

超伝導電流は電子ペアの流れではない ～標準理論に根本的な変更を迫る新理論の提案～

超伝導は電気抵抗ゼロで電流が流れる現象です。超伝導を説明する標準理論は、1957年に提出されたBCS理論が基礎となっています。この理論では、超伝導状態とは、2つの電子がペアになった「クーパーペア」ができている状態であり、その流れが超伝導電流であると説明されます。その根拠となっているのが、超伝導に特有の、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果と呼ばれる現象です。その後、銅酸化物高温超伝導体の超伝導機構など、標準理論では説明できない現象が数多く指摘されていますが、銅酸化物においてもアンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果は観測されており、「超伝導電流は電子ペアの流れである」とする点は、普遍的であると考えられてきました。

本研究では、これに先立ち提案した新理論が、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果も説明できることを明らかにしました。ここでは、超伝導電流を、電子ペアではなく、ベリー位相から生じる電流として理解します。ベリー位相は、電子が運動する空間にねじれをもたらし、これが電子の流れを生み、超伝導電流が生じると説明します。電子ペアもこの空間のねじれにより流れ、超伝導電流の一部となります。つまり、電子ペア形成の役割は、超伝導電流を生じるベリー位相を安定化することであり、超伝導電流の担い手として不可欠なものではないことを意味します。

この新理論は、これまでに指摘されている標準理論の不備をすべて解消し、現在の標準理論に根本的な変更を迫るものです。

研究代表者

筑波大学計算科学研究センター

小泉 裕康 准教授

研究の背景

超伝導に関しては、1957年に提出されたBCS理論^{注1}により完全に理解されたと多くの研究者が考えていました。しかし、1986年に発見された銅酸化物超伝導（高温超伝導）は、BCS理論では説明できず、物理学、物質科学の大問題の一つとなっています。また、近年、BCS理論が超伝導の理論として不完全であることを示唆する実験事実が相次いで指摘されています。例えば、BCS理論に基づく計算では、ロンドンモーメント^{注4}に現れる電子の質量は有効質量^{注5}となるのに対し、実験では自由電子の質量が観測されていたり、磁場中での超伝導-常伝導相転移が可逆であることが実験で観測されており、これらはBCS理論の説明と矛盾しています。

その一方で、「超伝導状態では、2つの電子による電子ペアができており、その流れが超伝導電流である」というBCS理論の根本は、銅酸化物超伝導においても成立するとされています。その理由は、超伝導に特有の現象である、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射^{注2}とジョセフソン効果^{注3}が銅酸化物超伝導体でも観測されているためです。

BCS理論では、超伝導体内の電子数が一定でない(電子数の非保存)と考えますが、実は、これには疑問が呈されています。しかし、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果の存在を立証するような実験事実が示されていることから、「超伝導体内の電子数が一定でない」ことは物理的に正しいと考えられるようになってきました。電子数の非保存は、南部陽一郎が発見した、南部ゴールドストーンモード^{注6}の出現のためにも必要であり、BCS理論を基礎とする現在の超伝導標準理論は、このモードの出現が超伝導の本質であると主張しています。

研究内容と成果

本研究に先立ち、本研究の遂行者は、ベリー位相^{注7}を使い、「超伝導体内の電子数が一定」の条件のもと、BCS理論の全ての内容を含むボゴリューボフ=ド・ジャン方程式を導いています。今回、この方程式を用いて、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果の説明を行いました。ベリー位相の理論を用いると、波動関数から、ベリー接続と呼ばれる、電磁気学で現れるベクトルポテンシャルと同じ性質のものが計算されます。ベリー接続は、電子が運動する空間のねじれ^{注8}を記述し、このねじれによる電子および電子ペアの流れが超伝導電流となります。また、ベリー接続により、アンドレーフ=セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果が非常にうまく説明できます。つまり、それらの現象には、「超伝導体内の電子数が一定でない」という条件は必要なく、現在の標準的な超伝導の前提は成り立たないこととなります。また、空間のねじれが超伝導電流の起源なので、電子ペアだけでなく電子も超伝導電流に寄与します。

空間のねじれによる超伝導電流は、ベリー位相が原因の電子の集団運動と見ることもできます。そして、この集団運動に参加する電子数は一定ではありません。つまり、現在の標準理論で、「超伝導体内の電子数が一定でない」とされていた説明は、「集団運動に参加する電子数が一定でない」と置き換わります。これにより、超伝導体内の電子数は一定となります。この理論は、上述のような標準理論と実験との齟齬もすべて解消するとともに、ベリー位相が南部ゴールドストーンモードに取って代わることを意味します(参考図)。また、電子ペア形成の役割は、ベリー位相を安定化することであり、超伝導電流の担い手として不可欠なものという位置づけではなくなります。

今後の展開

本研究成果により、BCS理論では説明できなかった銅酸化物超伝導の機構が解明される可能性があります。また、超伝導という現象をより正確に理解することで、量子コンピュータに用いられる量子ビット

の性能向上にもつながると期待されます。

参考図

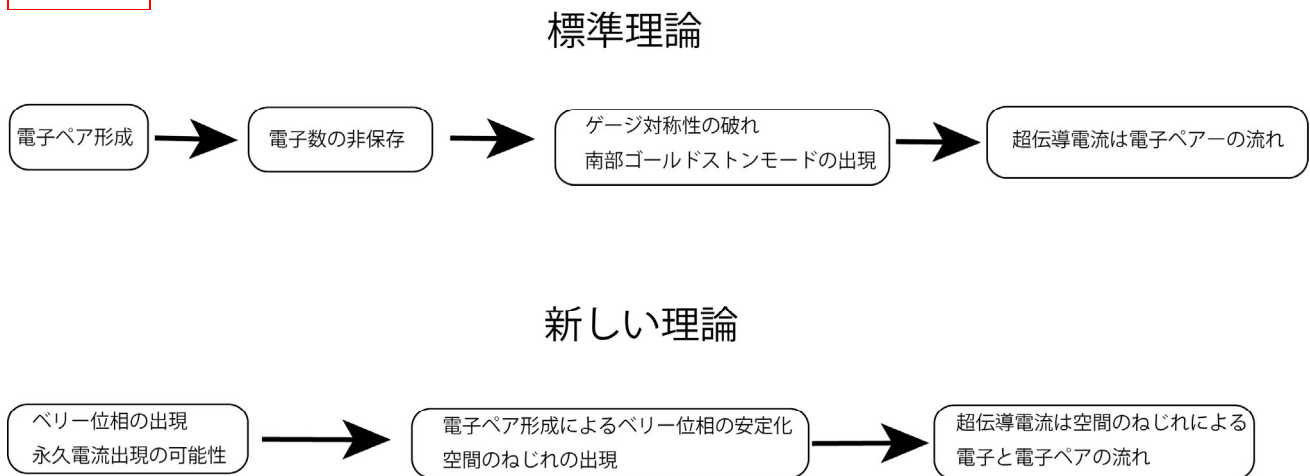


図 標準理論および新理論の考え方

現在の標準理論では、南部ゴールドストーンモード出現のために電子数の非保存が必要だが、新しい理論では、電子数は保存され、ベリー位相が南部ゴールドストーンモードに取って代わる。電子ペアの形成はベリー位相を安定化し、空間のねじれをもたらす。超伝導電流は、この空間のねじれによる、電子と電子ペアの流れである。

用語解説

注 1) BCS 理論

アメリカの物理学者 J. Bardeen, L. Cooper, J. R. Schrieffer の 3 人により提出された超伝導理論。この業績により 3 人は、1972 年にノーベル物理学賞を受賞した。

注 2) アンドレーフ=セント・ジェームズ反射（単にアンドレーフ反射と呼ばれることが多い）

ロシアの物理学者 A. F. Andreev とフランスの物理学者 D. J. Saint-James により予言された、通常金属から超伝導体に侵入しようとした電子が金属-超伝導体界面でおこす散乱が原因で起こる特異な電気伝導現象。

注 3) ジョセフソン効果

イギリスの物理学者 B. D. Josephson により予言された、2 の超伝導体に挟まれた薄い絶縁体を電子が通ることにより生じる特異な電気伝導現象。この業績によりジョセフソンは、1973 年にノーベル物理学賞を受賞した。

注 4) ロンドンモーメント

回転する超伝導体の表面には超伝導電流が流れるが、それによる磁気モーメントまたは、それが超伝導体内部につくる磁場のことをロンドンモーメントと呼ぶ。

注 5) 電子の有効質量

伝導電子はイオンや電子同士での散乱の影響で自由電子と異なる質量をもち、これを有効質量と呼ぶ。

注 6) 南部ゴールドストーンモード

ゲージ対称性の破れに伴い出現する運動のモード。南部陽一郎は、超伝導の標準理論の研究よりこのモードを見つけ、素粒子のモデルに適用した。その業績により、2008 年にノーベル賞物理学賞を受賞

した。同様なモードは英国の物理学者 J. Goldstone により一般的に定式化された。

注 7) ベリー位相

1984 年に英国の数理論理学者 Sir M. V. Berry により定式化された。この位相が量子ホール効果やトポロジカル絶縁体で見られる永久電流と関係していることが知られている。

注 8) 空間のねじれ

量子力学では電流は波動関数の位相の空間変化から生じるが、この位相の空間変化に通常の平坦な空間からのずれ（ねじれ）が生じることがある。それをここでは、空間のねじれという言葉で表現した。

掲載論文

【題名】 Superconductivity by Berry Connection from Many-body Wave Functions: Revisit to Andreev–Saint-James Reflection and Josephson Effect.

（多体波動関数のベリー接続による超伝導：アンドレーフ＝セント・ジェームズ反射とジョセフソン効果に対する再考）

【著者名】 Hiroyasu Koizumi

【掲載誌】 Journal of Superconductivity and Novel Magnetism

【掲載日】 2021 年 7 月 5 日

【DOI】 10.1007/s10948-021-05905-y

問い合わせ先

【研究に関すること】

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://sarabande.ccs.tsukuba.ac.jp>

【取材・報道に関すること】

筑波大学計算科学研究センター 広報室・戦略室

TEL: 029-853-6260

E-mail: pr@ccs.tsukuba.ac.jp