

超伝導にとって「3」は特別の意味を持っていた

－ 3つ以上の成分からなる多成分超伝導で起きる新規物性現象の解明－

平成24年5月22日

独立行政法人 物質・材料研究機構

概要

独立行政法人 物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）WPI 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野 正和）の古月 暁主任研究者らのグループは、多成分超伝導で起きる新規現象を解明した。多成分超伝導とは、MgB₂や鉄系超伝導体のように、化合物の中で異なる電子軌道にある電子が同時に超伝導状態になる現象であり、室温超伝導を実現させるカギと考えられている。

今回研究グループは電子クーロン相互作用が原因で互いに斥力が働く3成分を持つ超伝導体に注目した。成分間競合により、3成分の超伝導位相が互いにずれたフラストレーション超伝導状態が生じる。その結果、相対位相の振動がソフト化し、位相振動のLeggettモードと呼ばれる集団励起のエネルギーがゼロになり、超伝導体の中で減衰することなく安定に存在することが理論的に示された。また、鉄系超伝導体の低温電子比熱の実験結果はゼロエネルギーLeggettモードによってよく説明できることも判明した。Leggettモードは超伝導の唯一のゼロエネルギー集団励起と考えられ、その解明は超伝導現象の本質を理解する上で重要な意味を持つ。また、位相フラストレーション超伝導状態は高精度SQUIDや量子ビット等の超伝導量子デバイスに役立つと期待されている。

なお、本研究成果は米国物理学会の論文誌Physical Review Letters（電子版）で発表された。

研究の背景

老子¹⁾の言葉「道生一、一生二、二生三、三生万物（道は一を生み、一は二を生み、二は三を生み、三は万物を生む）」は古代東洋思想の代表的なものとしてよく知られている。量子力学に支配される超伝導現象²⁾にも三が特別な意味をもつようである。単純金属等の単成分超伝導や2成分超伝導では見られない、三つ以上の成分を持つ多成分超伝導ではじめて顔を出す特異な性質がある。

多成分超伝導とは、化合物の異なる電子軌道にある電子が同時に超伝導状態になる現象である。2009年に発見された鉄系超伝導が火付け役で、超伝導に携わる研究者は今、多成分超伝導に興味を持ち、超伝導相転移温度をさらに上げて、室温超伝導を実現したいと考えている。

BCS理論³⁾が示すように、多くの超伝導は結晶格子振動⁴⁾を媒介にして電子対が組まれることに起因する。1986年に発見された銅酸化物高温超伝導は、それまでの超伝導相転移温度を100度以上押し上げた。電子間の直接相互作用から生じる磁気エネルギーがノリの役割を果たしているからである。しかし、電子間相互作用は基本的に斥力であり、超伝導の元になっている電子ペアリングとは相性が良くない。2成分超伝導では、位相を互いに逆にすれば、電子間の斥力を実効的に引力に変えることができる。

成果の内容

3成分超伝導はどうなっているだろうか。互いに斥力を及ぼす3成分が共に満足する状況が作れ

ず、それぞれ部分的に妥協して系全体の安定を図らざるを得ない (図1)。この位相フラストレーション状態⁵⁾ から新奇な超伝導現象が生まれることが今回の研究で明らかになった。

多成分超伝導体では、成分間の超伝導位相差が振動し、その空間での伝搬様式が Leggett モード⁶⁾ と呼ばれている (図2)。一般的に、Leggett 振動はエネルギー損失を伴うので、減衰しやすい。しかし、3成分超伝導の位相フラストレーション状態 (図3) は完璧な安定状態ではないので、位相の振動が起きやすい。その結果、Leggett モードが非常に柔らかく、超伝導体の中で減衰することなく安定に存在する。

エネルギーのかからないゼロ質量 Leggett モードはまた実験的に直接的に観測されていないが、その傍証が既にある。今までに鉄系超伝導体の低温電子比熱の温度・磁場依存性について、既存の理論では互いに矛盾に見える実験結果が報告されていたが、ゼロ質量 Leggett モードが存在していれば、実験事実が統一的に説明できることが判明した。

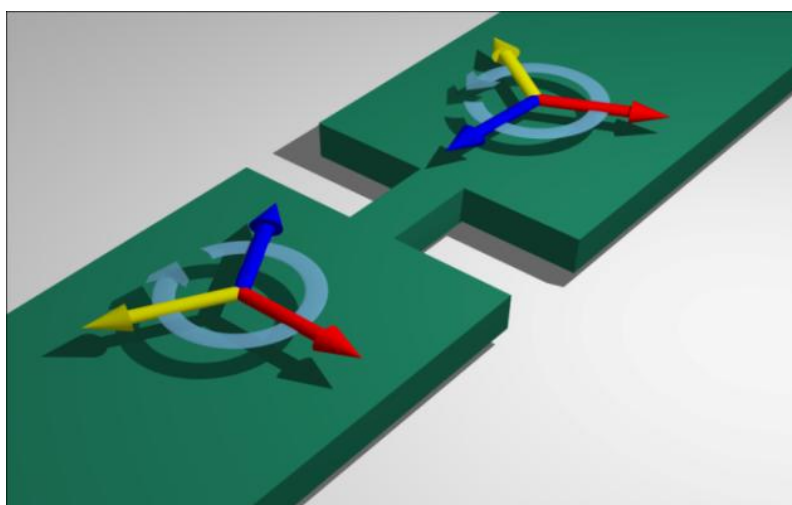


図1：斥力を及ぼす3成分超伝導ではそれぞれの成分が拮抗して、3成分の位相がそれぞれずれているフラストレーション状態が生まれる。位相差の時計周りと反時計周りの二つケースがあり、エネルギーが同じ双子である。

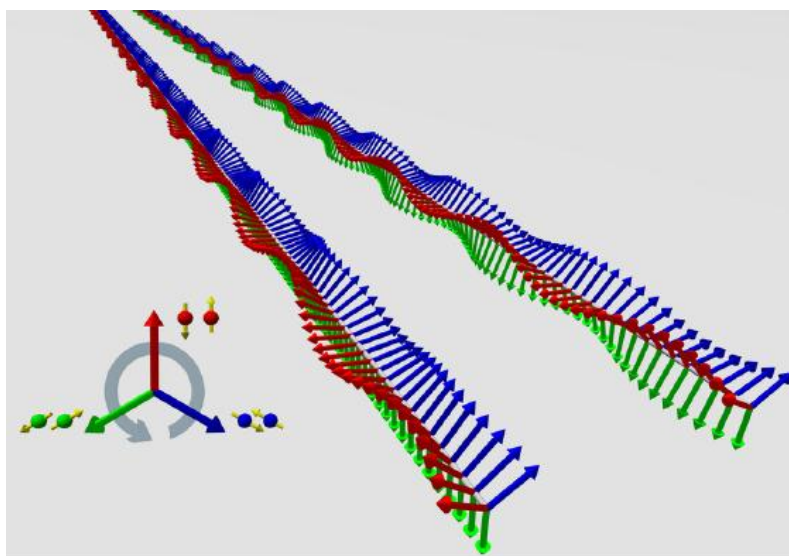


図2：3成分超伝導における位相振動モード。位相の相対振動に対応する Leggett モード (左) と位相全体が回転する南部・ゴールドストーンモード⁷⁾ (右)

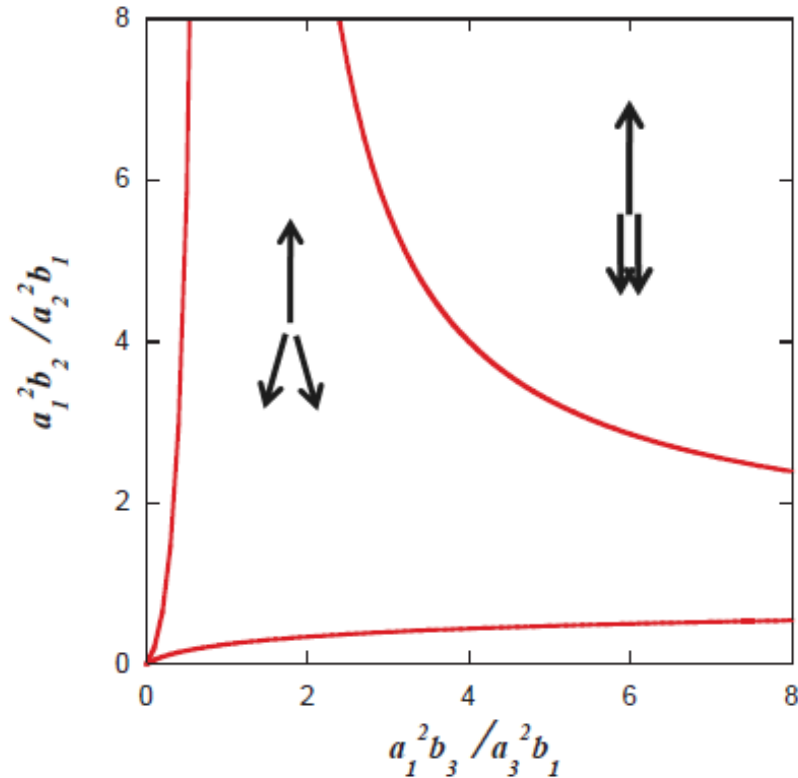


図3：超伝導強度の成分比による相図。横軸値（成分3と成分1の強度比）、縦軸値（成分2と成分1の強度比）と1、どの二つの和も残りのものより大きければ（三角形形成の条件）、三つの超伝導成分が拮抗し、位相フラストレーション状態になる。それ以外の領域では、一つの超伝導成分が支配的になる。相境界でゼロ質量 Leggett モードが現れる。

波及効果と今後の展開

超伝導位相の振動に伴う南部・ゴールドストーンモード⁷⁾は、位相と電磁場との結合により、質量を持つプラズマ振動になることが BCS 理論の誕生から間もなく判明した。それに対して、Leggett モードは超伝導成分間位相差の振動であり、電磁場と直接的に結合しないので、質量が生まれることがない。フラストレーション状態を伴う Leggett モードは超伝導の初めてのゼロエネルギー集団励起であり、その解明は超伝導現象の本質を理解する上で重要な意味を持つ。今後、ラマン散乱⁸⁾等の実験手法による直接的な観測が期待される。

Leggett モードの超伝導体の中での伝わり方から、超伝導状態での電子運動に関する新しい情報が得られる。位相フラストレーション超伝導状態では、分数化された磁束量子⁹⁾が現れ、高精度の SQUID¹⁰⁾に利用できる。位相フラストレーション超伝導状態には時計周りと反時計周りの双子があり（図1）、量子ビット¹¹⁾の新しい実装方式として役立つだろう。質量ゼロの超伝導位相振動モードを高速かつ安定な量子情報伝搬方法として利用する野心的なアイデアもあり、新しい超伝導量子デバイスへの夢がさらに膨らむ。

掲載論文

題目 : Massless Leggett Mode in Three-band Superconductors with Time-Reversal-Symmetry Breaking

著者 : Shi-Zeng Lin and Xiao Hu

雑誌 : Physical Review Letters

用語解説

1) 老子 : 古代中国の哲学者であり、道教創案の中心人物。その自然観は現代自然科学に近く、量子力学の背後にある哲学にも通じている。

2) 超伝導 : 1911年オランダの科学者カマリン・オネスによってはじめて発見され、特定の金属や化合物などの物質を低温に冷却したときに、電気抵抗が急激にゼロになる現象。超伝導が現れる温度は超伝導転移温度と呼ばれ、この温度を室温程度に上昇させること(室温超伝導)は、現代物理学の重要な研究目標の一つ。

3) BCS理論 : 1957年バーディーン、クーパー、シュリーファーの三人によって提唱され、格子振動が媒介になって電子がペアになり、巨視的な数の電子対が最低エネルギーを持つ量子状態に凝集することが超伝導の本質と解き明かした理論。

4) 結晶格子振動 : 結晶中の原子(格子)の振動のこと。BCS理論では電子が対になるノリの役割を果たす。

5) フラストレーション状態 : 互いに反平行に向いた状態が低いエネルギーを示すベクトルが3つある場合、3つのうち2つが反平行向きになって安定になるが、残る1つはどちらとも反平行になれないため不安定となる。結局3つのベクトルは共に部分的に妥協し、互いに120度角をなす状態。

6) Leggettモード : 多成分超伝導の各成分が互いに異なる超伝導位相を持ち、これら位相の違い(=位相差)の時空間での伝搬様式のこと。それに伴い、電子対が超伝導成分間に移り変わる。

7) 南部・ゴールドストーンモード : ワインボトル底の真ん中の盛りをエネルギーの高い正常状態、円周状の底をエネルギーの低い超伝導状態に対応させることによって超伝導現象を記述する場合、ワインボトル底型ポテンシャルの底での方位角は超伝導の位相に当たり、位相ベクトルの円周方向に沿った運動の様式のこと。

8) ラマン散乱 : 物質に光を入射したとき、散乱された光の中に入射された光の波長と異なる波長の光が含まれる現象。入射光と散乱光のエネルギー差から物質内の電子状態が測定できる。

9) 磁束量子 : 超伝導体又はその環を貫く磁束の単位で、 $\Phi_0 = ch/2e$ 。ここで、 c : 光速、 h : プラン

クの定数、e:電子の電荷。

1 0) **SQUID** : 超伝導量子トンネリング効果を利用した量子干渉素子で、微小な磁場の測定に用いられている。

1 1) 量子ビット : 量子情報の最小単位。量子情報では、従来の情報の取扱量の最小単位であるビットの代わりに、情報を量子力学的2準位系の状態ベクトルで表現する。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

独立行政法人物質・材料研究機構 WPI 国際ナノアーキテクニクス研究拠点

主任研究者 古月 暁

E-mail: HU.Xiao@nims.go.jp

TEL: 029-860-4897

(報道担当)

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026、FAX: 029-859-2017