

高温超伝導体の巨視的トンネリング

電気通信研究所 佐藤茂雄 (shigeo@riec.tohoku.ac.jp)
 電気通信研究所 中島康治 (hello@riec.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

超伝導体の位相などに代表されるような巨視的量子変数上でのトンネル現象は巨視的量子トンネリング (Macroscopic Quantum Tunneling, MQT) と呼ばれる。ジョセフソン接合、 ^3He - ^4He 混合液、単磁区磁石などで MQT が報告されている[1]。超伝導体では、Nb を用いたジョセフソン接合を用いて、超伝導電極間の位相差がトンネル現象を示すことを Voss と Webb が 1981 年に初めて報告した[2]。Caldeira と Leggett によれば、環境体は古典的な摩擦に対応する量子摩擦によって、MQT に抑制効果をもたらす[3], [4]。すなわち、超伝導電極間の位相差のような巨視的な自由度は、環境との結合によってエネルギー散逸を伴いながら運動する。Voss と Webb の実験結果はこの摩擦の効果を支持する結果となっており、トンネル確率が低下することが証明された。巨視的量子トンネリング (MQT) の特性を調べることで、量子コヒーレンスや量子摩擦などの量子特性を知ることができる。さて、金属系のいわゆる低温超伝導体での MQT[5], [6]はよく理解されてきており、現在では当たり前のように観測が行われている。一方、銅酸化物高温超伝導体では、チャルマース工科大学[7]と東北大[8]のグループによって、2005 年に相次いで、MQT が報告された。高温超伝導体では超伝導ギャップが d 波的であるため、超伝導ギャップの消失したノードからノード準粒子が励起されることが知られている[9]。ノード準粒子はエネルギー散逸を伴うことから、デコヒーレンスの要因になるという懸念があった。しかし実際の実験結果は、デコヒーレンスが、少なくとも MQT の観測を阻害するほど大きくはないということを示している。本稿では、銅酸化物高温超伝導体

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) 固有ジョセフソン接合における MQT と、共鳴特性について報告する。

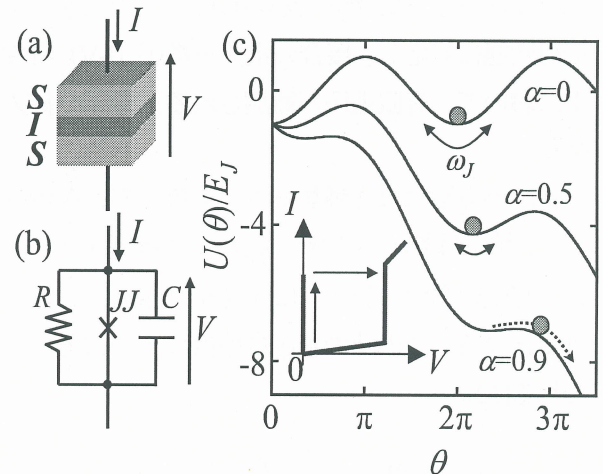


図1 ジョセフソン接合の構造(a)とその等価回路(b)、及び洗濯板型ポテンシャル中の仮想粒子の運動の様子(挿入図はジョセフソン接合の I - V 特性) (c)

2. ジョセフソン接合の力学と巨視的量子トンネリング (MQT)

図 1 (a) に示すように、薄い絶縁膜 I を二つの超伝導体 S で挟み込んだ、超伝導体のトンネル接合として知られるジョセフソン接合は、接合のキャパシタンス C と抵抗 R の並列回路としてモデル化される[10], [11] (同図(b))。このジョセフソン接合の等価回路モデルにおいて成立する回路方程式より、電流バイアス下における接合のポテンシャル $U(\theta)$ は次式で与えられる。

$$U(\theta) = -E_J (\alpha\theta + \cos\theta) \quad (1)$$

ここで、 E_J はジョセフソンエネルギー、 θ はジョセフソン接合を構成している二つの超伝導体間の波動関数の位相差、 α は接合の臨界電流 I_c とバイアス電流 I の比 ($\alpha = I/I_c$) である。横軸を位相差としてこの式をグラフ化すると、同図(c)のように、バイアス電流の増加に伴いその傾きが

大きくなる洗濯板型ポテンシャルとなる。このポテンシャルを用いると、接合の状態を仮想粒子の運動とみなすことができる。接合が超伝導状態(零電圧状態)であるときは、粒子がポテンシャル井戸の底にトラップされ(同図(c) $\alpha = 0, 0.5$)、バイアス電流に依存するジョセフソンプラズマ角周波数 ω_J で振動する。一方、バイアス電流が大きくなると洗濯板型ポテンシャルは傾き、粒子がポテンシャル井戸から脱出し、ポテンシャルの坂を転がり落ちる(同図(c) $\alpha = 0.9$)。この状態は常伝導状態に対応し、接合の電流-電圧 (I-V) 特性上において、有限電圧が観測される(同図(c)挿入図)。

脱出の方法には2種類あり、温度の高い環境下では、粒子は熱エネルギー $k_B T$ によって活性化され、有限のポテンシャル障壁を乗り越えることが可能となる。この時の脱出確率は以下の式で与えられる[12]。

$$\tau_{TA}^{-1} = a_t \frac{\omega_J}{2\pi} \exp\left(-\frac{U_0}{k_B T}\right) \quad (2)$$

ここで a_t は温度や減衰に関する係数であり、 U_0 はポテンシャル障壁の大きさである。これに対して、環境の温度を 0 K に向けて徐々に減少させていくと、熱活性による粒子の脱出確率は、指数関数的に抑制される。すると、粒子はポテンシャル障壁を量子力学的なトンネリング、すなわち MQT によって通り抜け始める。MQT による粒子の脱出確率は環境の温度に対して独立であり、以下の式で与えられる[3]。

$$\tau_{MQT}^{-1} = \sqrt{60}\omega_J \sqrt{\frac{b}{2\pi}} \exp(-b) \quad (3)$$

ここで b は

$$b = \frac{36U_0}{5\hbar\omega_J} \left(1 + \frac{1.74}{2RC\omega_J}\right) \quad (4)$$

である。熱活性が十分に抑えられた極低温環境において MQT による脱出が支配的となる。従って、ある温度 $T^*(\omega_J)$ を境に、熱励起による古典的な現象と MQT による量子的な現象がクロスオーバ

一することが予想される。接合を電圧状態にスイッチングさせる電流 (スイッチング電流) $I_{SW} (< I_C)$ に対して、零電圧状態から有限電圧状態へのスイッチングを統計的にカウントしたヒストグラム $P(I_{SW})$ の温度依存性を調べることで、MQT が起こっているかどうかを知ることができる。

3. 固有ジョセフソン接合における MQT

銅酸化物高温超伝導体 Bi-2212 の結晶構造は、高温超伝導特性を示す CuO_2 層と絶縁体である SrO 層、BiO 層が結晶 c 軸方向に周期的に積層した構造となっている(図2)。この周期構造は、超伝導体のトンネル接合であるジョセフソン接合と等価であり、固有ジョセフソン接合(IJJs)とよばれる。図2(a)に示すように IJJs の積層周期は約 15 Å と原子サイズのオーダーであり、また、接合界面も同様に原子レベルの平坦性を保っている。

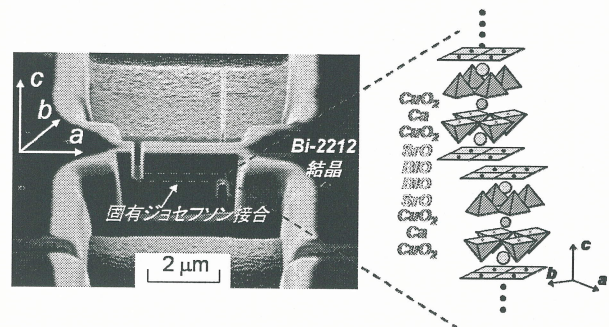


図2 Bi-2212 固有ジョセフソン接合列

Bi-2212 を含む銅酸化物超伝導体結晶では複数の接合が積層しているため、単一接合へ電流バイアスすることは不可能で、複数の接合に直列に電流を流すことになる。ただし、我々のサンプルのように FIB により加工されたサンプルでは臨界電流 I_C にばらつきがあるため、バイアス電流が小さい領域では、臨界電流の最も小さい接合の特性が支配的であり単一接合の特性を調べることが可能である。実際にスイッチング時の電流を測定すると、図3に示すようなスイッチング電流の頻度分布 $P(I_{SW})$ が得られる。

さらに温度を変えながらスイッチング電流の分布幅(標準偏差)をプロットすると、低温側では

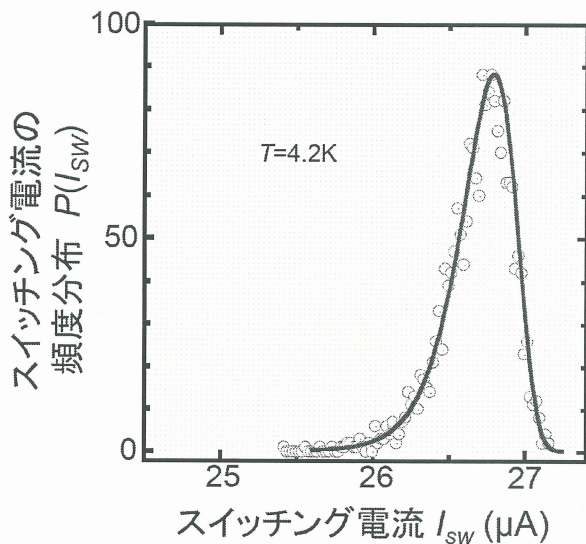


図3 スイッチング電流分布 $P(I_{SW})$ の例

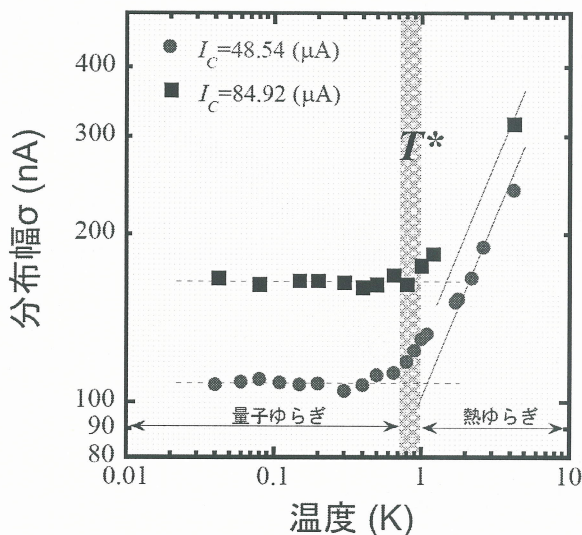


図4 スイッチング電流の分布幅 (標準偏差) の温度依存

量子トンネリングが支配的になるため、 σ が一定になる。逆に高温側では熱励起の特性を反映して温度 T の $2/3$ 乗に比例する特性が得られる[12]。実際の実験結果を図4に示す。約1K以下で巨視的量子トンネリングが起きていることがわかる。川畑らの理論的結果[13]が示すように、低エネルギー準粒子の影響は巨視的量子トンネリングを阻害するほど大きくはなく、このような温度領域では位相差 θ を量子変数として利用することが可能である。なお、環境体との相互作用による効果としての量子摩擦 (σ の減少) は確認できていない。

4. 共鳴特性

ポテンシャルからの脱出のメカニズムとして、熱励起と量子トンネリング以外に、マイクロ波による共鳴励起を考えることができる。図5に示すように、バイアス電流を調整すると3つのエネルギー準位が存在するポテンシャル井戸を実現することができ、これらのエネルギー準位を利用した位相量子ビットが Martinis らによって提案されている[14]。エネルギー差に相当する角周波数 ω_{01} もしくは ω_{12} を持つマイクロ波を照射することにより、量子状態を制御することが可能である。共鳴周波数はポテンシャルの式から求めることができるが、バイアス電流が大きくなると非調和型となり、上の準位に行くほどエネルギー差及び共鳴周波数が小さくなる。準位によって共鳴周波数が変わるため、選択的に状態を遷移させることができ、量子ビットとしての動作が可能になる。共鳴条件を満足するマイクロ波を照射した状態で前節と同様の測定を行うと、基底状態から上の準位への励起が起これ、結果としてスイッチング電流が減少する。図6にシングルフォトン (ω_{01}) による共鳴実験の結果を示す。マイクロ波の電力を増加していくと、あるところでスイッチング電流が小さくなり、励起準位からトンネリングが起きていることが確認できる。

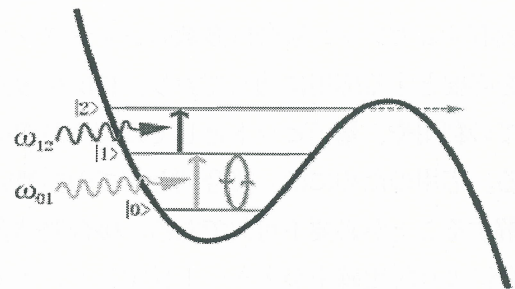


図5 位相量子ビット

マイクロ波照射が有る場合と無い場合のスイッチング電流分布 $P(I_{SW})$ の差から共鳴曲線を求めることが可能[5]で、この接合の Q 値は約70程度であることが確かめられる。量子ビットのような量子デバイスへの応用のためには量子コヒーレンスの保持が重要課題であり、 Q 値の改善が必要である。

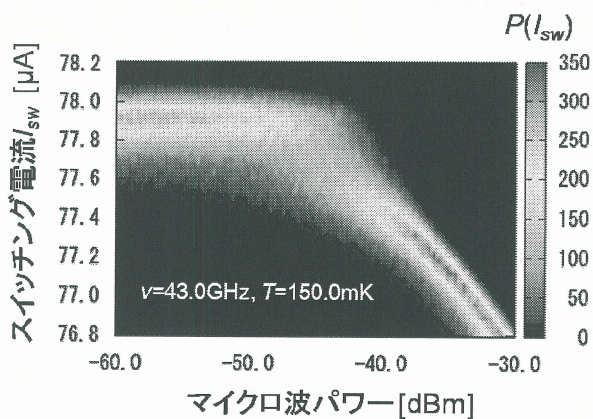


図6 マイクロ波パワーに対するスイッチング電流分布の変化

5. おわりに

本稿では、銅酸化物高温超伝導体 Bi-2212 固有ジョセフソン接合における MQT の実験結果を紹介した。金属超伝導体は超伝導ギャップが等方的 (s 波) であるのに対し、銅酸化物超伝導体では異方的 (d 波) である。この超伝導ギャップの幾何学的構造に由来して励起されるノード準粒子が、MQT の観測を困難にさせると考えられてきたが、このような準粒子の影響は MQT の観測にさほど大きな影響を与えないということが明らかとなった。

今後、高温超伝導体の量子デバイスとしての応用が期待される。特に、結晶中に自然に形成される固有ジョセフソン接合は多数のジョセフソン接合を必要とする応用に適しており、THz 発振器としての利用や、量子ビットとしての利用が期待される。応用のためには、接合列としての振舞いを理解することが必要不可欠である。接合間結合の影響により脱出確率が大きく上昇するという報告 [15] もあり、接合間結合と集団的運動の関係について詳しく理解する必要がある。

また MQT 領域における脱出確率は、インスタントン法を用いた一次元 (一接合) の経路積分によって求められる [16]。しかし、多次元 (多接合) への適用は困難であり、実験による検証が不可欠である。工学的観点からだけでなく、物理学的観点からも重要課題である。

謝辞

ここで紹介した内容は、猪股邦宏 (RIKEN)、王華兵 (NIMS) 両氏との共同研究による成果である。小山富男 (東北大学金属材料研究所)、町田昌彦 (JAEA)、北野晴久 (青学大) 各氏にも議論していただいた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 高木伸, 「巨視的トンネル現象」, 岩波書店 (1997).
- [2] R. F. Voss and R. A. Webb, Phys. Rev. Lett. **47** (1981) 265.
- [3] A. O. Caldeira and A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **46** (1981) 211.
- [4] A. O. Caldeira and A. J. Leggett, Ann. Phys. **149** (1983) 374.
- [5] J. Clarke, A. N. Cleland, M. H. Devoret, D. Esteve, J. M. Martinis, Science **239** (1988) 992.
- [6] A. Wallraff, A. Lukashenko, C. Coqui, A. Kemp, T. Duty, A. V. Ustinov, Rev. Sci. Instrum. **74** (2003) 3740.
- [7] T. Bauch, F. Lombardi, F. Tafuri, A. Barone, G. Rotoli, P. Delsing, T. Claeson, Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 087003.
- [8] K. Inomata, S. Sato, Koji Nakajima, A. Tanaka, Y. Takano, H. B. Wang, M. Nagao, T. Hatano, S. Kawabata, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 107005.
- [9] D. J. V. Harlingen, Rev. Mod. Phys. **67** (1995) 515.
- [10] W. C. Stewart, Appl. Phys. Lett. **12** (1968) 277.
- [11] D. E. McCumber, J. Appl. Phys. **39** (1968) 3113.
- [12] H. Kramers, Physica **4** (1940) 284.
- [13] S. Kawabata, S. Kashiwaya, Y. Asano, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **70** (2004) 132505.
- [14] J. M. Martinis, S. Nam and J. Aumentado, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 117901.
- [15] X. Y. Jin, J. Lisenfeld, Y. Koval, A. Lukashenko, A. V. Ustinov, P. Muller: Phys. Rev. Lett. **96**, (2006) 177003.
- [16] Sydney Coleman, "Aspects of Symmetry" (Cambridge University Press, New York), (1985).