

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	利根川 翔
論文題目	<p>Study of the electronic states in heavy fermion compound URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>  (重い電子系化合物URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>における電子状態の解明)</p>		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文では、重い電子化合物として知られているURu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>について、低温におけるサイクロトロン共鳴の測定と高分解能シンクロトロン放射光X線構造解析を行い、17.5 Kの相転移現象に伴う電子状態の対称性の破れについて調べた結果をまとめたものである。この相転移に伴い、転移温度以下でどのような状態となっているかについては発見から30年近く経った現在でも明らかになっておらず、「隠れた秩序」として固体物理学における大きな謎の一つとなっている。また、この「隠れた秩序」相内においてさらに低温の1.4 Kにおいて超伝導状態が出現することも知られている。</p> <p>論文では、主に(1) 隠れた秩序相における高分解能構造解析による結晶構造対称性の同定、(2) サイクロトロン共鳴による隠れた秩序相におけるフェルミ面上の有効質量の構造の決定、(3) 超伝導状態におけるサイクロトロン共鳴の観測結果、について3つの章に分けて論じている。</p> <p>(1) の構造解析では、バルクの情報を得るために、SPring-8におけるシンクロトロン放射光を用いX線のエネルギーをウラン原子のL核吸収端近傍にチューンすることによりX線の侵入長さを長くすることや、高分解能を実現するために4軸回折計を用いて広角領域の(880)という高次ブラッグピークを選択的に調べるなどの独自の工夫をして、10<sup>-5</sup>程度の非常に高分解能なバルク測定を実現した。さらに、試料についても残留抵抗比が670程度にも及ぶ非常に純良な試料を用い、結晶性の特によい試料を選択して測定を行うことにより、非常に微小な斜方晶歪みが隠れた秩序転移温度以下で現れることを明らかにした。この結果は高温の正方晶の状態で保たれていた面内の4回回転対称性が、低温で2回対称に低下していることを実験的に直接示した初めての結果である。</p> <p>(2) のサイクロトロン共鳴の観測は、重い電子系化合物では初めて共鳴の観測に成功したものである。これは、純良試料を用いたことと、この系が小数キャリア系であることによるサイクロトロン半径がマイクロ波の表皮深さ程度に短いことによるものであると考察している。この観測により、隠れた秩序相におけるフェルミ面上におけるサイクロトロン質量の詳細な構造を明らかにすることが可能となった。特に、最も線幅の狭い共鳴ピークが[110]方向近傍で明確に分裂することを明らかにした。この結果は、この系が持つ複数のフェルミ面のうち、最も移動度が高いと考えられる最大体積のホール面の有効質量が面内で2回対称の異方性を持ち、[110]方向にホットスポットとよばれる質量の増強された部分を持つことでうまく説明できる。この結果は、さきの4回対称性の破れを支持する結果であり、電子状態の面内異方性を初めて明らかにしたものである。</p> <p>(3) の超伝導状態におけるサイクロトロン共鳴の観測についても、前例のない初めての結果である。とくに共鳴線幅から得られる散乱時間の温度依存性において、渦糸格子の融解転移に伴う急激な変化を明らかにした。</p> <p>これらの結果は、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>の隠れた秩序相および超伝導相の電子状態を理解する上で重要な結果であり、特に隠れた秩序の対称性に4回回転対称性の破れという大きな制約を与えるものである。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文で研究対象としている $\text{URu}_2\text{Si}_2$ は、格子状に並んだウラン原子上の局在性の強い5f電子と伝導電子との近藤効果により、低温で電子間の強い相互作用のために有効質量が増大した金属状態が実現する、いわゆる重い電子系物質である。このような系では強い電子相関により様々な自明でない状態が現れることが期待される。この $\text{URu}_2\text{Si}_2$ で現れる隠れた秩序は、1985年の相転移の発見から様々な実験的・理論的な研究が行われたにもかかわらず、未だにその本質が明らかになっていない。一般に相転移では、一部の例外を除き、系の対称性の破れを伴うため、どの対称性が破れた状態にあるかを明らかにすることが、秩序の正体を明らかにする最も重要なステップである。2011年に磁気トルクの面内磁場角度依存性測定から、4回回転対称性が破れている可能性が指摘されたが、この測定条件のように磁場を印加している状態は、ゼロ磁場における隠れた秩序相の基底状態とは異なる可能性があるため、ゼロ磁場における研究が必須であった。

利根川氏はこの問題に挑むために、4回対称性の破れにより期待される結晶構造の斜方晶歪みを検知するために、様々な独自の工夫を施した高分解能構造解析により、ゼロ磁場下での非常に微小な斜方晶歪みの観測に世界ではじめて成功した。この結果は、隠れた秩序を記述する秩序パラメータの対称性を限定するものであり、この秩序の理解への大きな前進となるため、非常に高く評価できる。

さらに、重い電子系では初めてとなるサイクロトロン共鳴の観測に成功したことは大きな成果である。この系の隠れた秩序相の理解には電子構造の詳細を明らかにすることが重要となる。以前の量子振動の実験により、隠れた秩序相のフェルミ面の構造は、圧力下で誘起されることが知られている反強磁性相と似かよっていると考えられてきた。しかし、隠れた秩序相と反強磁性相は圧力相図上で1次相転移により隔てられており、その電子状態の違いがどの点にあるかを明らかにすることが重要と考えられてきた。本研究のサイクロトロン共鳴測定により、全ての主要なフェルミ面上で有効質量の構造が初めて明らかとなり、反強磁性相では期待されない面内2回対称性が現れることを見出した。この結果は構造解析の結果とコンシステントであり、また、この秩序が単なる構造相転移ではなく、電子間の相互作用に基づく電子的な相転移であることを強く示唆するものである。また、構造解析で明らかとなった斜方晶歪みが非常に小さいことは、電子秩序と格子歪みの結合が小さいことを意味しており、このことも秩序の理解の一助となることが期待される。

また、超伝導状態におけるサイクロトロン共鳴の観測についても、今まであまり前例のない新しい結果である。超伝導状態におけるサイクロトロン共鳴は理論的にも議論の余地のある問題であり、本論文の結果が、理論的な進展への呼び水となることが期待される。

このように、本論文の研究結果は、強相関電子系に現れる非自明な電子状態の発現メカニズムを解明する上で重要な貢献をするものであると認められる。利根川氏は低温実験の高い遂行能力を持つだけでなく、理論的な背景や周辺の物性物理学に関するトピックなども良く理解しており、実験科学者としてバランスのとれた優れた能力を有していることを実証した。

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、平成25年12月16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