

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	金城 克樹
論文題目	Nuclear Magnetic Resonance Study on Multiple Superconducting Phases in UTe_2 (UTe_2 の超伝導多重相におけるNMRによる研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本博士論文は、ウラン化合物超伝導体 UTe_2 が示す高磁場・圧力下に見られる超伝導多重相の性質を、磁氣的測定より調べたものである。UTe_2 は 2018 年に発見された新しい超伝導体で、超伝導転移温度 T_c は 1.6 K と低いものの、磁場を b 軸に印加した場合、T_c は 15T を極小にその後上昇に転じ 35T まで生き残る。また圧力を印加すると T_c は 3K まで上昇し、温度・磁場掃引に対し複数の異常が見られる超伝導多重相の振舞いを示す。このような磁場による超伝導の増強や超伝導多重相の振舞いは、ウラン化合物でのみ報告されている現象であり、超伝導がもつ新たな特性として量子コンピュータへの応用も視野に全世界で精力的に研究がなされている。</p> <p>金城氏は、この UTe_2 が示す超伝導多重相の性質を、交流磁化率と ^{125}Te 核の核磁気共鳴(NMR)によるナイトシフト測定より調べた。その結果、15T 以上の高磁場超伝導相では超伝導反磁性が磁場とともに増大することや限られた角度でのみ見られることから、高磁場超伝導はバルクの性質をもち低磁場超伝導とは異なる超伝導状態であることを明らかにした。さらにナイトシフト測定から、高磁場相では超伝導対のスピンは b 軸方向に向いており、低磁場相と異なるスピン状態にあることを見出した。</p> <p>金城氏はまた、圧力下の NMR 測定を超伝導の消失圧力域まで行い、UTe_2 の超伝導は $U-5f$ 電子が遍歴状態にある重い電子状態でのみ見られ、UTe_2 の圧力に対する超伝導・磁気相図は今まで知られていた重い電子超伝導体の相図と異なることを指摘した。さらに最高 T_c の圧力下の測定から、圧力で T_c が上昇する超伝導状態(SC2)は、常圧の超伝導状態(SC1)とは超伝導の性質が異なり、SC2 では超伝導対のスピンは b 軸方向にあることを指摘した。さらに SC2 相内の低温までの測定から、比熱測定から報告のあった SC2 から SC3 の転移を NMR 測定から見出した。この SC3 ではスピン磁化率は減少するものの、磁化率に分布が見られることから SC1 と SC2 の共存に起因した新奇な超伝導状態であることを指摘した。高磁場・圧力下で明らかになった超伝導・超伝導転移は、現在までの報告はわずか数例であり未解明の物理現象と考えられてきた。今回 UTe_2 により、この転移が明確に観測され、異なるスピン状態を持つ超伝導が一つの超伝導体で実現していることが明らかになった。これらの実験結果は UTe_2 がスピン自由度を持つスピン三重項超伝導であることを示唆する重要な結果と考えられる。</p> <p>本論文の第一章は、研究の背景であるスピン一重項・三重項超伝導、f 電子系が示す重い電子状態の概説、第 2 章はウラン化合物強磁性超伝導と今回の研究対象の UTe_2 の概説を行っている。第 3 章では主測定の NMR 実験の概説、第 4 章では、今回の実験で使用した試料の説明、実験に用いた高压セルや圧力校正等の実験の詳細が述べられている。第 5 章から 8 章に UTe_2 の NMR 実験結果が述べられており、第 5 章では T_c が 1.6K の試料の超伝導状態のナイトシフトの振舞い、第 6 章は 24T の高磁場までの交流磁化率・NMR 実験の結果、第 7, 8 章では圧力下で行われた、常伝導・超伝導状態の NMR 実験の結果が示されている。第 9 章では実験から考えられる各相の超伝導状態について議論されている。</p> <p>このように金城氏の博士論文は、最近発見された UTe_2 が示す超伝導多重相の磁氣的性質をNMR実験から調べた重要な実験結果を報告したものである。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

1. 研究目的の評価

研究対象物質のウラン化合物 UTe_2 は現在大いに注目を集めている超伝導体である。その理由として、磁場を b 軸に印加した場合に見られる超伝導の磁場による増強や、圧力を印加すると超伝導転移温度が倍近く上昇し異なる超伝導状態からなる超伝導多重相を示すことが挙げられる。磁場下での超伝導増強や圧力下の超伝導多重相の振舞いは超伝導体としては極めて特異で、現在までに限られた測定でのみ検出されその詳細については未解明であった。金城氏の博士論文は、この UTe_2 の特異な超伝導状態を、交流磁化率と ^{125}Te 核の核磁気共鳴 (NMR) 測定から調べたもので、研究の意義は十分認められる。

2. 研究手段に関する評価

^{125}Te 核のナイトシフトによるスピン磁化率測定は、超伝導の磁気状態を精度よく測定できる数少ない実験手法であり、内部磁場の発生等の磁気状態の変化にも敏感である。さらに今回の実験では実験精度を高めるため、測定試料のTe核をNMR可能な ^{125}Te に99.9%置換した試料を用いて測定を行っている。実験装置においても工夫がなされ、圧力NMR測定では希釈冷凍機と横磁場超伝導磁石を組み合わせ、高圧極低温下においても磁場を試料に正確に印加し測定が行えるようになっている。また15T以上の高磁場測定は東北大学金属材料研究所に設置されている無冷媒25T超伝導磁石を用いており、今回の測定はこの磁石における2軸回転機構のプローブを用いた初の交流磁化率・NMR測定である。 UTe_2 の超伝導多重相を研究するために様々な努力がなされたことが認められる

3. 結果、考察の評価

金城氏は、高圧下のNMR測定を行い、圧力に対する超伝導相図と磁場を b 軸に印加した時の相図の類似性を指摘し、 UTe_2 の超伝導がU-5f電子が遍歴状態にあるときのみに見られることを指摘した。さらに磁場を b 軸に24Tまで印加した交流磁化率とNMRによるナイトシフトの測定から、高磁場超伝導相がバルクの超伝導であること、低磁場超伝導相と高磁場超伝導相は異なる超伝導状態にあり高磁場超伝導相では超伝導対のスピンが b 軸方向にあることを指摘した。さらに高圧下の超伝導状態のNMR測定から、圧力下高温の超伝導相(SC2)では超伝導対のスピンが b 軸方向にあり、SC2内の低温の超伝導状態(SC3)ではスピン磁化率は常圧の超伝導(SC1)の時と同程度減少するものの、磁化率に異常な分布が生じていることを見出した。これらの結果は、高圧SC2は常圧SC1とは性質が異なる超伝導であること、SC2の低温にあるSC3ではSC1とSC2の超伝導が共存した新奇な超伝導状態であることを指摘した。

これら金城氏の実験結果は、 UTe_2 はスピンの自由度を持ち、超伝導多重相では超伝導対は異なるスピン状態にあることなどを明らかにしたものであり、超伝導多重相を理解するための重要な知見を与えた。また、結晶構造から考えられる群論に基づき各超伝導相の状態も議論され、現在までに報告されている実験結果の解釈の問題点や、そのための更なる実験も指摘されており今後の研究に指針を与えるものである。

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5年1月16日の公聴会と、1月23日に行った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。