

論文の内容の要旨

論文題目 高温超伝導体固有ジョセフソン接合における位相ダイナミクスの研究

氏名 太田 健介

背景、目的

超伝導体と超伝導体が絶縁体などを介し弱く結合されるときクーパー対が接合間をトンネルすることができる。これをジョセフソン接合と言い、ジョセフソン接合は二つの超伝導体の巨視的波動関数の位相差 γ を用いて記述される。そして、電流を印可したジョセフソン接合の位相ダイナミクスは、位相 γ の空間中の傾けた洗濯板状ポテンシャルにおける質点の運動に置き換えることができる。ポテンシャル井戸中に質点が捕捉された状態が電圧 $V = 0$ 、そこから抜け出して転がり落ちる状態が $V \neq 0$ に対応する。 $V = 0$ から $V \neq 0$ へ脱出する過程は高温では熱ゆらぎによる熱活性型 (TA) であるのに対し、十分低温にするとポテンシャル障壁をトンネルによって脱出する巨視的量子トンネリング (MQT) と呼ばれる量子力学的な振る舞いになる [1]。脱出過程において MQT が支配的な低温では、ポテンシャル井戸中の離散化量子準位が観測される。近年この離散化量子準位を量子ビットに応用する研究が活発化している。しかし、従来超伝導体を用いた量子ビットの動作温度は希釈冷凍機等でしか到達できない 10 mK 程度である。

一方、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (Bi2212) などの銅酸化物高温超伝導体は超伝導層と絶縁層が交互に積層した結晶構造を持ち、多数のジョセフソン接合が固有に形成された固有ジョセフソン接合系 (IJJ) とみなされる [2]。ポテンシャル井戸中にできる離散化量子準位間のエネルギーはジョセフソンプラズマ周波数に依存する。従来超伝導体で作成される接合のジョセフソンプラズマ周波数が 10 GHz 程度であるのに比べ、高温超伝導体では 300 GHz~2 THz であることが知られている。従って、高温超伝導体を量子ビットに用いることができればより高温で動作することが可能である。

近年、IJJ を量子ビットへ応用することを目的とし、IJJ における脱出確率 $\tau^{-1}(I)$ の測定が行われた [3, 4]。これらの結果では約 1 K で MQT が観測され、確かに量子ビットの高温動作が可能であることが示された。しかし、多層接合系である IJJ では複雑な位相ダイナミクスが期待される振る舞いも観測された [4]。

本研究の目的は、固有ジョセフソン接合における位相ダイナミクスを調べることである。 $\tau^{-1}(I)$ の測

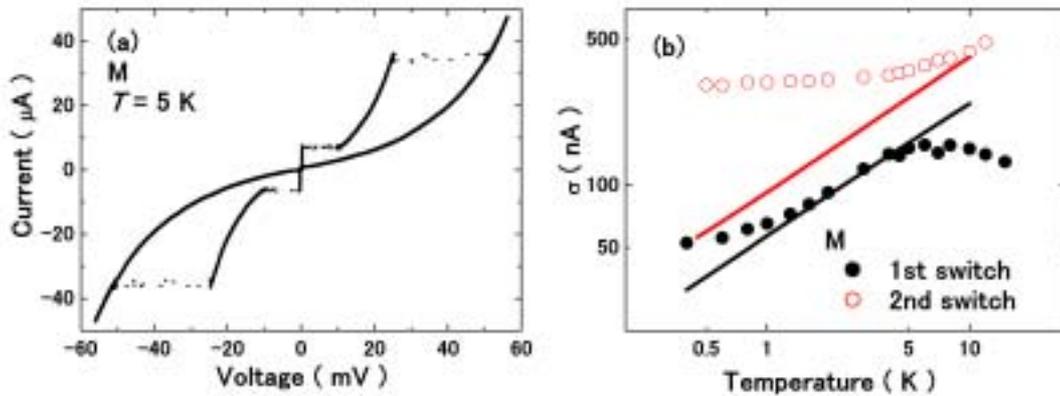


図 1: (a) IJJ の電流電圧特性, (b) 1st スイッチ、2nd スイッチにおける $P(I)$ の標準偏差 $\sigma(T)$ の温度依存性。点が実験値、実線が計算値を示す。

定を行い、脱出過程において何が支配的かを調べた。また、素子構造に起因したヒーティングや、準粒子注入の影響についても、実験的に調べた。

実験方法

集束イオンビームを用いて Bi2212 単結晶を S 字状に微細加工した。これにより結晶の c 軸方向、すなわち、IJJ の電流電圧特性を測定が可能になる。脱出過程が素子構造に依存するかを調べるため、京都大学鈴木研において Bi2212 単結晶から電子ビーム露光を用いて作製されたメサ構造の IJJ の測定も行った。La_{2-x}Sr_xCuO₄ (La214) 薄膜、La214 単結晶においても集束イオンビームを用いて S 字状の微細加工を行い同様の測定を行った。

ポテンシャルからの脱出過程は脱出確率 $\tau^{-1}(I)$ を測定することによって観測可能である。そして、 $\tau^{-1}(I)$ はスイッチング電流確率分布 $P(I)$ と次式の関係にある。

$$P(I) = \tau^{-1}(I) \left(\frac{dI}{dt} \right)^{-1} \left(1 - \int_0^I P(u) du \right) \quad (1)$$

$P(I)$ はバイアス電流を単調に増加させる時に初めて $V = 0$ から $V \neq 0$ へ電圧スイッチがおこる電流の確率分布である。すなわち、電流電圧測定を繰り返し行い、スイッチングする電流の統計分布を求めることによって $P(I)$ は得られる。

結果及び考察

Bi₂Sr₂CaCu₂O_y 固有ジョセフソン接合の典型的な電流電圧特性を図 1(a) に示す。接合数だけ電圧スイッチが起こり、電圧分枝が現れる。図 1(a) におけるゼロ電圧状態から第一電圧分枝への 1st スイッチ、及び、第一電圧分枝から第二電圧分枝への 2nd スイッチにおいて脱出確率の測定を行った。メサ型試料の Bi2212 固有ジョセフソン接合における、1st スイッチ、及び 2nd スイッチのスイッチング電流確率分

布 $P(I)$ の標準偏差 $\sigma(T)$ を図 1(b) に示す。1st スイッチにおいて、温度と共に $\sigma(T)$ が減少し、約 1 K 以下で $\sigma(T)$ が温度に依存しない振る舞いが見られる。TA による脱出確率の計算値と一致し、TA から MQT へのクロスオーバー温度の見積もりと一致することから、脱出過程が TA から MQT へ移行していることが示唆される。TA の高温領域で、温度の上昇と共に $\sigma(T)$ が減少する振る舞いについては Phase retrap により解釈することができた。1st スイッチにおいては S 字型試料においても同様の振る舞いが観測された。MQT による脱出過程を確かめるため、マイクロ波照射下でスイッチング電流確率分布の測定を行った。基底状態と第一励起状態間のエネルギーとマイクロ波の周波数が一致すると準位間の励起が起こる。図 2(a) に示したように、マイクロ波を照射すると、基底状態からのスイッチング確率のピークに加え、励起状態からのピークが観測された。また、マイクロ波の周波数とエネルギー準位間隔の計算値が一致した。以上により、MQT の観測、離散化量子準位の観測に成功したことがわかる。

2nd スイッチにおいても図 1(b) で示したように、定性的には 1st スイッチと同様の振る舞いが観測された。しかし、温度に依存しなくなる温度 T_s^{2nd} は約 10 K と 1 桁程度大きい。1st スイッチにより電圧状態になった接合部においてエネルギー損失が生じるため、ヒーティングの影響が考えられる。しかし、熱伝導の機構が全く異なる S 字型試料、メサ型試料で T_s^{2nd} はほとんど同程度であり、ヒーティングの寄与だけでは説明できない。ヒーティングの寄与をさらに定量的に調べるために、バイアス電流のパルス幅を変化させて脱出確率の測定を行った。図 2(b) に示すように、脱出確率はパルス幅に依存せず、ヒーティングのパワーであるバイアス電流にも脱出温度 T_{esc} が依存しないことからヒーティングの寄与は無視できる程度であることが分かる。1st スイッチにより電圧状態になった接合部からの準粒子の寄与が考えられるが、定量的な計算結果から、準粒子による温度上昇は見込めないことが分かった。最後に、MQT の可能性が挙げられる。2nd スイッチでは、1st スイッチが電圧状態になっていることから接合間相互作用の寄与が顕著になりクロスオーバー温度が高くなったことが考えられる。 T_s^{2nd} から見積もられるエネルギー準位間隔は THz 領域に達する。そのため、離散化量子準位の観測は THz 波の照射を行う必要があり、今後の課題として挙げられる。

La214 の IJJ においても同様の実験を行った。La214 薄膜から作製した IJJ は薄膜試料に特有の grain boundary の影響により overdamped 接合の特性になり、脱出確率の測定には適さないことが分かった。そこで、La214 単結晶から作製した IJJ において $P(I)$ の測定を行った。 $\sigma(T)$ の結果を図 3 に示す。Bi2212 の IJJ と同様の低温で $\sigma(T)$ が温度に依存しない振る舞いが見られた。そして、TA から MQT のクロスオーバー温度の見積もりとほぼ一致した。しかし、TA における脱出確率の定量的な一致は見られなかった。これは、接合サイズがジョセフソン侵入長 λ_J よりも大きな接合の時に現れる large junction の効果が考えられる。La214 は Bi2212 よりもさらに小さい λ_J を持つため ($\lambda_J < 0.1 \mu\text{m}$)、位相差 γ が空間に依存する large junction に属する可能性がある。さらに、Bi2212 に比べ異方性が小さい La214 では接合間の相互作用が強い系であり、接合間の相互作用によってポテンシャル構造が変わったことも考えられる。

結論

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合、及び、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 固有ジョセフソン接合において、脱出確率 $\tau^{-1}(I)$ の測定を行った。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 固有ジョセフソン接合の 1st スイッチにおいて脱出過程が TA から MQT に移行する振る舞いが観測され、マイクロ波照射による離散化量子準位の観測にも成功した。そして、素子の構造によらず、定量的にも一致が見られたことから、1st スイッチにおいては単一接合のモデルで理解することができることがわかった。2nd スイッチにおいては 1st スイッチと定性

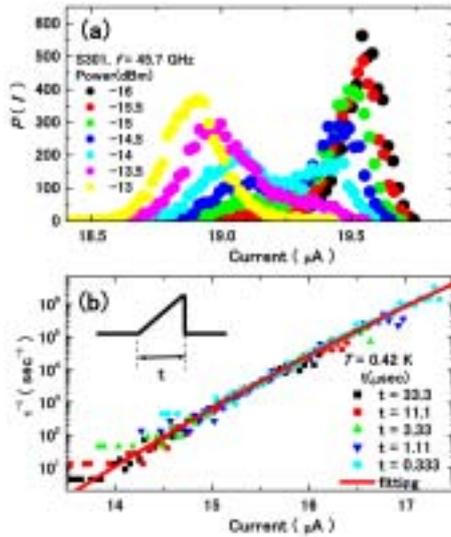


図 2: (a) 1st スイッチのマイクロ波照射下における $P(I)$ の測定結果, (b) 2nd スイッチの脱出確率 $\tau^{-1}(I)$ のパルス幅依存性

的には同様の振る舞いが観測されたが、温度に依存しなくなる温度は 1st スイッチの温度、及び単一接合から見積もられるクロスオーバー温度よりも高温となった。実験的な検証からヒーティングではないことが確認された。準粒子の可能性も低いことが分かり、MQT の可能性が示唆され、今後の研究の指針を示す結果となった。La214 においても脱出確率の測定を行った。Bi2212 と同様の振る舞いが観測されたが、定量的な不一致が見られた。これは large junction の効果、及び接合間相互作用の効果が示唆された。

参考文献

- [1] R. F. Voss and R. A. Webb, Phys. Rev. Lett. 47, 265 (1981).
- [2] R. Kleiner and P. Müller, Phys. Rev. Lett. 49, 1327 (1994).
- [3] K. Inomata et al., Phys. Rev. Lett. 95, 107005 (2005); X. Y. Jin et al., Phys. Rev. Lett. 96, 177003 (2006).
- [4] X. Y. Jin et al., Phys. Rev. Lett. 96, 177003 (2006).

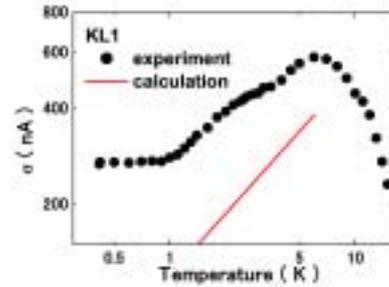


図 3: La214 固有ジョセフソン接合における $P(I)$ の標準偏差 $\sigma(T)$ の温度依存性。点が実験値、実線が計算値を示す。