

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	村山 陽奈子
論文題目	Novel quantum phases accompanied by rotational symmetry breaking in strongly correlated electron systems (強相関電子系における回転対称性の破れを伴う新奇量子相の研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>棒状や円盤状の分子系では、気体・液体・固体の三態の他に、液体と固体の中間状態として液晶と呼ばれる状態が現れる。近年、強相関電子系を中心として液晶に類似した電子状態が次々と観測され、新奇電子物性発現の舞台として注目を集めている。なかでも電子系が自発的に結晶格子の回転対称性を破る状態は、ある種の液晶相との類似性から「電子ネマティック状態」と呼ばれている。本学位論文において村山氏は電子ネマティック状態に関する実験的研究を、強相関電子系の代表例である銅酸化物高温超伝導体 (第3章)、さらには銅酸化物と類似の結晶構造と電子状態をもつイリジウム酸化物 (第4章) について行った。以下において各研究項目を要約する。</p> <p>銅酸化物高温超伝導体の四半世紀以上に渡る膨大な研究において、超伝導発現機構とともに長年謎とされてきたのは、アンダードープ領域に広がる擬ギャップ状態である。常伝導状態から擬ギャップ状態への変化が相転移であるのか、あるいはクロスオーバーであるのかも明らかとなっておらず、その解明は現代の物性物理学における最重要課題のひとつとなっている。村山氏は修士課程において銅酸化物高温超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の擬ギャップ状態について超高感度の面内磁気トルク測定による研究を行い、擬ギャップ現象が電子ネマティック状態への熱力学的相転移であることを指摘した。しかしながら、$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ は斜方晶構造をもち、結晶自体が4回回転対称性を破っているため、自発的な回転対称性の破れを真に示すためには、正方晶構造をもつ系での検証が重要な課題となっていた。</p> <p>以上の背景のもと、村山氏は、正方晶構造をもつ銅酸化物超伝導体 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ に着目し、面内磁気トルクの精密測定を行った。その結果、擬ギャップ状態において磁気トルクの2回対称振動を観測し、電子ネマティック状態への熱力学的相転移であることの決定的証拠を得ることに成功した。さらに、$\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ においては、Cu-O-Cu ボンド方向に回転対称性の破れる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ とは異なり、それとは45度異なる方向に回転対称性が破れた新しいタイプの電子ネマティック状態が実現していることを明らかにした。また、電子ネマティック状態は電荷密度波 (CDW) 温度以下で強く抑制されることを明らかにした。これらの結果は、擬ギャップ相が Cu-O-Cu ボンド方向への相関の発達を示すCDW相とは競合する別の熱力学相であり、CDWの前駆現象や名残ではないということを明確に示している。以上の研究成果は銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相の起源について極めて重要な知見を与えるものと考えられる。</p> <p>イリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 はスピン軌道相互作用誘起型のモット絶縁体であり、同じくモット絶縁体である銅酸化物 La_2CuO_4 と類似した結晶構造をもつ。銅酸化物と</p>			

同様、キャリアドーピングによる非従来型超伝導の可能性も理論的に指摘されている。 Sr_2IrO_4 は反強磁性を示すが、 Ir を Rh に置換してホールドーピングした $\text{Sr}_2(\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x)\text{O}_4$ においては、ホールドーピングにより反強磁性が抑制されるとともに、何らかの対称性が破れた「隠れた秩序」状態が実現していることが報告されていた。しかしながら、その秩序変数の詳細は明らかではなかった。

村山氏は精密磁気トルク測定を行い、隠れた秩序状態において回転対称性の破れを観測し、電子ネマティック状態が実現していることを明らかにした。母物質においてはこれまでの報告とは異なり、反強磁性転移温度よりも高温から隠れた秩序状態が実現していることを明らかにした。さらに村山氏は、東京大学と共同でネマティック感受率の測定を行い、秩序変数が歪みに対して奇パリティであることを明らかにし、秩序変数がアナポールモーメントであることを突き止めた。そして電子ネマティック状態においてはアナポールが結晶に対して特定の方向に揃った「アナポール秩序」という特殊な電子状態が実現していることを明らかにした。アナポールはドーナツ状のリングの表面を巻き付くように流れる電流によって生ずる、電場にも磁場にも極がないPT対称な極性モーメントであり、もともとは原子核物理の分野で提案されていたものである。アナポール秩序は理論的には提案されていたが、本研究はアナポール秩序が物質中において実現していることをはじめて実証するものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

電子同士が強く相互作用し合った強相関電子系の解明は、凝縮系物理学における最も重要な課題のひとつである。最近、強相関電子系を中心として、電子系が結晶格子の回転対称性を自発的に破った電子状態が発見され、液晶とのアナロジーから「電子ネマティック状態」と呼ばれ注目を集めている。電子ネマティック状態の発現には量子多体効果が重要な役割を果たしていると考えられており、これまでになく未知の電子状態や物理現象をもたらす舞台となると考えられている。このような背景のもと、本学位論文では、母物質がモット絶縁体である銅酸化物高温超伝導体およびイリジウム酸化物における電子ネマティック状態への熱力学的相転移現象に関する実験的研究の成果をまとめている。以下に各研究項目の成果の意義について述べる。

銅酸化物高温超伝導体における最大の謎のひとつが、超伝導よりも高温で起こる擬ギャップ現象である。この研究では、正方晶構造をもつ銅酸化物超伝導体 $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ に着目し、面内磁気トルクの精密測定を行うことで、擬ギャップ現象が電子ネマティック状態への熱力学的相転移であることの決定的な証拠を提出することに成功した。これまで擬ギャップ現象は相転移もしくはクロスオーバーであるのかも明らかになっておらず、四半世紀以上にわたる謎を解明したという点で、極めて重要な成果であると評価できる。さらに、同じく銅酸化物高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ とは異方性の異なる電子ネマティック状態が実現していることを示しており、物質の構造などにより電子ネマティック状態の性質が変化することを指摘している。このことは電子ネマティック状態の詳細な理解が擬ギャップ状態の全容解明に重要であることを示しており、大変意義深いものである。

スピン軌道相互作用誘起型モット絶縁体 $\text{Sr}_2(\text{Ir}_{1-x}\text{Rh}_x)\text{O}_4$ における研究では、秩序変数が未知であった「隠れた秩序状態」において電子ネマティック状態が実現していることを精密磁気トルク測定により示し、ネマティック感受率測定も行うことで、PT対称な極性モーメント（アナポールモーメント）が秩序化したアナポール秩序状態であることを明らかにした。アナポールは原子核物理で議論されていたものであり、固体中でのアナポールモーメントの出現およびその秩序化は理論的には指摘されていたものの、観測例はなかった。そのようななかで本研究はアナポール秩序を実証したはじめての実験的研究成果であり、電子ネマティック状態において新奇量子現象が現れることを実証した先駆的研究として評価できる。

以上のように、本研究は固体物理における長年の未解決問題を解明し、新奇電子状態を発見するなど、その学術的価値は高く、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4年1月17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