

強い斥力を持つ重い電子系化合物での オンサイト引力による超伝導

竹中 崇了 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 takenaka@qpm.k.u-tokyo.ac.jp〉

芝内 孝禎 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp〉

常盤 欣文 〈アウグスブルグ大学 yoshifumi.tokiwa@physik.uni-augsburg.de〉

松田 祐司 〈京都大学大学院理学研究科 matsuda@scphys.kyoto-u.ac.jp〉

超伝導は物質が見せる最も劇的な現象の一つであり、カマリン・オンネスによる発見以来多くの研究者を惹きつけてやまない。超伝導は2個の電子が対を作り、ボース・アインシュタイン凝縮に類似した量子凝縮を起こすことによって生じる相転移現象である。ほとんどの超伝導体での対形成は、電子格子相互作用、つまり格子を組む正イオンの振動による分極を媒介することにより起こる。この場合、同じ原子の位置（オンサイト）で引力が生じる。超伝導転移によりフェルミ面における電子励起スペクトラムにエネルギーギャップが生じるが、超伝導ギャップ関数の波数依存性は対形成の相互作用と密接な関係にある。一般にオンサイト引力の場合、フェルミ面のどの方向でも有限のギャップが等方的に開き、ギャップ関数が符号を変えない s 波となる。

一方で、電子間にはたらく強いクーロン斥力が無視できず、電子が強い相関を持って動き回る強相関電子系とよばれる物質群がある。その代表格が $3d$ 軌道に電子を持つ遷移金属物質である銅酸化物と鉄系化合物、そして f 軌道に電子を持つ希土類やアクチノイド物質で重い電子系とよばれる化合物である。このような系で発現する超伝導現象は、高温超伝導、量子相転移、非フェルミ液体、磁気秩序などの他秩序と超伝導の共存と競合、といった凝縮系物理学における主要テーマを数多く内包する。これらの強相関電子系では、強いクーロン斥力のためオンサイト引力で超伝導電子対を組むことができないと一般に考えられ、磁気揺らぎを媒介として対形成が起こると考えられてきた。この場合、超伝導ギャップ関数は大きな波数依存性を持ち、符号反転が生

じることから、フェルミ面のある方向で超伝導ギャップが消失したノード構造（ゼロ点）が多くの場合現れる。

これらの非従来型超伝導研究の先駆けとなったのが、1979年の $CeCu_2Si_2$ における超伝導の発見である。この系は、 f 電子と伝導電子の混成によって起こる近藤効果により非常に狭いバンドが形成され、その結果強い電子間斥力により、電子の有効質量が自由電子よりも一十倍近く重くなった電子状態が低温で実現し、超伝導に転移する。この物質は、磁気秩序相からわずかにずれたところに位置しており、臨界的な磁気揺らぎを反映して、様々な物理量の温度依存性が従来の金属とは大きく異なる、いわゆる非フェルミ液体的振る舞いを示す。さらに、超伝導ギャップ構造は長い間、非従来型のノードを持つものだと考えられており、対形成の機構は磁気揺らぎによる非従来型のものであるとされてきた。最近我々は、比熱、熱伝導度、磁場侵入長、電子線照射の実験を行い、多角的にこの物質の超伝導状態を詳細に研究した結果、超伝導ギャップ関数はフェルミ面のどの位置にもノードを持たないだけでなく、符号反転も伴わない従来型のものであることを明らかにした。

このことは電子間の強いクーロン斥力にも関わらず、オンサイト引力により超伝導が生じることが可能であることを意味しており、「磁気揺らぎを媒介とした非従来型超伝導」という長い間信じられてきた常識に再考を促すものである。非従来型超伝導という一大分野を切り開いた最初の重い電子系超伝導体 $CeCu_2Si_2$ は、今再び超伝導研究に新たな展開をもたらそうとしている。

—Keywords—

重い電子系超伝導体：

ランタノイドやアクチノイドを含む化合物の一部では、近藤効果による f 電子と伝導電子の混成(c - f 混成)によって低温で非常にエネルギー幅の狭いバンドを形成する。バンド内の電子間に働く強いクーロン斥力による電子相関効果の結果、自由電子の数百倍から千倍にも及び有効質量を持つ重い電子の金属状態が出現する。この重い電子はしばしば超伝導転移を示す。このような物質群を総称して重い電子系超伝導体と呼ぶ。このとき電子間に強いクーロン斥力が働くことから、従来型の超伝導体における、電子格子相互作用によるオンサイトでの超伝導電子対形成とは異なる機構で超伝導が実現していると考えられている。

磁場侵入長：

超伝導体を示す完全反磁性の状態（マイスナー効果）では、超伝導体の内部では完全に磁場が排除されているものの、超伝導体表面から数十～数千ナノメートルのごく限られた領域では磁場がわずかに侵入しており、この磁場が入り込める長さが磁場侵入長と呼ばれる。磁場侵入長の二乗の逆数は超伝導電子の数に比例しており、この温度依存性は超伝導ギャップ関数の構造によって大きく異なる。そのため、磁場侵入長の温度依存性を調べることで超伝導電子対の対称性に関する有力な情報が得られる。