

なぜ、超伝導電流は電気抵抗なしで消えるのか？
～磁場中での超伝導-常伝導相転移を説明する新理論～

研究成果のポイント

1. 現在の超伝導の標準理論では説明ができなかった、超伝導体が磁場中で相転移する際に超伝導電流がジュール熱を発生せずに消失する理由を、理論的に解明しました。
2. 超伝導電流の説明の点で問題があることが指摘されてきた現在の超伝導の標準理論を改良するための指針を提示しました。
3. 本研究成果は、現在の標準理論を超える超伝導理論が出現する可能性を示唆しており、銅酸化物高温超伝導体の機構解明、ひいては、超伝導体を量子ビットとして使うエラー訂正機能を備えた量子コンピュータの実現にも貢献することが期待されます。

国立大学法人筑波大学計算科学研究センター 小泉裕康准教授は、現在、広く適用されている超伝導理論では説明ができなかった、超伝導体が磁場中で超伝導状態から通常の金属状態(常伝導状態)に相転移^{注1)}する際、超伝導電流がジュール熱^{注2)}を発生せずに消失するという現象の、理論的解明に成功しました。

本研究が提唱する新理論では、「超伝導電流はベリー接続^{注3)}」によって生じる集団モードが作るループ電流^{注4)}の集まりである」と考えるべきであることが示されました。また、ベリー接続の生成にはラシュバ型スピンの軌道相互作用^{注5)}が重要である可能性を明らかにしました。

現在の超伝導の標準理論は、超伝導電流の説明の点で問題があることが度々指摘されてきました。今回の成果は、この問題点を解消するために、標準理論をどのように変更していくべきかについての一つの指針を提示したことになります。標準理論が変更されることにより、長い間、メカニズムが不明のままになっている、銅酸化物高温超伝導の機構解明が達成される可能性もあります。さらに、超伝導体を量子ビットとして使うエラー訂正機能を備えた量子コンピュータの実現に関して、重要な貢献になり得ると考えられます。

本研究の成果は、2020年8月21日付「Europhysics Letters」でオンライン公開されました。

研究の背景

磁場中に置かれた超伝導体は、磁場をその内部から排除するマイスナー効果と呼ばれる現象を示します。この性質により、磁石と超伝導体は反発するので、超伝導体を磁石の上に浮かせることができます(図1)。マイスナー効果が生じているときには、外部磁場を排除するために、超伝導体表面に、電気抵抗のない電流(超伝導電流)が流れます。この超伝導電流は、超伝導体が超伝導状態から通常の金属状態(常伝導状態)へ相転移する際に、ジュール熱を発生せずに消失することが実験で証明されています。しかし、このことに対する明確な説明はこれまで与られていませんでした。

現在、超伝導現象のメカニズムとしては、BCS理論^{注6)}が標準理論として適用されています。この理論では、クーパー対とよばれる互いに逆方向のスピンの持つ電子対の形成が超伝導の原因であり、この電子対の流れである超伝導電流は、電気抵抗なしで流れることができると説明されています(図2左)。また、超伝導状態から常伝導状態への相転移において、電子対は転移点付近で破壊され通常の電子となるため、その電子による電流から発生するジュール熱が生じることとなります。しかしながら、これは実験結果と矛盾しており、標準理論の問題の一つとされてきました。

研究内容と成果

今回の研究では、超伝導電流の持つエネルギーと磁場の持つエネルギーが、超伝導状態から常伝導状態への相転移においてどのように移り変わるかを理論的に考察しました。理論物理学では、数式で表した理論を構築し、既知の実験との整合性を考察し、新しい実験結果を予言します。そのような考察から、「超伝導電流はベリー接続によって生じる集団モードが作るループ電流の集まりである」と考えると実験結果との整合性がよいという結論を導き、新理論として提唱しました(図2右)。このループ電流はトポロジカルに保護された電流^{注7)}であり、トポロジカル量子数と呼ばれる整数に対応した電流を発生しますが、この整数がゼロとなることにより、電流の不連続な消失が起こります。つまり、ジュール熱を発生せずに超伝導電流が消失する理由を説明することが可能です。この結果は、標準理論の超伝導電流生成機構に根本的な変更が必要なことを意味します。そして、超伝導電流の起源は、ベリー接続によって生じる集団モードが有力であり、そのベリー接続の生成にはラシュバ型スピン軌道相互作用が重要な役割を果たしている可能性があることを指摘しました。

今後の展開

今後、本研究で提唱した新理論が予言するループ電流を確認することが必要です。実際、銅酸化物高温超伝導体では超伝導相の高温側に擬ギャップ相と呼ばれる、超伝導相の前駆相が存在し、その相にはループ電流が存在することが種々の実験で示唆されています。それは、本研究により提唱されたループ電流である可能性があります。ループ電流は量子コンピュータの量子ビットへの使用が可能であることも理論的に予言されており、ループ電流を量子ビットとすることによりエラー訂正が可能な量子コンピュータが実現するかもしれません。

参考図

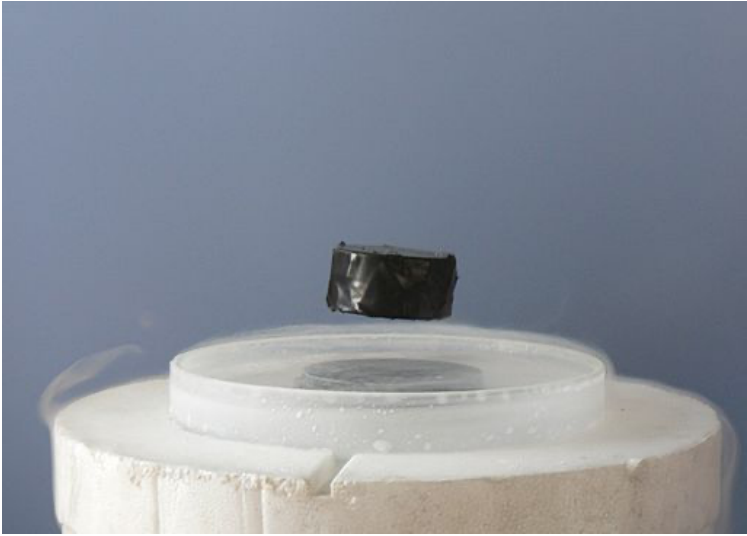


図 1 マイスナー効果により超伝導体の上に浮いた磁石

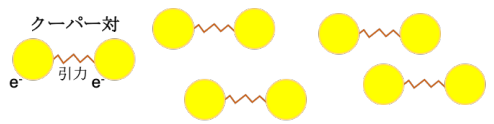
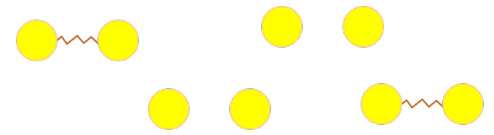
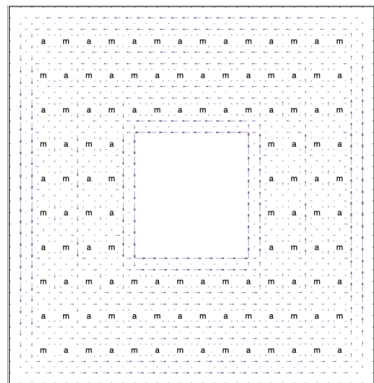
標準理論 (BCS理論)	本研究による新理論
<p data-bbox="319 952 606 985">標準理論 (BCS理論)</p>  <p data-bbox="175 1164 750 1276">● 2つの電子が1つの電子のように振る舞うクーパー対のイメージ 大量のクーパー対があることで、抵抗なく電流が流れる (超伝導状態)</p>  <p data-bbox="175 1489 750 1556">超伝導状態から常伝導状態へ相転移する際は、クーパー対が壊れるため抵抗が生じ、ジュール熱が発生する。</p> <p data-bbox="207 1568 414 1601">・・・実験結果と相違</p>	<p data-bbox="989 952 1244 985">本研究による新理論</p>  <p data-bbox="798 1377 1436 1556">● 超伝導電流を示すループ電流の集まり m, aがループ電流の中心を表す (m: 反時計回り、a: 時計回り) mはトポロジカル量子数+1に、aはトポロジカル量子数-1に対応。 トポロジカル量子数がゼロの時、電流は抵抗なしに消失するため、ジュール熱が発生しない。 (トポロジカル量子数は、消失する電流のもつ運動エネルギーと侵入する外部磁場のエネルギーが同じになるときゼロになる)</p> <p data-bbox="829 1568 1085 1601">・・・実験結果を説明可能</p>

図 2 標準理論と新理論の違いを示す概念図

用語解説

注1) 相転移

温度の上昇または圧力の低下により、液体の水が気体になるような状態の変化。超伝導状態は熱力学的な相で、温度と外部磁場を与えると熱力学的な安定状態が一つに定まるが、温度を上昇または磁場を強くすると超伝導相は常伝導相とよばれる通常の金属状態になる。磁場中で、超伝導相では表面に超伝導電流が存在する状態が安定状態であるが、常伝導相では電流が存在しない状態が安定状態である。

注2) ジュール熱

電流が電気抵抗のある導体中を流れるときに発生するエネルギー。このエネルギーは散逸し、状態変化の不可逆性をもたらす。

注3) ベリー接続

M. Berry により定式化された接続と呼ばれる幾何学で使う数式。平行移動に伴う波動関数の位相の変化を記述する。

注4) ループ電流

環状に回り続ける電流。

注5) ラッシュバ型スピン軌道相互作用

伝導電子が持つスピンとその伝導電子の座標の変化による運動が持つ相互作用。

注6) BCS 理論

J. Bardeen, L. Cooper, J. R. Schrieffer により提出された超伝導の微視的理論。超伝導の原因をクーパー対という電子対の生成であるとする。種々の実験事実を説明することに成功し、現在の標準理論はこれに基づいている。

注7) トポロジカルに保護されたループ電流

ループ電流が巻き数という整数で表されたトポロジカル量子数を持つ場合、その電流の変化は整数の変化を必要とし、容易に起こらない。これを「トポロジカルに保護された」と表現する。

掲載論文

【題名】 Reversible superconducting-normal phase transition in a magnetic field and the existence of topologically-protected loop currents that appear and disappear without Joule heating

(磁場中での可逆な超伝導-常伝導相転移とジュール発熱なしで生成消滅するトポロジカルに保護されたループ電流の存在)

【著者名】 Hiroyasu Koizumi

【掲載誌】 Europhysics Letters (DOI: 10.1209/0295-5075/131/37001)

問合わせ先

小泉 裕康(こいずみ ひろやす)

筑波大学 計算科学研究センター 准教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000000777>