

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	角田 峻太郎
論文題目	Modern classification theory of superconducting gap nodes (超伝導ギャップノードの現代的な分類理論)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年の物性物理学では、電荷とスピンに加えて軌道、副格子などの要素を有する大自由度電子系が重要な研究対象となっている。角田峻太郎氏は大自由度電子系の超伝導に関する理論研究を行った。特に、物質の対称性を簡便に記述する群論と近年著しい進歩を遂げたトポロジカル相の理論を相補的に活用して、超伝導体の一粒子励起を表す超伝導ギャップ構造の分類を行った。</p> <p>超伝導の実験研究では、低エネルギー励起の測定により超伝導ギャップのノード構造を決定する手法がしばしば用いられる。ノード構造は超伝導の秩序変数や発現機構と密接に関係しているため、実験と理論を比較する上でノード構造の理解は極めて重要である。これまでの研究では、Sigrist-Ueda らによって完成された群論的分類学 [M. Sigrist and K. Ueda, Rev. Mod. Phys. (1991)] が長く用いられてきたが、それが適用不能な例や不正確な結果を与える例があることが近年知られるようになった。角田氏がそれらの問題点を解決し、精密な分類結果を与えた成果が本論文にまとめられている。角田氏は、秩序変数に加えて電子波動関数の対称性を考慮した表現論を用い、さらに点群ではなく空間群対称性を用いることで、超伝導ギャップ構造の厳密な群論的分類を行った。その結果、対称性に保護された超伝導ギャップのノード構造をほぼ網羅する分類結果を得た。さらに、そのノード構造が全てトポロジカルに保護されていることを示し、該当するトポロジカル数を同定した。</p> <p>本論文の主要な成果は、【1】ブリルアンゾーンの対称面上での分類学【2】ブリルアンゾーンの対称線上での分類学、の2つの部分からなる。以下において、これらを項目に分けて記述する。</p> <p>【1】ブリルアンゾーンの対称面上での超伝導ギャップの分類</p> <p>Sigrist-Ueda 流の分類学の例外として、非共型空間群を有する物質におけるラインノードの存在が知られていた [M. R. Norman, Phys. Rev. B (1995)]。角田氏は、非共型空間群に守られたラインノードが現れる一般的な条件を示し、230ある全ての空間群について、また常磁性体・強磁性体・反強磁性体の全ての場合について、ラインノードが現れる超伝導対称性を特定した。また、クリフォード代数の拡大問題の解と組み合わせ、一部の磁性体では非共型空間群対称性が破れてもラインノードが安定になることを示した。</p> <p>【2】ブリルアンゾーンの対称線上での超伝導ギャップの分類</p> <p>従来の研究において、超伝導ギャップのノード構造は電子波動関数の対称性に依存しないと考えられてきた。しかし、この研究において、角田氏は超伝導ギャップ構造が電子波動関数の対称性に依存する例を発見した。特に、3回あるいは6回の回転軸上をフェルミ面が横切る場合には電子の角運動量J_zを考慮することで完全な分類が得られることを示した。そして、ウィグナー直交判定条件を用いた解析法により、全てのノードがトポロジーにより保護されていることを示した。角田氏は該当する超伝導体としてUPt₃の超伝導ギャップ構造を詳細に議論した。また他の対象物質としてUBe₁₃, SrPtAs, MoS₂, PrOs₄Sb₁₂について考察を行った。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

異方的超伝導およびエキゾチック超伝導の研究分野では、一粒子励起ギャップの波数依存性、すなわち超伝導ギャップ構造の理解が重要である。超伝導体のギャップ構造は一粒子状態密度に反映するため、様々な熱的・磁氣的・電氣的測定により観測することができる。そのため、超伝導分野の実験研究では、ギャップ構造を同定し、そこから秩序変数の対称性と超伝導発現機構を明らかにする戦略が長く採用されてきた。物理学の両輪である理論と実験が相補的に進歩するうえで、超伝導体のギャップ構造を正確に知ることができる理論の構築は極めて重要な課題である。

従来理論研究として、Sigríst-Ueda らによって完成された群論的分類学が良く知られている。これは、超伝導の秩序変数を結晶点群によって分類し、そこから超伝導ギャップ構造を推定するものである。しかし、「推定する」と書いたように、これは厳密な結果ではない。実際、Sigríst-Ueda 理論では記述できない超伝導ギャップ構造の例が幾つか知られている。空間群の情報や磁性が考慮されていないことや電子波動関数の対称性が考慮されていないことなどが問題の主要因である。

申請者である角田氏は、現代的な理論に基づいて超伝導ギャップ構造を再検討し、精密な分類結果を得た。その内容を以下において項目に分けて説明する。

【1】ブリルアンゾーンの対称面上での超伝導ギャップの分類

Sigríst-Ueda 理論では示せないギャップ構造の例として、非共型空間群を有する物質においてブリルアンゾーン境界面に現れるラインノードが示されていた。角田氏は、この例を含めた全ての対称性に保護されたラインノードを分類した。常磁性体・強磁性体・反強磁性体の全ての場合について、ラインノードが現れる空間群対称性と超伝導対称性の組み合わせを示した。これにより、対称性に守られたラインノードの分類は完成したと考えられる。角田氏は自身が作成した分類表に基づいて、 Sr_2IrO_4 , UCoGe , CrAs などで考えられる超伝導ギャップ構造を議論した。今後の超伝導研究において、角田氏の分類表が活用されると期待される。

【2】ブリルアンゾーンの対称線上での超伝導ギャップの分類

従来研究においては、超伝導ギャップ構造を決定する要因として、超伝導秩序変数の対称性とフェルミ面のトポロジーが考えられてきた。角田氏はこれらに加えて電子波動関数の対称性が決定的な役割をする例があることを示した。ブリルアンゾーンの対称線上では電子の角運動量 J_z が良い量子数になっていることに着目し、その量子数を含む分類表を作成した。そして、3回あるいは6回の回転対称性がある物質では超伝導ギャップ構造が角運動量 J_z に依存することを示した。さらに、分類表に現れる全てのノードがトポロジーにより保護されていることを示した。角田氏は分類結果に基づいて UPt_3 の超伝導ギャップ構造を詳細に議論し、 J_z によってワイル点の構造が異なることも示した。他に、 UBe_{13} , SrPtAs , MoS_2 , $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ についても考察を行った。これらの結果は従来異方的超伝導研究に再検討を迫るものであり、今後の超伝導研究において基礎となるものである。

申請者の研究成果は超伝導体のギャップ構造について従来なかった精密な理解を与えるものであり、今後の超伝導研究における基礎となるものである。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年12月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。