

奇周波数超伝導—同時刻で消える奇妙なペア—

星野晋太郎 〈東京大学大学院総合文化研究科〉

楠瀬博明 〈明治大学理工学部〉

低温で電気抵抗が突如として消失する超伝導現象は、その発見から今日に至るまで多くの人々の心を惹きつけている。この現象の本質は1957年に提出されたBardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) の理論によって説明され、物理学全体に影響を与える重要な概念となっている。例えば、2012年から翌年にかけて標準理論の最後のピース、ヒッグス粒子が発見されたことは記憶に新しいが、その着想にBCS理論が多大な影響を与えたことをご存じの方も多いただろう。超伝導の研究分野では、ヒッグス場の役割を果たす電子ペア凝縮体の多様性が大きな興味の1つであり、その中でもひときわ風変わりな超伝導状態が本稿の主題である。

超伝導は、格子振動などによって媒介される引力によって結びつけられた電子のペア(クーパー対)が位相をそろえて量子凝縮した状態と考えられている。ヒッグス粒子のスピンはゼロと同定されたようだが、BCS理論で想定されたクーパー対も等方的な(*s*波)スピンゼロ(1重項)状態である。この状態は元素で言えば軌道やスピンなどの自由度をもたない希ガス(閉殻構造)にあたる。周期表には内部自由度をもつ遷移元素や希土類元素もあり、多彩な物性の源になっている。

局所的に強い斥力が働く系では、粒子はお互いに避け合って空間的に離れたクーパー対ができやすく、その波動関数は2つの粒子の相対座標の原点に節をもつ(異方的超伝導)。実際、銅酸化物高温超伝導体や液体³Heでは*d*波1重項や*p*波3重項のペアが実現していると考えられている。では、空間的にではなく時間的に避け合ったペアは可能だろうか? このような新しいペアは1974年に液体³Heを対象として

Berezinskiiによって提案された。そのペア波動関数は時間方向に節をもつ奇関数であり、そのフーリエ変換は奇周波数成分によって特徴づけられるため、奇周波数超伝導と呼ばれている。ペアの結びつきが時間とともに振動し、同時刻では消えてしまうという奇妙な状態である。

奇周波数超伝導という物質の新しい量子状態には様々な驚きが潜んでいると思われる。これまでに理論・実験両方の観点から議論されている。しかしながら、この時間方向に「異方的」なペアに対して従来の超伝導理論の処方箋を適用すると、熱力学的に不安定で、かつ従来とは逆符号の電磁応答を示すなどの非物理的な解が得られることが指摘され、研究者を悩ませてきた。

本稿では超伝導体に対して通常仮定される2つの条件を個別に見直すことにより、熱力学的不安定性の問題が解決されることを示す。第一に見直す点は、ペアを特徴づけるギャップ関数に対して暗に仮定されている「エルミート性」である。これにより、奇周波数超伝導は熱力学的に安定な状態となり、正しい電磁応答係数を得ることがができる。また第二の解決策は、「エルミート性」の仮定はそのままに、クーパー対の重心運動量がゼロという通常用いられる条件を見直すことである。実際に、局所電子相関を厳密に取り扱う手法を用いて重い電子系のモデルを解析することで、有限の重心運動量をもつ奇周波数クーパー対が安定に存在することが示される。

このように最近の研究の進展によって、奇周波数超伝導の本質的な理解を妨げていた問題点が解決されるとともに、その特異な物性が具体的なモデル計算により明らかになりつつある。

—Keywords—

BCS理論:

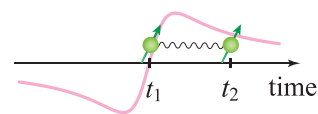
超伝導の基礎理論。1957年に初めて微視的な理論を提出したBardeen, Cooper, Schriefferの三人の頭文字をとってBCS理論と呼ばれる。電子間に有効的な引力が働くとき、電子対(クーパー対)が形成される。クーパー対が凝縮することで超伝導が生じることを、多体変分波動関数を用いて鮮やかに示した。

ギャップ関数:

クーパー対の凝縮は、対演算子の期待値(ギャップ関数)によって特徴づけられる。ギャップ関数の方位依存性に着目することで、超伝導状態を*s*波、*p*波、*d*波、…などに分類できる。通常、有効的な引力が等方的であるため*s*波超伝導が実現される。しかし、銅酸化物高温超伝導体といった強く相互作用する粒子系では、異方的なクーパー対凝縮が生じる。

超伝導体の電磁応答:

超伝導体に外部から静磁場を加えたとき、超伝導体の表面で誘導電流が生じて外部磁場を打ち消し、超伝導体内部の磁場をゼロにする。この電磁応答をマイスナー効果と呼ぶ。超伝導状態が巨視的なコヒーレンスを獲得したことを示す重要な特性の一つである。



奇の時間依存性をもつクーパー対の概念図。

本記事の長さは通常の最近の研究記事の規程を超過しておりますが、編集委員会の判断によりこのまま掲載しています。