

強く結合したジョセフソン接合集団における 巨視的量子トンネル現象の理論

産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門, JST-CREST, 川畑 史郎¹, 知崎 陽一

強く結合したジョセフソン接合集団において、1つの接合が有限電圧状態にある場合の巨視的量子トンネル現象 (MQT) のに関して研究を行った。この系は、周期的摂動下の1次元モデルへマップできるため、時間依存 WKB 法を用いて MQT 率を計算できる。その結果 MQT 率は、結合がない場合に比べて異常に増大する事がわかった。

1 イントロ

巨視的量子トンネル (Macroscopic Quantum Tunneling: MQT) は、マクロな自由度が示す量子現象という点で非常に興味深い。実際 MQT は、冷却原子気体、単一分子磁石、ジョセフソン接合などさまざまな系で実験的に観測されている。その中で、ジョセフソン接合における MQT の研究は、量子力学と古典力学の境界を明らかにするという目的でこれまで盛んに行われてきた。また、MQT は超伝導量子ビットの読み出し過程に利用されている。さらに、大規模な超伝導量子コンピュータを実現するためには、たくさんの結合した超伝導量子ビットを集積化する必要があり、そこで発現する協力現象を理解することは極めて重要である。

本研究においては、ジョセフソン接合の間に結合がある場合、結合が MQT にどのような影響を与えるかを単純なモデルを用いて明らかにする。ここではキャパシティブに結合するジョセフソン接合 [1] を考え、1つの接合が MQT を起こし有限電圧状態へスイッチした後、別の接合がスイッチする状況を考える。この時、別の接合の MQT 率が、初めにスイッチした接合によってどのような影響を受けるか調べる。ここでは最初の MQT を第 1MQT 過程、そのあとの MQT を第 2MQT 過程とよぶ。この研究は、最近高温超伝導体固有ジョセフソン接合において観測された第 2 スイッチング過程における MQT 率増大 [2] の起源を理解する上で重要な手がかりとなる。

本研究では、キャパシティブに結合する 2 接合系を考え、第 2MQT 過程を記述する有効理論を導出した。その結果、第 2MQT 過程は、周期振動する洗濯板ポテンシャル中を運動する粒子に対する 1 次元トンネル問題として理解できる事を明らかにした。このとき時間依存 WKB 法 [3] を用いて第 2MQT 率を計算し、第 1MQT 率に比べ異常に増大することがわかった [4]。

¹E-mail: s-kawabata@aist.go.jp

2 周期的摂動下の MQT 率

はじめに、キャパシティブに結合する 2 接合系のハミルトニアンを考え、1 つの接合が有限電圧状態にあると仮定する。その結果、有効ハミルトニアンとして、周期的摂動下の洗濯板ポテンシャル中を運動する粒子に対する一次元ハミルトニアンを得る。したがって、この系における MQT (第 2MQT) は、周期的摂動下のトンネル問題として理解することができる。周期的摂動下のトンネル問題の処方箋の 1 つに、時間依存 WKB 法 [3] がある。時間依存するシュレディンガー方程式を WKB 法と摂動論を用いて解く方法である。図 1 に時間依存 WKB 法を用いた計算によって得られた第 2MQT 率 Γ を規格化したバイアス電流 $\gamma = I_{\text{ext}}/I_c$ の関数としてプロットした。ここで、 I_{ext} , I_c はそれぞれバイアス電流およびジョセフソン臨界電流を表す。図 1 で、青線は、第 1MQT

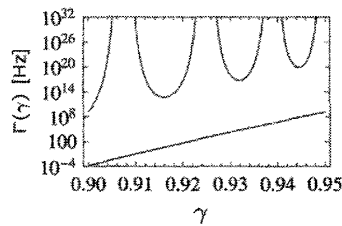


図 1: MQT 率のバイアス電流依存性

過程における MQT 率を表し、赤線は第 2MQT 過程における MQT 率を表す。図 1 に現れる第 2MQT 率の共鳴的増大は、周期摂動の振動数 ω とジョセフソンプラズマ振動数 $\omega_p(\gamma)$ との間に共鳴条件 $\omega = n\omega_p(\gamma)$ (n : 整数) が満たされた場合に起こる。すなわち基底状態から n 番目の励起状態へ遷移することでポテンシャルバリアの高さが実効的に下がり MQT 率の増大が起こる。一方、図 1 より第 2MQT 率の増大は、共鳴点からずれた点においても起こることがわかる。このタイプの増大は $\omega \gg \omega_p(\gamma)$ の場合に起こる。これは、高エネルギーの励起状態においてはエネルギー準位のぼけが非常に大きくなっており、厳密に共鳴条件を満たさなくても MQT が起こるためである。今後は接合数が増えた場合に対して計算を行い、固有ジョセフソン接合で見られた第 2 スイッチング過程における MQT 率増大 [2] の起源を解明する。

参考文献

- [1] T. Koyama, J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 2114.
- [2] H. Kashiwaya, et al., J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 104708.
- [3] M. P. A. Fisher, Phys. Rev. B **37** (1988) 75.
- [4] Y. Chizaki, H. Kashiwaya, S. Kashiwaya, T. Koyama, and S. Kawabata, Physica C (2010) 投稿中.