

博士（理 学） ガイフリーン, B. マラット

学 位 論 文 題 名

# The Josephson Plasma Resonance in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ におけるジョセフソン・プラズマ共鳴)

## 学位論文内容の要旨

高温超伝導体は2次元  $\text{CuO}_2$  面が層状に積み重なった構造を持ち、大きな異方性を示す。特に c 軸方向のコヒーレンス長は面間隔よりも圧倒的に短くなり超伝導状態では各  $\text{CuO}_2$  層はジョセフソン効果により結合した状態となる。この大きな電子状態の異方性により、通常の超伝導体では真空紫外領域にあるプラズモンの励起エネルギーが、高温超伝導体の  $\text{CuO}_2$  面に垂直方向では超伝導ギャップの内側まで減少してしまう。このため面に垂直方向のプラズモンはランダウ減衰や光学フォノン散乱を受けずにきわめて安定に存在する。このプラズマ(ジョセフソン・プラズマ)は通常の超伝導体や金属では観測されなかった興味ある電磁現象をもたらすことが期待される。

一方、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  の 30~60GHz の表面抵抗の磁場依存性の測定から、強い磁場を垂直方向にかけるとマイクロ波のシャープな吸収が観測された。第二種超伝導体の渦糸状態で何らかの共鳴吸収が観測された例はほかになく、渦糸状態や電子状態を研究する上できわめて興味を持たれた。当初、この共鳴は2次元  $\text{CuO}_2$  面で起こっていると考えられ準粒子のサイクロトロン共鳴、渦糸コア内部の準粒子励起モード等の様々な解釈がなされていた。本論文の主要な成果はマイクロ波空洞共振器を用いることにより様々なマイクロ波電場と磁場配置で実験を行い、この共鳴吸収モードが上述のジョセフソン・プラズマ共鳴であることを初めて明らかにしたことである。

高温超伝導体のマイクロ波領域では表面抵抗は一般にきわめて小さい。このため通常は超伝導体で作られた高いQ値を持つ空洞共振器を用いる。しかしながらこの方法では磁場をかけると常伝導になってしまうため強い磁場をかけることができない。申請者はボロメータ法を用いることにより強磁場中でも微弱なマイクロ波吸収を測定できる極め

て高感度な装置を作製した。TSFZ 法により作製した高品質の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  単結晶に対しマイクロ波導波管中で円偏光波をつくりこの共鳴現象の円偏光依存性を調べた。その結果この共鳴現象には円偏光依存性が存在しないことを明らかにし、この共鳴がサイクロトロン運動や渦糸コアの準粒子モードからきている可能性を完全に排除した。ついで、この共鳴が超伝導面内の電子の運動からきているのかそれとも面間の伝導からきているのかを明らかにする実験を行った。このためマイクロ波磁場  $H_{ac}$  とマイクロ波電場  $E_{ac}$  を  $\text{TE}_{102}$  空洞共振器中で  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  試料の超伝導面に垂直にかけてその応答の測定を行った。 $H_{ac}$  をかけた場合マイクロ波電流は超伝導面内にのみ流れるのに対し、 $E_{ac}$  をかけた場合電流は面に垂直方向にのみ流れる。この実験の結果、 $E_{ac}$  を面に垂直にかけた場合のみ共鳴吸収は観測され超伝導面に垂直な電子の運動によりこの共鳴が起こることを初めて明らかにした。この共鳴は通常のサイクロトロン共鳴とは逆にマイクロ波周波数を上げると共鳴磁場が減少すること示された。これらの結果からこの共鳴がジョセフソン・プラズマ共鳴であると結論した。

ジョセフソン・プラズマは超伝導面に垂直なクーパ対の振動モードであり、そのプラズマ周波数の二乗は  $c$  軸方向のジョセフソン臨界電流の強さに比例するなどその特徴を実験的に明らかにした。さらに、ジョセフソン・プラズマ共鳴は渦糸と強く相互作用することから、ジョセフソン・プラズマ共鳴周波数の温度依存性、磁場依存性より面間の位相コヒーレンスの強さを直接定量的に測定した。これにより従来の超伝導体とは大きく異なる高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  の渦糸状態で渦糸格子が熱的に融解した渦糸液体状態などその磁気相図の詳細を得た。

このように申請者は、酸化物高温超伝導体において観測されたマイクロ波吸収がジョセフソン・プラズマ共鳴であることを初めて明らかにし、このジョセフソン・プラズマ共鳴は超伝導渦糸状態を調べる強力な実験手段であることを示した。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |                        |
|-----|-----|------------------------|
| 主 査 | 教 授 | 熊 谷 健 一                |
| 副 査 | 教 授 | 中 原 純一郎                |
| 副 査 | 教 授 | 大 川 房 義                |
| 副 査 | 教 授 | 榊 原 俊 郎                |
| 副 査 | 助教授 | 北 孝 文                  |
| 副 査 | 助教授 | 松 田 祐 司(東京大学大学院理学系研究科) |

## 学 位 論 文 題 名

### The Josephson Plasma Resonance in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  におけるジョセフソン・プラズマ共鳴)

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  の 30～60GHz の表面抵抗の磁場依存性の測定において、強い磁場を垂直方向にかけるとマイクロ波のシャープな吸収が観測された。第二種超伝導体の渦糸状態で何らかの共鳴吸収が観測された例は他になく、渦糸状態や電子状態を研究する上で極めて興味を持たれた。当初、この共鳴は 2 次元  $\text{CuO}_2$  面で起こっていると考えられ準粒子のサイクロトロン共鳴、渦糸コア内部の準粒子励起モード等の様々な解釈がなされていた。これに対し、申請者は、マイクロ波空洞共振器を用いることにより様々なマイクロ波電場と磁場配置で実験を行い、この共鳴吸収モードの特徴を明らかにした。研究の経緯と目的を第 1 章に述べ、本論文の主要な成果は、共鳴吸収モードがジョセフソン・プラズマ共鳴であることを初めて明らかにしたことを要約した。

第 2 章では実験方法について述べている。高温超伝導体のマイクロ波領域では表面抵抗は一般にきわめて小さい。通常は超伝導体で作られた高い Q 値を持つ空洞共振器を用いる。しかしながらこの方法では磁場をかけると常伝導になってしまうため強い磁場をかけることができない。申請者はボロメータ法を用いることにより強磁場中でも微弱なマイクロ波吸収を測定できる極めて高感度な装置を作製した。酸化物超伝導体におけるマイクロ波共鳴現象に関する新たな研究を可能にした実験的開発は高く評価される。

第 3 章ではジョセフソンプラズマ共鳴の実験的検証と現象論的解釈をおこなった。TSFZ 法により作製した高品質の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  単結晶に対しマイクロ波導波管中で共鳴現象の円偏光依存性を調べた。その結果、この共鳴現象には円偏光依存性が存在しな

いことを明らかにし、共鳴がサイクロトロン運動や渦糸コアの準粒子モードからきている可能性を完全に排除した。ついで、この共鳴が超伝導面内の電子の運動からきているのかそれとも面間の伝導からきているのかを明らかにする実験を行った。このためマイクロ波磁場  $H_{ac}$  とマイクロ波電場  $E_{ac}$  を  $TE_{102}$  空洞共振器中で  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  試料の超伝導面に垂直にかけてその応答の測定を行った。この実験の結果、 $E_{ac}$  を  $CuO_2$  面に垂直にかけた場合のみ共鳴吸収は観測され超伝導面に垂直な電子の運動によりこの共鳴が起ることを初めて明らかにした。さらに、この共鳴は通常のサイクロトロン共鳴とは逆にマイクロ波周波数を上げると共鳴磁場が減少することを示すなど深い洞察に基づく実験を遂行し、酸化物高温超伝導体で観測されたマイクロ波共鳴がジョセフソン・プラズマ振動によるものであることを世界で初めて結論し、現象論的解釈を与えた。

第4章ではジョセフソン・プラズマ共鳴測定から超伝導混合状態における新しい物理現象を示した。ジョセフソン・プラズマは超伝導面に垂直なクーパ対の振動モードであり、そのプラズマ周波数の二乗が  $c$  軸方向のジョセフソン臨界電流の強さに比例するなどその特徴を実験的に明らかにした。さらに、ジョセフソン・プラズマ共鳴は渦糸と強く相互作用することから、ジョセフソン・プラズマ共鳴周波数の温度依存性、磁場依存性より面間の位相コヒーレンスの強さを直接定量的に測定した。これにより従来の超伝導体とは大きく異なる高温超伝導体  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$  の渦糸状態で渦糸格子が熱的に融解した渦糸液体状態などその磁気相図の詳細を得た。

このように申請者は、酸化物高温超伝導体において観測されたマイクロ波吸収がジョセフソン・プラズマ共鳴であることを世界で初めて明らかにし、このジョセフソン・プラズマ共鳴法が超伝導渦糸状態を調べる強力な実験手段であることを示したことは、固体物理学および高温超伝導の研究に貢献することが極めて大である。

よって、審査員一同は、最終試験の結果と合わせて、本論文の申請者、ガイフリーン、B. マラットは北海道大学博士(理学)の学位を受けるに十分な資格があるものと認定した。