

L'interaction répulsive entre paires de Cooper au cœur de la supraconductivité à haute température critique

Trente ans après sa découverte en 1986 par Bednorz et Müller, la supraconductivité à haute température critique (HTc) demeure encore une énigme. Deux questions se posent afin de comprendre ce phénomène : quelle est l'origine physique des paires de Cooper et quel est le mécanisme de condensation ? C'est pour tenter d'y répondre que des chercheurs de l'IMPMC, en étroite collaboration avec un chercheur de l'INSP, ont proposé un nouveau modèle microscopique pour décrire la supraconductivité HTc.

À l'opposé de la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer (BCS), ce sont les interactions répulsives entre paires qui sont ici responsables de la condensation et non directement l'énergie d'appariement entre électrons. La formation des paires, intimement liée au magnétisme local, est à l'origine de la phase « pseudogap », absente dans les supraconducteurs conventionnels. Le modèle reproduit les traits essentiels du diagramme de phase observé dans les cuprates, mais aussi des nouveaux supraconducteurs à base de fer, lui conférant un caractère universel.

Dans les années 1950, trois physiciens, John Bardeen, Léon Cooper et Robert Schrieffer (prix Nobel 1972) ont expliqué avec succès les mécanismes fondamentaux à l'origine de la supraconductivité conventionnelle. Dans le cadre de leur théorie, dite « théorie BCS », l'interaction électron-phonon donne lieu à un appariement entre deux électrons de vecteurs d'onde et de spins opposés, les paires de Cooper, qui se condensent dans un état quantique cohérent. Il en résulte un état non dissipatif caractérisé par une bande d'énergie interdite, ou « gap », dans le spectre des excitations.

La supraconductivité à haute température critique apparaît curieusement dans des matériaux isolants et antiferromagnétique (AFI) en fonction du dopage qui introduit des porteurs de charge (Figure 1). Contrairement aux matériaux conventionnels, l'état du système à T_c n'est pas métallique puisqu'il existe toujours un gap au niveau de Fermi, révélé par spectroscopie tunnel ou par photo-émission. Il persiste jusqu'à une température beaucoup plus élevée T^* , laquelle dépend fortement du dopage (Figure 1). L'origine physique de cette phase, dénommée phase « pseudogap », est toujours très débattue au sein de la communauté.

A basse température, le spectre d'excitation des quasiparticules a une forme bien

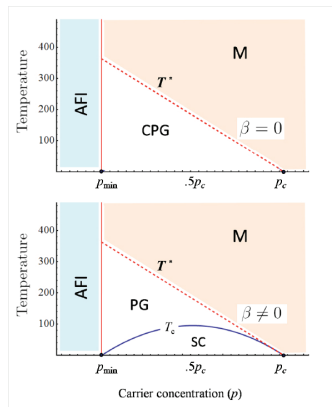


Figure 1

Diagramme de phase dans le plan température – dopage (p) proposé dans le modèle de paires en interaction (PPI).

Planche supérieure : le diagramme dans le cas de paires sans interaction ($\beta = 0$) : un état virtuel (Verre de Cooper, CPG) existe en dessous de T^ et juste au-delà de la phase anti-ferromagnétique.*

Planche inférieure : Lorsque l'interaction entre paires est branchée ($\beta \neq 0$) les phases supraconductrices (SC) et pseudogap (PG) sont séparées par la courbe critique en forme de cloche.

différente de celle observée dans les matériaux conventionnels : un creux (ou « dip ») est visible au delà du gap (voir le spectre en rouge, Figure 2). En analogie directe avec le couplage électron-phonon, celui-ci a été majoritairement attribué à l'existence d'un couplage fort des électrons avec un mode collectif d'origine magnétique, qui expliquerait aussi la formation des paires. Dans le cadre de cette interprétation, le pseudogap n'aurait aucun lien direct avec la supraconductivité. C'est ce paradigme, largement dominant au sein de la communauté, que nous remettons en cause dans ce travail.

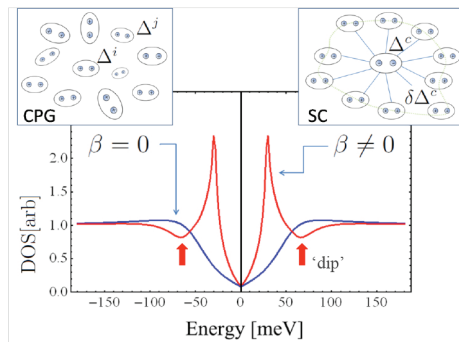


Figure 2

Spectre d'excitation obtenu dans le cadre de notre modèle pour la phase incohérente de verre de paire de Cooper où les interactions entre paires sont nulles (courbe bleue, $\beta=0$) et pour la phase supraconductrice (courbe rouge, $\beta \neq 0$).

On note en particulier un creux visible au-delà du gap (« dip »), qui est observé dans les expériences de spectroscopie tunnel et par photo-émission.

Le modèle que nous proposons relie de façon cohérente l'état supraconducteur et la mystérieuse phase « pseudogap », apparaissant lorsque l'état supraconducteur est détruit. Notre approche s'appuie principalement sur l'idée que des paires « préformées » existent à cause de l'antiferromagnétisme local en dessous d'une température T^* bien supérieure à la température critique.

En l'absence d'interaction entre paires (Figure 1, cas $\beta = 0$) le matériau est dans une phase incohérente et non supraconductrice. Dans cet état, les paires ont des énergies distribuées de façon stochastique autour d'une valeur moyenne. Nous appelons cet état virtuel le « verre de paires de Cooper » (CPG pour « Cooper-pair glass »). Lorsque l'interaction paire-paire (PPI) prend une valeur finie ($\beta \neq 0$), l'état virtuel CPG se sépare en deux phases bien distinctes, la phase supraconductrice (SC) et la phase pseudogap (PG), séparées l'une de l'autre par une courbe critique en forme de cloche, comme l'illustre la Figure 1. Nos études de la transition en fonction de la température montrent que la transition de phase est gouvernée par la statistique de Bose-Einstein.

Les calculs conduisent naturellement à de nouveaux objets quantiques dont les propriétés s'écartent de la vision classique « BCS » de l'état supraconducteur. Nous démontrons l'existence de nouvelles excitations, les « super-quasiparticules », qui résultent d'un couplage non conventionnel des électrons avec les paires excitées hors du condensat. Le spectre d'excitation théorique qui en découle reproduit fidèlement les mesures expérimentales obtenues dans les pnictides et les cuprates, comme l'illustre la figure 2. De surcroît, nous montrons que le scénario du couplage quasiparti-

cule-magnon, proposé par de nombreux auteurs comme origine du « dip », n'est pas compatible avec les résultats expérimentaux.

Notre théorie s'applique également avec succès aux supraconducteurs à base de fer, ce qui confère au modèle un caractère universel. Nos travaux en cours montrent qu'une seule échelle d'énergie, l'énergie d'échange magnétique J , pilote l'ensemble des propriétés physiques de ces matériaux.

Références

From Cooper-pair glass to unconventional superconductivity: a unified approach to cuprates and pnictides, William Sacks, Alain Mauger, and Yves Noat, Solid State Comm. 257, 1 (2017).

Universal spectral signatures in pnictides and cuprates: the role of quasiparticle-pair coupling William Sacks, Alain Mauger, and Yves Noat, J. Phys. Condens. Mat. (2017).

Contacts

William Sacks : William.Sacks@upmc.fr

Alain Mauger : Alain.Mauger@impmc.jussieu.fr