

## 集積機能工学講座

<http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp>

### 高温超伝導体固有ジョセフソン接合における協力的量子トンネル現象

超伝導現象は、電子の波動性が巨視的に現れる巨視的量子現象の代表例であり、巨視的な世界では非常識な現象が観測されます。そのひとつがジョセフソン接合に見られる巨視的量子トンネル現象です。ハイゼンベルグが予言した不確定性によるトンネル効果が、電流電圧特性のゆらぎに現れ、この現象は量子計算機を構成する量子ビットの動作原理となります。最近、カナダのベンチャー企業である D-Wave 社から最適化問題を解く量子アニーリング装置が発売され、NASA、ロッキードマーチンなどが導入したことが大きな話題となりました。ここで使われているデバイスもジョセフソン接合における量子トンネルを応用したものです。また、Google は超伝導量子ビットで世界をリードしてきたカリフォルニア大学サンタバーバラ校の John Martinis 教授の研究室を丸ごと買収し、量子計算機の独自開発を進めています。一方、高温超伝導体の c 軸方向には、およそ 1 nm という結晶構造の周期で超伝導性の強さが空間的に強く変調されているため、ジョセフソン接合が積層していると考えられます。この接合を固有ジョセフソン接合と呼びます。積層する固有ジョセフソン接合は、多数層を含む長距離的な相互作用と、隣接層間だけに及ぶ短距離的な相互作用により結合しており、これが多様な現象をもたらします。私たちは、高温超伝導体固有ジョセフソン接合間の短距離的な相互作用に由来する現象を抽出することに成功しました。これは、技術的に困難といわれてきた固有ジョセフソン接合を量子ビットとして利用するためのブレークスルーとなり、希釈冷凍機が不要な、大幅に小型化された量子計算機を実現することができます。

私たちは、独自の技術を用いて少数の固有ジョセフソン接合が積層するメサ構造を抽出し、特定の固有ジョセフソン接合がゼロ電圧状態から有限電圧状態に転移する電圧スイッチング特性を 0.4 ケルビンの極低温まで測定しました。メサ構造は、Bi2201, Bi2212, Bi2223 と呼ばれる 3 種類の超伝導体の単結晶に作製しました。これらの超伝導体では、ジョセフソン接合の周期が 1.2, 1.5, 1.8 nm と変化していく点を利用して、相互作用を変化できることに着目しました。メサ構造の最上にある第一接合と、第二接合のスイッチング特性における量子ゆらぎを評価したところ、Bi2201 と Bi2212 では、第二接合の量子ゆらぎを示す温度が第一接合のその十倍程度を示しているのに対して、ジョセフソン接合が比較的離れた Bi2223 では、両接合の量子ゆらぎは同等になるという結果が得られました。これは、Bi2201 と Bi2212 では、前述の短距離的な相互作用により協力的な量子トンネル現象が起きており、それがわずか 0.3 nm のジョセフソン接合間距離の増加により消失してしまうという興味深い事実を示しています。

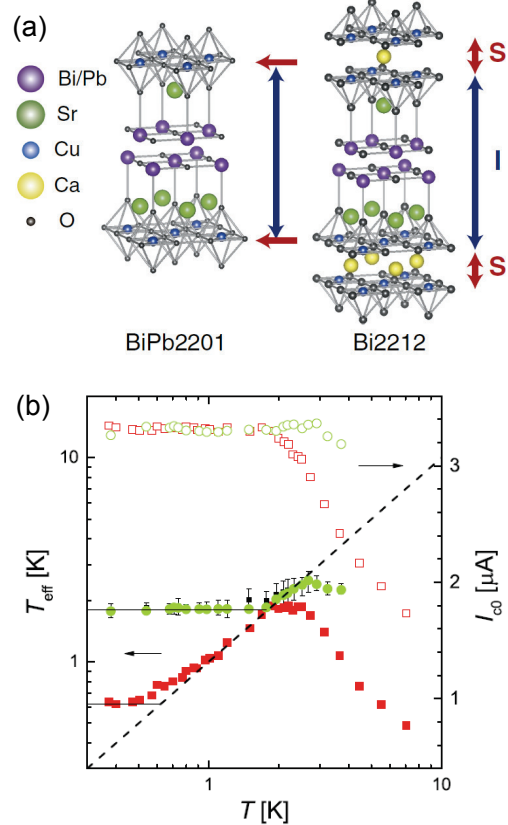


図:(a) Bi2201(左)と Bi2212(右)の結晶構造。S と書かれている原子層に超伝導性が集中して、ジョセフソン接合を形成しています。(b) Bi2201 における第一接合(赤)と第二接合(緑)のスイッチ揺らぎを示す温度が素子温度によって変化していく様子。0.4 ケルビンにおいて観測される量子ゆらぎは第二接合では第一接合に比べて顕著です。