

Faire sa thèse en recherche fondamentale



Service de Physique Statistique, Magnétisme et Supraconductivité CEA/Grenoble

Recueil des sujets de thèse
Année universitaire 2007-2008

<http://www-drfmc.cea.fr/spsms>

Du graphène aux nanotubes

Chiralité
 $\vec{c}_{m,n} = m\vec{a}_1 + n\vec{a}_2$

Diamètre $d_t = \frac{|\vec{c}_{m,n}|}{\pi}$

Vecteur de translation $\vec{T}_{m,n}$

Rubans de Graphène

(12,0) (6,6) (6,4)

200 µm Mag = 120 X



oo

CEA/Grenoble
Département de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée
Service de Physique Statistique, Magnétisme et Supraconductivité
17 rue des martyrs
38054 Grenoble cedex 09

oo

Cette plaquette rassemble les sujets de stages proposés au SPSMS (Service de Physique Statistique, Magnétisme et Supraconductivité) pour l'année 2007-2008. Le SPSMS est un laboratoire du CEA-Grenoble associé à l'Université Joseph Fourier et composante de la Fédération Matière et Nanophysique (environ 30 chercheurs et 10 techniciens). Il est entièrement dévolu à la recherche fondamentale en matière condensée : les thèmes de recherches que nous y développons couvrent le magnétisme, la supraconductivité, la nanophysique, avec pour objectif de dégager les nouveaux concepts qui permettront de « comprendre » les systèmes complexes où apparaissent de nouveaux états de la matière.

Pour attaquer ces problèmes, nous avons rassemblé des moyens sur des sujets très ciblés mais qui couvrent tout le spectre allant de l'élaboration des cristaux ou des dispositifs électroniques à leur compréhension théorique, en passant par toute la gamme des mesures physiques en conditions extrêmes (très basses températures, forts champs magnétiques, haute pression) et des mesures microscopiques (diffusion neutronique, muons, synchrotron, spectroscopie tunnel par STM « scanning tunneling microscope »...). Une des grandes forces du laboratoire est le développement d'une instrumentation de pointe pour répondre aux nouveaux défis expérimentaux, tant dans le domaine de la nanophysique, que de la diffraction neutronique ou des mesures très bas niveau en conditions extrêmes de température ($T \sim 10$ mK), pression (~ 10 GPa) ou champ magnétique (18 T).

Ainsi, un stage ou une thèse expérimentale au SPSMS comportera le plus souvent une implication forte dans ces développements pour réaliser des mesures fines sur un « nouveau système » et les comprendre. Une thèse théorique mettra en œuvre des techniques sophistiquées de théorie des champs pour rendre « quantitative » une idée en lien avec des expériences en cours...

THEMES DE RECHERCHES

Magnétisme

Trois types de systèmes nous intéressent : les systèmes à fortes corrélations électroniques, les systèmes de spins quantiques, les systèmes de spins frustrés.

- La physique des systèmes à fortes corrélations électroniques** dits « fermions lourds » est complètement dominée par les effets « à N corps » : leur état fondamental est généralement un liquide de Fermi, mais dont les excitations élémentaires (les quasi-particules) possèdent des masses effectives 100 à 1000 fois plus grandes que celle d'un électron libre. Si on comprend l'origine de ces grandes masses effectives, beaucoup reste à faire pour parvenir à une description microscopique en profondeur des fermions lourds : ce liquide de Fermi est facilement déstabilisé par un ordre magnétique, une phase supraconductrice, des fluctuations critiques quantiques... Les fermions lourds forment un nouvel état de la matière qui révèle les limites de nos images "classiques" d'électron (ou de magnétisme) itinérant/localisé, des notions de champ cristallin, de fluctuation de valence. Les composés actuellement étudiés sont des intermétalliques à base de cérium, d'uranium ou d'ytterbium, synthétisés pour beaucoup d'entre eux au laboratoire. (Voir sujets n°1, 2, 3, 6).

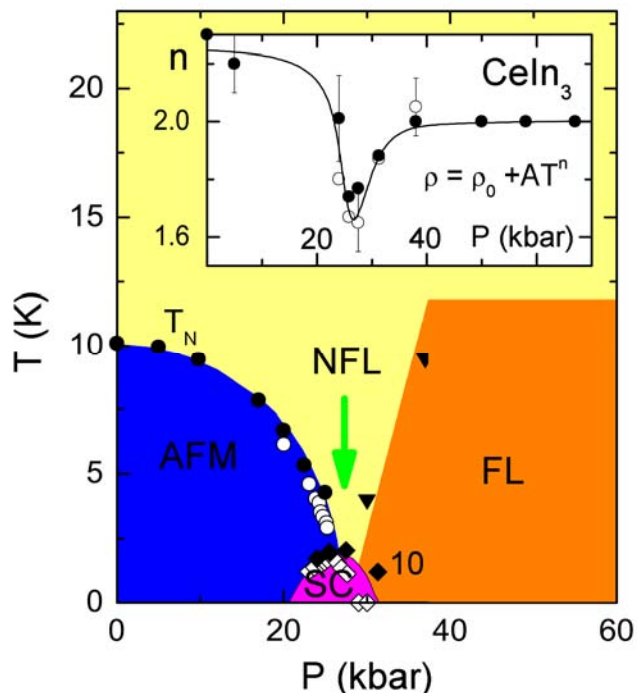
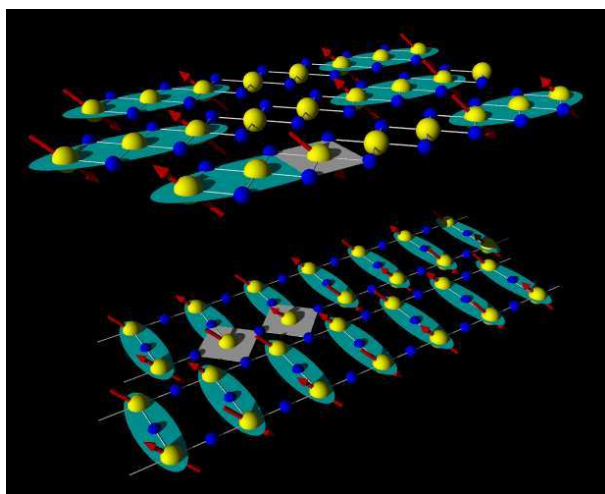


Diagramme de phase de $CeIn_3$ à $P_c = 25$ kbar, l'antiferromagnétisme disparaît, le régime liquide de Fermi s'effondre, mais la supraconductivité apparaît.

- Les systèmes de spins de basse dimension** : 1D pour des chaînes de spins, ou 2D pour des plans de spins, ont eux aussi des caractéristiques très inhabituelles : les excitations sont généralement dominées par des modes collectifs, qui peuvent avoir un « gap » à vecteur d'onde nul suivant la valeur (entière ou demi entière) du spin. Les fluctuations thermiques et quantiques sont très amplifiées, et les états fondamentaux peuvent être complètement non-magnétiques (singulets de spin), ou intriquer instabilité de réseau et ordre magnétique... Les effets d'un champ magnétique ou du dopage montrent souvent un comportement non conventionnel, comme l'existence d'une transition métal-isolant ou l'apparition de la supraconductivité. La



Ordre magnétique dans un composé $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ à échelle de spin

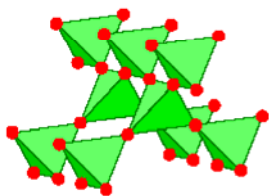
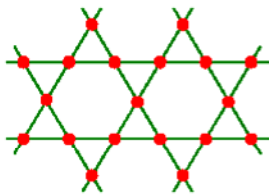
de spins, ont eux aussi des caractéristiques très inhabituelles : les excitations sont généralement dominées par des modes collectifs, qui peuvent avoir un « gap » à vecteur d'onde nul suivant la valeur (entière ou demi entière) du spin. Les fluctuations thermiques et quantiques sont très amplifiées, et les états fondamentaux peuvent être complètement non-magnétiques (singulets de spin), ou intriquer instabilité de réseau et ordre magnétique... Les effets d'un champ magnétique ou du dopage montrent souvent un comportement non conventionnel, comme l'existence d'une transition métal-isolant ou l'apparition de la supraconductivité. La

compétition entre plusieurs degrés de liberté : électroniques, magnétiques et réseaux, est à l'origine de cette grande richesse de comportements. Leur compréhension théorique et leur exploration expérimentale est un sujet majeur de la physique de la matière condensée. Les matériaux étudiés sont principalement des oxydes de métaux 3d, ou des composés moléculaires à dimères, chaînes, échelles ou plans de spin, très souvent à base de cuivre ($S=1/2$) ou de nickel ($S=1$). En effet, les valeurs de spin basses renforcent les effets quantiques. Les études impliquent une instrumentation performante, que ce soit pour les propriétés macroscopiques (aimantation, chaleur spécifique, transport,...) ou pour les études microscopiques par diffusion neutronique (connaissance des structures magnétiques et des spectres d'excitations en champ nul et sous champ, transitions de phase induites sous champ, condensation de Bose-Einstein,...)... (Voir sujet n°4).



Cristal de $Y_2Ti_2O_7$, structure pyrochlore

- **Les systèmes de spins frustrés** (c'est-à-dire où l'on ne peut minimiser toutes les énergies d'interaction dans une configuration statique) sont connus depuis longtemps : toute la physique des verres de spin vient de la frustration... et du désordre. La nouveauté, c'est la frustration sans le désordre, que l'on trouve dans des composés découverts assez récemment ayant le plus souvent

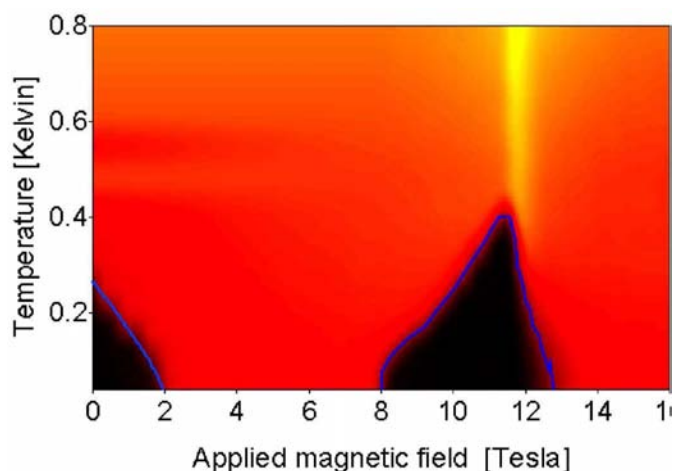


Structure "Kagomé" à 2D ou pyrochlore (3D) induisant la frustration magnétique "géométrique"

une structure pyrochlore (3D) ou Kagomé (à 2D). Dans ces systèmes, l'ordre magnétique dû aux interactions premier voisin est la plupart du temps supprimé, ou repoussé à très basse température. On observe alors des états fondamentaux complètement nouveaux, comme des « liquides de spin », des « glaces de spin », des structures non colinéaires... L'état fondamental est en général fortement dégénéré, avec des conséquences fortes sur les excitations élémentaires (présence de très nombreuses excitations collectives de basse énergie...). Ces systèmes en pleine phase exploratoire tant théorique qu'expérimentale devraient être encore plus « exotiques » lorsque les fluctuations quantiques sont dominantes (cas extrême : celui des systèmes de spin $1/2$). Au SPSMS, leur étude met en jeu toute la panoplie de mesures microscopiques (muons, neutrons), magnétiques (susceptibilité, aimantation), thermodynamique (chaleur spécifique), synthèse de cristaux (oxydes à base d'erbium, de terbium, ytterbium...), couplées à une grosse activité théorique. (Voir sujet n°5).

Supraconductivité

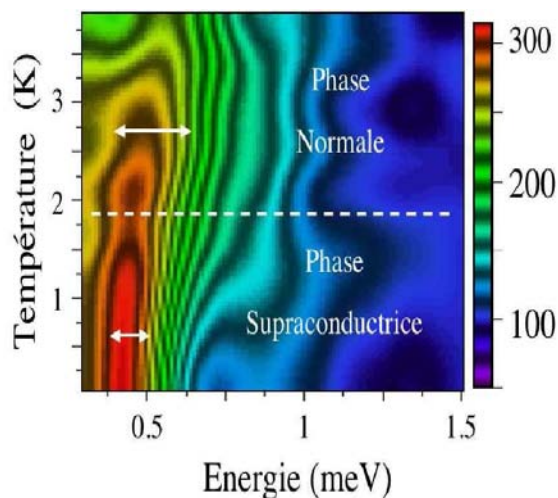
Au SPSMS, c'est un thème qui touche quasiment toutes les activités, toutes les techniques : recherche de nouveaux matériaux (découverte de UGe_2 et $URhGe$, à la fois supraconducteurs et ferromagnétiques), études théoriques (par exemple sur de nouvelles phases en fort champ magnétique : phase modulée FFLO...), diffusion neutronique (pour observer le réseau de vortex, tester les mécanismes d'appariement), spectroscopie tunnel (caractérisation du gap supraconducteur, spectroscopie des cœurs de vortex...), diagrammes de phases sous pression (compétition magnétisme/supraconductivité...), fluctuations de courant dans les jonctions supraconducteur - métal normal, fabrication de valves de spin avec des multicouches ferromagnétique-supraconducteur...



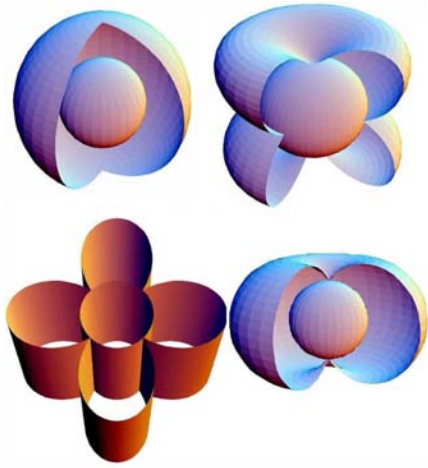
Supraconductivité rééminente (entre 8 et 12 T !) dans $URhGe$, coïncidant avec une transition

Cependant, les « grandes questions » auxquelles nous cherchons à répondre sont surtout :

- **Le mécanisme d'appariement** dans les systèmes à fortes corrélations électroniques : ces 20 dernières années, on a découvert la supraconductivité dans des matériaux où on ne l'attendait absolument pas, comme les céramiques à base d'oxyde de cuivre (records de T_c à plus de 160K), les systèmes à fermions lourds évoqués plus haut, pourtant fortement « magnétiques », des films de diamant dopés à la limite d'une transition métal isolant... Dans les systèmes à fermions lourds, on attaque cette question par des mesures qui sondent les corrélations entre apparition de la supraconductivité, et les excitations ou les ordres à longue distance de la phase normale. La force du laboratoire est de disposer à la fois de mesures macroscopiques sous pression très hydrostatique qui testent la coexistence, l'exclusion ou la rééminente des différentes phases, et la diffusion neutronique qui permet de suivre l'évolution des fluctuations de spin, phonons, fluctuations quadrupolaires... lorsqu'on franchit T_c . (Voir sujets n°1, 2, 3, 6, 7).

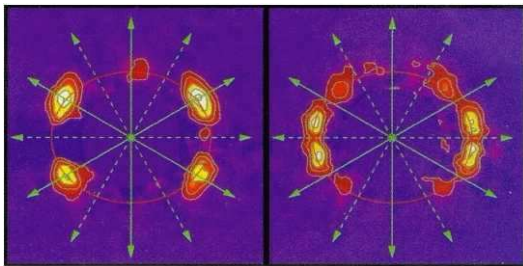


Carte des excitations "quadrupolaires" dans $PrOs_4Sb_{12}$ obtenue par diffusion de neutrons, faisant apparaître la corrélation entre temps de vie des excitations et apparition de la supraconductivité



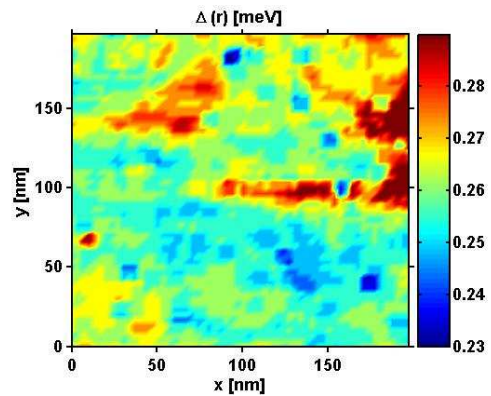
Différentes formes de gap supraconducteurs induites par des brisures de symétries

- **La symétrie du paramètre d'ordre :** dans ces composés où les paires de Cooper ont une longueur de cohérence faible, et où le mécanisme d'appariement fait intervenir d'autres excitations virtuelles que les phonons, l'état de base du condensat de paires a le plus souvent une symétrie basse. Les brisures de symétries spatiales ou temporelles du paramètre d'ordre (P.O.) supraconducteur induisent des nœuds du gap, l'apparition de petits moments orbitaux, des changements de phase de ce P.O., avec une physique nouvelle très riche. Grâce à la spectroscopie tunnel (STM), aux mesures fines du réseau de vortex par diffusion neutronique, aux mesures de conductivité thermique à très basse température et sous champ magnétique, on peut déterminer les symétries du paramètre d'ordre et explorer d'un point de vue expérimental comme théorique, les propriétés de ces phases «non conventionnelles». (Voir sujet n°7).



Changement de structure du réseau de vortex d'UPt₃, induit par un changement de symétrie du paramètre d'ordre, mesuré par diffraction neutronique

- **Supraconductivité inhomogène :** Quand on augmente fortement le désordre dans des couches quasi-bidimensionnelles supraconductrices on observe une transition vers un état isolant. Pendant près de vingt ans deux scénarios se sont opposés pour décrire cette transition. Le premier s'appuie sur l'augmentation de l'interaction répulsive effective entre électrons à l'approche du seuil de mobilité, l'autre décrit la perte de cohérence de phase entre des paires de Cooper localisées. Grâce à la spectroscopie STM nous avons pu réconcilier ces deux scénarios opposés en mettant en évidence une inhomogénéité spatiale du paramètre d'ordre supraconducteur. Ces inhomogénéités issues de l'action concomitante de l'interaction Coulombienne et des fluctuations mésoscopiques de conductance deviennent prépondérantes à l'approche du désordre critique. Les fluctuations quantiques entre ces îlots supraconducteurs localisent alors les paires de Cooper transformant le supraconducteur en un isolant de Bose. (Voir sujet n°8, 9)



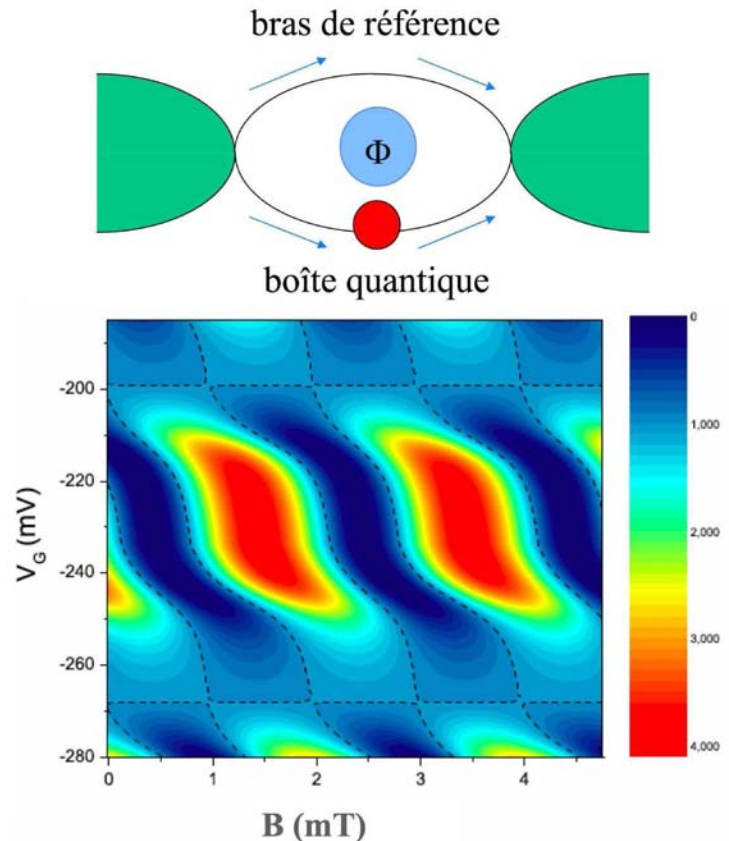
Inhomogénéités spatiales du gap supraconducteur dans un film mince de Nitrure de Titane obtenues à 50 mK par spectroscopie tunnel

- **Electronique supraconductrice :** Outre ces aspects très fondamentaux, les supraconducteurs sont aussi utilisés au SPSMS pour réaliser des composants permettant une logique complètement nouvelle ultrarapide pour travailler au téra-hertz (RSFQ), ou des détecteurs de photons ultrasensibles.

Au SPSMS, il est aujourd'hui possible de fabriquer et mesurer des structures artificielles de tailles nanométriques. Pour certaines le nombre d'électrons est contrôlé à l'unité près, et les interférences quantiques déterminent la conductance électronique. Pour d'autres, un ou plusieurs des multiterminaux sont supraconducteurs exacerbant de nouveau les effets d'interférences quantiques.

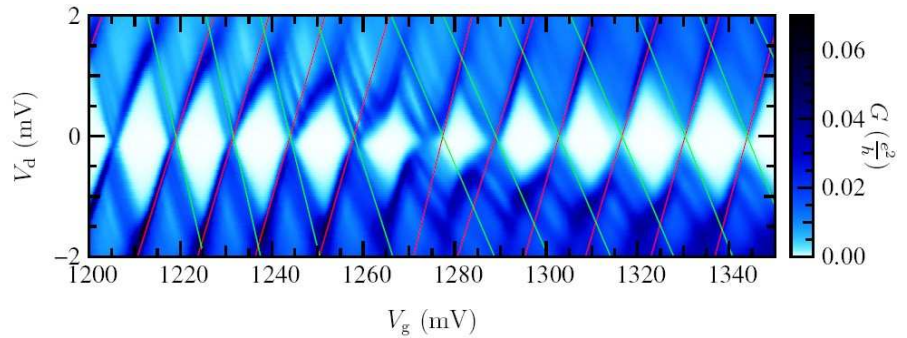
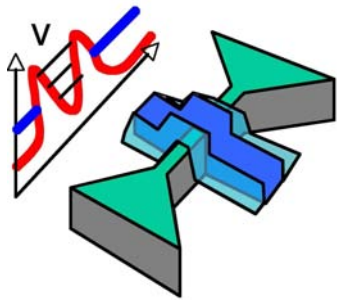
En exploitant la proximité du LETI, les possibilités de la salle blanche (voir « Les moyens salle blanche ») du site grenoblois et le savoir faire interdisciplinaire du DRFMC, des structures modèles montrant de nouveaux effets quantiques sont étudiées et analysées théoriquement.

- **« Boîtes quantiques » :** Les progrès de la micro et nanofabrication permettent de faire (et de connecter) des structures de taille comparable à la longueur d'onde de Fermi des porteurs. Ces structures « zero-dimensionnelles » (de simples « points ») peuvent ne contenir qu'un très petit nombre d'électrons, contrôlé par une tension de grille. Elles peuvent donc être vues comme des « atomes macroscopiques ». Mais elles permettent aussi de revisiter un des problèmes fondateur de la physique des systèmes à fortes corrélations électroniques : l'effet Kondo, avec une finesse de contrôle des paramètres inégalée, et des effets dimensionnels radicalement nouveaux, la prise en compte du blocage de Coulomb... Elles apporteront peut-être aussi un éclairage sur l'effondrement du régime liquide de Fermi des fermions lourds aux points critiques quantiques. (*Voir sujets n° 10*).



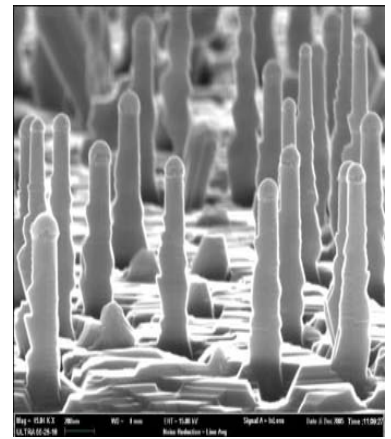
Calcul des interférences Aharonov-Bohm sur le courant, fonction de la tension de grille, lorsqu'une boîte quantique se trouve sur un des bras de l'interféromètre

- **MOSFET ultimes :** Les plus petites structures artificielles connectées individuellement ne sont plus des objets de laboratoire mais les transistors à effet de champ "ultimes" utilisés par la microélectronique. L'excellence du site grenoblois nous permet de disposer de ces objets fascinants, véritables concentrés de technologie. Mettre en évidence les nouveaux effets quantiques nécessite de les refroidir à très basse température. Ils se comportent alors comme les boîtes quantiques décrites précédemment. Ainsi le courant drain-source des transistors de taille de quelques dizaines de nm, montre des oscillations chaque fois qu'un électron est rajouté dans le canal par l'accroissement du potentiel de grille. C'est l'effet de blocage de Coulomb (voir figure). Le canal du transistor devient un laboratoire miniature où il est possible de mesurer la charge, le spin, la dynamique temporelle (bruit de courant), l'environnement électrostatique, voire la fonction d'onde électronique des porteurs, toutes quantités sous-jacentes mais inatteignables à température ambiante. Ces systèmes sont si bien contrôlés que des applications en métrologie (pompe à électrons) sont programmées.

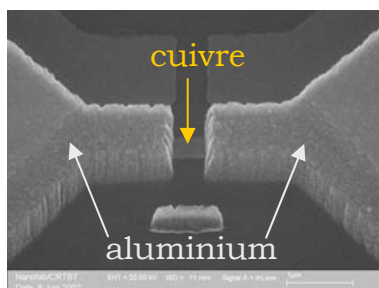


Mesure des "diamants" de Coulomb déformés par la présence d'une impureté unique dans le canal drain-source d'un Mosfet ultime

- Contrairement aux nanotransistors obtenus par une approche descendante (top-down), des nanofils peuvent être fabriqués par croissance (bottom-up). Cette méthode doit fournir des structures nouvelles très propres (nanotubes de carbone ou nanofils de silicium), qui sont étudiées théoriquement et expérimentalement au laboratoire. La nouveauté est alors la combinaison d'un transport balistique avec une structure périodique unidimensionnelle. Les effets d'interférences électroniques, le faible écrantage qui rend l'interaction coulombienne dominante, le couplage très fort avec les modes de réseaux (structures très déformables) donnent lieu à un foisonnement de concepts nouveaux (échec de la description en ondes de Bloch...). Pour cela il faut connecter les nanofils, ce qui présente déjà un enjeu technologique car ils poussent verticalement. (Voir sujet 11, 12).



Nanofils de silicium élaborés par épitaxie par jet moléculaires (DRFMC/SP2M)



Jonction SNS (CNRS/Nanofab).

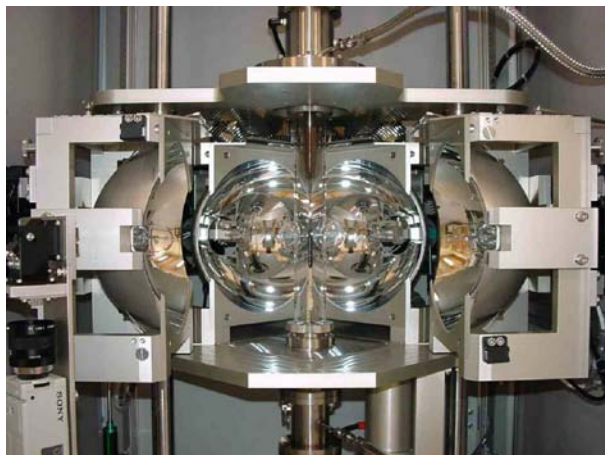
- **La propagation des effets de cohérence :** une caractéristique essentielle de l'état supraconducteur est d'être un état quantique cohérent à l'échelle macroscopique. Il est aussi connu que les corrélations entre électrons qui existent dans l'état supraconducteur se propagent à une échelle mésoscopique dans un métal normal, un métal ferromagnétique... dans la zone de contact avec le supraconducteur. Le mécanisme à la base de cet effet de proximité est la réflexion d'Andreev. Il se manifeste dans le métal normal par un affaiblissement de la densité d'états électronique, mais aussi par des résonances qui peuvent apparaître lorsque le métal normal est de taille comparable à la longueur de cohérence. La variation spatiale de ces anomalies est directement accessible par des mesures de spectroscopie tunnel par STM. Une autre manifestation de la réflexion d'Andreev apparaît sur le bruit de grenaille d'une jonction entre un supraconducteur et un métal normal. Ce bruit en courant est un bruit de partition qui traduit la granularité de la charge, et qui est donc sensible au fait que le courant soit porté par des paires de Cooper. Comprendre et mesurer ces effets fins de corrélations, et d'interférences (notamment en présence de désordre), les polarisations de spin induites, la possible intrication des 2 électrons normaux résultant de l'injection d'une paire de Cooper depuis le supraconducteur, constituent un des plus beaux défis de la nanophysique. (Voir sujets n° 13, 14).

MOYENS EXPERIMENTAUX

Pas de résultats nouveaux sans instrumentation nouvelle... C'est un adage qui contient pour vérité (bien connue) que les grandes découvertes viennent souvent des progrès dans les mesures... soutenus par de bonnes idées. Le SPSMS a ainsi une longue et fructueuse « culture » de développement instrumental, qui se retrouve dans les thèses soutenues au laboratoire. Les points forts et originaux du laboratoire dans ce domaine ont été développés au gré des besoins de nos thématiques scientifiques, et on retrouve donc :

La synthèse des cristaux massifs

De très nombreux systèmes peuvent être synthétisés sous forme cristalline au laboratoire, par une grande diversité de techniques permettant de s'adapter avec une excellente réactivité aux besoins de nos recherches : (Voir sujet n°1)



Four à image permettant d'obtenir des cristaux centimétriques d'oxydes

basse dimension, la frustration magnétique...

- techniques de flux presque « universelles » permettant d'obtenir très vite des petits cristaux idéaux pour les mesures de transport, chaleur spécifique, les mesures sous pression
- tirage Czochralski, fusion de zone Bridgman pour obtenir de plus gros cristaux de composés intermétalliques, indispensables pour la diffusion neutronique inélastique ou polarisée en spin.
- Four à image, permettant d'obtenir de très grands cristaux d'oxydes de cuivre, de vanadates, étudiés pour leur magnétisme de

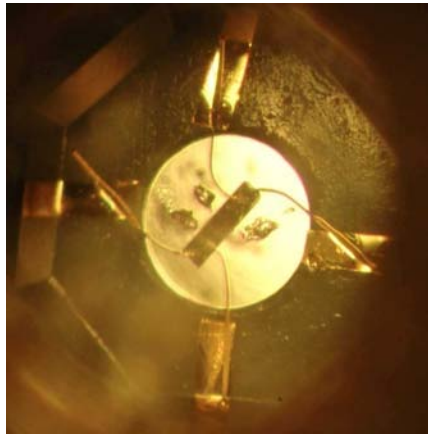
Les moyens de salle blanche

Pour les besoins de la nanophysique, le SPSMS dispose d'un accès privilégié à la nouvelle Plateforme Technologique Amont PTA qui propose des moyens en pulvérisation, évaporation, lithographie électronique, très performants et d'une grande souplesse, permettant réactivité et solide formation des étudiants à ces techniques. Cette plateforme, commune au CNRS, au CEA, à l'INPG et à l'UJF située dans le périmètre de Minatoc a démarré en janvier 2007. Avec un fort soutien du CEA et du CNRS, elle offre le « nec plus ultra » en matière de fabrication de dispositifs et de lieu de formation. (Voir sujets n° 8, 9, 14)

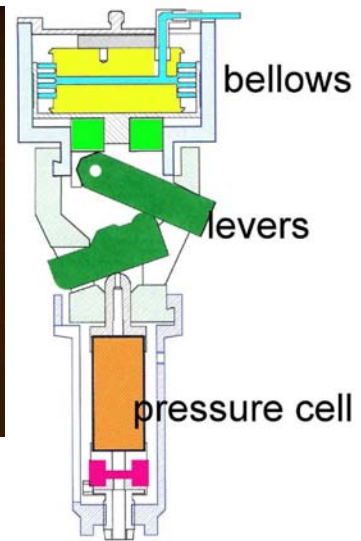


Les études sous pression

Moyen idéal pour révéler des compétitions entre différents types d'ordre dans un même système, les mesures sous pression ont connu un développement spectaculaire au SPSMS ces 20 dernières années. En sus des techniques classiques « piston-cylindre » bien adaptées aux mesures de diffraction neutronique par la grande taille de la chambre de pression, une étape décisive a été franchie avec la maîtrise des techniques de pression en enclume diamant. L'utilisation de l'hélium comme milieu transmetteur (matériau le plus hydrostatique connu à ce jour !), la mesure in situ de la pression par fluorescence du rubis, la possibilité de mesures de susceptibilité, puis de résistivité et maintenant chaleur spécifique a.c., jusqu'à 20GPa (200kbar) compensent largement les difficultés liées à la taille sub-millimétrique de la chambre de pression. Enfin, la possibilité de balayage continu de la pression, à froid en fait l'outil parfait pour l'étude fine des points critiques quantiques et la « chasse » aux phases supraconductrices induites à leur proximité. (Voir sujets n° 1, 2, 3)



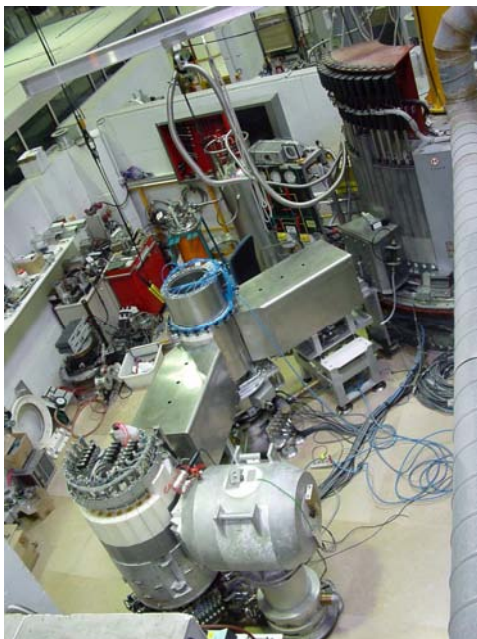
Montage 4 fils d'un échantillon en enclumes diamant (dans un "trou" de 500 μm).



Montage permettant d'appliquer à froid des pressions jusqu'à 20 GPa

La diffusion de neutrons

Le SPSMS dispose de 4 instruments « CRG », installés à l'Institut Laue Langevin (ILL) : 2 pour la diffraction élastique et 2 autres pour la diffusion inélastique. Ils nous permettent, outre le développement de nos thématiques, d'être très réactifs sur de nouveaux sujets et de développer la technique de mesure. Le laboratoire s'est ainsi spécialisé dans les mesures de neutrons polarisés : (Voir sujets n° 4, 6)

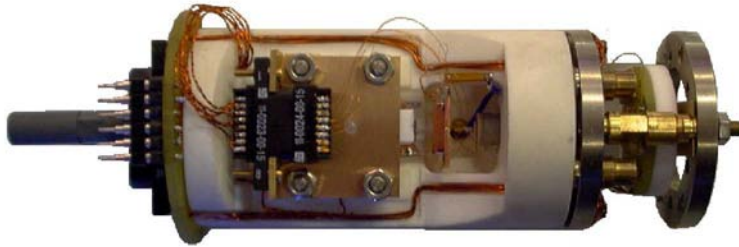


- En diffraction, on peut ainsi réaliser des cartes de densité de spin, déterminer des structures magnétiques complexes... grâce à des techniques utilisant la forte absorption des neutrons par l' He^3 (lui-même polarisé par pompage optique).
- En diffusion inélastique, on sait désormais analyser la rotation de la polarisation du spin, en 3 dimensions (polarisation sphérique), très pertinente par exemple dans l'étude des excitations hybrides (magnétique-réseau) des composés de basse dimension, ou la détection de très petits moments orbitaux dans les hauts- T_c ...
- En diffusion inélastique toujours, on attend un progrès spectaculaire dans la résolution en énergie des excitations par rapport aux spectromètres actuels (gain d'un facteur 100) par les techniques d'écho de spin qui

vont entrer en service fin 2007.

- Enfin, un autre atout majeur de ces instruments est la compatibilité avec des champs magnétiques très forts (jusqu'à 15T), et des mesures à très basse température (en cryostat à dilution).

La microscopie tunnel à très basse température (STM)



STM "maison", permettant une résolution énergétique record à basse température et une grande amplitude de balayage spatial

capable de fonctionner à très basse température (50 mK) dans un cryostat à dilution afin d'obtenir une résolution énergétique de quelques dizaines de micro-électronvolts. La simultanéité de ces deux résolutions, spatiale et énergétique, au sein du même instrument est un atout formidable pour l'étude de tous les systèmes où la supraconductivité est inhomogène en surface: jonctions entre un supraconducteur et un métal normal, films supraconducteurs fortement désordonnés ou en présence de vortex dans l'état mixte. (Voir sujet n° 8, 9).

- La microscopie tunnel permet de faire des images de la surface d'un métal jusqu'à une résolution spatiale atomique. En mesurant d'autre part, la conductance dI/dV de la jonction tunnel on peut accéder à la densité d'états électroniques locale de l'échantillon. Le SPSMS a développé un microscope

Les mesures bas niveau

La plupart de nos études se font en environnement cryogénique, parce que les nouvelles phases de la matière apparaissent souvent à basse température, lorsque le désordre thermique est suffisamment supprimé, et parce que les excitations, les effets fins de cohérence, d'interférence sont alors beaucoup mieux définis. Outre la maîtrise des appareillages cryogéniques (construction et installation de nombreux cryostats He^4 , He^3 , dilution He^3 - He^4 ...), et celle des mesures en très fort champ (18T disponibles au laboratoire), le SPSMS a acquis de nombreux savoir-faire dans les mesures bas-bruit, bas-niveau compatibles avec cet environnement : (Voir sujets n° 14)

- Mesures avec des SQUID (interféromètres supraconducteurs) pour les mesures de très faibles courants (tensions) D.C. ou de petits champs magnétiques,
- Développement de préamplificateurs très bas bruit, adaptation d'impédance par transformateurs supraconducteurs pour les mesures très bas niveau, utilisation de FET à froid proches de l'échantillon...
- Mesures de bruit de grenaille utilisant des auto-corrélations entre les détecteurs.

L'ENVIRONNEMENT

Le SPSMS dispose d'un environnement local exceptionnel, avec la présence de grands instruments comme le réacteur de neutron de l'ILL (où se trouvent nos CRG), le synchrotron (ESRF), le laboratoire de champs magnétiques intenses (LCMI), le LETI et MINATEC pour la nanophysique... En outre, il entretient de très nombreuses et fortes collaborations avec les autres services du CEA (le SP2M et le SPRAM pour ne citer que les principales), l'Institut Néel, l'université Joseph-Fourier (il est laboratoire associé), partageant de nombreux projets ANR, Fédération Matière et Nanophysique...

Mais il profite aussi de son rayonnement international pour nouer de nombreuses collaborations et des échanges fructueux avec les grandes universités ou les grands centres européens : Cambridge, Karlsruhe et Regensburg, Genève, Louvain, Moscou, Delft ou plus lointains : Japon (Osaka, Tokyo et Tokai), Etats-Unis (Ames, Mineapolis), Inde (Pune).

Et plus sur <http://www-drfmc.cea.fr/spsms/> ...

Quelques publications "didactiques"

Magnetic field induced superconductivity in the ferromagnet URhGe

F. Levy, I. Sheikin, B. Grenier and A. Huxley

Science **309**, 1343 (2005)

Detection of double shot noise in short normal metal/superconductor junctions

X. Jehl, M. Sanquer, R. Calemczuk and D. Mailly

Nature **405**, 50 (2000)

An unusual phase transition to a second liquid vortex phase in the superconductor YBa₂Cu₃O₇

F. Bouquet, C. Marcenat, E. Steep, R. Calemczuk, W. K. Kwok, U. Welp, G.W. Crabtree, R.A. Fisher, N.E. Philipps and A. Schilling

Nature **411**, 448 (2001)

Superconductivity in the itinerant ferromagnet URhGe

D. Aoki, A. Huxley, E. Ressouche, D. Braithwaite, J. Flouquet, J.P. Brison, E. Lhotel and C. Paulsen

Nature **413**, 613 (2001)

J. Flouquet

On the heavy fermion road

Prog. In Low Temp. Phys. **15** (2005), Condmat 0501602

Du gap de Haldane aux aimants moléculaires

V. Gadet, L.P. Regnault, J.P. Renard et M. Verdagner

L'Actualité chimique **284** (2005) pp. 16-24

Supra sous champ dans URhGe

F. Levy et al

Science **309** (2005) 1343

Les avancées de la supraconductivité, la Science au présent 2004 (encyclopedia Universalis) p. 146
J.P. Brison

Ferromagnetic superconductors
J. Flouquet, A. Buzdin
Physics world, janvier 2002, p. 41

La nanoélectronique ne peut être que quantique
Denis-Christian Glattli et Marc Sanquer
Clefs CEA 52, p. 14

Le MOSFET ultime, objet de nanoscience
Marc Sanquer
Clefs CEA 52, p. 28

Le nanomonde de la science aux applications
Marc Sanquer
(2005) ISSN0298-6248

SUJETS DE STAGE, THESE

Sujet N°1 : From crystal growth towards unconventional electronic and magnetic properties

Sujet N°2 : Systèmes à électrons corrélés en conditions extrêmes : une instrumentation novatrice avec enjeux fondamentaux.

Sujet N°3 : Supraconductivité non conventionnelle et point critique quantique magnétique : volume – entropie – paramètre d'ordre

Sujet N°4 : Mesure du temps de vie des excitations magnétiques et structurales par la technique de l'écho de spin neutronique à résonance

Sujet N°5 : Frustration géométrique et transitions de phase

Sujet N°6 : Dynamique de spin et de réseau dans les supraconducteurs non conventionnels

Sujet N°7 : Absorption d'ondes électromagnétiques dans les supraconducteurs non-conventionnels

Sujet N°8 : Supraconductivité dans les semiconducteurs très fortement dopés : le diamant et le silicium

Sujet N°9 : Quantum transport and proximity effect in graphene

Sujet N° 10 : Effets à N -corps et transport quantique dans les boîtes quantiques

Sujet N° 11 : Théorie et Simulation du Transport Quantique en Nanosciences : Cas des Nanotubes de Carbone et du Graphène 2D

Sujet N° 12 : Electronic Transport and Spin Dynamics in self-assembled SiGe Quantum Dots

Sujet N° 13 : Effet de proximité dans des multicouches supraconducteur/graphène

Sujet N° 14 : Superconductivity near a magnetic domain wall

Sujet N°1

From crystal growth towards unconventional electronic and magnetic properties



Contact : **Dai Aoki**

Tél : **0438784243**

Mél : dai.aoki@cea.fr

The material side has been and will be the jackpot in the discovery of completely novel effect in the complex domain of strongly correlated electronic system: high T_c superconductor; organic conductor, heavy fermion compounds (HFC). We select here the domain of uranium compounds. The richness of the 5f electrons of uranium compounds originates from the intermediate natures between the localized 4f electrons (classical rare earth) and the itinerant 3d electrons like Fe. Thus the uranium compounds exhibit a large variety of interesting many body phenomena, such as Non-Fermi liquid behaviour, multipolar order, unconventional superconductivity with even coexistence of ferromagnetism and superconductivity.

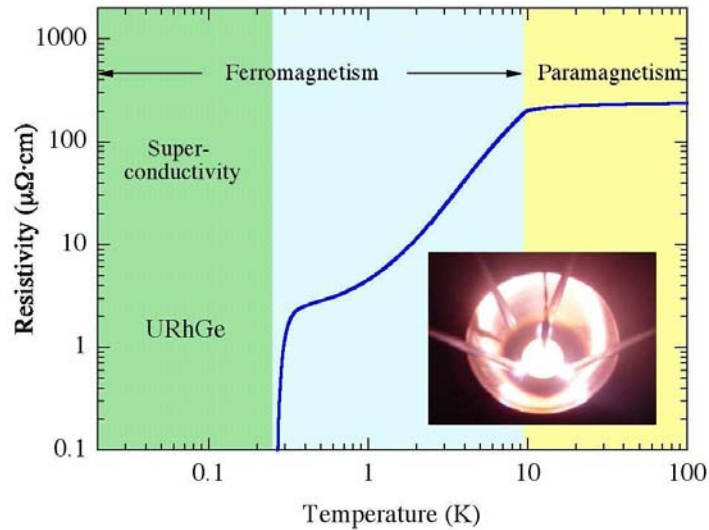
Major physical insights have been originated by study on uranium compounds, such as UBe_{13} , UPd_2Al_3 , UPt_3 , URu_2Si_2 , UGe_2 and $URhGe$ notably in Grenoble with the first discovery of ferromagnetic superconductors.

The PhD subject will consist in two actions: 1) crystal growth of new uranium compounds, 2) search for novel properties including new heavy fermion superconductivity. For example the ferromagnetic superconductor $URhGe$ shows the superconductivity only for the high-quality sample with the mean free path more than a few hundred Angstrom.

The crystal growth is an excellent start, since the knowledge and the technique contains basic ideas for the condensed matter physics, metallurgy, applied physics and etc, which will give the basic ability to become an independent researcher in the future. The target materials are compounds with 1) relatively large U-U distance, 2) weak ferro/antiferromagnet temperature close to the collapse of their magnetism under pressure, 3) similar structure of recent discovered heavy fermion superconductor.

On this new materials, the chance will be to observe new unpredictable properties. Thanks to the large facilities in the group, fast characterizations will be made and then more sophisticated transport and ac calorimetric macroscopic experiments as well as microscopic quantum oscillations measurements will be performed in extreme conditions (temperature down 10mK, pressure up to 10GPa and magnetic field up to 18T). The aim is to get a broad view of the physical properties. This possibility will depend strongly on the capacity of the candidate to interact with other physicists with the great advantage that the discovery of a new interesting case opens many possibilities.

The project is part of the work of D Aoki selected for the “ chaire d’excellence junior by the Agence nationale de recherche.



Références :

“Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe”, D Aoki et al. Nature **413**, 613-616 (2001)

“Unconventional heavy fermion superconductivity of a new transuranium compounds NpPd₅Al₂”, D Aoki et al, Highlights of J Phys Soc Jpn **76**, 063701 (2007)

“Frontiers of Novel superconductivity topics” J Phys Soc Jpn 76, No 5 (2007)

“Interplay between different states in heavy fermion physics”

G. Knebel et al. J. Magn. Magn. Mater. **310**, 195-200 (2007)

Invited paper ICM conference in Kyoto 2006

Sujet N°2 :

Systèmes à électrons corrélés en conditions extrêmes : une instrumentation novatrice avec enjeux fondamentaux.



Contact : Daniel Braithwaite
Tél : 0438784411
Mél : daniel.braithwaite@cea.fr

Les propriétés remarquables des systèmes dits à fortes corrélations électroniques sont dues à l'hybridation des électrons des couches 4f ou 5f incomplètes (d'un élément de terre rare ou actinide) avec les électrons de conduction. Cela peut conduire à une très forte renormalisation de l'échelle de l'énergie du système vers une température caractéristique qui peut être de l'ordre de 10K-100K. Cette valeur est très faible par rapport à l'énergie de Fermi d'un métal normal (typiquement 10^5 K). Ainsi il est facile de modifier les interactions microscopiques par l'application d'un paramètre externe comme la pression ou le champ magnétique, pour conduire à différents états macroscopiques. En ajustant la pression, il est possible d'approcher un point critique quantique où une transition de phase, se produit à une température assez basse pour que seuls les effets quantiques interviennent, les excitations thermiques étant négligeables [1].

La compréhension des phénomènes, comme la supraconductivité non-conventionnelle, qui se produisent au point critique est un enjeu majeur qui pourrait avoir des répercussions dans d'autres domaines comme la supraconductivité à haute température.

Le groupe (IMAPÉC) a apporté plusieurs contributions essentielles dans ce domaine. L'originalité a été d'adapter la technique de pression utilisant des enclumes en diamant à des mesures de transport électrique et de calorimétrie alternative et de pouvoir changer et mesurer la pression dans la cellule à basse température, ce qui permet une approche beaucoup plus fine des points intéressants du diagramme de phase [2].

Le sujet de thèse proposé s'inscrit dans le programme de développement ambitieux qui permettra d'étendre cette technique, à des conditions extrêmes de très basse température et de fort champ magnétique, élargissant ainsi considérablement le champ des études possibles. Ce projet est financé par l'Agence Nationale de Recherche (Projet Blanc ECCE 2007-2010). Le projet permettra d'acquérir une grande compétence expérimentale en physique des très basses températures grâce à la participation aux différentes étapes : Installation d'une bobine supraconductrice 14 teslas, implantation du réfrigérateur à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$, conception et mise au point du dispositif de variation *in-situ* de la pression, puis applications aux mesures calorimétriques.

Les études physiques seront commencées dès le début de la thèse avec les moyens déjà disponibles. Cela permettra d'acquérir les bases de la physique des électrons corrélés tout en réalisant une instrumentation novatrice. Avec l'avancement du développement technique d'autres études nécessitant des très basses températures, le fort champ magnétique, ou le contrôle très fin de la pression, deviendront possibles.

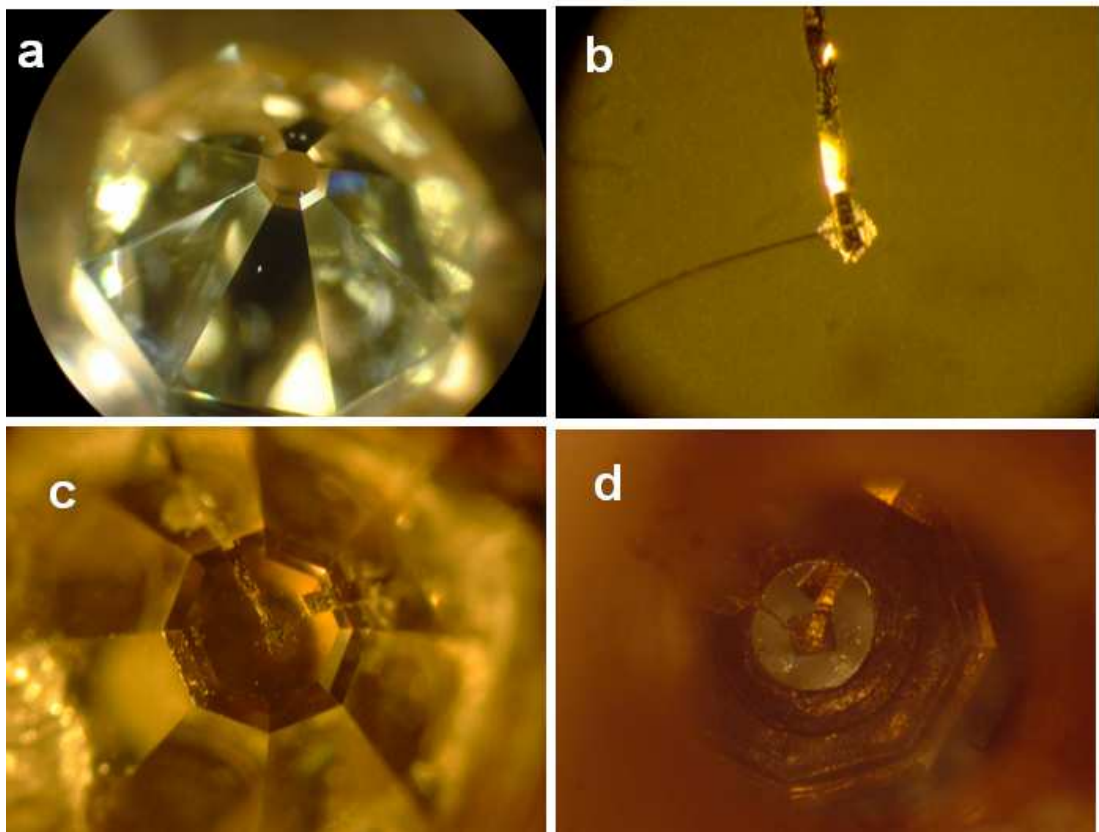


Figure 1 : Montage d'une mesure de chaleur spécifique dans une cellule à enclumes diamant. a) l'enclume en diamant, b) l'échantillon de dimensions environ $150\ \mu\text{m}$ avec le thermocouple soudé, c) l'échantillon avec thermocouple installé sur la table de l'enclume, d) l'ensemble mis sous pression.

L'axe principal du sujet proposé est la comparaison du point critique quantique dans les composés à base d'ytterbium par rapport aux composés de cérium déjà très étudiés. Sous l'effet de la pression l'ytterbium a tendance à passer de sa configuration non-magnétique $4f^{14}$ vers la configuration magnétique $4f^{13}$. Les échantillons sont majoritairement réalisés dans le service, et une collaboration existe avec le groupe de diffraction neutronique permettant des études microscopiques complémentaires. Pour exploiter les résultats, dans le cadre du projet ECCE, le couplage naturel avec les groupes théoriques de Grenoble est élargie avec la participation au projet de théoriciens du CEA/Saclay et de l'université de Bordeaux.

- 1 - J. Flouquet, in *Prog. Low Temp. Phys.*, edited by W. Halperin, (Elsevier, Amsterdam, 2005), Vol. XV.
- 2 - B. Salce, J. Thomasson, A. Demuer, J. J. Blanchard, J. M. Martinod, L. Devoille, and A. Guillaume, *Review of Scientific Instruments*. June **71**, 2461 (2000).

Sujet N°3

Supraconductivité non conventionnelle et point critique quantique magnétique : volume – entropie – paramètre d'ordre



Contact : Bernard Salce – Jacques Flouquet

Tél : 0438784199 - 0438785423

Mél : bernard.salce@cea.fr – jacques.flouquet@cea.fr

L'objectif est la découverte de nouveaux états de la matière en explorant largement l'espace température, pression et champ magnétique. La coexistence d'états à la fois antiferromagnétiques et supraconducteurs a été mise en évidence dans un petit nombre de composés intermétalliques de terre rare où deux types distinctes d'électrons participent aux deux états. Cette coexistence est liée à la hiérarchie entre longueurs de cohérence magnétique et supraconductrice. La paire de Cooper interagissant sur des longues distances perçoit peu l'antiferromagnétisme qui lui est régi par des interactions restreintes à des distances inter atomiques.

Dans les systèmes électroniques fortement corrélés, l'originalité est que le même type de porteur va participer à la formation des deux états. De plus l'antiferromagnétisme est aussi en compétition avec un état fondamental paramagnétique. Cette instabilité du magnétisme va se caractériser par des couplages à longue distance correspondant à une longueur de cohérence magnétique nanométrique comparable à la longueur de cohérence supraconductrice. Ce beau problème de nanophysique devient encore plus fascinant dans la nanostructure parfaite induite dès un champ magnétique faible dans le supraconducteur par la création d'un état mixte supraconducteur – phase normale avec la possibilité de coexistence ou d'exclusion de trois états simples de la matière : antiferromagnétisme, le paramagnétisme et la supraconductivité. Jusqu'à présent c'est la supraconductivité qui apparaissait à l'intérieur d'une phase magnétique. Nous venons de montrer qu'à contrario, par application d'un champ magnétique, une phase magnétique peut aussi apparaître dans la phase supraconductrice (G Knebel et al Phys Rev 74, 020501, 2006)

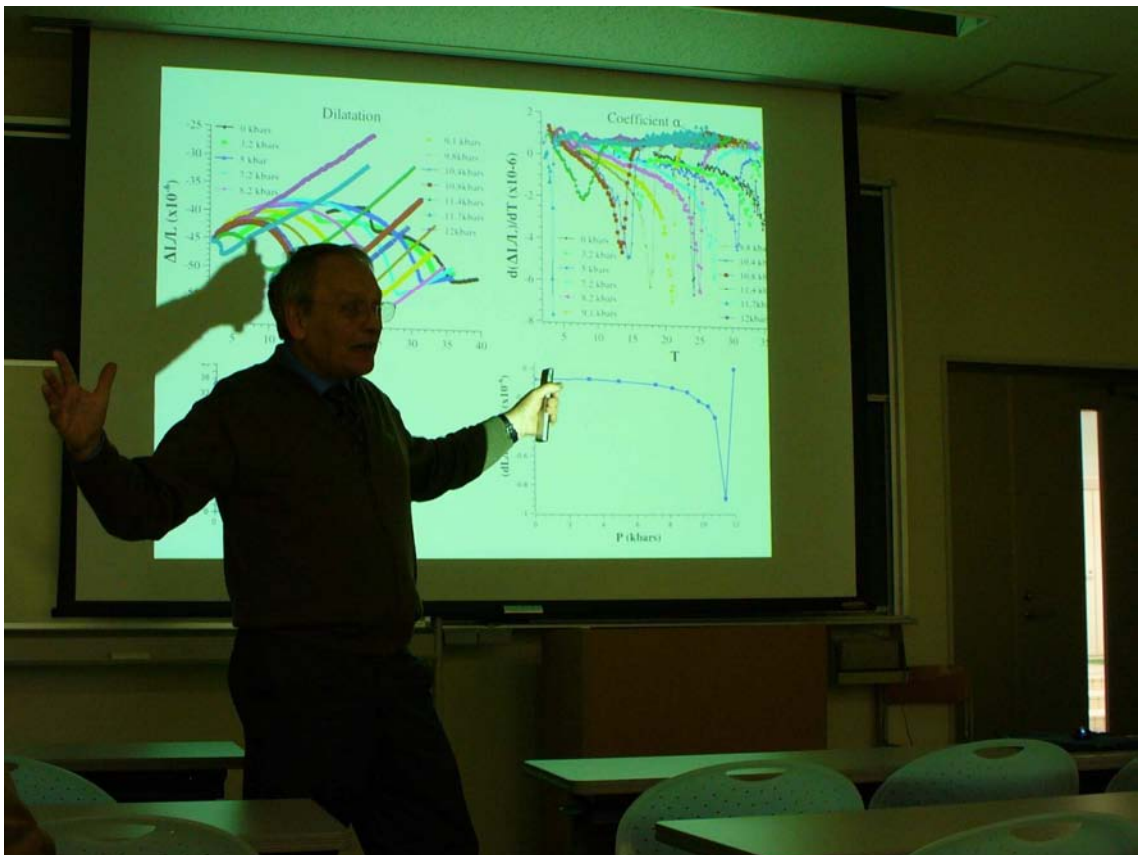
L'objectif de la thèse est de préciser les domaines de coexistence et d'exclusion grâce à la mise au point de mesures de dilatation thermiques sous pression. Le choix comme matériau des fermions lourds est lié à leur forte sensibilité aux effets de pression et de champ magnétique. Les mesures calorimétrique et de diffraction neutronique permettent d'atteindre les variations d'entropie et d'aimantation du sous réseau magnétique (le paramètre d'ordre magnétique). Les mesures de dilatation thermique détectent la variation de volume. Les effets sont grands dans le cas choisi de transitions de phase quantique où simultanément les températures de transition de phase et les excitations de très basse énergie varient beaucoup en pression et en champ magnétique.

Il y a deux volets importants : D'une part atteindre une description thermodynamique complète des transitions de phase, et d'autre part utiliser la très forte sensibilité des mesures d'expansion thermique proche des pressions critiques pour localiser parfaitement leurs positions puis de coupler ces mesures avec d'autres mesures comme

celles citées de calorimétrie ou de diffraction magnétique. Les systèmes à élucider sont ceux de composés à fermions lourds avec compétition ou coexistence entre magnétisme (incluant le ferromagnétisme) et supraconductivité : cas de CeRhIn_5 / CePt_3Si / URu_2Si_2 . Ce sujet a une dominante expérimentale mais requiert un fort attrait pour les enjeux fondamentaux.



Il s'inscrit dans la continuation du projet ICENET soutenu par l'Agence nationale de la recherche (2005- 2008). Le candidat travaillera en étroite collaboration avec un chercheur postdoctorant ; il s'initiera aussi à la diffusion neutronique en participant aux expériences croisées expansion thermique- diffraction.



Exposé à Kobe (Japon) des résultats de A Villaume sur les mesures de dilatation thermique sous pression à travers le point critique quantique de CeRh_2Si_2

Références :

J. Flouquet cond- mat 0501602

Compte Rendus Physique, J Flouquet, G Knebel et al ,7,22-34 52006

“Collapse of antiferromagnetism in CeRh_2Si_2 : volume versus entropy”, A Villaume et al., Cond-mat 0707302 (2007)

Sujet N°4

Mesure du temps de vie des excitations magnétiques et structurales par la technique de l'écho de spin neutronique à résonance



Contact : L.P. Regnault

Tél : 0476207087

Mél : regnault@ill.fr

Le sujet proposé concerne l'étude par diffusion inélastique des neutrons polarisés de la compétition entre les différents degrés de liberté de charge, de spin, d'orbite et de réseau, plus ou moins mis en jeu dans certains oxydes de métaux de transition (cuivre, nickel, cobalt ou manganèse) ou des composés de terre rares "anormales" (cérium, ytterbium, etc). Par ce que ce sont les "mêmes" électrons qui participent à la fois à la cohésion du matériau et au mécanisme de l'interaction entre les moments magnétiques, ces degrés de liberté vont présenter une hybridation plus ou moins importante et engendrer des propriétés plus ou moins anormales. Tel est le cas des cuprates supraconducteurs à haute température critique ($\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$), des manganites dits "à magnéto résistance géante" ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$) ou des composés "multiferroïdes" dans lesquels le magnétisme coexiste avec la magnéto-électricité (TbMnO_3 , TbMn_2O_5). On s'attend donc à trouver des effets anormaux à la fois dans les propriétés statiques (distorsions de réseau, corrélations magnétiques incommensurables) et dynamiques du système (modes mixtes magnéto-structuraux, modes électro-phonons, polarons, branches de phonons anormales, etc). L'hybridation des degrés de liberté a aussi des effets importants sur le temps de vie des excitations, qui vont dépendre beaucoup de la température. On propose donc d'étudier la variation thermique du temps de vie des excitations structurales ou magnétiques dans une variété de matériaux présentant des propriétés physiques (supraconductivité, magnéto-électricité, magnétisme) "anormales" à partir de la technique dite de "l'écho de spin neutronique". Outre les systèmes précédemment cités, seront aussi étudiés les systèmes à chaînes de spin 1/2 (spin-Peierls: CuGeO_3) et 1 (gap de Haldane: NENP; chaîne alternée: NTENP), à échelles de spin 1/2 ($\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$). Un exemple de spectre d'excitation mesuré dans le composé spin-Peierls CuGeO_3 est montré à la figure 1 [1].

La méthode expérimentale est basée pour beaucoup sur la diffusion inélastique des neutrons polarisés et l'analyse de polarisation du spin neutronique disponibles sur le spectromètre "trois-axes" IN22 (CEA) installé sur un guide à neutrons thermiques de l'Institut Laue Langevin (ILL). IN22 est un spectromètre à haut flux de neutrons polarisés géré par le laboratoire MDN du CEA-Grenoble. Il vient d'être récemment équipé d'une option spin écho "NRSE" (acronyme anglais de Neutron Resonant Spin Echo) qui lui permet de pousser la résolution en énergie de l'appareil dans la gamme 2-10 μeV pour des transferts en énergie de 5 à 50 meV. Le gain en résolution de près de deux ordres de grandeur par rapport à la technique de diffusion inélastique standard ouvre la porte à la mesure très précise des temps de vie d'excitations dispersives, magnétiques ou structurales. Le principe NRSE, développé ces vingt dernières années en Allemagne (HMI, FRM-II) et en France (ILL) (c.f. ref. [2]), est basé sur l'utilisation contrôlée de la précession de Larmor du spin du neutron à partir de " π -flipper"



radiofréquence et de la technique de l'écho de spin pour remonter à la fonction de corrélation $S(\mathbf{q},t)$ et à sa transformée de Fourier $S(\mathbf{q},\omega)$. Elle permet ainsi d'accéder à des transferts d'énergies relativement petits, ou d'accéder à des temps de vie d'excitation relativement lents. La figure 2 montre une vue du spectromètre IN22 équipé de l'option NRSE en cours de montage (aout 2007). Les performances anticipées de l'appareil devraient lui permettre pour la première fois au monde d'accéder à la gamme de transfert en énergie mise en jeu, par exemple, dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique (transferts d'énergie de l'ordre de 40 meV) et les systèmes à magnéto-résistance ou magnéto-électricité anormale.

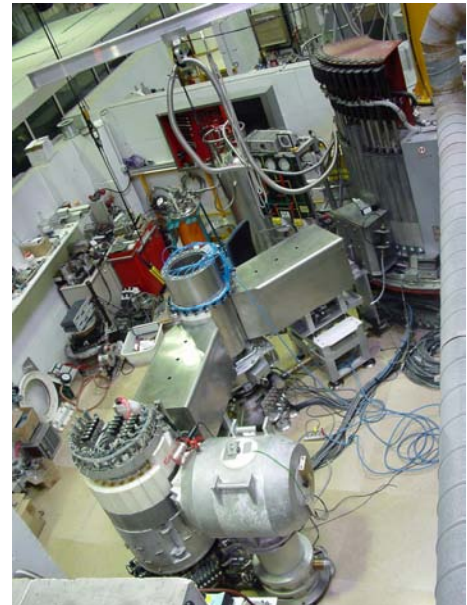
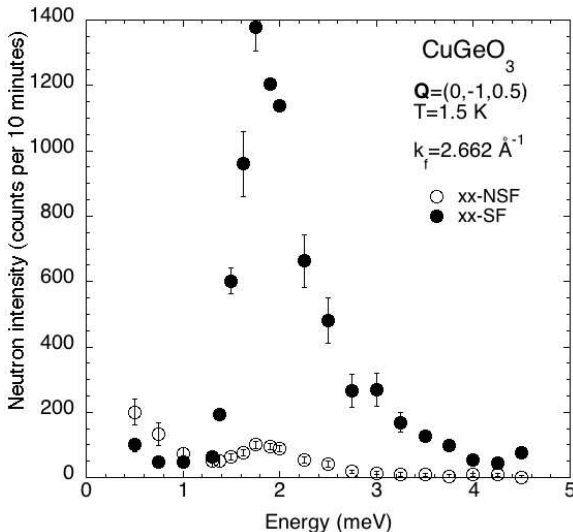


Figure 1: Gap de spin dans le composé spin-Peierls CuGeO_3 . Neutrons polarisés sur IN22

Figure 2: Vue du spectromètre "trois-axes" IN22 avec l'option NRSE en cours de montage

La technique NRSE peut très avantageusement aussi être utilisée en diffraction pour la mesure précise ($\sim 10^{-5}$) des paramètres de maille des matériaux et leurs évolutions thermiques

Une partie non négligeable de la thèse sera consacrée à l'instrumentation, en particulier à la mise au point et l'optimisation du spin écho.

Connaissances et formations qui seront acquises pendant la thèse:

Physique et magnétisme non conventionnels sur des systèmes fortement quantiques; diffusion inélastique des neutrons polarisés; instrumentation neutronique; cryogénie; technique de l'écho de spin neutronique à résonance; technique des radio fréquences.

Références:

- [1] L.P. Regnault et al, Phys.Rev. B 53, 5579 (1996)
- [2] R. Gähler et R. Golub, J. Phys. 49 , 1195 (1988).

Sujet N°5

Frustration géométrique et transitions de phase

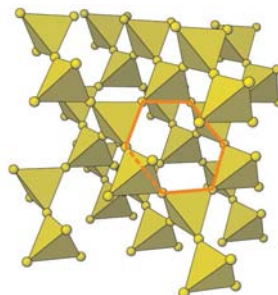


Contact : Alain Yaouanc
Tél : 0438784392
Mél : alain.yaouanc@cea.fr

La frustration géométrique est une propriété physique commune de la matière faisant l'objet actuellement de nombreuses études. Par exemple, elle est une des caractéristiques de la glace cristalline. Elle apparaît quand l'arrangement spatial ne permet pas la minimisation simultanée des énergies d'interaction et elle engendre un état fondamental ayant une dégénérescence importante. Dans le cas de la glace, la chaleur spécifique a permis d'évaluer cette dégénérescence. Cette dernière a un rôle essentiel dans des domaines aussi divers que le repliement des protéines, la conformation des polymères ou les propriétés magnétiques de certains composés. En s'attaquant à cette question omniprésente par le biais du magnétisme, le physicien bénéficie d'un grand nombre de techniques expérimentales.

Le stage consistera à effectuer des mesures de chaleur spécifique jusqu'à 100 mK sur deux composés présentant de la frustration géométrique et peu étudiés à ce jour, afin de déterminer si des transitions de phases apparaissent à basse température. Parallèlement, des mesures microscopiques par une méthode apparentée à la résonance magnétique nucléaire (relaxation du spin du muon) seront effectuées sur un grand instrument jusqu'à 20 mK. Ces mesures permettront de savoir si ces systèmes explorent les différentes configurations possibles dans leur état fondamental.

Les composés qui nous intéressent cristallisent dans une structure pyrochlore qui est composée de tétraèdres comme représentée sur la figure ci-dessus.



Références

R. Moessner et A. P. Ramirez, *Physics Today*, février 2006, page 24.

Commissariat à l'Énergie Atomique, DRFMC-SPSMS
Centre de Grenoble – 17 rue des Martyrs – 38054 Grenoble cédex

Direction des Sciences de la Matière
Département de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée
Service de Physique Statistique, Magnétisme et Supraconductivité

“Magnetic Density of States at Low Energy in Geometrically Frustrated Systems”, A. Yaouanc et al., *Physical Review Letters*, **95** (2005) 047203

“Spin Dynamics and Magnetic Order in Magnetically Frustrated $Tb_2Sn_2O_7$ ”, P. Dalmas de Réotier et al., *Physical Review Letters*, **96** (2006) 127202



Sujet N°6

Dynamique de spin et de réseau dans les supraconducteurs non conventionnels



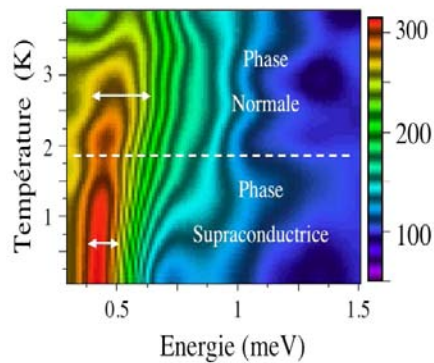
Contact : **Stéphane Raymond**
Tél : **0438783738**
Mél : stephane.raymond@cea.fr

Le mécanisme de la supraconductivité conventionnelle correspond à l'appariement des électrons en paires de Cooper par le biais des phonons. Dans le cas des supraconducteurs non conventionnels avec de fortes interactions électroniques, d'autres mécanismes sont envisagés en relation avec la présence de fortes fluctuations magnétiques.

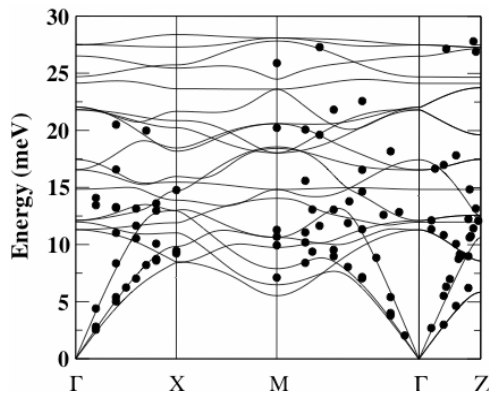
Dans cette thèse (et/ou stage M2), nous nous intéresserons à cette problématique pour des systèmes où magnétisme et supraconductivité sont des états fondamentaux coopératifs ou en compétition. Les études possibles concernent la coexistence entre ferromagnétisme et supraconductivité (UGe_2 , $URhGe$, $UCoGe$), la supraconductivité en présence de fluctuations quadrupolaires ($PrOs_4Sb_{12}$) ou la supraconductivité dans des composés sans centre d'inversion ($CePt_3Si$). Ces composés sont synthétisés au SPSMS et sont par ailleurs le sujet d'études détaillées par sonde macroscopique (voir sujets 1, 2, 3).

Ces études visent à préciser les **mécanismes** de la supraconductivité non conventionnelle. Pour cela, la technique privilégiée sera la diffusion inélastique des neutrons qui est une sonde **microscopique** donnant accès aussi bien au spectre des fluctuations magnétiques qu'à celui des phonons. La mesure de ces spectres dans des composés bien choisis permettra de discuter la pertinence des différents mécanismes proposés pour la supraconductivité.

Cette thèse demande un goût pour la physique expérimentale et le travail auprès des « grands instruments ». Les expériences de diffusion des neutrons seront réalisées à l'Institut Laue Langevin à Grenoble sur les lignes du CEA-Grenoble. Le sujet met en jeu plusieurs collaborations internationales du laboratoire (Japon, Pologne).



Carte d'intensité du mode triplet mesuré dans $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ par diffusion de neutrons et montrant l'influence de la transition supraconductrice sur cette excitation



Spectre de phonons de PuCoGa_5 mesuré par diffusion des rayons X et calcul *ab-initio* avec un terme de répulsion coulombienne $U \sim 3$ eV traduisant la localisation des électrons 5f.

Références :

“Probing the Coulomb Interaction of the Unconventional Superconductor PuCoGa_5 by Phonon Spectroscopy”, S. Raymond et al., *Physical Review Letters*, **96** (2006) 237003

“Direct Observation of Quadrupolar Excitons in the Heavy-Fermion Superconductor $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ ”, K. Kawuhara et al, *Physical Review Letters*, **95** (2005) 107003.

“Phonon spectrum of the ferromagnetic superconductor UGe_2 and consequences for its specific heat”, S. Raymon et al., *Physical Review B*, **73** (2006) 094420

Sujet N°7

Absorption d'ondes électromagnétiques dans les supraconducteurs non-conventionnels



Contact : Vladimir Mineev
Tél : 0438784409
Mél : vladimir.mineev@cea.fr

Les supraconducteurs à haute température critique ont toujours suscité beaucoup d'intérêt. Le problème fondamental est d'identifier le mécanisme de la formation de l'état supraconducteur dans les composés sous-dopés qui sont des milieux presque diélectriques caractérisés par un pseudogap dans le spectre des trous (i.e., les porteurs de charge électrique). La formation du pseudogap dans l'état normal est suivie par l'apparition d'un gap supraconducteur à plus basse température. Les deux gaps ont la même symétrie, mais ils ont des valeurs très différentes. C'est pourquoi ils sont facilement mesurables par spectroscopie de courant tunnel entre le supraconducteur et un métal normal. Cette méthode offre la possibilité de déterminer la densité des états de trous dans le supraconducteur. Les études expérimentales qui ont été faites récemment au Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses (Grenoble) ont mis en évidence que le gap supraconducteur dans le composé BSCCO est supprimé par un champ électromagnétique avec une fréquence plus basse que le gap. Ce comportement absolument anormal pour un supraconducteur conventionnel pourrait être une conséquence de l'appariement de type d caractéristique des supraconducteurs à haute température critique.

La théorie de la conductivité infrarouge et de l'effet de peau sont bien établies pour les supraconducteurs de type d. En revanche, la théorie de l'influence des ondes électromagnétiques de basse fréquence sur la densité des états dans les supraconducteurs non-conventionnels n'existe pas. Le but de la thèse sera de développer une telle théorie.

Pour travailler sur ce sujet, une connaissance de la théorie microscopique de la supraconductivité est souhaitable.

En introduction, le (la) candidat(e) pourra consulter le dernier chapitre du livre de A.A.Abrikosov, L.P.Gor'kov, I.E. Dzyaloshinskii , « Methods of Quantum field theory in statistical Physics », Dover Publications, NY, 1975.

La théorie de la supraconductivité non-conventionnelle est esquissée dans la monographie de V.P.Mineev, K.V.Samokhin, « Introduction to Unconventional Superconductivity », Gordon and Breach Science Publishers, 1999.



Sujet N°8

Supraconductivité dans les semiconducteurs très fortement dopés : le diamant et le silicium



Contact : Christophe Marcenat
Tél : 0438783732
Mél : christophe.marcenat@cea.fr

Récemment, nous avons découvert que la supraconductivité pouvait être induite dans le silicium par très fort dopage au bore. La température critique reste très basse, de l'ordre de 0.35 K [1] mais la technologie associée au silicium laisse entrevoir la possibilité de fabriquer de nouveaux dispositifs hybrides supra-normal entièrement en silicium.

Nous proposons dans ce sujet l'étude de cette supraconductivité qui entre dans notre thématique : supraconductivité des semiconducteurs très fortement dopés. En effet, nous étudions depuis 2004 la supraconductivité du diamant et dans cette thèse l'étudiant sera amené à comparer les propriétés de ces deux systèmes.

En pratique, nous essaierons de nouveaux dopants (P, Al,...) non seulement pour essayer d'augmenter la température critique mais aussi pour étudier le dopage électrons, par opposition au cas du bore où le dopage s'effectue par trous. La fabrication et l'étude de jonctions normal-supra sera une étape nécessaire avant la fabrication de tout dispositif.

Nous nous intéresserons aussi tout particulièrement à la transition isolant-supra à 2 dimensions dans le cas du diamant, en comparant avec le cas du silicium. Cette étude se fera en forte interaction avec C. Chapelier qui étudie le coeur des vortex par STM sur nos couches de diamant.

Ce travail, à forte connotation instrumentale et expérimentale, se fera en étroite collaboration avec l'Institut Néel, non seulement pour la fabrication et la caractérisation de couches épitaxiées de diamant (Dr E. Bustarret) mais aussi pour toutes les mesures physiques (Prof. T. Klein) : transport électronique sous champ magnétique, effet Hall, susceptibilité magnétique et chaleur spécifique. Les couches de silicium seront préparées, soit à l'Institut d'Electronique Fondamentale à Orsay par GILD (Gas Immersion Laser Doping), soit par implantation au LETI.

Références :

[1] E. Bustarret, C. marcenat et al., Nature **444**, 465 (2006)

Voir aussi Nature, News and Views by R.J. Cava in Nature **444** (2006), 427



Sujet N°9

Quantum transport and proximity effect in graphene

Contact : **Louis Jansen**

Tél : **0438783902**

Mél : louis.jansen@cea.fr



The study of the physical properties of graphene, consisting of a two-dimensional planar hexagonal arrangement of carbon atoms, has attracted great interest with the spectacular breakthrough, three years ago, of a rather simple cleavage method to produce graphene crystallites. The micrometer size of the obtained crystallites allowed experimental investigations of novel phenomena related to the specific two-dimensional structure of graphene (for recent reviews see [1-3]). In an alternative method, mono- and bi-layers of carbon layers are produced on top of a SiC substrate by sublimation [4].

The electronic structure of graphene closely resembles the spectrum of relativistic spin-1/2 fermions as described by the Dirac theory of quantum mechanics. The linear energy dispersion $E_{\pm}(k) = \pm\hbar v_F k$ of the quasi-particle states near the K-points in the Brillouin zone corresponds to the that of massless Dirac fermions where the Fermi velocity replaces the speed of light in free space. The positive electron-like and negative hole-like energy solutions correspond to the fermion particles and anti-particles of Dirac's theory. The fermion spin in relativistic quantum mechanics is replaced in graphene by a pseudo-spin index resulting from the chiral degeneracy of the band structure.

From a fundamental viewpoint, the importance of experimental research on graphene is directly related to the unique electronic properties of this nanomaterial, such as the massless nature of its carriers discussed above. By applying a gate voltage to the graphene the charge carriers can be tuned continuously between electrons and holes with zero carrier density at the Dirac point for $k = 0$. The first direct prove for the existence of relativistic massless quasi-particles in graphene was found in the experimental observation of the Quantum Hall Effect in a quantizing magnetic field, which deviates from the standard integer QHE as expected from the Landau quantization of graphene's electronic spectrum. Another peculiar phenomenon is concerned with the observation of a finite conductivity at the neutrality point where $n = 0$. Usually one would expect an insulating state at low carrier concentration, but the chirality of the charge carriers seems to prevent the usual scenario of localization.

The high mobility of the charge carriers, even at room temperature, makes this material a promising candidate for graphene-based electronics. Future quantum transport studies on graphene will go into directions with samples of reduced size (10 nm) like quantum-dot structures or ribbons with either zig-zag or armchair arrangements of the carbon atoms along the sample border.

The transport of charge carriers across the interface of a normal metal and a superconductor involves the Andreev reflection of a negatively charged electron into a positively charge hole, where a electron Cooper pair of charge $2e$ enters into the superconductor. Because of the relativistic Dirac quantum mechanics, the electron-hole conversion at a normal-metal/superconductor interface in graphene reveals the peculiar possibility of a specular Andreev reflection of a hole, in contrast to the usual Andreev retroreflection of a hole [5]. The interface resistance between a superconductor and graphene gives information on the Andreev reflection process, where a multiple contact configuration would allow for the investigation of non-local transport phenomena.

Using an STM, the local density of states can be determined in order to study the proximity effect of a superconductor on graphene.

PhD project:

This PhD thesis is concerned with the experimental investigation of exfoliated single-crystal samples to study the quantum mechanical properties of graphene flakes in contact with either normal or superconducting electrodes. The graphene single crystals will be produced by cleaving a single-layer of carbon from HOPG bulk graphite. Using electron-beam lithography, the single crystals will be configured in the required shape and contact pads will be added for electrical transport and STM spectroscopy measurements.

The PhD student will be involved in the study of the low-temperature electrical properties of single flakes consisting of one to a few graphene layers. Experiments will be performed using state-of-the-art equipment for cryogenic measurements down to 10 mK. We will explore the possibility to control electron transport by gate electrodes at the bottom, at the top, or from the side of the flake. At the same time, the PhD student will develop a reliable procedure for the fabrication of high-transparency niobium contacts for the study of the proximity effect in graphene. To this aim we plan to employ STM spectroscopy at low temperatures (< 100 mK).

The proposed research will rely on the existence in the lab of an expertise in nanofabrication, low-temperature transport, shot-noise measurements, and scanning-probe techniques [6-9].

[1] A.K. Geim and K.S. Novoselov, *Nature Materials* **6**, 183 (2007).

[2] M.I. Katsnelson, *Materials Today* **10**, 20 (2007).

[3] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, and A.K. Geim, *CondMat* 0709.1163.

[4] C. Berger, et al., *Science* **312**, 1191 (2006).

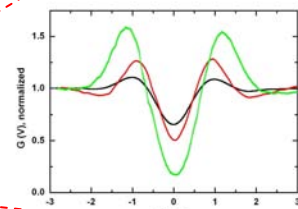
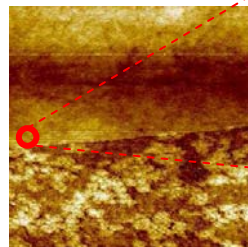
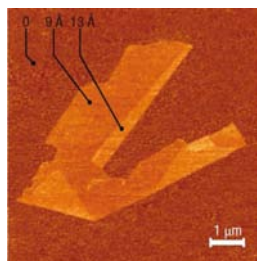
[5] C.W.J. Beenakker, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 067007 (2006).

[6] S.S. Murzin, A.G.M. Jansen, and I. Claus, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 016802 (2004).

[7] J. van Dam, Y. Nazarov, E. Bakkers, S. De Franceschi, and Leo Kouwenhoven, *Nature* **442**, 667 (2006).

[8] F. Lefloch, C. Hoffmann, M; Sanquer, and D. Quirion, *Phys. REv. Lett.* **90**, 067002 (2003).

[9] W. Escoffier, C. Chapelier, N. Hadacek, and J.-C. Villégier, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 217005 (2004).



Exfoliated graphene visualized by AFM. (A.K. Geim and K.S. Novoselov, 2005) *STM spectra for different number of graphene layers on top of superconducting Nb. (B. Sacepe and C. Chapelier, 2007)*

Sujet N° 10

Effets à N -corps et transport quantique dans les boîtes quantiques



Contact : Steven Blundell
Tél : 0438785939
Mél : steven.blundell@cea.fr

Les boîtes quantiques semi-conductrices consistent en un système quasi-bi-dimensionnel d'électrons piégés près de l'interface entre deux semi-conducteurs ou entre un semi-conducteur et un isolant [1]. Les dimensions latérales de ce système sont typiquement d'une centaine de nanomètres, selon le potentiel de confinement électrostatique appliqué expérimentalement, alors que son épaisseur peut être seulement de quelques nanomètres. La boîte quantique peut contenir de quelques électrons à quelques centaines d'électrons. Essentiellement des « atomes artificielles », les boîtes quantiques montrent des effets de taille finie quantiques à N -corps subtils. Technologiquement, ces systèmes se trouvent dans les « transistors à un électron » (SET), alors que les boîtes quantiques couplées, ou les « molécules artificielles », pourraient fournir des *qubits* pour l'information quantique ou les ordinateurs quantiques.

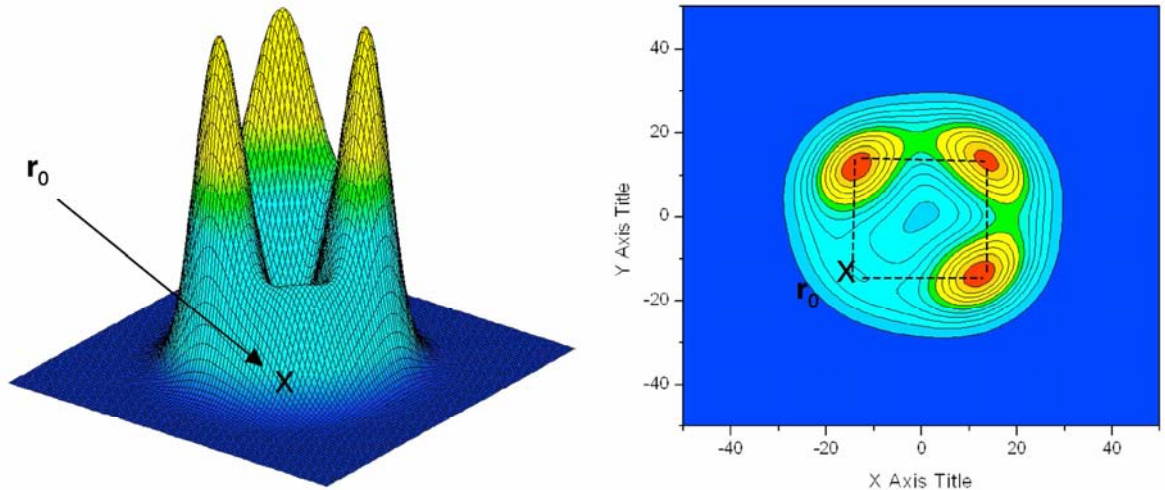
Il est important de pouvoir modéliser et prédire les propriétés de ces systèmes électroniques à l'échelle nano-métrique. La thèse consistera en le développement et l'application des méthodes formelles et numériques quantiques à N -corps pour calculer les propriétés électroniques et de transport quantique des boîtes quantiques.

Le projet consistera en deux parties :

1) Le calcul des propriétés électroniques des boîtes quantiques semi-conductrices isolées. À moyen terme, ce projet vise à soutenir des expériences dans notre service sur les propriétés des transistors à un électron (SET). Notre groupe a récemment développé nous-mêmes quelques méthodes de structure électronique pour les systèmes électroniques quasi-2D : une approche en fonctionnelle de spin-densité (SDFT), et une méthode par l'interaction des configurations (CI) ou par la diagonalisation exacte (ED). Pendant le stage ou la thèse, ces approches seront étendues par l'addition d'un champ magnétique externe, éventuellement intense, permettant de modéliser le système dans le régime de Hall quantique. On étudiera l'énergie et la magnétisation de l'état fondamental et des premiers états excités en fonction du nombre d'électrons dans la boîte (jusqu'à une centaine d'électrons), de la géométrie de la boîte, du désordre et du champ magnétique appliqué, ainsi que la localisation électronique à faible densité (molécules de Wigner) ou à champ magnétique intense. On considérera aussi l'effet de l'épaisseur du gaz quasi-2D d'électrons dans ces systèmes en développant des versions 3D du code – une généralisation relativement simple.

2) Dans la deuxième partie, nous proposons de calculer la conductance quantique d'une boîte quantique qui est relié entre deux contacts. Pour cela, il y a plusieurs approches

possibles. On peut utiliser le formalisme de la fonction de Green hors équilibre, dans une approche à N -corps numérique, en adaptant les méthodes numériques utilisées jusqu'ici (notamment l'utilisation des bases numériques de fonctions 2D de type Hartree-Fock ou SDFT). Une autre possibilité sera de généraliser notre code existant SDFT. Il est aussi possible d'inclure les états électroniques des contacts dans une approche CI. Une priorité est l'application à la conductance des transistors à un électron.



Fonction de corrélation des paires $g(\mathbf{r}_0\uparrow; \mathbf{r}\uparrow)$ pour l'état fondamental d'une boîte quantique parabolique de $N = 4$ électrons à faible densité électronique $r_s = 15 a_0^*$, calculée par une méthode de diagonalisation exacte. La quantité $g(\mathbf{r}_0\uparrow; \mathbf{r}\uparrow)$, considérée comme une fonction de \mathbf{r} , est proportionnelle à la probabilité conditionnelle de trouver un électron de spin up (\uparrow) à la position \mathbf{r} , étant donné l'existence d'un premier électron de spin up à un point \mathbf{r}_0 . La figure montre donc la localisation des électrons dans une molécule de Wigner de géométrie carrée. (Le quatrième pic, autour du point $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$, est exclu par le principe de Pauli.)

Actuellement le groupe consiste en un ou deux post-docs et des visiteurs par des collaborations internationales.

Références :

S. M. Reimann et M. Manninen, Rev. Mod. Phys. **74**, 1283 (2002).

Cet article de revue discute de façon générale de plusieurs méthodes de structure électronique et leur application aux boîtes quantiques

Sujet N° 11

Théorie et Simulation du Transport Quantique en Nanosciences : Cas des Nanotubes de Carbone et du Graphène 2D

Contact : **Stephan Roche**

Tél : **0438783381**

Mél : stephan.roche@cea.fr



La physique du transport quantique dans les nano-objets et systèmes de basse dimension est au cœur d'un ensemble de problématiques théoriques et de défis expérimentaux et technologiques.

Les effets quantiques jouent en effet un rôle primordial dans les propriétés de transport des nouveaux nano-matériaux tels que les **nanotubes de carbone**, le **graphène 2D** et les nanofils silicium de dimensions nanométriques. Les approches théoriques et les outils de simulation du transport quantique sont en plein développement, avec l'utilisation répandue du formalisme de Landauer-Büttiker et des fonctions de Green hors-équilibre. Ces méthodes sont suffisamment générales et versatiles pour étudier des modèles de plus en plus réalistes et pour inclure des phénomènes quantiques plus complexes : *couplage du système avec les contacts métalliques, rôle des défauts et dopants, couplage électron-phonon, effets des interactions Coulombiennes (écranage, etc..)*. Le CEA Grenoble poursuit de nombreuses activités de recherche théorique et expérimentale dans ces domaines, aussi bien en recherche fondamentale que dans une optique de développement de nouvelles technologies de la nanoélectronique du future.

De nouvelles approches théoriques et le développement de code de simulation du transport basé sur le formalisme des fonctions de Green hors-équilibre ont été récemment développées avec succès dans notre groupe, et permettent des études approfondies de la physique du transport en basse dimensionnalité, et l'exploration de la physique des « nano-transistors ». Les recherches poursuivies se développent en partenariat avec des collaborateurs expérimentateurs et théoriciens du CNRS et de l'Université, dans le cadre de projets nationaux, européens et internationaux (Japon, Etats-Unis, Europe,..).

Le but de cette thèse est de *contribuer au développement de la compréhension théorique du transport quantique dans des nano-objets au cœur des Nanosciences*, à savoir les **nanotubes de carbone et le graphène 2D**. Des questions fondamentales seront abordées, comme la compréhension des phénomènes de localisation quantique dans ces systèmes de basse dimensionnalité en présence de désordre (élastique et inélastique). La physique quantique du graphène bidimensionnel présente une analogie avec l'électrodynamique quantique, et il existe de fortes controverses sur la nature de la localisation des états électroniques et les particularités d'une transition métal-isolant unique dans ces systèmes. Nos approches permettront d'apporter un éclairage théorique nouveau et original. De même, les phénomènes de décohérence quantique via le couplage électron-phonon seront étudiés dans les nanotubes de carbone.

A un niveau plus applicatif, on analysera le transport quantique dans les transistors à base de nanotubes et de graphène. Pour cela, le code de transport (Poisson-Schrödinger) développé au CEA sera utilisé et amélioré lors de la thèse sur des aspects plus

novateurs, e.g. traitement des effets inélastiques, couplage électron-phonon, électron-électron.

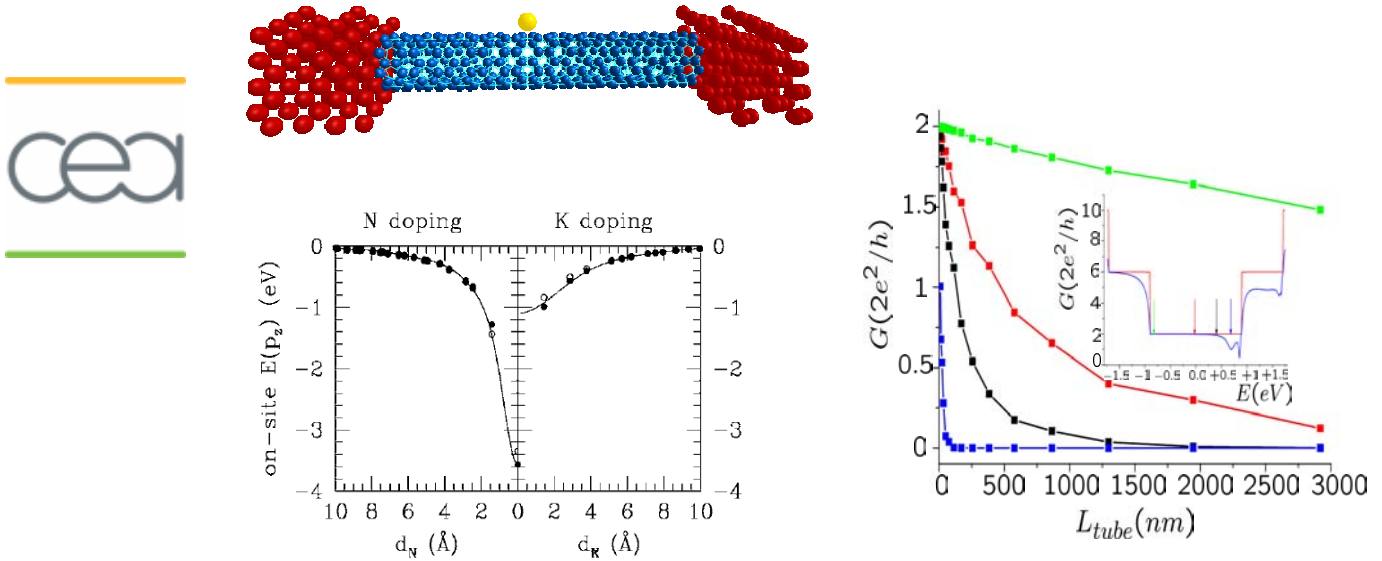


Schéma: hétérojonction métal/nanotube/métal avec une impureté chimique (atome de potassium physisorbé).

Potentiel de diffusion pour les électrons projeté dans l'espace réel. d_N indique la distance relative par rapport à l'impureté qui produit le puits de potentiel (calcul ab-initio cadre Théorie de la fonctionnelle densité-DFT).

Conductance en fonction de l'énergie des porteurs de charge (encart), calculée dans le formalisme Landauer-Büttiker.

Comportement d'échelle de la conductance pour une énergie fixée (couleur), à densité d'impuretés constante. Manifestation de tous les comportements d'échelle du transport quantique (ballistique, diffusif, localisation quantique).

Une bonne formation en physique de la matière condensée (physique du solide, physique quantique) et un goût pour la théorie et la simulation numérique sont nécessaires.

Références récentes du groupe:

“*Electronic and transport properties of nanotubes*”, J.C. Charlier et al. Review of Modern Physics **79** (2007) 677
 “*Exploring the Magnetic induced Field Effect Efficiency in Carbon Nanotube Based Devices*”, G. Fedorov et al., Nano Letters **7** (4) (2007) 960
 “*Inelastic quantum transport and Peierls-like mechanism in carbon nanotubes*”
 L. Foa-Torres et al. Physical Review Letters **97** (2006) 076804
 “*Chemical disorder strength in carbon nanotubes: Magnetic tuning of quantum transport regimes*”, R. Avriller et al. Physical Review B **74** (2006) 121406.

Sujet N° 12

Electronic Transport and Spin Dynamics in self-assembled SiGe Quantum Dots

Contact : **Silvano De Franceschi -Georgios Katsaros**

Tél : **0438781705 - 0438785480**

Mél : sylvano.defranceschi@cea.fr - georgios.katsaros@cea.fr



There is an increasing interest towards the realization of electronic devices whose operation relies on the spin degree of freedom of electrons rather than their charge. In particular one of the most intriguing as well as ambitious challenges is to exploit the electron spin as a quantum mechanical two-level system for quantum information processing. Spins have long coherence times because they are “immune” to the long range electrostatic coulomb interactions between charges and thus are more promising as quantum bits (Qubits) than charges.

The realization of a Quantum Computer requires several key ingredients: an ensemble of qubits (i.e. two-level quantum mechanical systems), control tools for the implementation quantum logic gates, error correction processes. Various physical realizations have been proposed over the past years, such as single photons, ions in electromagnetic traps, charges and fluxes in superconducting devices etc.. Loss and DiVincenzo [1] suggested to use electron spins confined in lithographically defined QDs as elementary qubits, while Kane [2] the nuclear spin of phosphorous impurities in Si. The main advantage of such solid-state implementations is scalability, i.e. the ability to extend the size of a quantum processor to a large number of qubits. Scalability is an important property which represents a serious obstacle to the development of certain approaches to quantum computing such as the use of nuclear-magnetic-resonance systems.

So far, most of the experimental work has focused on GaAs-based single and double QDs [3]. In GaAs QDs the quantum coherence of electron spins is lost on relatively short time scales (well below 100 ns) due to hyperfine interaction with the nuclear spins (both Ga and As have non-zero nuclear spin moments). This is a serious problem for the development of spin-based quantum computation with this material system.

Here we aim to investigate an alternative material system: SiGe self-assembled QDs; Si and Ge are attractive materials for the realization of a spin-based QC. In these materials electronic spins can have a long coherence time due to the absence of hyperfine interaction (in isotropically purified crystals).

SiGe self-assembled islands are created by means of lattice-mismatched heteroepitaxial growth when a material with a larger lattice constant (Ge) is deposited on a smaller lattice constant substrate (Si). In the so called Stranski-Krastanow (SK) growth mode, the elastic strain stored in the growing film is relaxed by the formation of three-dimensional (3D) islands on top of a thin, pseudomorphic wetting layer (WL). Islands of different sizes and geometries [hut clusters, pyramids, domes etc.; see Fig. 1 (a)-(c)] have been observed [4].

Although the islands consist nominally of pure Ge, due to the competition between strain and surface energy, they are actually formed by a SiGe alloy. Several experimental studies have investigated the composition of SiGe QDs. All these studies have shown that there is a gradient in the composition of the QDs with the composition becoming Ge richer close to the apex [Fig. 1 (d)] [5]. Photoluminescence measurements have shown [6] that SiGe QDs belong to the type II structures, i.e. holes are confined inside the dots while electrons reside in the Si matrix.

By using admittance spectroscopy on a large ensemble of SiGe QDs the discrete nature of their energy spectrum could be revealed [7]. Energy level separations were estimated to be in the 20-50meV range. Low temperature transport measurements on individual SiGe QDs may enable more accurate determination of their energy spectrum.

In this project the transport properties and spin dynamics of self assembled SiGe islands will be investigated for the first time. Low temperature transport measurements will be performed to characterize the electronic properties of individual quantum dot devices fabricated from self-assembled SiGe islands. Under high magnetic fields, the hole g-factor will be measured by tunneling spectroscopy measurements of the Zeeman spin splitting. Time-resolved, high-frequency measurements will be carried out to study and control the spin dynamics of confined holes. The characteristic times for spin relaxation (T_1) and decoherence (T_2) will be experimentally determined. Electron-spin resonance experiments will be devised to implement coherent spin manipulation. The main purpose of this work is to investigate the potential of self assembled SiGe QDs for spin-based quantum information processing. The research project is expected to give an answer to whether spins in SiGe QDs have indeed much longer lifetimes and whether SiGe QDs could be suitable building blocks for a spin-based quantum computer.

[1] D. Loss, and D. P. DiVincenzo, **Phys. Rev. A** **57**, 120 (1998).

[2] B. E. Kane, **Nature** **393**, 133 (1998).

[3] M. Kroutvar et al., **Nature** **432**, 81 (2004); J. M. Elzerman et al., **Nature** **430**, 431 (2004); J. R. Petta et al., **Science** **309**, 2180 (2005).

[4] J. Stangl, V. Holý, and G. Bauer, **Rev. Mod. Phys.** **76**, 725 (2004).

[5] G. Capellini et al., **Appl. Phys. Lett.** **78**, 303 (2001); R. Magalhães-Paniago et al., **Phys. Rev. B** **66**, 245312 (2002).

[6] M. L. W. Thewalt et al., **Phys. Rev. Lett.** **79**, 269 (1997).

[7] S. K. Zhang et al., **Phys. Rev. Lett.** **80**, 3340 (1998); T. Asperger et al., **Phys. Stat. Sol. B** **224**, 237 (2001).

[8] A. Rastelli, **PhD Thesis**, Università degli Studi di Pavia, 2002

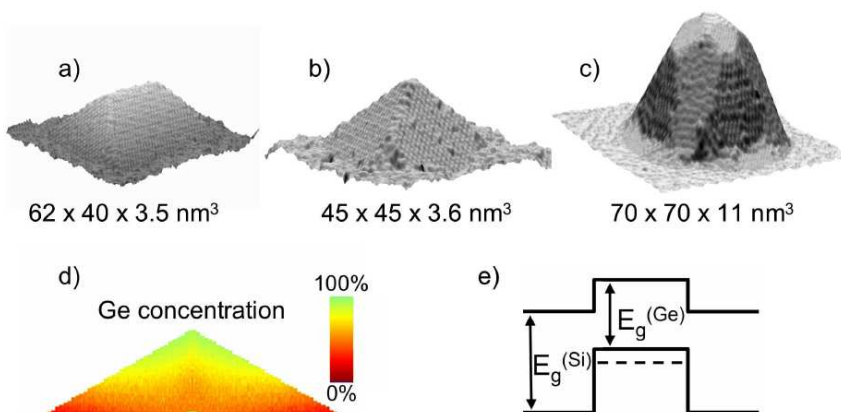


Figure : (a)-(c) High resolution 3D STM images showing a hut cluster, a pyramid and a dome island, respectively [8]. (d) 2D cross section from a simulated compositional map of a SiGe pyramid (e) Simplified 1D band alignment for a Ge island embedded in a Si matrix. Strain effects are not included.

Sujet N° 13

Effet de proximité dans des multicouches supraconducteur/graphène



Contact : Manuel Houzet
Tél : 0438789044
Mél : manuel.houzet@cea.fr

Le graphite est formé de plusieurs « feuilles » de graphène où les atomes de carbone sont répartis selon un réseau plan hexagonal. Des chercheurs sont parvenus récemment à isoler ces feuilles et à les connecter à des électrodes. Plusieurs expériences de transport électronique à travers le graphène ont ainsi pu être réalisées. Elles ont mis en évidence des propriétés spectaculaires de ce matériau bidimensionnel : effet de champ bipolaire, effet hall quantique demi-entier, interférences quantiques, minimum de conductivité [1]. Ces effets sont généralement associés au caractère exotique de la structure de bande électronique qui est intermédiaire entre celles d'un métal et d'un semi-conducteur. En effet, au voisinage de la surface de Fermi, les électrons ont un spectre de Dirac avec une masse nulle et une densité d'états qui tend vers zéro.

Des expériences ont également montré l'existence d'un effet de proximité entre le graphène et un métal supraconducteur [2]. Le transport électronique entre ces matériaux y est réalisé par réflexion d'Andreev à leur interface. Des études théoriques ont prédit des différences importantes avec l'effet de proximité conventionnel entre un supraconducteur et un métal normal : existence d'une réflexion d'Andreev spéculaire en plus de la rétro-réflexion habituelle, oscillation du courant Josephson dans une jonction supraconducteur-graphène-supraconducteur en fonction de la tension de grille appliquée à la couche de graphène.

Dans le cadre de la thèse, on étudiera théoriquement l'effet de proximité dans une géométrie alternative où le graphène est déposé sur le substrat supraconducteur. Cette géométrie correspond aux expériences de microscopie à effet tunnel réalisées au sein du groupe expérimental de notre laboratoire. Dans ce but, on généralisera la théorie des multicouches hybrides supraconductrices/métalliques. La dépendance du gap de proximité induit dans le graphène sera étudiée en fonction du nombre de couches de graphène déposées. Les propriétés de la supraconductivité induite dans le graphène seront étudiées théoriquement en vue de prédire et comprendre le comportement des structures mésoscopiques qui seront réalisées avec ce matériau (effet Josephson, billards quantiques...).

Une formation en physique théorique de la matière condensée est souhaitable pour démarrer ce sujet.

[1] “The rise of grapheme”, A.K. Geim and K.S. Novoseolov, *Nature Materials* **6**,183 (2006).

[2] H. Heersche *et al.*, *Nature* **446**, 56 (2007), F. Miao *et al.*, *Science*, **317**, 1530 (2007), A. Shailos *et al.*, *Europhys. Lett.* **79**, 57008 (2007)



Sujet N° 14

Proximity of superconductivity and magnetism



Contact : Louis Jansen

Tél : 0438783902

Mél : louis.jansen@cea.fr

Usually, ferromagnetic order destroys the singlet ground state of superconductivity so that the two phenomena hardly coexist in the same material. There exist a few examples of U-based compounds, like UGe₂ and URhGe, where superconductivity exist in the ferromagnetic phase pointing to unconventional superconductivity with triplet pairing. In another approach compared to the interesting case of bulk material revealing the coexistence of the two antagonistic quantum phenomena, artificial hybrid structures can be used to control the mutual influence between superconductivity and magnetism on the nanometer scale.

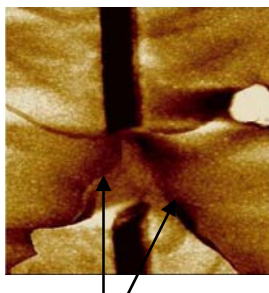
Using layered structures, the PhD thesis work will address various problems related to the proximity of superconductivity and ferromagnetism, like the superconducting properties close to a magnetic domain wall, the injection of spin-polarized current into a superconductor, or the non-local character of electron transport in a superconductor in close contact with two oppositely polarized ferromagnetic domains.

Using e-beam lithography, the thin ferromagnetic film can be configured in the required shape in order to control the position of a magnetic domain wall. One of the aims of the PhD study will be the investigation of the influence of a magnetic domain wall on the superconducting properties by means of transport measurements on a structured ferromagnetic-superconducting bi-layer system.

Magnetic multilayers in contact with a superconductor will be used for the injection of spin-polarized current into a superconductor in order to study critical current effects of polarized currents. In a later stage of the thesis, the correlation in the electron transport will be studied between two nearby oppositely polarized ferromagnetic domains in contact with a superconductor considering non-local effects in the Andreev reflection.

For the realization of the experimental study, the student will be in contact with various preparation methods and experimental techniques, like e-beam lithography of thin-film structures, magnetic-force-microscopy on domain structures, or electrical transport measurements at cryogenic temperatures.

For a review article on the proximity effect between superconductivity and ferromagnetism see: A.I. Buzdin, Rev. Mod. Phys. 77, 935 (2005).



MFM image of permalloy bridge showing by arrows the domain-wall structure close to the bridge (image 2 x 2 μm).

