

論文の要旨

氏名 舟木 博志

論文題目 Pairing Interactions Mediated by Ferromagnetic Magnons

—Odd- and Even-Frequency Superconductivities—

(強磁性マグノンが媒介する対形成相互作用

—奇周波数及び偶周波数超伝導—)

本論文において我々は、強磁性マグノンが媒介する対形成相互作用について研究を行い、その結果、この対形成相互作用によって、奇周波数と偶周波数、どちらの対称性の超伝導も生じることを明らかにしました。また、物理的なパラメータを系統的に変化させ、計算を行うことで、どのような条件で奇周波数超伝導が有利になるかも明らかにしました。

従来、強磁性と超伝導は競合すると考えられてきましたが、2000年に S.S.Saxena 達が UGe_2 の加圧下で強磁性と超伝導がミクロに共存する相を発見し、大きな注目を集めました。それ以降も URhGe , UCoGe という化合物において、強磁性と超伝導の共存相が発見されました。これらの強磁性超伝導体の発見に触発され、理論的にも様々な研究がなされてきました。その中でも我々は強磁性ゆらぎを媒介とした引力による対形成機構に着目し、この機構による超伝導の性質を解明したいと考えました。磁気ゆらぎの取り扱い方にも様々な方法がありますが、Fay と Appel は 1980 年に、強磁性ゆらぎを RPA 理論で取り扱う方法を用いて、強磁性ゆらぎが媒介する超伝導機構を研究しました。一方で、反強磁性の場合に、Shimahara は磁気ゆらぎをマグノンとして扱う方法を用いて、マグノンを媒介とした対形成機構について研究を行いました。

これらの背景をもとに、我々はなるべくシンプルなモデルに基づいて、強磁性ゆらぎを媒介とした対形成機構について詳細に調べるといった目的のため、拡張近藤格子模型という遍歴電子と局在スピンから成るモデルを採用しました。そして強磁性ゆらぎをマグノンとして扱う方法を用いることにしました。この方法の利点は、強磁性ゆらぎと超伝導を担う電子を分離することで、取り扱いが簡単になる点です。このとき、電子-マグノン相互作用は電子-フォノン相互作用と似た扱い方ができますが、マグノン特融の性質もあります。その一つは、マグノンはフォノンと違ってスピン-1 を運ぶという点です。これによってマグノンを吸収或いは放出する電子のスピンは、著しく制限されます。もう一つの特有の性質は、一つの電子が、マグノンの吸収と放出を同時に行うことができる点です。これによって以下で説明する 2 マグノン交換相互作用や三角プロセス相互作用が導かれます。我々はファイマンダイアグラムを用いた摂動論を使って、マグノンが媒介する電子間の有効相互作用を導きました。この際、強い交換場によってスピンの

向きが反平行な電子対の形成は抑制されるので、スピンの向きが平行な電子対のみを考えます。すると1 マグノン交換相互作用はマグノンがスピンを運ぶことを反映し、スピン平行な電子対には働かないことが分かります。従って、2 マグノン交換相互作用がスピン平行な電子対に働く最低次の項となります。しかしこの相互作用はマグノンの粒子数に比例するので、絶対零度では0になってしまいます。従って我々は三次の項まで調べる必要があり、これを三角プロセス相互作用と呼ぶことにします。この相互作用が絶対零度でスピン平行な電子対に働く、最低次の項となります。

我々は、上記の有効相互作用による超伝導感受率を、準一次元系において、コンピュータを用いて数値的に計算しました。そして、超伝導の転移温度と秩序変数の対称性を求めました。この際、我々は波数依存性だけでなく、周波数依存性も正確に取り入れた計算を行い、奇周波数超伝導の可能性も考慮しました。奇周波数超伝導は1974年、Berezinskiiによって初めて提案された超伝導状態であり、 $\Delta(\mathbf{k}, \omega_n) = -\Delta(\mathbf{k}, -\omega_n)$ と、秩序変数が周波数の反転に対して奇である超伝導状態のことです。近年では強磁性体と超伝導体の接合系を中心に活発に研究されており、いくつかのモデルにおいてもその出現の可能性が議論されています。強磁性超伝導体における奇周波数超伝導に関連した研究については Matsumoto 達による研究がありますが、彼らはスピン反平行な電子対を仮定しており、従って、奇周波数と偶周波数の混成状態について調べています。それに対し、本研究ではスピン平行な電子対を考えており、混成状態は現れません。また、彼らはフォノンを媒介とした対形成機構を調べており、我々の研究とは目的が異なります。

温度や、近藤結合の強さ、異方性、電子密度などの物理的なパラメーターを系統的に変化させ、計算を行い、多くの相図を作成した結果、マグノンを媒介とした対形成機構による超伝導の様々な性質が明らかになりました。まず、マグノンを媒介とした有効相互作用が、強い温度依存性を持つことを反映し、温度を下げていくと、超伝導状態から正常状態に一旦戻り、さらに温度を下げると再び超伝導状態に相転移するという、リエントラントな振る舞いを発見しました。また、強磁性超伝導体において奇周波数超伝導が生じ得ることを明らかにしました。強磁性ゆらぎを媒介とした引力による対形成機構に基づいて、奇周波数超伝導が出現し得ることを示したのは本研究が初です。2 マグノン相互作用は常に奇周波数超伝導に有利に働きますが、三角プロセス相互作用は近藤結合の符号によって奇周波数と偶周波数のどちらの超伝導を引き起こすかが変化することも突き止めました。また、局在スピン間の相互作用は異方性が弱いほど、どちらの対称性の超伝導にも有利であり、電子密度はハーフフィリングから離れるほど奇周波数超伝導に有利だということが分かりました。