学位論文題名

STM spectroscopy on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystal($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料に対する STM 分光測定)

学位論文内容の要旨

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ は超伝導転移温度 $T_c=87\text{K}$ の銅酸化物高温超伝導物質である。この試料は Cu-O 層、Sr-O 層、Bi-O 層などからなる層状構造をしており、Cu-O 層内に金属的な電子が存在する擬二次元伝導物質である。銅酸化物高温超伝導物質では超伝導状態で Cooper 対が形成されることが知られている。しかし、これらの物質では Cu-site における on-site Coulomb 力が強く、従来型の超伝導物質におけるのと同じ電子格子相互作用による引力では Cooper 対を形成することが難しいと考えられている。そのため、その電子間引力の起源が何であるのかということについては以前から活発な議論がなされてきた。電子間引力相互作用に関する重要な情報を与える電子対波動関数および超伝導ギャップの対称性は、超伝導状態における電子状態密度に反映される。そして、電子状態密度は高いエネルギー分解能を持ったトンネル分光測定によって直接的に観測することができる。とりわけ、走査型トンネル顕微鏡 (STM) による STM 分光測定は試料と探針が非接触であるという理想的な条件のもとで、試料表面の局所的な電子状態密度を知ることができるという優れた実験手段である。本研究では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料の超伝導状態に対して劈開によって得られる劈開面及びこれに垂直な側面での STM 分光測定を行い、得られたトンネル微分コンダクタンス曲線から超伝導状態における電子対波動関数の対称性を調べた。

4.2K における $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料の側面での STM 分光測定では、a-b 面内の様々なトンネル方向に関する測定を行うために、単結晶試料をその方向に垂直な面が出る様に切断した。そして、Cu-O 結合方向、Cu-Cu 方向、及び a-b 面内で Cu-O 結合方向から 9° , 19° , 27° , 35° , 38° の各方向のトンネルに対するトンネル微分曲線を得た。これらのスペクトルは明確なトンネル方向依存性を示している。このことは超伝導ギャップが a-b 面内で異方的であることを示している。そして、同時に STM 分光測定ではトンネル遷移確率の波数依存性を考慮しなければならないことも示している。単結晶試料側面で得られたこれらのスペクトルのうち、Cu-O 結合方向から 9° , 19° , 27° , 35° , 38° の各方向で得られたスペクトルは、その関数形が連続的に変化している。すなわち、Cu-O 結合方向に近い 9° , 19° などの方向で得られたスペクトルではトンネル微分コンダクタンスがゼロバイアス付近で平坦な振る舞いを示してい

るのに対して、 35° 、 38° など Cu-Cu 方向に近づくにつれて、ゼロバイアス付近でエネルギーに線形な振る舞いになっていく。このことは単純に考えれば、超伝導ギャップがフェルミ面上の Cu-Cu 方向でノードを持つ $d_{x^2-y^2}$ 波対称性を持つことを示している。そして、これらのスペクトルは WKB 近似によるトンネル遷移確率の波数依存性を取り入れることにより、 $d_{x^2-y^2}$ 波の対称性を持った超伝導ギャップモデル、 $\Delta = \Delta_0 \cos 2\theta$ (θ は Cu-O 結合方向からの角度) で統一的に説明できることがわかった。

Cu-O 結合方向での測定で得られたトンネル微分曲線では、超伝導ギャップ構造は観測されない。かわりに、ゼロバイアス付近でコンダクタンスがピーク構造を示したり、大きな有限の値が残っている。これは d 波対称性を持つ超伝導ギャップのノードのところでトンネルが起こるときに予想される振る舞いである。一方、Cu-Cu 方向では明確な超伝導ギャップ構造が観測された。Cu-O 結合方向、および Cu-Cu 方向で得られたこれらの結果は一見、超伝導ギャップが d_{xy} 波の対称性を持っていることを示しており、 $d_{x^2-y^2}$ 波対称性を示す 9° 、 19° 、 27° 、 35° 、 38° 方向で得られたスペクトルとは矛盾しているように思われる。しかし、表面酸素原子の周期配列によるブロッホ電子の波動関数を考慮することにより、Cu-O 結合方向及び Cu-Cu 方向で得られたこれらのスペクトルも $d_{x^2-y^2}$ 波対称性を持つ超伝導ギャップで説明できることが明らかになった。したがって、本研究において単結晶試料側面で得られたスペクトルはすべて $d_{x^2-y^2}$ 波の超伝導ギャップの対称性で説明できる。

一方、4.2K で単結晶試料の劈開面で得られたスペクトルは、ゼロバイアス付近におけるコンダクタンスの振る舞いに場所および試料依存性があるものの、いずれも明確な超伝導ギャップ構造を示している。そして、これらのスペクトルではギャップ端の内側に有限のコンダクタンスが残っており、 a - b 面内で超伝導ギャップが異方的であることを示している。これらのスペクトルに対して、Cu-O 面内の酸素原子の周期配列によるブロッホ電子の波動関数を考慮して、 $d_{x^2-y^2}$ 波モデル、 $\Delta = \Delta_0 \cos 2\theta$ によってフィッティングを行った。その結果、一電子準位の広がり効果を取り入れることによって、ゼロバイアス付近におけるコンダクタンスの振る舞いの場所、試料依存性まで含めて、得られたスペクトルをすべて $d_{x^2-y^2}$ 波で説明できることがわかった。

以上のように、本研究では $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料に対して様々なトンネル方向での STM 分光測定を行い、得られたトンネル微分曲線から超伝導ギャップの対称性を調べた。そして、本研究で得られたトンネル微分曲線はすべて $d_{x^2-y^2}$ 波対称性を持つ超伝導ギャップで統一的に説明できる。このことは、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の超伝導状態における電子対波動関数が $d_{x^2-y^2}$ 波の対称性を持つことを強く示唆している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 野 村 一 成
副 査 教 授 大 川 房 義
副 査 助 教 授 小 田 研

学 位 論 文 題 名

STM Spectroscopy on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Single Crystal

($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料に対するSTM分光測定)

銅酸化物高温超伝導体の超伝導発現の機構に関して、数多くの研究が積み重ねられているが、未だ完全には解明されていない。これに関して、超伝導ギャップの対称性を明らかにすることは、超伝導電子対をもたらす電子間引力の起源を決定するために極めて重要である。超伝導状態の電子状態を調べるためには、走査型トンネル顕微鏡 (STM) によるSTM分光測定は、STM探針と試料表面が非接触であるという理想的な条件下で、試料表面の局所的な電子状態密度を知ることができる極めて優れた実験手段である。著者は、銅酸化物高温超伝導体である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料の超伝導状態において、STM分光測定を行い、得られたトンネル微分曲線の解析から超伝導ギャップ及び電子対波動関数の対称性を明らかにした。

この研究では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶試料のへき開面及びそれに垂直な側面に対してトンネル探針の方向を変化させてSTM分光測定を行い、超伝導ギャップの異方性を調べた。単結晶試料の側面における測定では、銅と酸素の軌道からなる擬二次元的バンドの二次元面内において、トンネル微分コンダクタンスがトンネル電流の方向に依存して変化することを見いだした。微分コンダクタンスは Cu-O 結合方向に近い角度ではゼロバイアス付近でエネルギーに関して平坦な構造を示すのに対して Cu-Cu 結合方向近辺ではゼロバイアス付近でエネルギーに比例する。また、この間の方向ではその関数形が連続的に変化する。このことから、STM分光測定においてトンネル確率の波数依存性を考慮する必要性があることを議論し、WKB近似に基づく波数依存性を用いて結果を解析した。これにより、Cu-Cu 結合方向にノードを持つ $d_{x^2-y^2}$ で表される d 波の対称性の超伝導ギャップモデルで説明できることを示した。一方、Cu-O 結合方向では、超伝導ギャップ構造は観測されず、ゼロバイアス付近でコンダクタンスがピーク構造を示すのに対し、Cu-Cu 結合方向では比較的平坦なギャップ構造が観測される。これらの結果を単純に解釈すれば、超伝導ギャップが $d_{x,y}$ 波の対称性を持っていることを示唆する。しかし、著者は試料表面の酸素原子の軌道の周期配列によるプロッホ電子の波動関数を考慮することにより、へき開面での結果も併せて Cu-O 結合方向及び Cu-Cu 方向で得られたこれらのスペクトルも $d_{x^2-y^2}$ の対称性を持つ超伝導ギャップを統一的に指示していることを明らかにした。

以上のように、著者は、銅酸化物高温超伝導体をSTM分光測定によって調べ、その超伝導ギャップが $d_{x^2-y^2}$ の対称性を持つ確証を与えた。この結果は高温超伝導の起源となる電子間引力を特定する上で重要な指針となるデータを提供したものであり、銅酸化物高温超伝導物質における超伝導状態の発現機構の解明に大きな貢献をなすものである。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。