

Un premier pas vers la compréhension de la supraconductivité à haute température dans les oxydes de cuivre

En étudiant le diagramme de phase de l'oxyde de cuivre $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$, des chercheurs ont démontré l'existence d'un lien d'origine microscopique entre l'état supraconducteur et la redistribution des charges dans le cristal (ordre de charge), qui se généralise à tous les oxydes de cuivre supraconducteurs.

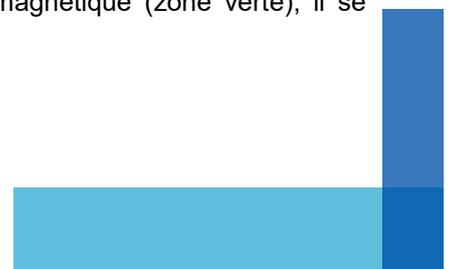
Les supraconducteurs transportent le courant électrique sans dissiper d'énergie et ils ne peuvent pas être pénétrés par un champ magnétique. Il en découle de nombreuses applications, comme le transport de l'électricité sans résistance et la lévitation de mobiles (trains, surf). Seulement, la supraconductivité se manifeste à des températures très basses. Le plomb est supraconducteur en dessous de 7 K (-266 °C) et le diborure de magnésium (MgB_2) en dessous de 40 K (-233 °C). En revanche, la température de transition supraconductrice du cuprate $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ peut atteindre 133 K (-140 °C) (figure 1c). Comprendre le mécanisme à l'origine de la supraconductivité dans les oxydes de cuivre appelés cuprates est donc un enjeu majeur pour espérer élaborer des supraconducteurs à des températures terrestres.

Des chercheurs du laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, CNRS/Univ. Paris Diderot), en collaboration avec le Laboratoire de physique des solides (LPS, CNRS/Univ. Paris-Sud) et le Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS), sont parvenus, en étudiant la diffusion inélastique de la lumière sur les charges (effet Raman électronique), à distinguer les signaux spectroscopiques des ordres supraconducteur et de charge au sein de la phase pseudogap dans le cuprate $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$.

Pour la première fois, les échelles d'énergie associées aux ordres supraconducteurs et de charge ont pu être détectées simultanément grâce à une astuce expérimentale qui a consisté à minimiser l'influence de la phase de pseudogap qui, sinon, aurait masqué leur observation. Les chercheurs ont ainsi pu traquer les échelles d'énergies caractéristiques de l'ordre supraconducteur et de charge sur une large portion du diagramme de phase, grâce au contrôle du nombre de porteurs de charges dans les cristaux. Ils ont montré que ces énergies sont intimement liées : elles ont quasiment les mêmes valeurs et suivent la même évolution en fonction du nombre de porteurs de charges (figure 2b). Ceci suggère que l'ordre supraconducteur et de charge ont la même origine microscopique. L'échelle d'énergie du pseudogap a, elle aussi, la même évolution en dopage même si son énergie est plus élevée. Ceci conforte l'hypothèse que les ordres supraconducteurs, de charge et la phase de pseudogap sont intimement reliés.

Pour parvenir à ce résultat, les chercheurs ont travaillé sur du cuprate de composition chimique : $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$, dont la structure est représentée sur la figure 2a. Il a pu être synthétisée sous la forme de petits cristaux (figure 1b) de plusieurs centaines de microns de côté par deux chercheuses du Service de physique de l'état condensé (SPEC, CEA/CNRS). Leurs surfaces extrêmement propres et lisses permettent de les explorer optiquement.

Le diagramme de phase des cuprates révèle que le mécanisme à l'origine de la supraconductivité est différent de celui des métaux traditionnels, ou de leurs alliages comme le plomb ou le diborure de magnésium. En effet, en augmentant le nombre de porteurs de charges qui transportent le courant dans un cuprate, son état fondamental électronique est profondément modifié : d'un isolant antiferromagnétique (zone verte), il se transforme en un métal supraconducteur (zone rosée) (figure 2a).



Pour une concentration de porteurs correspondant à un dopage de 12 % (dopage assuré par l'ajout d'atomes d'oxygène dans les plans d'atomes de mercure cf. figure 1a), l'ordre supraconducteur (en rosé dans la figure 2a) coexiste avec un ordre de charge (en bleu pastel) à basse température, ordre caractérisé par une redistribution des charges des électrons, différente de celle attendue habituellement, qui suit l'agencement des atomes du cristal. Ces deux ordres se développent à l'intérieur d'une troisième phase dite de pseudogap, encore mal comprise. Pour étudier l'ordre supraconducteur dans cet enchevêtrement d'états, il faut identifier les propriétés individuelles de chaque ordre et le type d'interaction qu'il développe avec les autres, et ainsi identifier les coopérations ou compétitions (par exemple, l'ordre de charge augmente-t-il ou diminue-t-il la supraconductivité ?). Dans ce but, il est nécessaire de développer des techniques expérimentales performantes comme les spectroscopies de diffusion de neutrons, de la lumière (Raman, infra-rouge, rayons X) ou encore de résonance magnétique nucléaire. Du côté théorique, il faut exploiter toute la puissance du numérique pour mettre en œuvre de nouvelles approches théoriques telles que la cDMFT (cluster Dynamcis Mean field theory).

Ces travaux ouvrent une perspective nouvelle pour la compréhension du diagramme de phase des cuprates. Les ordres supraconducteurs et de charge sont les deux états que peut choisir le cuprate à basse température dans la phase de pseudogap. Cette dernière reste à ce jour incomprise, mais les chercheurs viennent de faire une avancée remarquable en découvrant expérimentalement qu'il existe un lien, encore à identifier, qui unit les ordres supraconducteurs et de charge au sein du pseudogap. C'est un premier pas vers la compréhension du mécanisme à l'origine de la supraconductivité dans les cuprates.

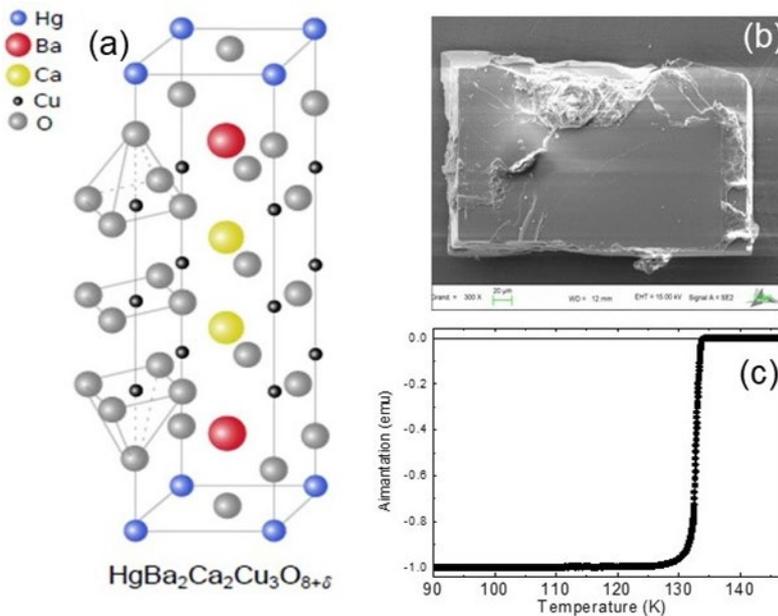


Figure 1 : (a) Structure du cuprate $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$; (b) Un monocristal de $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$, synthétisé au SPEC ; (c) Transition supraconductrice à 133 K mesurée par susceptibilité magnétique.

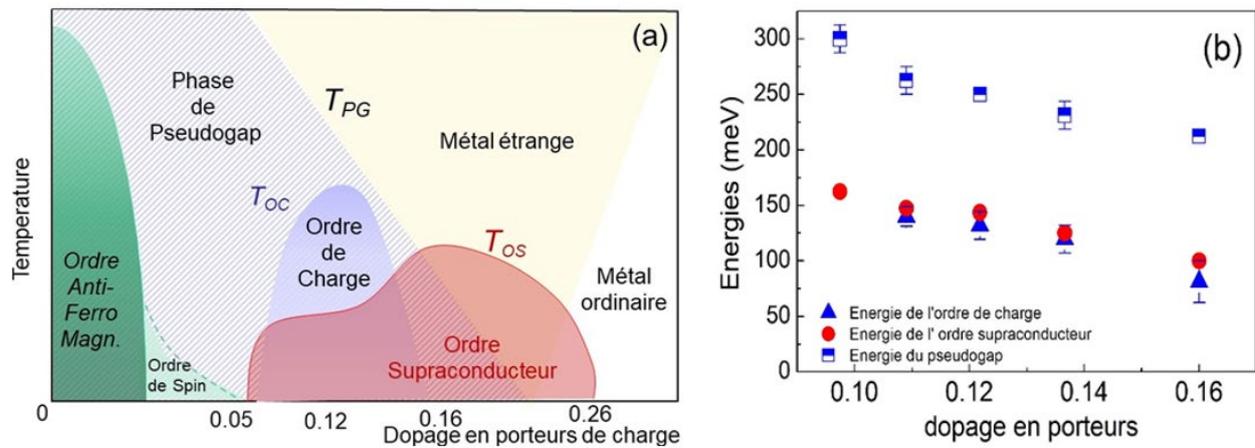


Figure 2 : (a) Diagramme de phase générique des cuprates ; (b) Evolution des échelles d'énergies des ordres de charge, supraconducteur et du pseudogap.

Bibliographie

Intimate link between charge density wave, pseudogap and superconducting energy scales in cuprates, B. Loret, N. Auvray, Y. Gallais, M. Cazayous, A. Forget, D. Colson, M.-H. Julien, I. Paul, M. Civelli et A. Sacuto, *Nature Physics*, le 22 avril 2019. DOI: 10.1038/s41567-019-0509-5

L'article scientifique est disponible sur la base d'archives ouvertes [ArXiv](https://arxiv.org/abs/1904.09881)

Contacts

Chercheur MPQ | Alain Sacuto | alain.sacuto@univ-paris-diderot.fr

Communication INP | inp.com@cnrs.fr