inversement (résine négative). Un masque de résine est ainsi réalisé sur un substrat de silicium, par exemple.



© Schéma Mariño Yergu/Universcience



Vue d'ensemble d'un évaporateur à canon à électrons
© Laetitia Doguet/Paris Diderot

Le dépôt de couches minces métalliques

Un faisceau d'électrons chauffe localement un matériau métallique qui s'évapore ainsi atome par atome. Les atomes se déposent ensuite sur un substrat éventuellement recouvert de résine.



Évaporateur à canon à électrons
© Laetitia Doguet/Paris Diderot

La gravure par plasma

L'impact des ions d'un plasma (gaz fortement ionisé) accélérés par un champ électrique (*Ion Etching*) éjecte de la matière. Ce « bombardement » ionique peut être combiné avec des réactions chimiques entre les ions du plasma et la matière à enlever (*Reactive Ion Etching*). Un plasma contenant du di-oxygène (O_2) permet d'éliminer les résidus de résine.

Matériaux et dispositifs quantiques

Université Paris Diderot - Paris 7

6



Nanotube de carbone entouré de molécules organiques
© Equipe MEANS/LMPO



Un nanotube de carbone « Single Walled Carbon Nanotube » est formé d'une seule couche d'atomes de carbone. Sa conductivité électrique, modifiée par un dépôt de molécules organiques (à base d'atomes de carbone) est étudiée pour réaliser des nanotransistors.

Nanotube de carbone entre deux contacts d'or, sur un substrat de SiO₂, © Equipe TELIMA/LMPO

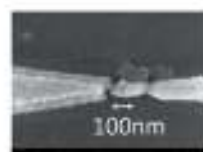


Image d'un C60 obtenue par microscopie à effet tunnel
© Vincent Repain/LMPO

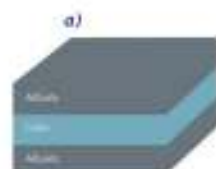
Un fullerène

Le C60 est un nanoballon de football.

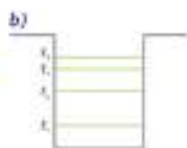
Cette molécule est composée de 60 atomes de carbone placés aux sommets de 12 pentagones et de 20 hexagones. Elle peut être introduite dans la cassure d'un nanofil d'or pour fabriquer un transistor à molécule.



Cassure nanométrique d'un fil d'or, structure de base pour un dispositif à molécule unique
© Equipe STM/LMPO



Structure (a) et représentation des niveaux d'énergie discrets (b) d'un puits quantique
© Schémas Marielle Vergès/Université



Puits quantique : un atome artificiel

C'est un dispositif quantique formé d'une couche de semi-conducteur (arséniure de gallium par exemple) prise en sandwich entre deux couches de matériau plus isolant.

Les électrons piégés dans la couche semi-conductrice ont une énergie quantifiée (elle ne peut prendre que certaines valeurs), comme ceux d'un atome.



© Schéma Marielle Vergès/Université

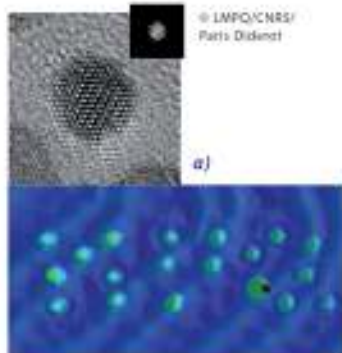


Un laser à cascade quantique est un dispositif constitué d'une succession de puits quantiques de différents niveaux d'énergies. Par effet tunnel, un électron peut passer d'un puits quantique à un autre, d'énergie plus basse. Ayant trop d'énergie dans ce nouveau puits, l'électron libère son excès d'énergie sous forme de rayonnement. Une cascade convenable de puits permet d'obtenir un rayonnement intense d'une seule longueur d'onde : le rayonnement laser.

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques

Université Paris Diderot - Paris 7

7



© LMPO/CNRS/Paris Diderot

Les microscopes actuels, à effet tunnel (STM), à force atomique (AFM) et à transmission (TEM) permettent de sonder la matière à l'échelle atomique. Il est ainsi possible d'étudier les propriétés physiques des nano objets (magnétiques, optiques, électriques...) en lien avec l'arrangement des atomes. Les édifices que l'on peut fabriquer et sonder sont obtenus à partir d'atomes uniques ou bien à partir d'une vapeur d'atomes formée sous ultravide. Cela peut être des amas de quelques atomes, dont on peut faire varier les distances moyennes ainsi que la symétrie d'arrangement, jusqu'à des édifices cristallins formés de plusieurs centaines d'atomes.

Images de microscopes électroniques représentant des nanostructures obtenues à partir d'atomes de cobalt

- a) manipulés individuellement par une pointe de microscope en champ proche,
- b) à partir d'une vapeur atomique créée sous ultravide.

© LMPO/CNRS/Paris Diderot

Le laboratoire conçoit, réalise et caractérise un large panel de micro et nanodispositifs optroniques et électroniques : sources et détecteurs à multi-puits quantiques ou à cascade quantique, microcavités optiques, nanotransistors à effet de champs, semi-conducteurs et nanotransistors à molécule unique...



Laser à cascade quantique émettant dans la gamme de fréquence des téra-hertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$).

© LMPO/CNRS/Paris Diderot



© Samuel Guibault/LMPO

Pour observer certains phénomènes quantiques, les chercheurs mesurent le transport des électrons dans leurs dispositifs, refroidis à très basse température (10 millikelvin, soit $-273,14^\circ\text{C}$). Cela nécessite l'exploitation de techniques de cryogénie et de mesures électriques à très bas bruit électronique. Le laboratoire est également spécialisé en spintronique et supraconductivité.

Cryostat « à dilution », utilisant le refroidissement dû à l'expansion d'hélium 3 dans de l'hélium 4.

La physique quantique offre de nouveaux concepts de traitement de l'information, potentiellement plus sûrs et efficaces que les protocoles et dispositifs classiques. Le laboratoire développe des sources lumineuses quantiques capables d'émettre de manière contrôlée des paires de photons corrélés, appelés photons jumeaux. Il conçoit, réalise, caractérise ou exploite des lasers originaux aux propriétés variées : lasers à semi-conducteurs émettant dans le visible ou l'infrarouge, en continu ou sous forme d'impulsions ultra-courtes, avec une grande précision sur la fréquence.



Source laser pour une expérience de piégeage et de refroidissement par laser d'ions de strontium. Un outil pour la manipulation de l'information quantique.

© Samuel Guibault/LMPO



Master Dispositifs Quantiques

Université Paris Diderot - Paris 7

Master International en physique théorique et expérimentale, sur les phénomènes quantiques et les nombreux dispositifs qui en découlent.



© Nicole Raoul/Paris Diderot

Cette formation au **monde de la recherche** propose aux étudiants, entre autres, des projets en nanosciences, des stages, des visites de laboratoires, des séminaires sur les nanosciences, des cours donnés par des intervenants de laboratoires prestigieux d'Ile-de-France.



© Nicole Raoul/Paris Diderot

La formation offre aux étudiants **plusieurs débouchés** : intégration dans un programme doctoral, un groupe de R&D industriel, des bureaux de valorisation..., par le biais de stages et de thèses dans des laboratoires académiques et industriels français et étrangers.



© Nicole Raoul/Paris Diderot

[Http://www.masters-dispositifs-quantiques.fr/](http://www.masters-dispositifs-quantiques.fr/)