

Supraconductivité à haute température dans les cuprates et les organiques: Où en est-on?

André-Marie Tremblay
Département de physique
Université de Sherbrooke
Québec, Canada J1K 2R1

Les progrès dans la qualité des matériaux et le raffinement des méthodes expérimentales au cours des deux dernières décennies ont permis aux chercheurs d'atteindre un consensus sur plusieurs aspects du diagramme de phase des cuprates supraconducteurs à haute température critique. Les méthodes théoriques se sont aussi développées considérablement durant cette période. Dans cette série de quatre leçons, je donne un aperçu des résultats expérimentaux pour ensuite me concentrer sur deux classes de méthodes théoriques et sur ce qu'elles nous apprennent sur la physique des supraconducteurs à haute température et sur d'autres matériaux fortement corrélés, tel que les supraconducteurs organiques en couche de la famille des BEDT. J'espère transmettre l'idée que nous commençons à atteindre un certain accord entre théorie et expérience.

Les leçons dureront une heure et demie, mais elles seront généralement divisées en deux parties avec une courte pause entre les deux. La première partie de chaque exposé sera largement accessible et la deuxième, particulièrement pour les deux dernières leçons, sera un peu plus formelle, développant certains aspects plus spécialisés de la première partie correspondante.

I. Défis et quelques réponses : un aperçu (biaisé) du domaine

Les succès les plus retentissants de la physique du solide reposent sur deux piliers : La théorie des bandes et la théorie BCS de la supraconductivité médiée par les phonons. Néanmoins, ces théories n'ont pas réussi à expliquer les phases normales et supraconductrices des cuprates et des supraconducteurs organiques en couche. Dans cette première leçon, j'identifie d'abord les difficultés théoriques suggérées par la structure et ces matériaux et par leurs diagrammes de phase. Je discute des observations qui démontrent qu'une transition métal –isolant induite par les interactions (transition dite de Mott), contrôle la physique. J'expose ensuite le modèle d'Hubbard à une bande et démontre qu'il explique non seulement l'antiferromagnétisme observé dans ces composés, mais aussi le transfert de poids spectral. Ceci permet de mieux définir ce qu'est une phase de la matière et pourquoi il y a des différences entre corrélations faibles et corrélations fortes dans les phases antiferromagnétiques et supraconductrices. Après une brève revue des méthodes théoriques, j'aborde plus en détail la question du diagramme de phases. Quelles sont les trois grandes classes de mécanismes pour le pseudogap? Pourquoi y a-t-il deux dômes dans le diagramme de phase des cuprates? Qu'est-ce que les méthodes théoriques expliquent au moins qualitativement? Je termine avec quelques brefs commentaires sur les fermions lourds et le rôle des points critiques quantiques pour la supraconductivité.

II. Isolants de Mott dopés : La supraconductivité fortement corrélée et sa phase normale

Ici j'approfondis ce que nous avons appris sur le modèle d'Hubbard pour les cuprates et pour les supraconducteurs en couches, en utilisant principalement les approches basées sur les généralisations de la théorie de champ moyen dynamique. Je commence avec l'état normal et le pseudogap, démontrant qu'il peut y avoir une transition de premier ordre à basse température entre une phase pseudogap et un métal normal. Les changements graduels de comportements à haute température peuvent être reliés à cette transition de premier ordre et à la ligne de Widom qui y est associée. Dans la deuxième partie, je passe à la supraconductivité. Je discute de ce qu'il y a de particulier au sujet de la supraconductivité fortement corrélée en la contrastant avec la théorie BCS. Je discute de la rigidité suprafluide selon l'axe c et de la spectroscopie tunnel par balayage. Je termine avec une discussion du mécanisme, du rôle du retard et des questions ouvertes.

III. Supraconductivité induite par les fluctuations de spin : Les supraconducteurs dopés aux électrons et l'approche auto-cohérente à deux particules

Quelques-unes des premières idées sur la supraconductivité de type d médiée par les fluctuations antiferromagnétiques sont nées d'une collaboration entre Orsay et Sherbrooke dans les années 80. Dans cette leçon, j'explique l'approche auto-cohérente à deux particules pour le modèle d'Hubbard, développée dans les années 90. Cette approche est non-perturbative mais contrôlée par des règles de somme et des critères de cohérence. Je démontre d'abord comment l'approche fonctionne et je présente des comparaisons avec des calculs étalon dans l'état normal. Je discute comment certaines expériences dans l'état normal des cuprates dopés aux électrons, incluant le pseudogap, peuvent être expliquées par cette approche. Je conclus par la supraconductivité médiée par les fluctuations antiferromagnétiques, expliquant les conditions optimales pour l'appariement. Dans la deuxième partie, je passe à une approche plus formelle et je discute de certaines questions ouvertes.

IV. Généralisations de la théorie de champ moyen dynamique et solveurs améliorés

La théorie de champ moyen dynamique (DMFT de son acronyme anglais), développée en grande partie à Paris, est la base de plusieurs des résultats importants présentés dans cette série de leçons. Ici je rappelle d'abord l'intuition physique et les concepts qui sont derrière la DMFT et les généralisations qui sont nécessaires pour travailler à basse dimension. Je présente les avantages et les désavantages de plusieurs versions de cette approche, à partir de la théorie des perturbations sur amas, en passant par l'approximation de l'amas variationnel, la théorie de champ moyen dynamique sur amas et l'approximation de l'amas dynamique. Je discute brièvement de différentes versions de ce qu'on appelle les « solveurs d'impuretés », de la diagonalisation exacte au Monte Carlo Quantique en temps continu. Dans la deuxième partie de cette présentation, j'introduis de façon plus formelle la fonctionnelle de Luttinger-Ward et je démontre comment plusieurs approches mentionnées ci-haut peuvent s'en déduire. J'explique quelques détails des solveurs, discute brièvement le problème du prolongement analytique et je termine avec des questions ouvertes.