

AOÛT 2016

MATERIAUX QUANTIQUES

CHANGEMENT DE DENSITÉ DE PORTEURS AU POINT CRITIQUE PSEUDOGAP DANS LES SUPRACONDUCTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE

OBJET DE L'ÉTUDE

Cette étude vise à explorer la nature du point critique de la phase pseudogap des supraconducteurs à haute température à base d'oxydes de cuivre, à la limite près du zéro absolu de température atteinte par l'application d'un champ magnétique très puissant.

CONTEXTE

La supraconductivité est la capacité qu'ont certains matériaux de transporter l'électricité sans perte, une propriété spectaculaire aux possibilités transformatrices dans des domaines aussi différents que le transport de l'énergie, les communications et la médecine. Toutefois, jusqu'à présent, ce phénomène s'entête à se manifester seulement à basse température, habituellement des dizaines de degrés au-dessus du zéro absolu. Il s'agit maintenant de voir si la supraconductivité à température ambiante est possible. Certains matériaux à base de cuivre et d'oxygène (cuprates) manifestent la supraconductivité jusqu'à environ -100 °C.

Dans les supraconducteurs traditionnels, comme l'aluminium, la supraconductivité est causée par le réseau ionique qui vibre de façon telle à entraîner les électrons à s'apparier par attraction. Ces paires d'électrons occupent un état de faible énergie bien en dessous de leur premier état excité et cette lacune énergétique interdit les mécanismes de diffusion habituels qui donnent lieu à la résistance électrique dans les métaux. On sait aussi que les paires d'électrons entraînent la supraconductivité à haute température dans les cuprates, mais la force physique qui les lie est d'une origine différente et actuellement inconnue.

Cerner la nature de cette force se révèle complexe en grande partie par le fait que les cuprates manifestent une variété d'états électroniques mêlés les uns aux autres et avec la supraconductivité, et dont la nature même demeure un mystère. Il y a principalement la phase pseudogap, une propriété importante et universelle des cuprates observée expérimentalement comme une

suppression partielle de la densité électronique des états. La phase pseudogap se manifeste à une température caractéristique T^* qui est initialement bien supérieure à la température critique T_c pour la supraconductivité, mais elle est graduellement supprimée par dopage, chutant sous la T_c , habituellement près du moment où elle est la plus élevée, disparaissant finalement complètement à un dopage p^* (voir Fig. 1a).

Comme la phase pseudogap et la supraconductivité coexistent et semblent si étroitement liées, il est largement reconnu dans la communauté que peu importe ce qui cause la phase pseudogap doit aussi participer activement au mécanisme d'appariement des électrons. On a proposé de nombreux scénarios mettant en jeu soit des paires d'électrons préformées, ou une variété d'ordres de charges, d'orbitales ou de magnétisme, mais aucun n'a offert de description satisfaisante jusqu'à présent. Le pseudogap occupe aussi une position centrale dans le diagramme de phase, reliant l'état métallique à dopage élevé et la phase isolante près de $p = 0$. Conséquemment, pour avoir une compréhension globale et unifiée du diagramme de phase des cuprates, il faut assurément trouver une solution au problème du pseudogap.

Depuis sa découverte, il y a plus de deux décennies, le pseudogap a fait l'objet d'études expérimentales. Mais aucune expérience ne sondait en détail ce qui se passe au point d'origine du pseudogap à p^* , au zéro absolu de température sur l'axe de dopage. Voilà précisément ce qu'a réalisé cette étude.

RÉSULTATS

Pour accéder au zéro absolu, il faut supprimer la phase de supraconductivité, ce qui peut se faire par l'application d'un champ magnétique. Toutefois, la supraconductivité des cuprates est notoirement robuste et il faut donc avoir recours à des champs magnétiques plus d'un million de fois plus puissants que celui de la Terre. Pour ce faire, il faut un laboratoire qui se consacre pleinement au domaine des champs magnétiques intenses comme celui de Toulouse (France) où la plupart des expériences se sont déroulées. Le champ magnétique joue un autre rôle clé : il détecte les électrons de façon telle à produire une tension électrique transversale par rapport à la direction dans laquelle il se propage. Il s'agit de l'effet Hall qui procure une mesure directe de la densité des électrons, ou n_H . En mesurant l'effet Hall à basse température en présence d'un champ magnétique intense sur les spécimens les plus propres du cuprate $YBa_2Cu_3O_y$, et en répétant

l'expérience à des valeurs de dopage différentes, ou p , l'équipe de l'ICRA a observé une baisse soudaine et dramatique de six fois de n_H à p^* , comme il est illustré à la Figure 1 b. Voilà la première démonstration claire qu'une transition de phase électronique fondamentale se produit en entrant dans le pseudogap à p^* . De plus, cela révèle une réaction clé entre la densité de porteurs mesurée totale n_H et le dopage p , où n_H passe de $n_H = 1 + p$ au-dessus de p^* , à $n_H = p$ en dessous. Selon la théorie standard, on s'attend à $n_H = 1 + p$ dans l'état métallique des cuprates. Ce $n_H = p$ à l'intérieur de la phase pseudogap démontre qu'un électron par atome de cuivre est perdu, ce qui appelle une explication différente. Un résultat connexe important de l'étude fut de démontrer que le pseudogap et l'onde de densité de charge se produisent à des dopages nettement différents (voir Fig. 1A) et, en conséquence, ceux-ci n'ont pas la même origine.

MÉTHODES

Cette étude a vu le jour grâce à des percées récentes dans les technologies de pointe des aimants au Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI), le centre national français des champs magnétiques intenses à Toulouse (France), le port d'attache de Cyril Proust, membre du programme Matériaux quantiques de l'ICRA. Dans les dernières années, les chercheurs du LNCMI ont augmenté l'intensité de leur champ maximal de 65 T à 90 T, justement le saut quantique dont nous avons besoin pour sonder la région de dopage autour de p^* . Mais cela ne suffit pas. Des champs magnétiques d'une

telle intensité ne sont pas permanents, ils fonctionnent pendant environ 0,1 seconde, le temps requis pour qu'une grande batterie de condensateurs se décharge complètement dans un électroaimant conservé à la température de l'azote liquide. Voilà un environnement extrême sur le plan de la vibration et de l'échelle temporelle qui exige un découplage mécanique sophistiqué entre l'expérience et l'aimant, ainsi que des systèmes électroniques ultrarapides et à faible bruit pour l'acquisition des données, tout en gardant les échantillons au froid, à quelques degrés au-dessus du zéro absolu.

RÉPERCUSSIONS

La baisse de la densité de porteurs à p^* signale une profonde transformation de la structure électronique des cuprates. Le fait que $n_H = p$ à l'intérieur de la phase pseudogap est un indice qui restreint considérablement le nombre de mécanismes possibles. Dans le scénario le plus simple, le pseudogap est une phase de l'antiferromagnétisme où il y a alternance dans l'orientation des spins aux sites de cuivre. La structure magnétique brise la symétrie du réseau cristallin et font se plier les niveaux d'énergie électronique de sorte qu'un électron par atome de cuivre devient localisé. Un scénario plus exotique met en jeu des paires couplées par antiferromagnétisme, connues sous le nom de liaisons de valence résonante, un état qui ne brise pas

la symétrie translationnelle, mais qui semble tout de même reproduire la chute observée de la densité de porteurs. Il existe d'autres scénarios mettant en jeu, par exemple, un réseau de petites boucles de courant ou une forme d'ordonnement d'orbitales, mais il faudra réexaminer ces possibilités à la lumière de la présente étude. Néanmoins, la fenêtre que viennent d'ouvrir ces résultats nous permet aussi de rehausser notre compréhension de certaines des propriétés physiques énigmatiques des cuprates, comme le fait que leur résistivité électrique, auparavant interprétée comme une transition métal-à-isolant, peut maintenant s'expliquer par une transition métal-à-métal avec des densités de porteurs différentes.

RÉFÉRENCE

Change of carrier density at the pseudogap critical point of a cuprate superconductor
S. Badoux et coll., Nature 531, 210 (2016)

FIGURES

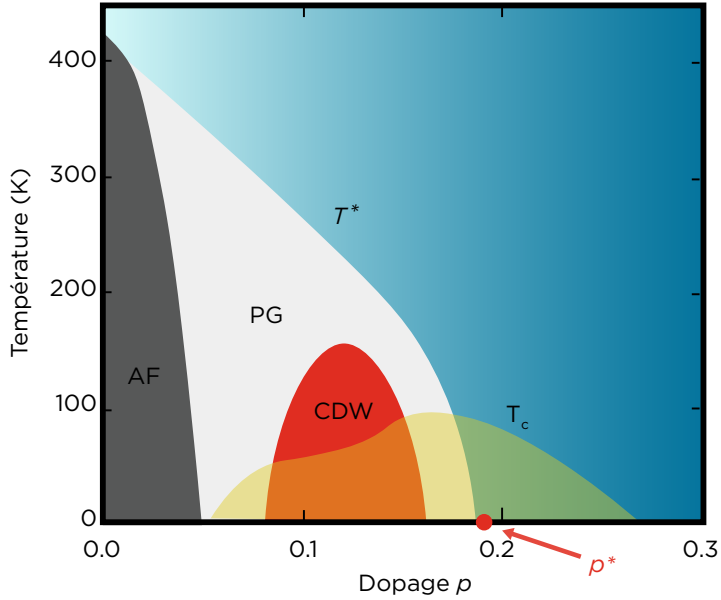


Figure 1a : Diagramme de phase en fonction de la température et du dopage du supraconducteur à base de cuprates YBa₂Cu₃O_y, illustrant la phase magnétique isolante (AF; gris foncé), la phase pseudogap en dessous de T* (PG; gris pâle), la phase d'onde de densité de charge (CDW; rose), et la supraconductivité en dessous de T_c (jaune pâle). La phase pseudogap prend fin au dopage critique ρ^* , illustré par le point rouge.

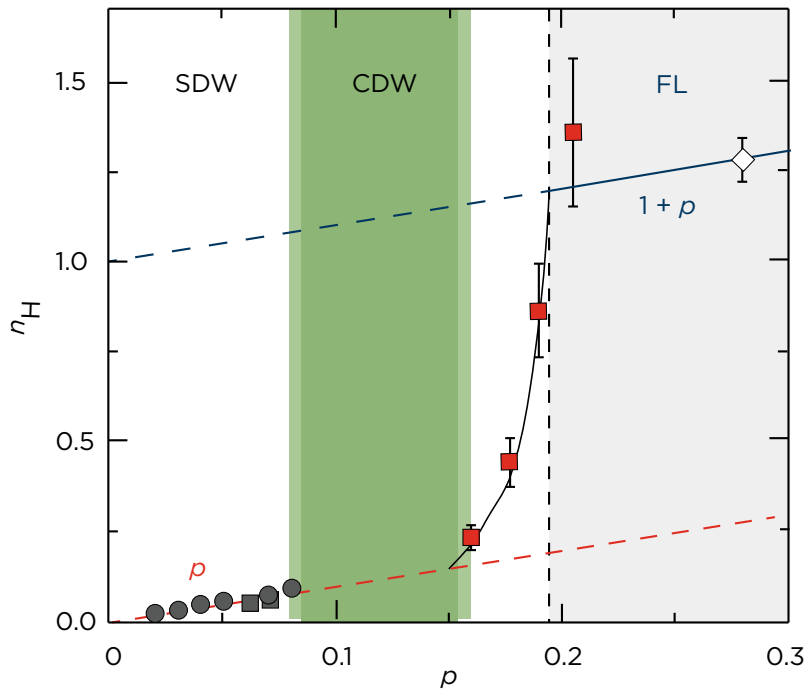


Figure 1b : Densité de porteurs de l'effet Hall, n_H , mesurée à basse température dans le supraconducteur à base de cuprates YBa₂Cu₃O_y (données illustrées par des carrés rouges), démontrant une diminution de six fois de la densité à ρ^* , de $n_H = 1 + \rho$ à $n_H = \rho$.

ICRA

Centre MaRS, tour Ouest
661, av. University, bureau 505
Toronto (Ontario) M5G 1M1

www.icra.ca