

## Conductivité et statistique, une approche différente est-elle possible?

XAVIER OUDET

Laboratoire de Magnétisme et d'Optique de l'Université de Versailles, C.N.R.S.,  
45 Avenue des Etats-Unis, 78035 Versailles, France.

**RÉSUMÉ.** L'existence de défauts structuraux comme sources des électrons de conduction dans les supraconducteurs à  $T_c$  élevée, justifie dans l'étude de leurs propriétés qui dépendent de la température, l'utilisation d'une distribution statistique de leur énergie thermique proche de celle d'un gaz idéal pour lequel les atomes sont supposés être quasi-indépendants. Alors la question se pose de l'utilité d'introduire des propriétés quantiques spécifiques aux solides dans l'étude thermodynamique statistique de leurs propriétés électriques. Il est proposé que dans les conducteurs métalliques comme dans les supraconducteurs et les semiconducteurs, en dehors du passage du courant, les électrons de conduction sont liés à un atome par un gap.

*ABSTRACT.* The existence of structural defects as sources of conduction electrons in the high- $T_c$  superconductors justified, in the study of the properties as a function of the temperature, the use of a statistical distribution of their thermal energy close to that of an ideal gas where the atoms are supposed to be quasi-independent. Then this put the question of the need to introduce specific quantum property to the solids in the statistical thermodynamically study of their electrical properties. It is proposed that in metallic conductors, as in superconductors and semiconductors, when there is no current flow, the conduction electrons are bound to an atom with an energy gap. (An English translation is available on request.)

### 1. Introduction.

Au début de ce siècle les électrons de conduction furent supposés libres. Cette hypothèse est naturelle quand le courant est établi. Toutefois il est également important de savoir décrire les électrons de conduction lorsqu'il n'y a pas de courant. Dans les solides il y a de fortes corrélations entre les positions des différents électrons de conduction qui minimisent leurs interactions de répulsion. Une solution possible pour décrire ces corrélations est de supposer que chaque électron de conduction, à basse température et en l'absence de courant, appartient à un atome. Cette hypothèse implique qu'il y a un gap, ou barrière de potentiel, qui localise les électrons de conduction lorsqu'il n'y a pas d'interaction externe pour les libérer. Par suite cette approche soulève différentes questions quant à la distribution statistique de l'énergie thermique des électrons de conduction qu'il faut utiliser pour décrire la conductivité électrique en fonction de la température  $T$ . Cette étude a pour but de montrer comment cette conception des électrons de conduction ouvre la porte sur une compréhension nouvelle pour comprendre plusieurs aspects de la conductivité électrique, parmi lesquels, la transition entre l'état conducteur et supraconducteur.

### 2. Le désordre et les électrons de conduction

Le solide est une sorte de molécule géante [1]. Quand on considère les échanges d'énergie thermique entre le solide et le gaz qui l'entoure, il y a lieu de considérer le solide comme un tout. Ce comportement comme un tout vient des fortes corrélations entre les atomes, qui pour un cristal sont reproduites périodiquement. Ces corrélations impliquent que la chaleur spécifique tend vers zéro avec  $T$ . Dans cette approche les électrons de conduction dans un solide sont localisés à basse température et la question est de comprendre comment le courant électrique peut prendre place. Dans les cuprates supraconducteurs, la localisation des électrons de conduction dans l'état normal peut être considérée puisqu'un pseudo gap est observé [2-4]. Par ailleurs il est également établi que des défauts de structure sont nécessaires pour observer la conductivité et la supraconductivité dans ces composés. Ces défauts peuvent être par exemple un excès ou un défaut d'oxygène, une substitution de La par Sr dans  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ , du désordre entre les axes  $a$  et  $b$  pour les chaînes d'atomes d'oxygène et de cuivre dans  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  [5-10]. Dans un travail récent [11], nous avons montré que cette propriété, l'existence de défauts structuraux, conduit à l'hypothèse que ce sont ces défauts qui permettent à

quelques électrons de conduction de réellement participer au courant électrique. Ces électrons sont excités électriquement lorsque le courant est établi. Les autres électrons analogues quantiques sont localisés dans l'état supraconducteur et peuvent être excités thermiquement pour participer au courant électrique [11].

Le fait que les électrons de conduction soient originaires des défauts structuraux a une conséquence simple, ils sont distribués au hasard et peuvent être supposés quasi-indépendants, avec de très faibles interactions entre eux comme pour les atomes d'un gaz. Cette propriété suggère, dans l'étude de leurs propriétés en fonction de la température, l'utilisation d'une distribution statistique de leur énergie thermique proche de celle d'un gaz idéal pour lequel les atomes sont supposés être quasi-indépendants. Il se pose alors la question de la nécessité d'introduire des propriétés quantiques particulières pour décrire la distribution de l'énergie thermique des électrons de conduction. Cette question est peut être plus évidente si le nombre des électrons de conduction est faible, c'est à dire quand le nombre des défauts structuraux est faible. Rappelons alors que du point de vue statistique le principe d'exclusion de Pauli peut être remplacé par le fait que deux particules ne peuvent pas occuper la même place dès que l'on considère leurs volumes [12,13]. Par ailleurs le quantum de flux trouve une explication avec l'étude des propriétés magnétiques dans le cadre du modèle de Dirac [11,14] et de ce fait ne nécessite pas le mécanisme de paire. Ainsi la propriété des électrons de conduction d'être liés à des défauts structuraux semble autoriser l'utilisation d'une distribution statistique de leur énergie thermique déterminée avec une approche voisine de celle utilisée par Boltzmann pour les gaz parfaits [12,13]. Nous avons déjà montré que cette distribution permet le calcul de la conductivité à partir de [15,16] et également celui de la susceptibilité paramagnétique des atomes porteurs d'un moment magnétique [17].

### 3. L'état métallique

Les propriétés semi-conductrices sont aussi le résultat de défauts. Par suite, les mêmes conclusions sont valides pour cette classe de corps. Par ailleurs le métal ytterbium est connu pour être semi-conducteur à basse température et haute pression (au voisinage de 15 kbars [18,19]), et SmB<sub>6</sub> [20, 21] pour être un semi-conducteur à gap faible, de telle sorte qu'il ressemble à un métal à haute température (dans le voisinage de 300K). Ces faits suggèrent qu'un métal peut être considéré comme un semi-conducteur à gap faible ou un supraconducteur ayant trop de défauts structuraux pour manifester des propriétés supraconductrices. Dans cette approche, la distribution statistique de l'énergie thermique en fonction de sa valeur

moyenne permet de décrire les propriétés électriques de ces corps [15,16]. Le gap métallique des électrons de conduction autres que ceux provenant des défauts structuraux, leurs permet d'être excités thermiquement avec l'augmentation de la température, ce qui engendre un saut de chaleur spécifique qui est le reflet de ce gap [22, 23]. Par suite, la transition de l'état conducteur à l'état supraconducteur apparaît comme une condensation, sur leur état atomique, des électrons de conduction excités thermiquement.

En terminant je tiens à remercier le Professeur François Varret, pour nos fructueuses discussions.

### Références

- [1] Julg A., "Crystals as giant molecules", Lecture Notes in Chemistry, Springer-Verlag, Berlin, vol. 8, 1978.
- [2] Ding H., Yokoya T., Campuzano J.C., Takahashi T., Randerias M., Norman M.R., Mochiku T., Kadowaki K. and Giapintzakis J., Nature, 382, 51-54, (1996).
- [3] Loeser A.G., Dessau D.S. and Shen Z.-X., Physica C, 263, 208-213, (1996).
- [4] Marshall D.S. et al., Phys. Rev. Lett., 76, 4841-4844, (1996).
- [5] Yoshida H. and Atobe K., Physica C, 156, 225-229, (1988).
- [6] Sleight W., Physics Today, 24-30, June (1991).
- [7] Jorgensen J.D., Physics Today, 34-58, June (1991).
- [8] Raveau B., Physics Today, 53-58, October (1992).
- [9] Michel et al., Physica C 178, 29-36, (1991).
- [10] Jorgensen J.D. et al., J. Superconductivity, 7, 145-149, (1994).
- [11] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 22, 409-421, (1997). In French an English translation is available from the author.
- [12] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 12, 11-27 (1987).
- [13] Oudet X., Theoretical and Experimental Approaches to High-Tc and Conventional Superconductivity. Nova Science Publishers, Inc., 87-100, (1991).
- [14] Oudet X. and Lochak G., J. Mag. Mag. Mat. 65, 99-122 (1987).
- [15] Oudet X., Ann. Fondation Louis de Broglie, 14, 1-26 (1989).
- [16] Oudet X., In: Theoretical and Experimental Approaches to High-Tc and Conventional Superconductivity. Nova Science Publishers, Inc., 101-119, (1991).
- [17] Oudet X., J. Mag. Mag. Mat. 98, 298-306 and 307-332, (1991).
- [18] Souers P.C. and Jura G., Science 140, 481-483, 3 May (1963).
- [19] Rieux M., Thèse, Université Paris-Sud, (1974).
- [20] Menth A., Buehler E., and Geballe T.H., Physical Rev. Lett., 22, 295-297, (1969).
- [21] Oudet X., International Conference on Valence instabilities and related narrow band phenomena, November 11-13 (1976), pages 525-7, Plenum Publishing corporation (1977).
- [22] Kitazawa K. et al., Japan J. Appl. Phys., 26, L748-L750 (1988).
- [23] Laegreid T., Fossheim K., Sandvold E. and Julsrud S., Nature 330, 637-638, (1987).