

多軌道・多自由度系超伝導体の対称性とノード構造

野本 拓也 〈東京大学大学院工学系研究科 nomoto@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

服部 一匡 〈首都大学東京理工学研究科 hattori@tmu.ac.jp〉

池田 浩章 〈立命館大学理工学部 ikedah@fc.ritsumeai.ac.jp〉

金属を冷やしていくと電気抵抗が突然消失する。この劇的な現象の本質が、クーパーペアと呼ばれる電子対の形成とその巨視的位相コヒーレンスの獲得にある、という事実が解明されたのは、今から約60年も前のことである。位相の対称性の破れとそれに伴う励起ギャップの形成が超伝導の本質であるという見方は、銅酸化物をはじめ、数多くの非従来型超伝導が発見された現在でも変わっていない。一方、これら非従来型の超伝導体ではクーパーペアの形成機構が従来型とは異なっており、位相の対称性に加えて回転などの結晶の対称性も破れる場合がある。対称性の破れ方は、クーパーペアの持つ変換性によって分類され（超伝導対称性）、クーパーペアの形成機構やノードと呼ばれるゼロエネルギー状態の構造と密接に関係している。超伝導対称性の同定は、新しい非従来型超伝導体を理解するための第一歩であると言えるだろう。

基本的に一粒子励起にギャップを有する超伝導体において、ノードの存在は低エネルギーの励起構造を劇的に変化させる。したがって、ノード構造をプローブとして超伝導対称性を探ることが可能であり、この際、超伝導対称性とノード構造の対応関係を把握しておくことが重要である。これは比較的初期の研究で系統的に調べられ、これまでに発見された非従来型超伝導体の解析において中心的な役割を担ってきた。しかしながら、近年の精密測定では、従来の理論では偶然や例外に分類されるノード構造が数多く見つかっており、この対応関係を整理し直す要請が高まっている。

例えば、奇パリティ超伝導体の数少ない例である UPt_3 では、スピン軌道相互作用のため、対称性に守られたラインノードは

存在しないはずである（Blountの定理）が、実験的にはその存在が示唆されている。これに対し、その実現が有力視されている超伝導対称性においては、定理の例外が存在することが示されている。また、我々の第一原理計算に基づく研究では、そのような対称性に属し、フェルミ面毎にノード構造が異なる特異な波数依存性を示すギャップ構造が得られており、その中には垂直方向に1つだけラインノードが入る従来不可能と思われていたノードも含まれる。

我々は、このように従来の理論の例外と考えられるノード構造を系統的に調べるため、軌道や副格子自由度そしてスピン軌道相互作用を陽に考慮した分類を行った。特に軌道自由度に関する結果として、六方晶系における角運動量 $j_z = \pm 3/2$ の自由度を持つ電子間のクーパーペアが、従来知られていたものとは大きく異なる構造を持ち、これが UPt_3 で示唆される垂直ラインノードを自然に説明できることを示した。

また、副格子自由度は系が螺旋やグライドといった部分並進の対称性を持つとき、特に重要となる。我々は磁気秩序と超伝導との共存系においてこのようなノードの分類を行い、特に UPd_2Al_3 や $UCoGe$ で実験的に示唆されているラインノードがこれらの対称性によって守られた特殊なラインノードであることを示した。実は、この2つの系は従来型の s 波超伝導が結晶の対称性だけから禁止される、あるいはラインノードの存在がその超伝導対称性によらず決定されるといった稀有な例になっている。これらの結果は実験的に対称性を決定する上で重要となるだけでなく、近年のトポロジに基づいたノードの分類などとも関連して、現在進行中の興味深い問題である。

—Keywords—

非従来型超伝導体：

従来型超伝導のBCS理論では、電子-格子相互作用に起因した有効な引力による電子対（クーパーペア）の形成および電子対の凝縮による電荷の $U(1)$ 対称性の自発的破れにより超伝導現象が説明される。近年では、引力機構の異なる超伝導体や $U(1)$ 以外の対称性も自発的に破れる超伝導体が知られており、これらは非従来型超伝導体とよばれている。

奇パリティ超伝導体：

空間反転対称性を持つ系においては、空間反転に対して符号を変えない偶パリティ超伝導か符号が反転する奇パリティ超伝導のどちらかが実現する。これまでに発見された超伝導体のほとんどは偶パリティ超伝導体であるが、奇パリティ超伝導体は d ベクトルとよばれるスピン自由度を持ち、多くの興味深い物性を示すことが知られている。

ノード構造：

通常の超伝導体は、波数空間の全ての領域で一粒子励起にギャップを持つが、一部の超伝導体ではある領域でギャップが閉じている場合がある。このような領域をノードと呼び、その形状によってポイントノード、ラインノードなどと呼ばれる。超伝導対称性によっては、必ず存在しなくてはならないノードも存在し、それらは対称性に守られたノードと呼ばれる。

Blountの定理：

時間・空間反転対称性を持ち、スピン軌道相互作用のある系で奇パリティ超伝導が実現するとき、対称性に守られたラインノードは存在しないことが知られており、Blountの定理と呼ばれている。ただし、この定理は結晶の対称性が螺旋やグライドなどの部分並進の対称性を含むような場合には成り立たない。