

Axe principal: Supraconductivité à l'échelle nanométrique

Axes secondaires : Systèmes d'électrons (fortement) corrélés

Dispositifs quantiques contrôlés : nanofabrication propriétés électroniques et magnétiques

<http://www.insp.upmc.fr/-Dispositifs-quantiques-controles-.html>

Institut des Nanosciences de Paris
4 Place Jussieu, 75005 Paris cedex 05 Case 840 - France
Tour 22-32

<http://www.insp.upmc.fr/>

Contact C'nano de l'équipe

Dimitri Roditchev

dimitri.roditchev@insp.jussieu.fr

Responsable d'équipe :

Dimitri Roditchev (DR2)

dimitri.roditchev@insp.jussieu.fr

Membres permanents de l'équipe :

Yves Noat (CR1)

yves.noat@insp.jussieu.fr

Tristan Cren (CR1)

tristan.cren@insp.jussieu.fr

François Debontridder (IR)

francois.debontridder@insp.jussieu.fr

Christophe Brun (CR2)

christophe.brun@insp.jussieu.fr

• **Activité scientifiques de l'équipe :**

Notre équipe est spécialisée dans l'étude des propriétés électroniques et magnétiques de matériaux et de nanostructures par microscopie/spectroscopie tunnel à balayage. Nous développons nous même nos microscopes. En 2008 nous avons achevé le développement d'un nouvel équipement unique en France : un microscope à effet tunnel à 300mK, 10T et fonctionnant sous ultravide (UHV), le système entier étant couplé à une chambre de

préparation et de croissance de nanostructures. Nous développons actuellement un nouveau microscope STM/AFM UHV à 2K « cryogen free » (i.e. fonctionnant sans bain d'hélium liquide mais avec en circuit fermé d'hélium gazeux comprimé et détendu), avec un champ magnétique vectoriel, nous n'en connaissons pas d'équivalent à travers le monde.

Nous sommes impliqués dans de multiples thématiques dont trois seront décrites ci-dessous. La première concerne la supraconductivité confinée dans des nanostructures. Plus particulièrement nous nous sommes intéressés à l'étude du diagramme de phase de nano-îlots supraconducteurs soumis à un champ magnétique. Notre but est d'observer, dans l'espace réel, comment les supercourants circulent, comment les vortex (tourbillons de courants) s'organisent et s'ils fusionnent en cas de fort confinement [1-2].

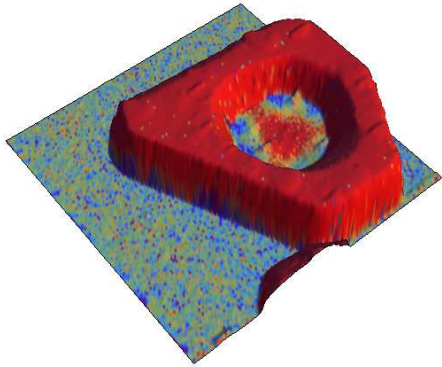
La seconde thématique s'articule autour de la transition supraconducteur-isolant dans des films ultraminces supraconducteurs. Nous avons commencé par étudier des couches de 2 à 15 nm d'épaisseur de NbN utilisées dans la fabrication de détecteurs de particules à photons uniques. Ces dispositifs utilisent des méandres supraconducteurs. Nous observons que proche de la transition supraconducteur-isolant (qui a lieu en dessous de 2nm d'épaisseur) les signatures spectrales s'écartent fortement de celles de supraconducteurs ordinaires bien décrits par ma théorie BCS [3].

La troisième thématique concerne la transition métal-isolant induite par pulse électrique à l'échelle nanométrique. C'est un sujet totalement nouveau qui a donné lieu à une prise de brevets de la part de nos collaborateurs de l'Institut des Matériaux de l'Université de Nantes. Notre but est de comprendre les mécanismes microscopique de la transition de Mott induite par pulse électrique. Nos travaux montrent que la transition se manifeste par l'apparition d'inhomogénéités électronique à l'échelle nanométrique. Nous avons aussi montré que les nouveaux états électroniques induits étaient associés à une déformation du matériau. Pour gagner plus d'information sur d'éventuels effets électrostrictifs, nous développons un AFM UHV basse température [4-6].

Par ailleurs, l'équipe poursuit ses travaux de fond sur l'étude des supraconducteurs non-conventionnels (récemment découverts ou plus anciens) par spectroscopie à effet tunnel. Nous cherchons à comprendre les mécanismes responsables de la supraconductivité dans les pnictides, les composés multigaps, les cuprates, etc [7-9].

- Recherche(s) et résultat(s) obtenu(s) dans les domaines d'actions des nanosciences :

Supraconductivité confinée



Copyright INSP

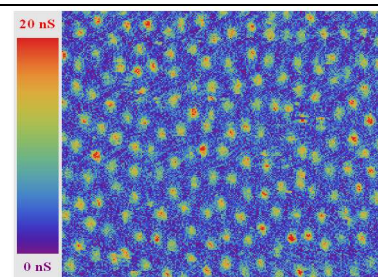
Nano-piscine supraconductrice de Pb/Si(111), large de 400 nm, épaisse de 8nm au bord et de 3nm au centre dans la piscine. L'ensemble est placé dans un champ magnétique de 0,2 T à une température de 300 mK. Les zones supraconductrices sont en rouge et les zones normales en bleu-violet : l'îlot accepte trois paires de vortex, ancrées contre les bords.

La supraconductivité fait apparaître deux échelles caractéristiques : la longueur de cohérence ξ qui correspond à la taille d'une paire de Cooper et la longueur de London λ qui donne l'échelle sur laquelle un champ magnétique extérieur est écranté. Nous cherchons à comprendre ce qui se passe quand la taille d'un supraconducteur devient comparable voire plus petite que ces longueurs caractéristiques. C'est un sujet extrêmement actif en ce moment.

Nous avons publié récemment un article sur l'étude dans l'espace réel du confinement d'un vortex unique (tourbillon de courant) dans un nanosupraconducteur individuel [1]. Ce régime de confinement extrême ou un îlot peut accepter un vortex au maximum avant de transiter entièrement dans l'état normal n'avait jamais été exploré.

Nous examinons maintenant la coexistence et l'organisation de plusieurs vortex confinés dans des îlots 2D de taille variable. Nous cherchons à observer un phénomène propre au confinement, à savoir la fusion du réseau de vortex en un seul vortex géant [2].

Supraconductivité proche de la limite supraconducteur-isolant



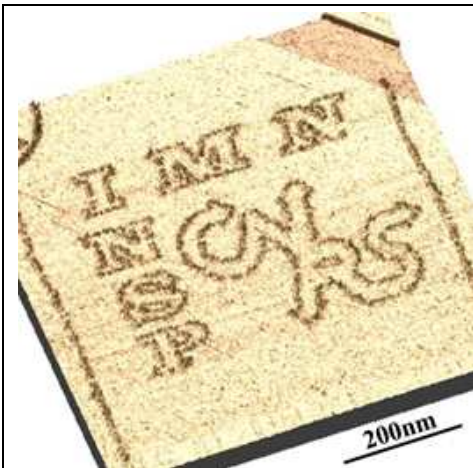
Copyright INSP

Image de spectroscopie tunnel à balayage d'un réseau de vortex dans une couche mince de NbN de 8nm d'épaisseur. Le réseau de vortex est très désordonné.

Dans le cadre d'une collaboration internationale avec nos partenaires du DLR Institute of Planetary Research (Berlin) et du Institute of Micro- und Nano-electronic Systems (University of Karlsruhe), nous étudions les propriétés des couches minces de NbN, en particulier de très faible épaisseur (<6 nm), inférieures à la longueur de cohérence (la taille des paires de Cooper) où de forts effets de dimensionnalité 2D sont attendus ainsi que des effets liés à la localisation de paires de Cooper proche de la transition supraconducteur-isolant.

Diverses théories prédisent que la limite 2D devrait être marquée par de fortes déviations par rapport à la supraconductivité conventionnelle BCS. Nos résultats préliminaires montrent des effets très forts, comme l'existence d'un pseudogap au cœur des vortex. Par ailleurs, nous avons tout récemment observé une supraconductivité spatialement inhomogène pour les plus faibles épaisseurs, conformément à ce qui avait été prédit théoriquement pour un tel système, qui est proche de la transition supraconducteur-isolant (2nm d'épaisseur) [3].

Transition de Mott métal-isolant induite par pulse électrique



Copyright INSP
 Nanolithographie par nano-indentation induite par pulse électrique en STM à température ambiante d'un échantillon de GaTa₄Se₈ clivé sous UHV. La marche en haut à droite correspond à une hauteur d'un feuillet atomique de 0,5 nm d'épaisseur.

Nous travaillons depuis 4 ans sur la transition de Mott métal-isolant induite par pulse électrique dans un isolant de Mott faible GaTa₄Se₈. Cette étude, menée en collaboration avec nos collègues de l'IMN de Nantes, est soutenue par l'ANR NanoMott. Cette activité, unique au Monde, a rapidement donné d'excellents résultats. Nous avons mis en évidence de façon directe, par microscopie/spectroscopie tunnel, l'apparition d'inhomogénéités électroniques intrinsèques dans des échantillons de GaTa₄Se₈ suite à la transition de l'état isolant vers l'état métallique. Nous avons aussi montré la possibilité d'induire localement la transition métal-isolant à l'échelle nanométrique. Cette découverte, pourrait faire l'objet d'une extension aux brevets déjà déposés par l'équipe de l'IMN en vue de la réalisation de mémoire RRAM (Resistive Ram). La taille des séparations de phase électroniques induites par pulse électrique est de l'ordre de 40 nanomètres, elles sont spatialement associées à des zones métalliques et super-isolantes, dans une matrice de type isolante.

• **Programme de recherche :**

Les recherches futures sur la supraconductivité confinée dans les nano-cristaux de plomb porteront sur l'effet du confinement (vertical et latéral) sur le paramètre d'ordre supraconducteur par spectroscopie tunnel à balayage à basse température et sous champ magnétique. Pour cette étude un aspect important est de bien comprendre le rôle joué par le substrat sur lequel les nano-cristaux supraconducteurs sont supportés. Cet aspect concerne à la fois la problématique de la connexion électrique des îlots aux électrodes et des effets de proximité (direct et inverse) induits par le substrat sur la supraconductivité des îlots. Ainsi nous effectuerons l'étude préliminaire de la croissance d'îlots de Pb sur différents substrats-types afin de faire varier la nature du couplage électrique des îlots au substrat et d'observer les effets produits sur les propriétés supraconductrices des îlots.

Par ailleurs, certains aspects de ce premier objectif recoupent des questions soulevées par l'étude des couche minces supraconductrices proches de la transition métal-isolant actuellement étudiées dans l'équipe. Nous poursuivrons les mesures sur les films ultraminces de NbN afin de comparer ces résultats à ceux obtenus sur des films de Pb sur Si(111) en vue de mieux comprendre le rôle du désordre, des interactions Coulombiennes ou encore des fluctuations supraconductrices sur l'apparition de la transition supraconductrice-isolant dans ces systèmes.

Un troisième objectif à plus long terme concernera l'étude locale de la destruction progressive de la supraconductivité par l'introduction contrôlée d'impuretés magnétiques dans les îlots de plomb supportés sur substrats silicium. Un aspect complémentaire à cette étude concerne l'étude de jonction supraconductrice-ferromagnétique à l'échelle

nanométrique, ces systèmes étant également fabriqués in situ par épitaxie, comme le sont les îlots de plomb sur silicium.

Concernant la thématique de la transition de Mott induite par pulses électriques, Nos travaux se poursuivent en vue de comprendre les mécanismes microscopiques en jeu. Nous cherchons aussi à observer le même type d'effet dans d'autres composés présentant une transition de Mott dans l'idée que les mécanismes sous-jacents pourraient être génériques à une grande classe de matériaux.

- **Références (sélection 2009-2010):**

1. "Ultimate Vortex Confinement Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy", T. Cren, D. Fokin, F. Debontridder, D. Roditchev, *Phys. Rev. Lett.* 102, 127005 (2009).
2. "Vortex fusion and Giant Vortex states in confined superconducting condensates", T. Cren, L. Serrier-Garcia, F. Debontridder, D. Roditchev, submitted.
3. "Superconductivity in Ultra-Thin NbN Films at the superconducting-insulator transition", Y. Noat, T. Cren, F. Debontridder, C. Brun, D. Roditchev, K. Ilin, M. Siegel, A. Semenov, B. Günther, and H.-W. Haubers, to be published.
4. "Electric-pulse-driven electronic phase separation, insulator-metal transition, and possible superconductivity in a Mott insulator", Vaju C., Cario L., Corraze B., Janod E., Dubost V., Cren T., Roditchev D., Braithwaite D., Chauvet O., *Adv. Mat.* 20, 2760 (2008).
5. "Electric-pulse-induced resistive switching and possible superconductivity in the Mott insulator GaTa₄Se₈", Vaju C., Cario L., Corraze B., Janod E., Dubost V., Cren T., Roditchev D., Braithwaite D., Chauvet O., *Microelectronic Engineering* 85, 2430 (2008).
6. "Electric-Field-Assisted Nanostructuring of a Mott Insulator", Cren T., Vaju C., Cario L., Corraze B., Janod E., Debontridder F., Roditchev D., *Adv. Func. Mat.* 19, 2800 (2009).
7. "Two energy gaps in the tunneling-conductance spectra of the superconducting clathrate Ba₈Si₄₆", Y. Noat, T. Cren, P. Toulemonde, A. San Miguel, F. Debontridder, V. Dubost, and D. Roditchev, *Phys. Rev. B* 81, 104522 (2010).
8. "Signatures of Multi-gap Superconductivity in Tunneling Spectroscopy", Y. Noat, T. Cren, F. Debontridder, D. Roditchev, W. Sacks, P. Toulemonde and A. San Miguel, *Phys. Rev. B* 82, 014531 (2010).
9. "Disorder effects in pnictides: a tunnelling spectroscopy study", Y. Noat, T. Cren, V. Dubost, S. Lange, F. Debontridder, P. Toulemonde, J. Marcus, A. Sulpice, W. Sacks and D. Roditchev, *J. Phys.: Condens. Matter* 22, 465701 (2010).