

氏 名 宮崎 正範

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1494 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 物質構造科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 ミュオンナイトシフトによる銅酸化物超伝導体 (Bi,Pb)
2201 の擬ギャップ状態の研究

論文審査委員 主 査 教授 組頭 広志
教授 門野 良典
教授 熊井 玲児
教授 村上 洋一
准教授 中尾 裕則
教授 小形 正男 東京大学

論文内容の要旨

超伝導現象が発見されてより一世紀、銅酸化物超伝導体が発見されてより四半世紀。今だ、その発現機構の全ては明らかにされておらず超伝導への謎は尽きない。

本研究で対象とする銅酸化物超伝導体の物質群は、その高い超伝導転移温度を示すだけでなく、その周りには母物質の反強磁性モット絶縁体に始まり、スピングラス的状态、超伝導揺らぎに関連していると考えられるネルンスト効果、そして擬ギャップ状態といった変化に富み、興味深い物理現象を多く示す。これら超伝導相の周りで起こる種々の物理現象がどのように超伝導と関係しているのか？あるいはしていないのか？ということ明らかにすることで、高い超伝導転移温度をもつ原因が明らかになり、そして室温で超伝導となる物質を探査する糸口が見つかるかもしれない。その中で、特に注目されているものは、超伝導の発現と関係しているかもしれないと考えられている擬ギャップ現象である。

本論文では、この10年間で高純良試料作成技術及び測定技術の向上により劇的にその実態が明らかにされつつある擬ギャップ状態の研究成果を踏まえて、これまで行われていなかったミュオンスピン回転法 (μ SR法)を用いたミュオンナイトシフト測定から、さらに新しい知見を得ようと試みた。

これまで磁性からの寄与が少なからず存在し磁性によるシフトと擬ギャップによるシフトを明確に区別できなかった事と高い上部臨界磁場 (H_{c2})を持つ為に、基底状態までミュオンナイトシフトによる擬ギャップ状態の観測が困難であると考えられ、ほとんど測定が行なわれてこなかった。しかし、他の銅酸化物超伝導体と比べて磁気相関が非常に弱い事、強い異方性を持ちc軸方向に対して低い H_{c2} を持つと考えられている $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+\delta}$ (Bi2201)に注目することで、 μ SR測定として初めて擬ギャップの直接観測に成功し、かつ複数のホール濃度による系統的測定を行なった。その結果、擬ギャップが観測し始める温度 T^* 及びミュオンナイトシフトの温度依存性からギャップの大きさ Δ^* を見積もり、ホール濃度依存性を得た。さらに、擬ギャップ形成に伴い消失する状態密度はホール濃度によらず一定であるという新しい知見を得ると共に、 $T=0$ Kで残留シフトが観測された。これは運動量(k)空間の基底状態で、フェルミ面に状態密度が存在する事を示し、擬ギャップとは別に金属的状态にある電子(又はホール)が存在することを μ SRの結果からも示した。

本研究結果から、1)擬ギャップ(T^* , Δ^*)と超伝導転移温度 T_c 及びネルンスト効果測定から報告されている超伝導揺らぎのホール濃度依存性は相関していない事、2)他の測定手法によるBi2201の先行研究の物質系とでは、ホールドープの仕方が異なり T_c が約1.5倍異なるが、擬ギャップ T^* は、ほぼ同じ値を示し、少なくとも T^* は T_c の値から独立に決まる値のように見える事、3)超伝導が発現しない過剰ドープ試料でも、擬ギャップは観測された事、4)擬ギャップ形成に伴い消失する状態密度のホール濃度依存性は一定であるが、超伝導を担う超流体密度は T_c におよそ相関するホール濃度依存性を示す、という考察結果を得て、擬ギャップと超伝導は別の物理現象であり、直接的な前駆現象ではないという結論を得た。

さらに高横磁場 μ SR実験の緩和率の温度依存性から、これまで $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の μ SR実験から報告されているような磁場誘起磁性がBi2201でも存在することを示唆する結果を得た。これは、強磁場によるスピン揺らぎの抑制が磁性を誘起させることで出現すると考えられる。この磁場誘起磁性は、ミュオンスピン緩和率の温度依存性及び磁場依存性から起源が

異なるものが2種類存在し、一方は反強磁性揺らぎに関係したもの、他方は超伝導に関係するスピン揺らぎである可能性を示唆した。

本論文は、擬ギャップが超伝導の前駆現象を前提とするモデルに対して、これを否定するという厳しい制限を与えると共に、本実験結果は k 空間で擬ギャップを形成していない金属的状态にある電子（もしくはホール）が電気伝導や超伝導状態を担っていると理解する方が自然である事を示している。また基底状態において、この金属的状态の状態密度は、不足ドーピングでは超伝導相と共に出現し、ドーピング共にその割合も増加する。これらの事実はモット絶縁体から少し離れ、超伝導相が出現する希薄ドーピングから過剰ドーピング側では、超伝導相の基底状態はバンド描像で理解できるとする理論的考えとは一致する。以上のように理論モデルに対しても一定の制限を与えることに成功した。

博士論文の審査結果の要旨

銅酸化物における超伝導現象は、固体物理学における最も重要なテーマの一つである。この現象の理解を難しくしている要因は、銅酸化物という物質群が、単に高い超伝導臨界温度を示すだけでなく、母物質における反強磁性モット絶縁体に始まり、スピングラス状態、超伝導揺らぎに関連していると考えられるネルンスト効果、そして擬ギャップ状態の形成といった複雑な興味深い物理現象を内包していることにある。本論文では、ミュオンスピン回転法 (μ SR法) を用いたミュオンナイトシフト測定を高温超伝導体に適応し、擬ギャップの存在を明らかにした。ミュオンナイトシフト測定から擬ギャップ状態を観測することは磁性からの影響のため難しいとされてきたが、本論文では他の銅酸化物に比べて磁気相関が非常に弱いという特徴をもった $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (Bi2201) という物質に注目することで初めて観測に成功した。

本論文では、ミュオンナイトシフトの詳細な解析を行うことで、擬ギャップは超伝導の前駆的な現象ではなく、超伝導と直接的には関係がない別の現象であることを明らかにした。さらに、基底状態において波数空間で擬ギャップとは別に金属的な領域が存在している可能性を指摘した。これらは超伝導機構を理解する上できわめて重要な知見である。また、 μ SR法の利点を駆使することにより、過剰ドープ領域にあるBi2201において強磁場誘起磁性が発現することを明らかにし、この磁場誘起磁性が反強磁性揺らぎと超伝導の前駆現象である超伝導揺らぎの2成分から構成されている可能性を初めて示した。

本論文では、上に述べた科学的意義、実験方法、それに基づく議論と考察が要領よくまとめられており、また、発表および質疑応答においても、それらの内容および関連領域に関する質問に対する的確に回答し、出願者が十分な知識と理解があることを示した。

以上のことから判断して、本論文の結果は科学的に重要であり、学位論文としてふさわしいものとして審査委員会全員一致で合格と判断した。