

氏 名	小池上 繁
学位(専攻分野)	博士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2150 号
学位授与の日付	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Strong Correlation Effects in the d-p Model (d-p モデルにおける強相関効果)
論文調査委員	(主 査) 教授 山田耕作 教授 石黒武彦 教授 大見哲巨

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は高温超伝導の発現機構を微視的なモデルである d-p 模型に基づいて研究した論文である。高温超伝導は 1986 年に発見され、それ以後、実験・理論両面から世界中で活発な研究が続けられてきた。きれいな試料が作成され、精密なデータが提出され、実験的にはその現象がかなり明らかにされてきた。

理論研究では依然として正常状態そのものをめぐって、基本的に異なる立場があり、超伝導の発現機構に関しても多様な理論がある。実験的には反強磁性的なスピンの揺らぎが観測されており、それと関連づけた理論が多い。このような現状において申請論文は高温超伝導の基礎である銅原子と酸素原子から構成される 2 次元面が積み重ねられた構造を忠実に取り上げ、それに基づいて超伝導の発現機構を検討したものである。

この銅原子の d 軌道と酸素の p 軌道よりなる電子状態を記述するハミルトニアンは d-p モデルと呼ばれているが、この模型で多体的な相互作用を表すのは同一原子内の d 電子間のクーロン反発力のみである。したがって、この項無しには超伝導は発現しない。申請論文は銅酸素面におけるこの電子間相互作用の効果を詳細に調べたものである。

Fluctuation Exchange Approximation (FLEX) と呼ばれるスピンの揺らぎを記述する近似を用い、そのスピン揺らぎの電子の自己エネルギーへの寄与を計算する。申請者の公表論文 (1) ではスピンの揺らぎより生じる引力を与える自己エネルギーも取り入れた積分方程式を解き、d-波の超伝導が実現することを導いた。d-電子間の相互作用による自己エネルギーは、準粒子を減衰させる一方で、反強磁性的な揺らぎを通じて d-波的な電子対を形成する引力を導く。このような計算をセルフコンシステントに行うことによって、高ドーピング領域から最適ドーピング領域までの超伝導転移温度を計算し、実験と一致する結果を得た。

さらにドーピング量を減らした領域は低ドーピング領域と呼ばれるが、ドーピングを減らし、反強磁性相に近づくると転移温度 T_c が低下するが、FLEX では逆に増大するのみである。これはスピンの揺らぎを中心にして取り扱った近似が低ドーピング側では不十分であることを示している。この低ドーピング側では超伝導揺らぎが大きく、電荷の揺らぎを記述する項も取り入れ、セルフコンシステントに解かなければならない。このような試みは世界中でもほとんどなされておらず、申請者は公表論文 (2) において困難な数値計算を行い、擬ギャップの発生する温度の高温側から、その付近までの解を得ることに成功した。

その結果によると、スピンの揺らぎによって生じた超伝導揺らぎが擬ギャップを形成し、フェルミ面での電子の状態密度を下げる。そのことによって、超伝導転移温度が下がることが示された。同時にこの超伝導揺らぎより生じた擬ギャップは反強磁性スピン揺らぎの低周波部分を抑え、反強磁性への転移が抑制されることが示された。周波数の高い部分に対しては超伝導揺らぎによる抑制効果は小さく反強磁性揺らぎによる引力は変わらず、超伝導が最終的に実現することが示された。

論文審査の結果の要旨

申請論文は現在まで13年余にわたって研究されてきた困難な理論課題に対して、基本的な進歩をもたらした重要な論文である。現実の銅酸化物高温超伝導体の最も一般的なモデルであるd-Pモデルに対してFLEX近似を適用して、超伝導機構を議論したのはこの論文が最初である。現在ではわが国でもかなり普及し、FLEX近似を適用するグループが増えたが、ほとんど一人でプログラムを作り、解析した申請論文は理論の発展、とりわけフェルミ液体論に基づく定量的な計算を可能にした点で意義が大きい。

この理論計算によって、高ドーピング側から、最適ドーピング領域までの超伝導転移温度を計算し、実験結果を説明することが出来た。後にわが国でも申請者達や他の人達によって同じ方法で有機導体の超伝導転移温度が計算され、銅酸化物とある種の有機導体が同じ機構で超伝導を発現していることが示された。この意味でも申請論文の計算は超伝導理論の発展に重要な役割を果たした。

さらに重要なのは、公表論文(2)の内容である。この論文では超伝導揺らぎとスピン揺らぎが人為的な近似無しに対等に結合され、その両方の揺らぎを入れてセルフコンシステントに解を求めたもので、世界中でもこのように正確な計算は行われていない。現実には反強磁性揺らぎの強い系は反強磁性になることが多い。にもかかわらず、高温超伝導体に見られるように超伝導と言う別の相に転移する理由はなにか。この疑問に答えるためには超伝導揺らぎと反強磁性揺らぎの結合した系を忠実に調べる以外にない。このような計算の必要性は広く認識されているが、実行の見通しがないために滞っていたものである。申請者は正確さを損なわないで計算可能な形に導いたもので、数式の変形、物理的考察、計算機による数値計算力の3点にわたってその力を発揮したものである。このような計算によって明らかになったことは反強磁性揺らぎによって、準粒子間の引力が強められる。それによって、クーパー対は形成されるが、準2次元系であるために超伝導転移が熱揺らぎで抑えられ、擬ギャップが形成され、超伝導転移温度が下がる。一方、擬ギャップの形成は反強磁性揺らぎの遅い成分を抑制し、反強磁性の長距離秩序を抑制する。このように遅い反強磁性揺らぎが抑制される一方で、引力に寄与する周波数のスピン揺らぎは抑制されず、強い電子対間の引力は継続される。こうして温度の低下と共に超伝導が実現し、反強磁性は揺らぎとしてのみ継続する。

以上が申請論文によって、明らかにされた高温超伝導実現のシナリオである。この申請論文以前では反強磁性と超伝導揺らぎの競合、協力の関係が推測されるのみであった。それを計算で示したことは極めて価値の高い結果である。ここに銅酸化物で超伝導が起こる重要な鍵が見出されたわけである。

以上のような重要な研究結果を有する申請論文は学位論文として十分価値があることを確認した。さらに、1月17日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、十分な学識を有することを確認し、合格と認めた。