

液晶のような特定の向きに整列する超伝導状態の発見 —一回転対称性の破れを伴った「ネマティック」超伝導—

概要

超伝導とは、ある温度以下で電気抵抗が完全にゼロになる現象のことで、超伝導物質内で電子 2 個ずつがペアをすることで引き起こされます。国立大学法人京都大学理学研究科の米澤進吾助教らの研究グループは、このペアの組み方が非常に独特な超伝導状態を発見しました。これまでに知られていた超伝導物質では、ペアの組み方は物質の構造という外的な要因だけで決まっていた。米澤助教らは、銅を挿入したビスマス-セレン化合物超伝導物質において、超伝導ペアたちが、特定の方向でペアを組む強さが弱くなるように自発的に整列していることを明らかにしました。これは、液晶ディスプレイなどに利用されている液晶ネマティック状態（液晶分子同士がある方向に整列することで、特別な方向を生じ回転対称性を破っている）に類似しているため、「ネマティック超伝導」と呼ばれるべき現象です。このような状態の実現が確かめられたのは超伝導研究の 100 年超の歴史において初めてであり、超伝導の基礎・応用両面で非常に重要な一歩だと考えられます。また、2016 年のノーベル物理学賞は物質におけるトポロジーの重要性を開拓した業績について授与されますが、この物質におけるネマティック超伝導はトポロジーの観点でも特異な性質を持つ超伝導であるため、我々の成果は本年のノーベル物理学賞とも深く関連しています。

本成果は英国 Nature Publishing Group の発行する Nature Physics 誌のオンライン版に平成 28 年 10 月 11 日（日本時間）に掲載されました。また、同誌の注目論文を紹介する News and Views に解説記事が掲載されました。本研究は、本学理学研究科の米澤助教・前野悦輝教授および同修士課程 2 回生の田尻兼悟らのグループ、ドイツ連邦共和国・ケルン大学の安藤陽一教授のグループ、学校法人京都産業大学の瀬川耕司教授、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の永井佑紀研究員との共同研究です。

1. 背景

「自発的対称性の破れ」は、南部陽一郎らの 2008 年ノーベル物理学賞の業績に代表されるように、物理学全般において極めて重要な概念です。超伝導は、伝導電子がペアを組むことによって電気抵抗が消失するという現象ですが、この現象も対称性の破れと密接にかかわっています。特に、超伝導物質が超伝導状態になるときにどのような対称性の破れを伴うのかが活発に研究されてきました。例えば、超伝導になると同時に磁石のような性質も持つようになる「時間反転対称性の破れた」超伝導、超伝導ペアを特徴づける位相という量が特殊な方向変化を持つようになる「*p*波」「*d*波」超伝導などがこれまでに見つかってきました。しかし、超伝導ペアを組む強さが方向によって変化するような「回転対称性の破れた¹超伝導」はこれまでに見つかっていませんでした。

¹ 自発的な回転対称性の破れは、非常に細い丸棒をテーブルの上に立てようとする場合にたとえられる。棒をまっすぐに立てた状態では、どの方向も等しくなっている（「回転対称性がある」と言う）が、この棒の配置は不安定なので、最終的には棒はどこかの方向に倒れてしまう。この時、棒の倒れた方向という特殊な方向が生じて方向の等価性（回転対称性）が失われている。これが回転対称性の破れのもっとも簡単な一例である。

超伝導は物質中で起こるため、より厳密な議論をするためには物質の構造（物質中での原子の並び方）も考慮しなければなりません。超伝導ペアを組む強さが物質の構造と対応した強弱を示すことはこれまでに知られていました（図1上）。しかし、四角格子の場合（図1）に縦と横の方向が全く同等であるように、物質は構造上等価な方向を通常いくつか持っており、これまでに知られている超伝導物質では、それらの等価な方向では超伝導ペアを組む強さも同じになっていました。先に述べた、「回転対称性の破れた超伝導」というのは、より厳密には「構造上は等価な方向にもかかわらず超伝導ペアを組む強さが異なる」と定義されるべきものです（図1下）。

液晶においては、分子同士が流動性を持ちながらある方向に整列することで回転対称性が破れるネマティック状態が起こります。この液相ネマティック状態は液晶ディスプレイなどに利用されています。回転対称性を破った超伝導では超伝導ペアが流動性を持ちながら回転対称性を破るため、液晶ネマティック状態と類似しています。このことから、回転対称性の破れた超伝導は「ネマティック超伝導」と近年呼ばれるようになりました。ネマティック超伝導はこれまでにない対称性破れを伴った新しい種類の超伝導であり、その発見は、生物学での新種の発見や、素粒子物理学での新しい粒子の発見にも相当します。この数年、このようなネマティック超伝導は実在するのか、また実現した場合にどのような性質を持つのか、研究者の間で注目されていました。

2. 研究手法・成果

理学研究科の米澤助教・前野教授、同修士課程2回生の田尻、理学部4回生の中田のグループは、ビスマス-セレン化合物 Bi_2Se_3 の結晶中に銅イオンを挿入した $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ という物質²（図2）の単結晶試料を用い、超伝導ペアの結合の強さと関係する比熱³という物理量を、磁場方向を精密に制御しながら測定しました。なお、この研究で使用した $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 単結晶試料は、この物質の研究で世

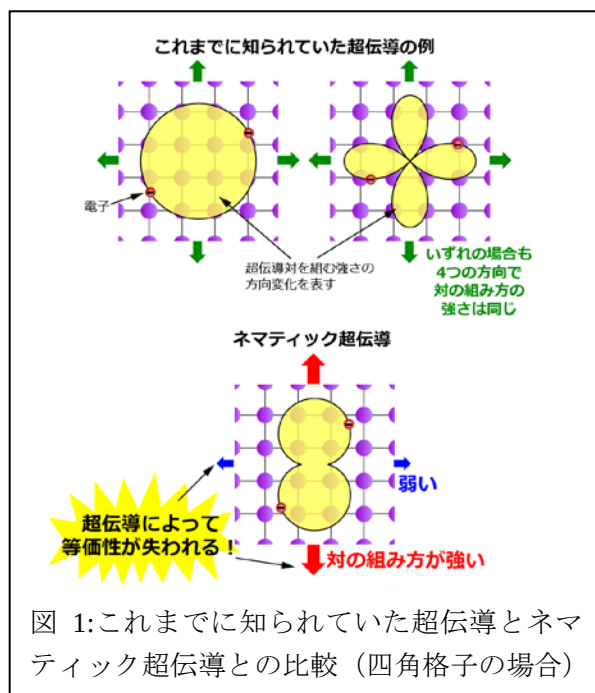


図1: これまでに知られていた超伝導とネマティック超伝導との比較（四角格子の場合）

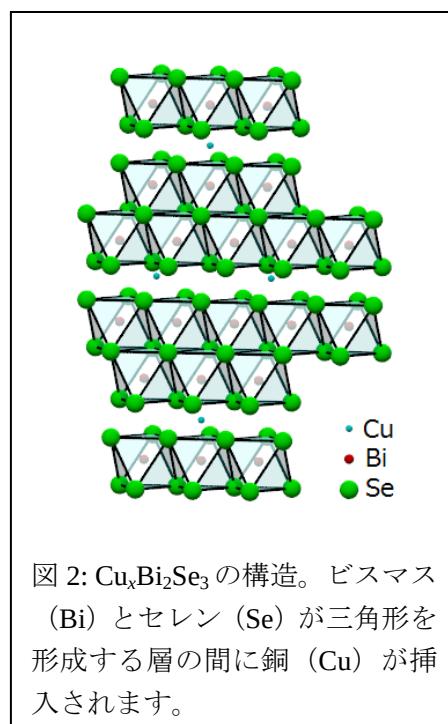
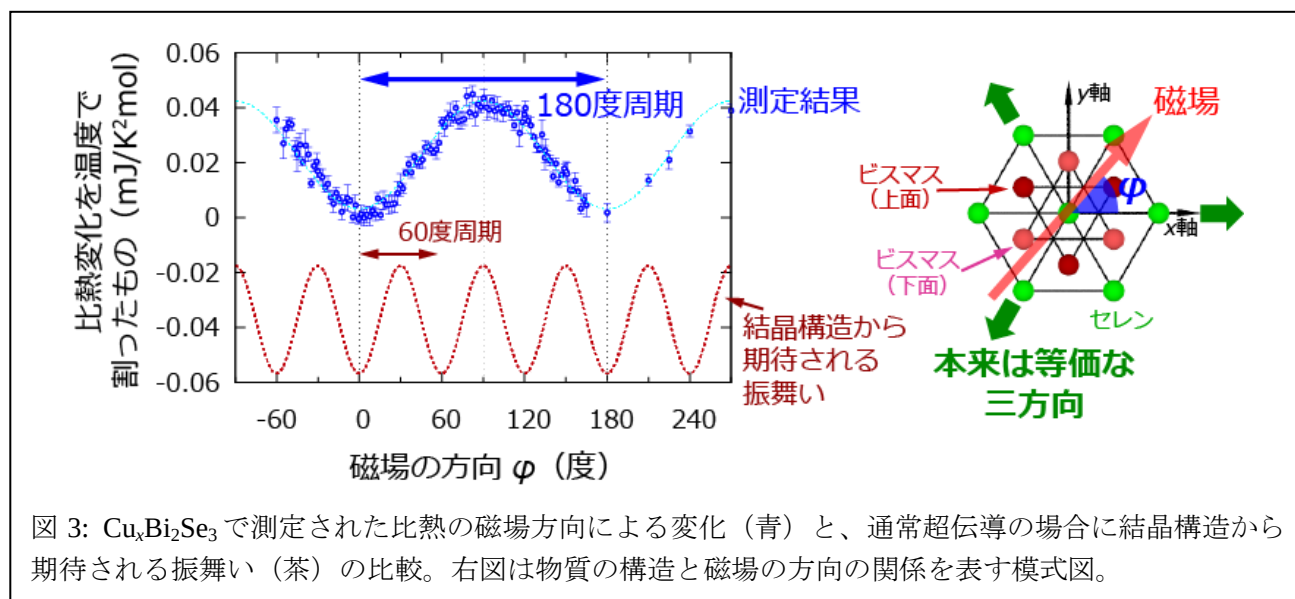


図2: $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の構造。ビスマス（Bi）とセレン（Se）が三角形を形成する層の間に銅（Cu）が挿入されます。

² Bi_2Se_3 はビスマスとセレンの三角格子が交互に積層した構造をしており、典型的なトポロジカル絶縁体の一つとして近年盛んに研究されている。この物質の層の間には別の原子を挿入（インターカレーション）することができ、Cu原子を挿入した場合は約 -270°C （絶対温度3ケルビン）以下で超伝導を示す。

³ 物体に熱を一定量加えた時にどの程度温度が上昇するかを表す物理量。比熱が大きいほど、温度が上昇しにくくなる。超伝導体の場合、超伝導ペアが壊れて生じる電子が比熱を担うため、比熱の大きさから超伝導ペアの壊れやすさ、すなわち超伝導ペアの結合の強さがわかる。



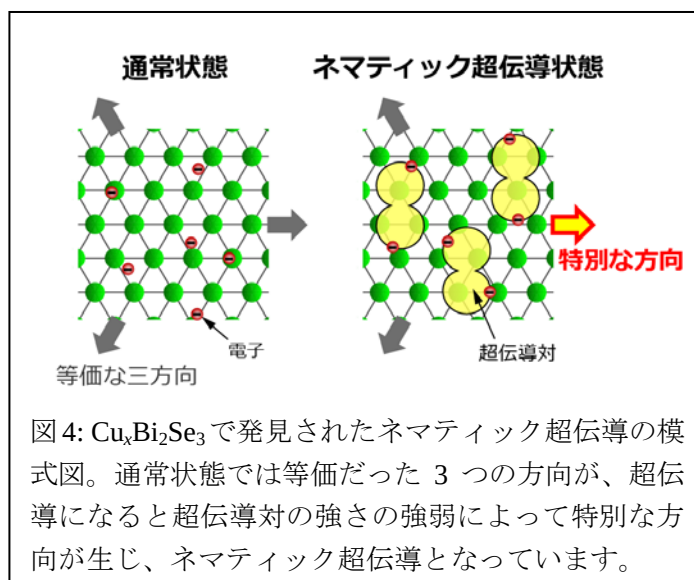
界をリードしているケルン大学の安藤陽一教授・Z. Wang博士および京都産業大学の瀬川耕司教授から提供を受けました。

この物質は図 2 のように原子の三角形構造が積層してできていますが、この層に平行に磁場を回転させたとき、比熱が磁場角度に対して 180 度周期の振動を示すことを米澤らは明らかにしました（図 3）。この物質の構造には 3 つの等価な方向があります。本来は、これらの等価な方向に磁場を向けた時には比熱の大きさは同じになるはずですが、図 3 の赤線のように通常であれば 60 度（場合によっては 120 度）周期の振動が起こることが期待されるのですが、観測された周期は期待された周期よりも明らかに長くなっています。さらに、超伝導状態が保持できる最大の磁場（上部臨界磁場）も磁場方向に対して 180 度周期の振動を示すことがわかりました。これらのことは、物質の持つ等価な 3 つの方向のうちの 1 つでペア結合の強さが弱まっていることを示しています。即ち、構造的に等価な方向にもかかわらず超伝導ペアを組む強さがそれらの間で異なるネマティック超伝導が実現していることが初めて明らかになりました（図 4）。

さらに、比熱と磁場方向の関係性を様々な条件下で測定し、それらを日本原子力研究開発機構の永井研究員の行った理論計算と比較する

ことにより、超伝導ペアを組む強さがどちらの方向で弱まっているのかを調べました。その結果、ピスマスやセレンの三角形の辺の方向の一つでペアの強さが弱まっているということを明らかにしました。

このように、ネマティック超伝導が実現していることが示されペアの強さの強弱まで解明できたのは、超伝導研究の 100 年を超える歴史の中でも初めてのことであり、新しい種類の対称性の破れを伴った超伝導の発見として非常に重要です。また、この物質でのネマティック超伝導状態は、近年注目されてい



るトポロジカル超伝導状態⁴でもあることが理論的にわかっているため、本成果はトポロジカル超伝導状態が実現しているということを比熱測定という試料全体の性質を測定できる強力な手法で示したことになります。また、液晶のネマティック状態とは異なり、ネマティック超伝導は超伝導ペアという量子力学的な状態が形成するネマティック状態であるため、これまでに知られているネマティック状態と比較しても、非常に新奇な状態であるといえます。

3. 波及効果、今後の予定

今後、ネマティック超伝導の性質自体を明らかにしていく必要があります。例えば、ネマティック液晶状態では分子の並ぶ方向を外部電圧でコントロールできますが、同様にネマティック超伝導の超伝導ペアの強さの方向を外的な方法によってコントロールできることがわかれば、新規な超伝導デバイスへの応用も期待できます。また、本研究成果は $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がトポロジカル超伝導であることを熱力学的な手段で初めて明確にしたものであり、トポロジカル超伝導を利用した量子コンピューティングへの実現に向けた大きな一歩にもなると考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

この研究は、以下のプロジェクトによる支援を受けました。

- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」(JSPS KAKENHI Grant Numbers JP22103002, JP22103004)
- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究「トポロジー物質科学」(JSPS KAKENHI Grant Numbers JP15H05852, JP15H05853, JP16H00995)
- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究 B (JSPS KAKENHI Grant Number JP26287078)
- ・ 日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究 B (JSPS KAKENHI Grant Number JP26800197)
- ・ ドイツ連邦共和国 German Research Foundation (DFG) CRC1238 'Control and Dynamics of Quantum Materials', Project A04.

<論文タイトルと著者>

タイトル: Thermodynamic evidence for nematic superconductivity in $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

著者: Shingo Yonezawa, Kengo Tajiri, Suguru Nakata, Yuki Nagai, Zhiwei Wang, Kouji Segawa, Yoichi Ando, and Yoshiteru Maeno

掲載誌: *Nature Physics*

DOI: 10.1038/nphys3907

⁴ 超伝導ペアの性質を表す波動関数が「ねじれた」ような性質を持っている超伝導状態。その研究は 2016 年のノーベル物理学賞の受賞業績「物質のトポロジカル相と トポロジカル相転移の理論的発見」に端を発しており、近年は新しい性質を示す超伝導状態として非常に注目されている。トポロジカル超伝導の性質を用いることで量子コンピューティングができるという提案もある。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ もトポロジカル超伝導実現の候補物質として積極的に研究されている。

<参考情報>

固体量子物性研究室 ホームページ

<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

米澤進吾 ホームページ

<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/person/yonezawa/>

<イメージ図>

