

読者の広場

Q&A

Q: 「超電導の新現象発見 磁力線、物質をすり抜け」という記事がありましたが、どのような現象が発見されたのでしょうか？ また、どのような応用が期待されるのでしょうか？

A: 超伝導の研究は、電場が関与する現象と磁場が関与する現象の発見が交錯しながら進展してきました。歴史的には、1911年にゼロ抵抗現象や完全電気伝導を示す超伝導現象が発見（1913年ノーベル物理学賞受賞）され、1933年には完全反磁性現象を示すマイスナー効果^{※7}が発見されました。1962年になると超伝導デバイスの基礎であるジョセフソン効果が発見（1973年ノーベル物理学賞受賞）されました。ジョセフソン効果は量子電圧標準を実現し、現代科学技術分野全般に大きな波及効果を及ぼしました。超伝導現象を応用した磁気共鳴画像装置（MRI）の開発は、産業、医療分野を大きく前進させ、ジョセフソン効果を応用した高感度に磁束を測定できる超伝導量子干渉計（SQUID）は、多くの重要な応用場面で役立っています。

ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対な現象がコヒーレント量子位相スリップ（CQPS）効果です。ジョセフソン効果は、弱く結合した2つの超伝導体の間に、超伝導体の電子対がトンネル（透過）することによって超伝導電流が発生する現象です。ジョセフソントンネルでは、電子（電子対）がエネルギーを散逸せずトンネル障壁をすりぬけます。CQPS効果では、磁束がエネルギーを失うことなく量子的に超伝導細線を横切る現象です。ジョセフソン効果における電子対が絶縁体（空間）をトンネルすることと類似しています。また、ジョセフソン効果では、電子対の運動の障壁になるのは、絶縁体（空間）ですが、CQPS効果の場合は、磁束の障壁は超伝導細線になります。CQPS効果は昔から理論上予言されていましたが、適合する実験材料が見つからず、また評価方法も確立できなかったこともあって実証されていませんでした（図1）。

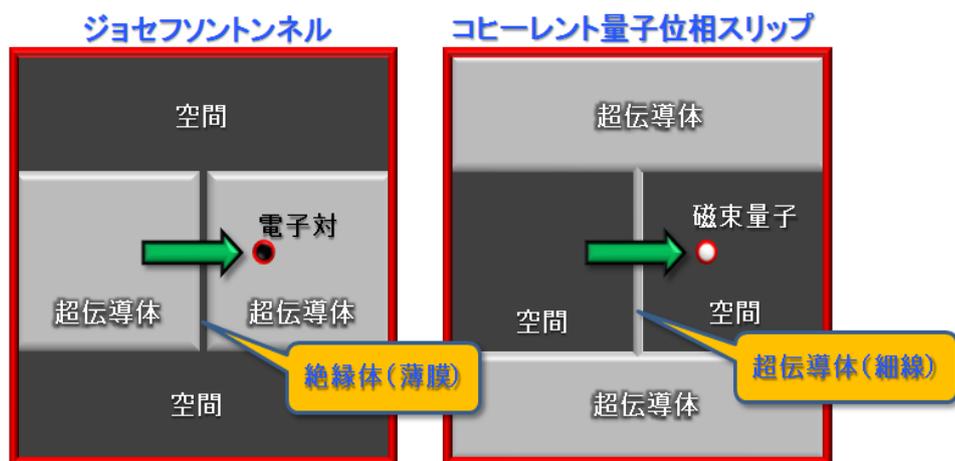


図1 ジョセフソントンネル接合（左）とコヒーレント量子位相スリップ（右）

CQPS効果を明確に観測するため、酸化インジウム（InOx）薄膜を用いて幅40 nmの細線を含んだ4×8 μmの大きさの超伝導ループを電子リソグラフィで作製しました。（図2）このような構

造では、完全反磁性に反して磁束がエネルギーを失うことなくトンネルすると、磁束が超伝導ループを出入りし、既に開発したジョセフソン接合を用いた磁束量子ビットに相当するデバイスが実現できることが予想されました。また過去の研究により、このような量子ビットで量子力学的なトンネルが発生すると、原子と同等の性質をもつ量子ビットは、基底状態から励起状態へとエネルギーを変化させ、ギャップ構造を生じることが分かっていました。

磁場は図面に垂直方向に印加

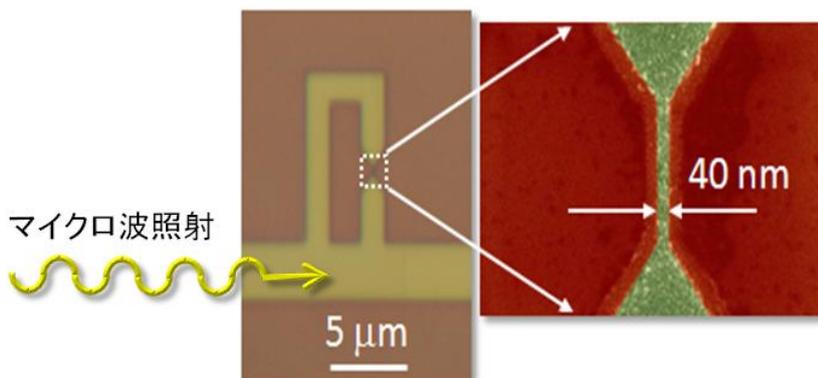


図2 超伝導細線を含んだ超伝導ループ

この量子ビットのエネルギーレベルを観測するために、外部から非常に小さな磁場を変化させながら印加し、同時に接続したマイクロ波共振器から、ギガヘルツレベルのマイクロ波を照射してエネルギー分光測定を行いました。その結果、エネルギーバンドには約5ギガヘルツのギャップが存在することを確認しました(図3)。これは磁束が量子的にトンネルしていることを証明するもので、理論上予想されていたCQPS効果を実証し、ジョセフソン接合を用いない新しい超電導磁束量子ビットの試作に成功したことも意味します。

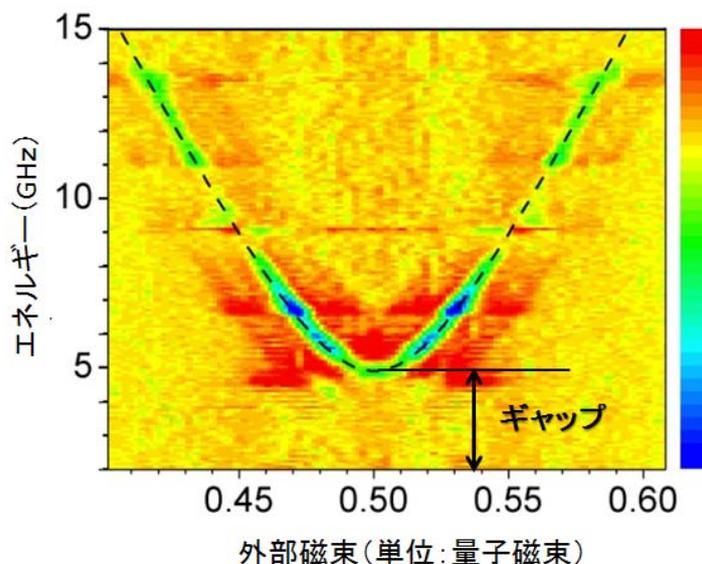


図3 エネルギー分光測定法で得られたエネルギーバンド図

CQPS 効果は、ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対であることから、ジョセフソン効果が達成できることは、全てその双対のデバイスの実現が可能だと考えられます。最も期待を寄せている応用は、現存のジョセフソン効果をもたらした量子電圧標準と双対関係にある CQPS 効果による量子電流標準の実現です。これまで単電子トランジスタを基に量子電流標準の実現が試みられてきましたが、単電子トンネルが確率的に起こることや、背景電荷のばらつきなどの問題があり、標準構築には至っていませんでした。CQPS 効果にはこうした問題が存在しないため、効果的な量子電流標準の実現が比較的簡単にできると考えられます。既に量子電圧標準と量子抵抗標準は現存しているため、量子電流標準の実現が達成できれば、「量子三角形」と呼ばれる自己完結した量子標準系が初めて実現することになります。

回答者：独立行政法人理化学研究所 量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー 蔡 兆申 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」