

## Superconductivity and magnetism/Supraconductivité et magnétisme

### Foreword

Superconductivity and ferromagnetism are the two antagonistic phenomena: a superconductor expels a magnetic field, which in turn destroys the superconductivity. The microscopic theory of superconductivity has been created by J. Bardeen, L. Cooper and J. Schriffer (BCS) in 1957. Following this BCS theory the electrons due to the interaction with the crystalline lattice may form pairs, called ‘Cooper pairs’. The spins and the momenta of electrons in these ‘Cooper pairs’ are opposite. The magnetic field destroys this singlet superconductivity via the so-called orbital effect and the paramagnetic effect. The orbital effect is just the manifestation of the Lorentz force which acts in the opposite directions on the electrons of the Cooper pairs having the opposite momentum. The paramagnetic effect is related with the Zeeman energy of electron spins—the magnetic field favours the orientation of the electrons spins along the field direction. In a ferromagnet a huge internal field acts on the electron spins, thus preventing the coexistence of singlet superconductivity and ferromagnetism.

Firstly, the question if superconductivity and ferromagnetism could coexist in the same compound has been put forward theoretically by V. Ginzburg in 1957. The early experiments of B.T. Matthias in 1959 demonstrated that even a very small concentration (several percents) of rare earth impurities suffices to completely destroy the superconductivity.

The first regular superconducting single crystals with a sublattice of rare earth magnetic atoms have been discovered in 1976. They are ternary rare earth (RE) compounds,  $\text{RE}R\text{h}_4\text{B}_4$ ,  $\text{REMo}_6\text{S}_8$ , and  $\text{REMo}_6\text{Se}_8$ . Most of them are superconducting with the critical temperature  $T_c \sim 2\text{--}10$  K and magnetic transition temperature in the range 0.5–4 K. The coexistence of superconductivity and antiferromagnetism is quite peaceful and very weakly influences each other. On the other hand, the ferromagnetism is transformed into a special type of domain structure, while appearing in the superconducting phase. The physics of these magnetic superconductors is reviewed here by M. Kulić.

Recently the spectacular discovery of superconductivity in the ferromagnetic superconductors  $\text{UGe}_2$  and  $\text{URhGe}$  provided a strong evidence in favour of the existence of unconventional types of superconductivity – triplet superconductivity, which is insensitive to the paramagnetic effect. This subject as well as unconventional superconductivity in heavy fermion systems is discussed in the reviews by J. Flouquet et al. and V. Mineev.

M. Hruska and L. Bulaevskii discuss the interaction between moving vortices and magnetic excitations in magnetic superconductors resulting in peculiar I–V characteristics. S. Budko and P. Canfield review a new class of  $\text{RENi}_2\text{B}_2\text{C}$  borocarbides which presents one more interesting example of superconductivity and magnetism coexistence in 3D systems. Another situation when superconductivity in  $\text{CuO}_2$  layers coexists with a magnetic order in the adjacent  $\text{RuO}_2$  layers in ruthenocuprates is described by T. Nachtrab et al.

Though impossible in bulk compounds, the coexistence of singlet superconductivity and ferromagnetism may be easily achieved in artificially fabricated hybrid superconductor (S) – ferromagnet (F) structures. The properties of these structures where the interaction between ferromagnetism and superconductivity occurs only via magnetic field are reviewed by V. Moshchalkov et al. J. Aarts and A. Rusanov discuss the effects of magnetic switching on superconductivity in S/F bilayers and F/S/F trilayers in the opposite limit when the interaction between S and F systems is mediated by the exchange of electrons between them. The anomalous proximity effect in S/F system which leads to the damped oscillatory behaviour of the Cooper pair wave function in ferromagnet is introduced by A. Buzdin and V. Ryazanov. The interesting consequence of this phenomenon is the fabrication of the novel type of the Josephson S/F/S junction, so-called the ‘ $\pi$ -junction’. Some recent experiments with these ‘ $\pi$ -junctions’ are reviewed

by M. Aprili et al. The nonhomogeneous exchange field in the ferromagnet can generate the triplet component of the condensate. S. Bergeret et al. discuss the possible experimental manifestation of this component. Finally, T. Yokoyama and Y. Tanaka overview the proximity effect in unconventional superconductor–ferromagnet junctions.

The articles of this volume are written by the actively working world-known experts in the field. I hope that they provide a comprehensive view on the present state of the physics of superconductivity and magnetism interplay and the perspectives of the further progress in this field.

## Avant-propos

*Supraconductivité et ferromagnétisme sont deux phénomènes antagonistes, puisque tout supraconducteur expulse un champ magnétique, qui en retour détruit les propriétés supraconductrices du matériau. La théorie microscopique a été développée par J. Bardeen, L. Cooper and J. Schriffer (BCS) en 1957. Selon cette théorie, les électrons s'apparient dans un supraconducteur—appelées « paires de Cooper »—grâce à leur interaction avec la matrice cristalline. Dans chacune de ces « paires de Cooper », les deux électrons ont des spins ainsi que des impulsions opposés. Un champ magnétique appliqué sur un supraconducteur peut détruire cette supraconductivité singulet de deux façons, par l'effet orbital et par l'effet paramagnétique. L'effet orbital est simplement une manifestation de la force de Lorentz qui agit dans des directions opposées sur chaque électron de la paire. L'effet paramagnétique est du à l'énergie Zeeman des spins électroniques—en présence d'un champ magnétique, il est énergétiquement plus favorable pour les spins de s'orienter dans la direction du champ. Dans un composé ferromagnétique règne un fort champ interne dont l'influence sur les spins des électrons empêche toute coexistence entre la supraconductivité singulet et le ferromagnétisme.*

*C'est V. Ginzburg qui dès 1957 s'est intéressé théoriquement à la possible coexistence des deux ordres. Deux ans plus tard, les expériences menées par B.T. Matthias démontraient que même une très faible concentration d'impuretés de terre rare (quelques pourcents) suffit pour détruire complètement le caractère supraconducteur d'un matériau.*

*En 1976, il a été découvert que de la supraconductivité conventionnelle apparaît dans des monocristaux magnétiques de terre rare. Ces composés sont des terres rares ternaires, parmi lesquels  $RERh_4B_4$ ,  $REMo_6S_8$ , et  $REMo_6Se_8$  (RE pour Rare Earth en anglais). La plupart d'entre eux deviennent supraconducteurs à la température critique  $T_c \sim (2-10)$  K et ont une température de transition magnétique dans le domaine (0.5–4) K. La coexistence entre supraconductivité et anti-ferromagnétisme est assez naturelle et les deux ordres s'influencent très peu. Au contraire, quand la supraconductivité apparaît, la structure ferromagnétique est modifiée en une structure pseudo-ferromagnétique. M. Kucic dans sa revue détaille la physique de ces matériaux magnétiques et supraconducteurs.*

*La découverte récente et tout à fait spectaculaire du caractère supraconducteur de composés ferromagnétiques tels que  $UGe_2$  et  $URhGe$  constitue une preuve forte de l'existence de types de supraconductivité non conventionnelle. Il s'agit de la supraconductivité dite triplet, qui ne subit pas l'effet paramagnétique. J. Flouquet et al. et V. Mineev ont traité ce sujet, ainsi que la supraconductivité non conventionnelle dans les fermions lourds dans leurs revues respectives.*

*M. Hruska et L. Bulaevskii discutent l'interaction entre les vortex mobiles et les excitations magnétiques dans les supraconducteurs magnétiques dont les caractéristiques  $I-V$  sont inattendues. S. Budko et P. Canfield présentent une nouvelle classe de borocarbides  $RENi_2B_2C$  qui fournit un autre exemple de la coexistence entre supraconductivité et magnétisme dans des systèmes 3D. T. Nachtrab et al. décrivent la coexistence de couches de  $CuO_2$  avec des couches adjacentes de  $RuO_2$  dans les ruthéno-cuprates.*

*Bien que supraconductivité singulet et ferromagnétisme ne peuvent pas coexister dans un matériau massif, il est possible d'étudier leur compétition dans des structures artificielles dites hybrides constituées de couches supraconductrices (notées S) en contact avec des couches ferromagnétiques (F). V. Moshchalkov et al. exposent les propriétés de ces structures dans lesquelles l'interaction entre supraconductivité et ferromagnétisme n'est rendue possible que grâce au champ magnétique (effet orbital). J. Aarts et A. Rusanov s'intéressent aux effets de la variation de l'aimantation sur la supraconductivité dans des bicouches S/F et des tricouches F/S/F dans la limite opposée, c'est-à-dire dans la limite paramagnétique. L'effet de proximité dans les couches S/F est particulier ; il en résulte que la fonction d'onde d'une paire de Cooper non seulement diminue mais aussi oscille dans un ferromagnétique. C'est ce principe qu'introduisent A. Buzdin et V. Ryazanov. Une conséquence intéressante de ce phénomène est la fabrication d'un*

nouveau type de jonction Josephson S/F/S, appelée « jonction  $\pi$  ». M. Aprili et al. présentent quelques expériences récentes mettant en jeu cette « jonction  $\pi$  ».

La présence d'un champ d'échange inhomogène peut générer une composante triplet dans le condensât. S. Bergeret et al. discutent la possible manifestation expérimentale de cette composante. Enfin, T. Yokoyama and Y. Tanaka apporte une vue d'ensemble de l'effet de proximité dans les jonctions supraconductrices–ferromagnétiques.

Les articles de ce volume ont été écrits par des experts reconnus dans leur domaine. J'espère qu'ils fourniront aux lecteurs une vision claire de ce qu'est à l'heure actuelle la physique de l'interaction entre supraconductivité et magnétisme, ainsi que de ses perspectives dans un futur proche, et à long terme.

Alexandre Buzdin  
Institut Universitaire de France and CPMOH,  
Université Bordeaux I,  
351, cours de la Libération,  
33405 Talence,  
France

E-mail address: a.bouzdine@cpmoh.u-bordeaux1.fr (A. Buzdin)

Available online 27 January 2006