

学 位 論 文 題 名

# Tunneling Spectroscopy Studies on the Energy Gap of High- $T_c$ Cuprates

(トンネル分光法による高温超伝導体の  
エネルギー・ギャップに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

### 1. Introduction

Superconductivity, a phenomenon that electric resistivity becomes zero below a certain temperature  $T_c$ , was first discovered in mercury in 1911. This phenomenon is brought about by the condensation of electron pairs, which are formed by an electron-electron attractive force, into a macroscopic ground state. In conventional superconductors with low  $T_c$ 's, the electron-electron attractive force occurs through their interactions with the lattice (ion) vibrations. However, in high- $T_c$  cuprates, discovered in 1986 by Bednorz and Müller, the pairing mechanism has been unclear and studied as one of the most interesting problems in solid-state physics.

In the superconducting (SC) state, an energy gap  $\Delta$  (SC gap), reflecting the pairing interaction strength, is formed on the Fermi surface. In conventional superconductors,  $T_c$  scales with  $\Delta$ ; that is,  $\Delta$  is a measure of the characteristic energy in determining  $T_c$ . In high- $T_c$  cuprates, on the other hand, it was reported in scanning tunneling spectroscopy experiments that  $\Delta$  increases monotonically with the lowering of hole-doping level  $p$ , although  $T_c$  decreases after exhibiting a maximum at a certain doping level  $p_0$ ;  $T_c$  does not scale with  $\Delta$  in the underdoped (UD) region below  $p_0$ . Moreover, in the UD region, the electronic property in the normal state is characterized by a significant suppression of the electronic energy spectrum around the Fermi level, the so-called "pseudogap". For this reason, it has been considered that the pseudogap will strongly affect the SC mechanism, and studies on the pseudogap are expected to provide us important information about the SC mechanism in high- $T_c$  cuprates.

In this study, to examine the pseudogap, I measured the temperature dependence of tunneling spectrum on  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212). Furthermore, I examined the relation between  $T_c$  and  $\Delta$  in Bi2212 to clarify the characteristic energy in determining the  $T_c$  of high-temperature cuprate superconductivity.

### 2. Experiment

Bi2212 crystals were grown using the TSFZ method. The present tunneling experiments were performed in break-junctions, fabricated by using a scanning tunneling

microscope (STM) system (Olympus LTSTM-300). In the experiments, the STM tip was contacted with a crystal vertically to the cleaved surface so that a very small piece of the crystal stuck to the tip, and then retracted back from the crystal; the crystal was cleaved, and a fresh Bi2212/vacuum/Bi2212 junction, which is of Superconductor-Insulator-Superconductor type below  $T_c$ , was fabricated.

### 3. Results and Discussion

After performing tunneling experiments in Bi2212/vacuum/Bi2212 junctions and comprehensive data analyses, I found out the following features of the energy gap in Bi2212. In the electronic excitations, there exist two kinds of pseudogaps with different characteristic energies; the small energy-scale pseudogap (SPG) which is comparable to the SC gap magnitude  $2\Delta$  at  $T \ll T_c$  and the large energy-scale pseudogap (LPG) which is 3 to 4 times larger. The SPG develops progressively below the mean-field SC critical temperature  $T_{co}$  ( $\equiv 2\Delta/4.3k_B$ ,  $k_B$ : Boltzmann's constant), in addition to the LPG, which already exists above  $T_{co}$ . Furthermore, the SPG smoothly evolves into the SC gap with no tendency to close at  $T_c$ . These findings strongly suggest that the SPG will be a precursor of superconductivity, probably due to the formation of preformed singlet pairs of some kind. On the other hand, the LPG, which remains open even in the high-temperature region above  $T_{co}$ , is related to the crossover behavior of uniform magnetic susceptibility around  $T_{max}$  ( $\gg T_{co}$ ), which arises from the gradual development of antiferromagnetic spin fluctuations.

Additionally, it was found in underdoped Bi2212 that in accordance with the SC transition, the characteristic feature of the spectrum at high energies also changes from a LPG-like broad hump structure to a clear dip-hump structure accompanied by a small shift of the hump position, in addition to the rapid growth of the SC gap from the SPG at low energies. Such high-energy behavior of the tunneling spectrum across  $T_c$  was explained as follows: in the SC state below  $T_c$ , where a coherent spin-singlet state is realized, the antiferromagnetic spin fluctuations are expected to be strongly suppressed, leading to the observed modification of the high-energy tunneling spectrum responsible for the LPG.

It was confirmed in the present Bi2212/vacuum/Bi2212 junction experiments that the SC gap amplitude  $\Delta$  at  $T \ll T_c$ , increases monotonically as a function of decreasing hole-doping level  $p$  within the Cu-O plane, while  $T_c$  starts to decrease after exhibiting a broad maximum at  $p_0 \sim 0.18$ ;  $\Delta$  does not scale with  $T_c$ . This feature of the SC gap in high- $T_c$  cuprates is quite different from the expectation ( $T_c \propto \Delta$ ) in conventional superconductors, as mentioned in section 1. In addition, a novel relation between  $T_c$  and  $\Delta$  was found out in the present study;  $T_c$  is nearly proportional to the product of  $\Delta$  and  $p$ , that is,  $T_c \sim p\Delta$ . This means that the characteristic energy in determining  $T_c$  is of order  $p\Delta$  in high- $T_c$  cuprates, instead of  $\Delta$  in conventional superconductors. It was also found that the novel relation between  $T_c$  and  $\Delta$ ,  $T_c \sim p\Delta$  is consistent with a scenario for the transition from pseudogap to superconducting states, proposed in some theoretical studies; in the scenario, carriers with high mobility on the Fermi arc around  $(\pm\pi/2, \pm\pi/2)$ , whose length seems to be proportional to  $p$ , play an important role in the establishment of the long-range phase coherence in the collective motion of pairs, leading to the SC transition at  $T_c$ .

# 学位論文審査の要旨

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

## 学 位 論 文 題 名

### Tunneling Spectroscopy Studies on the Energy Gap of High- $T_c$ Cuprates

(トンネル分光法による高温超伝導体の  
エネルギー・ギャップに関する研究)

近年発見された銅酸化物高温超伝導体の超伝導発現機構は、固体物理学の最も興味深い問題の1つとして現在精力的に研究されている。BCS 平均場理論によると、従来型超伝導の転移温度  $T_c$  を決めるエネルギー・スケールは、電子のスペクトルに形成されるギャップ（超伝導ギャップ： $\Delta$ ）である。一方、高温超伝導の  $T_c$  を決めるエネルギー・スケールは  $\Delta$  ではないことが、最近のトンネル分光や光電子分光の実験で明らかになってきた。また、高温超伝導体では、従来型超伝導体には見られない擬ギャップと呼ばれるギャップ様構造が正常状態の電子のスペクトルに発達することも明らかになっており、その発達が  $T_c$  を決めるエネルギー・スケールに深く関わっていると考えられている。このため、擬ギャップは高温超伝導の機構解明の鍵を握る現象として注目されており、現在活発な研究がなされている。

以上の研究状況を踏まえ、申請者は、代表的な高温超伝導体の1つである  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  において、電子のスペクトルを高いエネルギー分解能で精度良く測定できるトンネル分光により、擬ギャップの性質を詳しく調べた。また、高温超伝導体の  $T_c$  を決める特性エネルギーを明らかにするため、 $T_c$  と  $\Delta$  の関係も調べた。この研究で得られた結果を以下に記す。

- 1) 特性エネルギーの異なる2種類の擬ギャップが、正常状態における電子のスペクトルに存在することを明らかにした。また、小さい特性エネルギーの擬ギャップ (SPG) は、超伝導ギャップ  $\Delta$  とほぼ同じ大きさで、 $\Delta$  でスケールされる BCS 超伝導の転移温度  $T_\infty$  付近より低温で発達し、 $T_c$  以下で超伝導ギャップに連続的に移行することも明らかになった。この結果は、SPG が超伝導の前駆現象であることを強く示唆するものである。さらに、大きい特性エネルギーの擬ギャップ (LPG) は、 $T_\infty$  より高温においても存在しており、反強磁性スピン揺らぎの発達に起因する一様磁化率のクロスオーバー的な振舞いに関係することが明らかになった。
- 2)  $T_c$  と  $\Delta$  のキャリアー（ホール）濃度  $p$  依存性を詳しく調べることにより、 $T_c$  が  $p$  と  $\Delta$  の積でスケールされること、すなわち、高温超伝導の  $T_c$  を決めるエネルギー・スケールが  $p\Delta$  となることを明らかにした。この結果は、エネルギー・ギャップの温度発展に関する角度分解型光電子分光の結果を考慮すると、高い易動度のホールが存在するコールド・スポットと呼ばれるフェルミ面上に  $T_c$  以下で開くギャップの大きさが  $p\Delta$  程度になること意味しており、また、コールド・スポット部分のホールが超伝導の発現に深く関わっていることを強く示唆するもの

である。このことは、最近提案された高温超伝導の発現機構に関するモデルと符合しており、その機構解明に繋がり得る重要な知見として注目を集めている。

以上の申請者の研究は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ におけるトンネル・スペクトルの測定から擬ギャップの起源を明らかにしただけでなく、擬ギャップ状態から超伝導への転移温度  $T_c$  を決めるエネルギー・スケールを実験的に示して高温超伝導の機構に関する重要な知見を得たもので、高い評価を受けている。また、本研究に関する申請者の7編の論文は、いずれも権威ある国際学術誌に発表されている。よって、審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有すると認めた。