

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	足立 景亮
論文題目	Fluctuation and dimensionality effects on superconductivity in the BCS-BEC crossover regime (BCS-BECクロスオーバー域にある超伝導へのゆらぎと次元性の効果)		
(論文内容の要旨)			
<p>超伝導は電子間の引力が原因で起こる典型的なフェルミ粒子多体系における相転移現象である。しかし、これまで知られているほぼ全ての超伝導体ではその超伝導転移温度がフェルミ縮退温度に比べてはるかに低く、電子間引力が十分に弱いという仮定が妥当であり、その超伝導は約60年前に発表されたBardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論の枠内で理解できた。しかし、十分に引力が強い状況での超伝導は電子対束縛状態であるボゾンの Bose-Einstein凝縮 (BEC)となるため、引力の強さを徐々に強めるとBCS 描像での超伝導からBECに相当する超伝導に連続的に変化することが30年以上前に理論的に予言されており、該当する物質の発見が待たれていた。そして近年、このBCS-BEC クロスオーバー域に近い超伝導が鉄系超伝導物質の一つである FeSe やその関連物質で実現していると考えられている。電子密度が低い系での強い超伝導揺らぎ効果というのがBCS-BEC クロスオーバー域に近い超伝導体の特徴であるが、実際、磁場下のFeSeの磁気応答は異常に強い超伝揺らぎの存在を示した。ただ、BCS-BEC クロスオーバー域の系に適用できる磁場下の超伝導揺らぎの理論はこれまで全く整備されておらず、上記の現象の理解のためには新たな理論の進展が必要であった。</p> <p>今回、足立景亮氏は FeSe における磁場下の超伝導転移現象を念頭にして、BCS-BEC クロスオーバー域に近い超伝導体における超伝導揺らぎの理論の構築を目指した。そのために足立氏はまず、BCS描像で理解できる超伝導体での超伝導揺らぎによる磁化に適用できる理論公式を導出した。磁化は一樣磁場下での超伝導性を測る主要な物理量であるが、揺らぎ間の相互作用 (モード間結合) が本質的となる強い揺らぎを有する系に適用できる理論手法はこれまで確立されていなかった。この成果により、多くの銅酸化物高温超伝導体で見られた、磁場が十分高い領域で磁化 - 温度曲線が交差する (クロッシングと呼ばれる) 特徴が自然に説明できるようになった。この若干技巧的な題材をクリアした後、足立氏は BCS-BEC クロスオーバー域に近い系にこの手法を拡張した。BCS 超伝導ではフェルミ粒子の化学ポテンシャルのフェルミエネルギーからのずれを無視するが、一般には粒子数一定で化学ポテンシャルの変化を含むアンサンブルを用いる必要がある。上記の形で理論を拡張することにより、FeSe に匹敵する引力が強い系では上記のクロッシングが広範な磁場域で見られるべきであることを示し、FeSe における対応する実験事実を説明することに成功した。また、超伝導転移に伴う臨界領域が、引力が強まるとともに劇的に広がることも指摘した。このことがBCS 超伝導の場合と比べて磁場 - 温度超伝導相図が著しく異なっていることを示唆するため、次に足立氏は渦格子が融解して渦液体に変わる温度、すなわち磁場下の真の超伝導転移線と、ボゾン形成に相当する磁場 $H_b(T)$ と平均場近似で定義される対破壊磁場 $H_{c2}(T)$ を調べた。その結果、高電子密度の系、つまり化学ポテンシャルをフェルミエネルギーと同一視できるBCS 超伝導の場合とは異なり、$H_b(T)$ と $H_{c2}(T)$ がBCS-BEC クロスオーバー域に近い低電子密度の系では明確に分離し、実験ではそれは超伝導揺らぎの挙動に関する特徴的な階層として現れると足立氏は指摘した。</p> <p>さらに、ゼロ磁場下の超伝導に関して、系の次元性を低下すれば BCS-BEC クロスオーバーは生じやすくなることを理論的に指摘し、この予言が圧力の印加や超格子作成などによる人工的な実験で確認できると主張した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

従来の超伝導の基礎理論であるBardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論は、弱い電子間引力と高い電子密度を暗に仮定した理論になっており、逆に電子間引力が十分に強いため電子対が2原子分子的なボゾンとなって超伝導の担い手となっている場合には、それらの Bose-Einstein凝縮 (BEC) にむしろ近い超伝導が起こると期待される。この後者の超伝導の実現は過去に例がなく、鉄系超伝導物質 FeSe における磁場下の超伝導現象からこの物質がBECに近い超伝導を示していると考えられている。BEC に近い系、つまりBCS-BEC クロスオーバー域の系における磁場下の超伝導の理論はこれまで整備されておらず、理論的に開拓すべき新たな研究方向だといえる。

足立景亮氏の学位論文は上記の理論的動機に端を発した研究をまとめたものであり、関連する複数の題材に取り組むことにより、FeSe における現象の理論的理解を進めることを目指した。その複数の題材が3つの公表論文それぞれの題材となっており、本学位論文の第2, 3, 4章を構成している。理論的記述の仕方からBCS 超伝導とクロスオーバー域に属する超伝導との違いは主に、前者では化学ポテンシャル一定とする近似を取るのに対し、後者では粒子数一定という現実の系により適合する条件を自己無撞着に取り入れる点にある。第2章は、修士課程の後半に足立氏がBCS超伝導を対象に発展させた磁化における超伝導揺らぎの効果を記述するモード・カップリング理論(参考論文2)をクロスオーバー域に近い系に応用して得られた結果をまとめたものである。その主要な結果は、1) 超伝導秩序パラメタの臨界揺らぎは引力が強まるとともに増大する、2) 異なる磁場値での磁化-温度曲線が1点で交差するというクロッシングと呼ばれる現象が広い磁場域で FeSe という異方的3次元系で実験的に見いだされたという結果を半定量的に再現できた、というもので、この2)の結果は上記の修士課程時に遂行した理論結果を応用かつ発展させた成果であり、まさに足立氏独自の研究成果というにふさわしい内容である。

第3章では、第2章においてと同じ近似を粒子数一定の条件に関して適用し、高電子密度の系に用いられたBCS 超伝導理論とクロスオーバー域に近い低密度系に対する理論との間の違いが、磁場-温度相図においてどのように生じるのかを理論的に指摘している。超伝導体の磁場-温度相図は、BCS理論に基づく場合には渦格子の融解転移線と平均場近似での超伝導転移線であるHc2線とで構成され、その2つの線の間領域が渦糸液体と呼ばれる正常金属相の一部である。クロスオーバー域に近い低密度系では Hc2 線の高温側にボゾン形成の磁場 Hb が Hc2 線と明確に分離した形で位置しており、電子間引力が強くなるとともに、つまり低密度になるとともに、これら2線の間領域が渦糸液体領域よりもむしろ広がる、という結果を足立氏は得た。定性的にはこの結果は FeSe の示す磁場-温度相図の特徴と符合する。ただし、実験的に見いだされた渦糸液体領域の幅は理論結果から想定される結果よりかなり狭いという不一致があることも指摘し、この不一致はFeSe が2バンド超伝導体であることを考慮すれば説明できることを足立氏は提案した。第2, 3章の結果は磁場下の超伝導に関する包括的な理論結果となっており、また今後の関連物質の実験研究を刺激するとも考えられ、高く評価できる内容である。

第4章では、量子力学に従う1粒子が引力ポテンシャルの下で形成しうる束縛状態の次元性依存性そのまま、BCS-BEC クロスオーバー域のフェルミ超流動の発現可能性に反映することを示したという素朴な内容ではあるが、これまで実験手法の提案を絡めた理論の報告として前例のない内容であり、十分評価できる研究である。

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。平成31年1月18日論文内容とその関連事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：平成 年 月 日以降