

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	人見 尚典
論文題目	奇パリティ多極子秩序相における新奇量子現象の理論的探索		
(論文内容の要旨)			
<p>空間反転対称性は自然界を記述する基本的な対称性の一つである。固体中の物質相においては、電子あるいは結晶格子の内部自由度が秩序化することによって空間反転対称性が自発的に破れることがしばしばある。その中でも、奇パリティ多極子秩序相の研究が近年の注目を集めている。</p> <p>古典電磁気学の多重極展開にも現れる電子の多極子自由度が秩序化する例は過去にも知られており、遷移金属酸化物や重い電子系を中心に長く研究されてきた。しかし、その長い歴史の中で取り扱われてきた多極子は、空間反転対称性を破らない偶パリティの多極子に限定されてきた。近年の発展は、結晶格子の副格子自由度をもちいて多極子の概念を拡張した「拡張多極子」の提案に端を発している。拡張多極子の概念を用いると、これまでは不可能とされてきた奇パリティ多極子の実現が可能になると期待されている。そのような量子相が真に実現可能なのか、そして、もし可能であれば、物質相にどのような新機能が現れるのだろうか、という疑問に答える理論研究が重要な課題となっている。</p> <p>申請者は数多くある奇パリティ多極子秩序の中でも特に電気八極子秩序に焦点をあて、幾つかの研究を行った。本論文は、【1】スピン軌道相互作用による電気八極子秩序の熱力学的安定化、【2】電気八極子秩序相の電磁気応答、【3】銅酸化物高温超伝導体 <math>\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}</math> における実現可能性の検証、の3つの部分からなる。以下において、これらを項目に分けて記述する。</p> <p><b>【1】スピン軌道相互作用による電気八極子秩序の熱力学的安定化</b></p> <p>過去の研究より、2層前方散乱モデルにおける電気四極子秩序の安定性が示されている。申請者は、スピン軌道相互作用を含むように拡張した2層ラッシュバ前方散乱モデルを平均場理論により解析し、電気八極子秩序が熱力学的に安定な相となることを示した。その際にスピン軌道相互作用が果たす役割を詳細に解析した。また、温度磁場相図において新しい量子臨界点が現れることを発見した。</p> <p><b>【2】電気八極子秩序相の電磁気応答</b></p> <p>電気八極子秩序相では空間反転対称性が自発的に破れるため、特異な電磁気応答が現れることが期待される。その可能性を検証するために、申請者はスピンホール効果および磁気電気効果 (エーデルシュタイン効果) の計算を行った。久保公式に基づく数値計算により、電気八極子秩序相においてスピンホール効果が急激な上昇を示すこと、また新奇な <math>D_{2d}</math> 型の磁気電気効果が表れること、などが示された。</p> <p><b>【3】銅酸化物高温超伝導体 <math>\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}</math> における実現可能性の検証</b></p> <p>最近行われた第二高調波発生の実験により、2層銅酸化物高温超伝導体 <math>\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}</math> において空間反転対称性が自発的に破れていることが示された。また、磁気トルクの測定により、擬ギャップ相への相転移に伴う磁気トルクのキンク構造が観測された。これらの実験結果を受けて、申請者は電気八極子秩序が生じている可能性を理論的に検証した。まず、磁気トルクの温度依存性を計算し、実験結果と矛盾のない結果を得た。そして、超伝導状態において磁化率の面内異方性が正常状態と比べて数100倍に増強されることを発見し、核磁気共鳴法を用いた実験的検証を提案した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

自然界を記述する基本的な対称性の一つである空間反転対称性が自発的に破れる現象が近年の物性物理学において注目を集めている。その一例として、奇パリティ多極子秩序が挙げられる。申請者は奇パリティ多極子秩序の中でも特に電気八極子秩序に焦点をあて、熱力学的安定性と新機能開拓の両面から研究を行った。その内容を以下において項目に分けて記述する。

**【1】 スピン軌道相互作用による電気八極子秩序の熱力学的安定化**

申請者は2層前方散乱モデルをスピン軌道相互作用が含まれるように拡張し、得られた2層ラシュバ前方散乱モデルを平均場理論により解析した。その結果に基づいて、スピン軌道相互作用の存在下で電気八極子秩序が熱力学的に安定になることを示した。この結果は、電気八極子秩序の熱力学的安定性を理論的に初めて示したものである。申請者はさらに多極子感受率の詳細な解析を行い、スピン軌道相互作用が層間結合を有効的に弱めることで電気八極子秩序が安定になることをつきとめた。また、申請者は温度磁場相図において新しい量子臨界点が現れることを発見した。これは新しい量子臨界現象の存在を示唆するものであり、今後のさらなる研究を刺激している。

**【2】 電気八極子秩序相の電磁気応答**

空間反転対称性が自発的に破れた物質相ではしばしば特異な電磁気応答が現れる。申請者は久保公式に基づく数値計算を行い、スピンホール効果および磁気電気効果（エーデルシュタイン効果）が電気八極子秩序状態において現れることを示した。特に、電気磁気効果はこれまでに知られているラシュバ型やカイラル型とは異なる新奇な $D_{2d}$ 型の電流方向依存性を示す。これらの結果は、電気八極子秩序状態の新機能を開拓するのみならず、電気八極子秩序相の実験的同定法を与えるものであり、興味深い発見と言える。

**【3】 銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ における実現可能性の検証**

申請者は、2層ラシュバ前方散乱モデルに結晶の4回回転対称性を破る異方性項を加え、2層銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ をモデル化した。このモデルを平均場理論により解析し、久保公式を用いて様々な物理量を計算した。磁気トルクの温度依存性に関しては、最近発表された実験結果と矛盾のない結果を得た。また、ヴァン・ブレック磁化率の計算により、超伝導状態において磁化率の面内異方性が正常状態と比べて数100倍に増強されることを発見した。ヴァン・ブレック磁化率は超伝導状態の核磁気共鳴実験により検証が可能である。今後の実験研究により電気八極子状態の検証がなされることが期待される。申請者はさらに、2層銅酸化物高温超伝導体 $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ において電気八極子秩序が発現された場合に期待される電磁気応答を計算した。相転移温度においてスピンホール効果が急激な上昇を示すこと、そして、磁気電気効果が電気八極子秩序の形成に伴ってラシュバ型から $D_{2d}$ 型へのクロスオーバーを示す、という興味深い結果が得られている。

申請者が行った研究は、電気八極子秩序相という未発見の量子相を予言し、その熱力学的安定条件と新機能を明らかにしたものである。また銅酸化物高温超伝導体における実現可能性を検証したことも重要な成果である。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、平成30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。