

Magnetism and superconductivity in extreme conditions

In the race for the most intense non-destructive pulsed magnetic fields, the Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (National High Magnetic Field Laboratory) in Toulouse established in 2017 a new European record of 98.8 teslas, and will attempt soon to beat the world record of 100.7 teslas setup a few years ago in Los Alamos, USA. Accessing such extremely high magnetic fields constitutes a powerful tool for the study of condensed matter physics. It allows continuously changing the basic properties of numerous materials, as quantum magnets where a non-conventional superconducting phase develops in the vicinity of a quantum magnetic phase transition. Amongst them, the heavy-fermion systems, where the electrons have effective masses of 100 to 1000 times the free electron mass - due to strong electronic interactions - are one of the most challenging experimental targets.

We have recently developed a new generation of pressure cells, which allow performing magnetoresistivity experiments under high pressures up to 4 GPa combined with pulsed magnetic fields up to 60 T at low temperature (1.5 K). The combined used of extreme conditions of intense magnetic field, high pressure, and very low temperature permits to study three-dimensional phase diagrams. In particular, a target is to determine the boundaries of the different phases (antiferromagnetism, superconductivity, Fermi liquid etc.), but also to characterize the effective mass and the Fermi surface.

The PhD thesis proposed here consists in an experimental study of heavy-fermion superconductors (see our recent discovery of magnetic-field-induced superconductivity in UTe_2). Magnetoresistivity and magnetization experiments will be performed in several state-of-the-art combinations of the most extreme conditions: in fields up to 100 T (1.5 K, ambient pressure), in pressures up to 4 GPa (400 mK, 60 T), and temperatures down to 100 mK (60 T, ambient pressure). Complementarily, neutron scattering experiments in fields up to 40 T (experiments done at the European neutron source ILL in Grenoble with a specially designed LNCMI pulsed magnet) will be performed to determine the high-field magnetic structure of selected materials. This work will be done within strong collaboration with the CEA-Grenoble and the University of Tokoku in Japan, where missions will be planed.

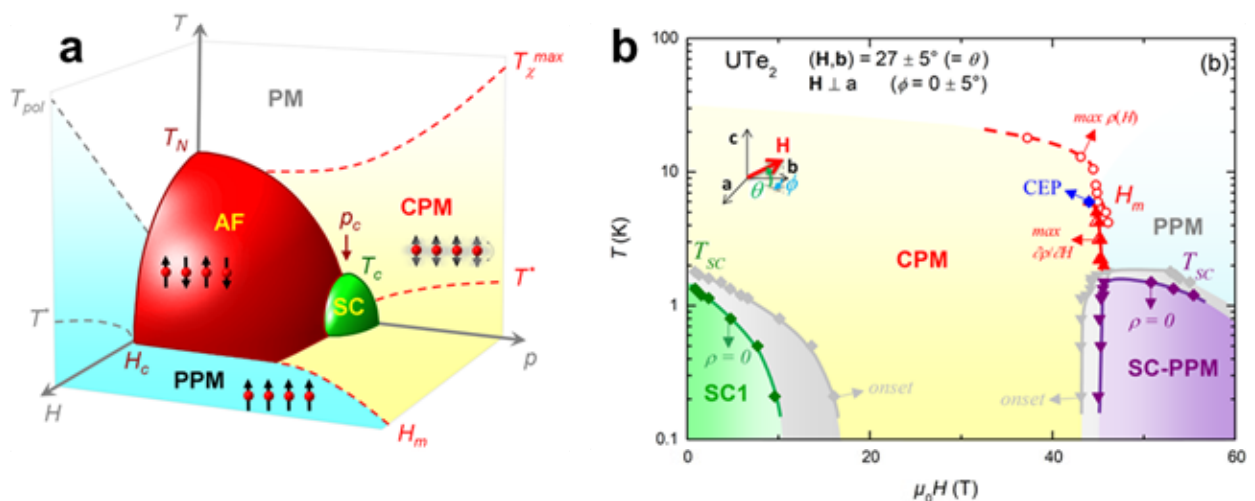


Figure 1: (a) Schematic 3D (H, p, T) phase diagram of heavy-fermion systems (AF = antiferromagnetism, SC = superconductivity, PPM = polarized paramagnetism, CPM = correlated paramagnetism, PM = paramagnetism). (b) High-field (and ambient pressure) phase diagram of UTe_2 (SC-PPM = field-induced superconductivity).

The candidate for this thesis will have a strong motivation to perform cutting-edge experiments under extreme conditions, and a will to continue learning about fascinating theoretical notions about magnetism and superconductivity.

This PhD project is funded by a ‘Bourse Ministérielle’ (PhD grant) from the ‘Ecole doctorale des Sciences de la Matière’ in Toulouse.

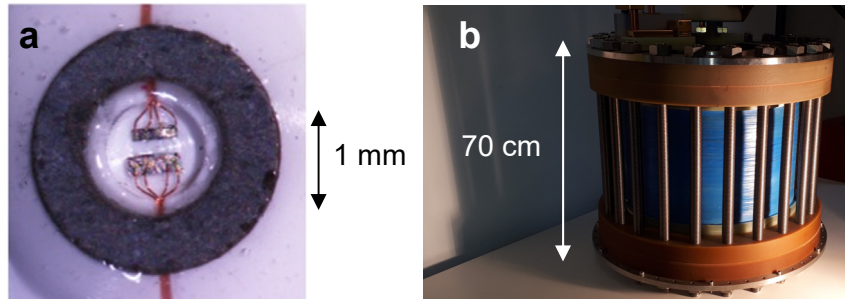


Figure 2:

a. Samples measured by the four-point method (electrical resistance under high pressure)

b. LNCMI 100-T magnet

Contact: William Knafo
Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
143 avenue de Rangueil, Toulouse, France

E-mail: william.knafo@lncmi.cnrs.fr

A few references:

1. “Destabilization of hidden order in URu_2Si_2 under magnetic field and pressure“, W. Knafo *et al.*, accepted in Nature Physics.
2. “Field-reentrant superconductivity close to a metamagnetic transition in the heavy-fermion superconductor UTe_2 “, G. Knebel, *et al.*, [J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 063707 \(2019\)](#).
3. “Three-dimensional critical phase diagram of the Ising antiferromagnet $CeRh_2Si_2$ under intense magnetic field and pressure“, W. Knafo *et al.*, [Phys. Rev. B **95**, 014411 \(2017\)](#).
4. “Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu_2Si_2 “, W. Knafo *et al.*, [Nature Commun. **7**, 13075 \(2016\)](#).
5. “Pressure cell for transport measurements under high pressure and low temperature in pulsed magnetic fields“, D. Braithwaite, *et al.*, [Rev. Sci. Instrum. **87**, 023907 \(2016\)](#).
6. “Heavy fermions in a high magnetic field“, D. Aoki, *et al.*, [C. R. Physique **14**, 53 \(2013\)](#).

More on the web:

http://www.toulouse.lncmi.cnrs.fr/spip.php?page=rubrique&id_rubrique=8

<http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article3837>

<http://objectifnews.latribune.fr/innovation/recherche-et-developpement/2015-10-15/toulouse-capitale-mondiale-de-la-recherche-sur-les-champs-magnetiques.html>

Magnétisme et supraconductivité en conditions extrêmes

Dans la course aux champs magnétiques pulsés non-destructifs les plus intenses, le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses de Toulouse a établi en 2017 le record d'Europe avec 98.8 teslas, et prévoit de bientôt tenter de battre le record du monde de 100.75 teslas détenu par les américains de Los Alamos. Ces champs extrêmes sont un enjeu pour l'étude des propriétés fondamentales de nombreux matériaux, par exemple des aimants quantiques présentant des phases de supraconductivité non-conventionnelle. Parmi eux, les systèmes dits à fermions lourds, où les électrons acquièrent des masses effectives de l'ordre de 100 à 1000 fois la masse de l'électron libre - du fait de très fortes interactions électroniques -, mais aussi les nouveaux supraconducteurs à base de fer, où les masses effectives sont moindres mais les températures de supraconductivité plus élevées, sont deux exemples parmi les plus connus.

Récemment, nous avons développé une nouvelle génération de cellules de pression qui permettent d'effectuer des mesures de magnétorésistivité combinant champs magnétiques pulsés de 60 T et hautes pressions de 4 GPa, à basse température (1.5 K). L'utilisation combinée des conditions extrêmes de champ magnétique intense, haute pression et très basse température permet d'étudier le diagramme de phase tri-dimensionnel de ces systèmes. Elle permet de suivre l'évolution des différentes phases (magnétisme, supraconductivité, liquide de Fermi) et des transitions associées, mais aussi de caractériser les évolutions de la masse effective et de la surface de Fermi.

La thèse proposée consiste en l'étude expérimentale du magnétisme et de la supraconductivité induite par le champ magnétique dans les fermions lourds. Des expériences seront effectuées dans plusieurs combinaisons de conditions extrêmes : dans des champs magnétiques allant jusqu'à 100 T (à 1.5 K, pression ambiante), dans des pressions allant jusqu'à 4 GPa (400 mK, 60 T), et des températures allant jusqu'à 100 mK (60 T, pression ambiante). De manière complémentaire, des expériences de diffraction des neutrons en champ magnétique intense jusqu'à 40 T (sur le site de l'ILL Grenoble) seront planifiées. Elles permettront de déterminer la structure magnétique des phases induites sous champ dans une sélection de composés.

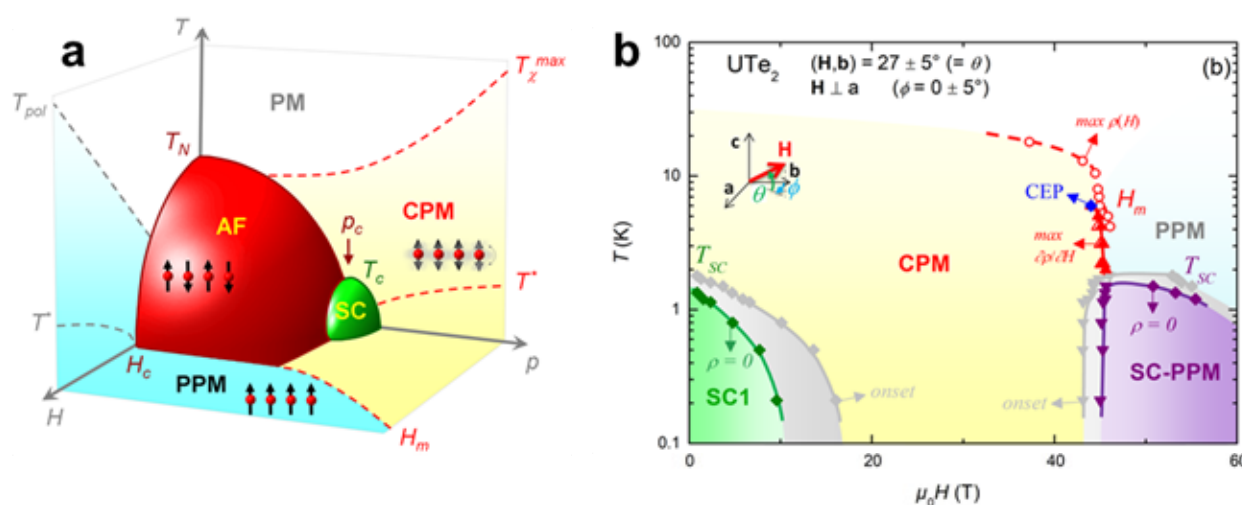


Figure 1: (a) Diagramme de phase 3D (H, p, T) schématisant les systèmes à fermions lourds (AF = antiferromagnétisme, SC = supraconductivité, PPM = paramagnétisme polarisé, CPM = paramagnétisme corrélé, PM = paramagnétisme). (b) Diagramme de phase à fort champ du supraconducteur réentrant UTe_2 (SC -PPM = supraconductivité induite par un champ magnétique).

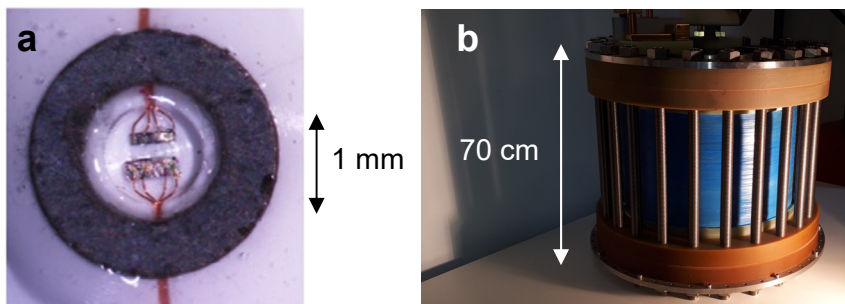


Figure 2:
 a. Echantillons dont la résistivité électrique est mesurée sous pression et champ magnétique intense combinés
 b. Aimant 100-T du LNCMI

Ce travail sera fait en collaboration étroite avec le CEA-Grenoble et l'Université de Tohoku au Japon, où des missions seront prévues.

Cette thèse demande un goût prononcé pour la physique expérimentale (montages fins faits sous microscope, expériences en conditions extrêmes, etc.), mais aussi une volonté d'approfondir des notions théoriques passionnantes en magnétisme et supraconductivité.

Cette thèse est financée par bourse de thèse MESRI de l'Ecole doctorale des Sciences de la Matière de Toulouse.

Contact: *William Knafo*
Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
143 avenue de Rangueil, Toulouse, France

E-mail: william.knafo@lncmi.cnrs.fr

Quelques références:

1. "Destabilization of hidden order in URu_2Si_2 under magnetic field and pressure", W. Knafo *et al.*, accepted in *Nature Physics*.
2. "Field-reentrant superconductivity close to a metamagnetic transition in the heavy-fermion superconductor UTe_2 ", G. Knebel *et al.*, [J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 063707 \(2019\)](#).
3. "Three-dimensional critical phase diagram of the Ising antiferromagnet $CeRh_2Si_2$ under intense magnetic field and pressure", W. Knafo *et al.*, [Phys. Rev. B **95**, 014411 \(2017\)](#).
4. "Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu_2Si_2 ", W. Knafo *et al.*, [Nature Commun. **7**, 13075 \(2016\)](#).
5. "Pressure cell for transport measurements under high pressure and low temperature in pulsed magnetic fields", D. Braithwaite *et al.*, [Rev. Sci. Instrum. **87**, 023907 \(2016\)](#).
6. "Heavy fermions in a high magnetic field", D. Aoki *et al.*, [C. R. Physique **14**, 53 \(2013\)](#).

Sur le web:

http://www.toulouse.lncmi.cnrs.fr/spip.php?page=rubrique&id_rubrique=8

<http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article3837>

<http://objectifnews.latribune.fr/innovation/recherche-et-developpement/2015-10-15/toulouse-capitale-mondiale-de-la-recherche-sur-les-champs-magnetiques.html>