

京都大学	博士 (理学)	氏名	施 安路
論文題目	Nuclear Magnetic Resonance Studies on Iron Chalcogenide Superconductor FeSe 鉄カルコゲナイド超伝導体FeSeの核磁気共鳴による研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、鉄系超伝導体の中で最も単純な結晶構造を持つFeSeにおいて、磁気トルクや熱伝導測定から示唆されている顕著な超伝導ゆらぎや高磁場超伝導“B相”の性質を⁷⁷Se核の核磁気共鳴実験より調べたものである。反強磁性ゆらぎを検出する核スピン-格子緩和率の測定より、FeSeでは構造相転移温度以下で反強磁性ゆらぎの発達が分かるが、超伝導ゆらぎが示唆されている温度あたりからこの発達が抑制され始めることを見出し、反強磁性ゆらぎを通して超伝導ゆらぎを検知できることを示した。また高磁場の“B相”では超伝導ゆらぎも弱められ、超伝導の性質は低磁場の超伝導と異なることを明らかにした。</p> <p>第1章では、序章として、鉄系超伝導体の紹介と研究対象物質のFeSeの概説及びこの物質の特徴的であるマルチバンドに起因するホールと電子の性質を持つ小さなフェルミ面、そのフェルミ面の持つ小さなフェルミエネルギーについて紹介し、その結果、FeSe超伝導体はBCS-BECクロスオーバー領域に位置する物質として指摘されていることを紹介した。その後、冷却原子の物理で発展しているBCS-BECクロスオーバーの概念の紹介と、クロスオーバー領域の興味ある現象として超流動転移温度以上で見られるpreformed-pairや擬ギャップ状態、超伝導転移温度直上で見られる超伝導ゆらぎについても概説がなされている。</p> <p>第2章では、実験手法である核磁気共鳴や測定量であるナイトシフトや核スピン-格子緩和率について概説している。</p> <p>第3章では、測定したFeSeの超伝導性や試料の質、実験装置についての紹介と測定試料の角度合わせについて述べられている。</p> <p>第4章では、FeSeの磁場中超伝導転移温度以上で見られる反強磁性ゆらぎの発達の抑制や擬ギャップ的な振舞いを詳細に調べ、NMR測定からは超伝導ゆらぎは反強磁性ゆらぎの抑制として見られることを指摘した。またこれらの温度・磁場依存性より、超伝導ゆらぎに関係すると考えられる反強磁性のゆらぎの抑制に関する相図を作成した。さらにFeSeで見られた超伝導転移温度以上での反強磁性ゆらぎの抑制の様子は、エネルギースケールを考慮すると最適ドーピングにあるYBa₂Cu₃O₇の実験結果と酷似しており、BCS-BECクロスオーバー領域にある超伝導の特徴である可能性も指摘した。</p> <p>第5章では、高磁場での“B相”における超伝導性を磁化率とNMRの共鳴線から調べた結果を報告している。磁化率測定から“B相”の磁場領域でも超伝導は生き残っていることは示されるが、共鳴線の広がりから超伝導反磁性の効果も小さくなり、超伝導性は弱められていることを示した。超伝導性が弱められる原因として、電子面のフェルミエネルギーが小さいことに関係し電子面で起こっている超伝導は磁場によって壊され、超伝導はホールのフェルミ面だけで起こっている可能性を指摘した。“B相”の解明のため、より詳細なNMR実験が待たれる。</p> <p>第6章では実験結果まとめ結論を述べ、今回の実験の意義について述べられている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

施安路氏の博士論文では、鉄系超伝導 FeSe において様々な巨視的測定から指摘されていた超伝導ゆらぎや熱伝導の異常から示された高磁場超伝導“B 相”について微視的測定である核磁気共鳴(NMR)測定から調べた結果が報告されている。FeSe は鉄系超伝導体の中で最も簡単な結晶構造を持つが、他の鉄系超伝導体が構造相転移温度と同じ温度か僅かに低温で磁気秩序を示すのとは対照的に、構造相転移後も磁気秩序は示さず、9 K あたりで超伝導転移を示す。ただし NMR の実験結果から、構造相転移温度以下でストライプ相関の反強磁性ゆらぎが発達することが示されていた。また走査型電子顕微鏡測定によるバンド分散の測定から、多バンドに起因する電子・ホール面のフェルミエネルギーが数 meV と大変小さく、超伝導ギャップエネルギーと同程度であることから、FeSe の超伝導は BCS-BEC クロスオーバー領域にある強結合超伝導体であることが指摘されていた。このクロスオーバー領域では、強結合超伝導に起因する超伝導転移温度より上の温度からの対形成が理論研究から指摘され、事実通常超伝導ゆらぎが観測される温度よりはるか高温から対形成の始まりと考えられる電気抵抗の減少や磁気トルクの異常が報告されていた。また、高磁場の超伝導では熱伝導の測定から高磁場超伝導“B 相”の存在が指摘されていたが、“B 相”が存在する 14 テスラの磁場では超伝導が消失しているという報告もあり、高磁場超伝導の研究が待たれていた。このような状況のもと、微視的な測定の NMR 実験から超伝導ゆらぎがどのように観測されるのか、また高磁場“B 相”で超伝導は見られるのかどうかについて調べた。

その結果、構造相転移後低温に向かって発達を続けていた反強磁性ゆらぎが超伝導転移以上の温度から抑制され擬ギャップ的な振舞いが見られること、しかし 13.5 テスラ以上の磁場ではこの反強磁性ゆらぎの抑制が小さくなることから、反強磁性ゆらぎの抑制や擬ギャップ的な振舞いは超伝導ゆらぎに起因すると考えられることを示し、NMR の実験からは反強磁性ゆらぎの抑制を通して超伝導ゆらぎの効果が分かることを示した。また FeSe で見られた、超伝導ゆらぎの効果は最適ドープの銅酸化物高温超伝導体 YBa₂Cu₃O₇ にも報告されていたことを指摘し、エネルギースケールの違いを考慮するとどちらの物質でも超伝導転移温度の 1.4 倍程度の温度から見えていることを指摘した。

また高磁場超伝導“B 相”に関しては、交流帯磁率の測定から“B 相”の磁場領域でも超伝導は生き残っていることを示した。ただし NMR の共鳴線の測定からは“B 相”では超伝導反磁性による共鳴線の増大は見られておらず超伝導性は弱まっていることを示した。電子面でのフェルミエネルギーは極端に小さく磁場のエネルギーと同程度であることを考慮し、高磁場の“B 相”では電子面での超伝導は消えており超伝導はホール面だけで起こっている可能性を指摘した。

重い電子系超伝導体や銅酸化物超伝導体の発見以降、超伝導ギャップがフェルミエネルギーの 1/10 程度の強結合超伝導体の存在が認識され、これらの強結合超伝導体が示すであろう超伝導ゆらぎに興味が集まっていた。本研究はより強結合超伝導体と考えられる FeSe において超伝導ゆらぎを NMR 実験からとらえた研究として意義を認められる。また FeSe が小さなフェルミエネルギーを持つことより、フェルミエネルギーと同程度の磁場下での超伝導状態を調べた研究としても意義は認められる。従って本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 30 年 2 月 19 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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降