



PRESS RELEASE

岡山大学記者クラブ

文部科学記者会

科学記者会

御中

令和 7 年 8 月 22 日

岡 山 大 学

トポロジカル超伝導が結晶を歪ませる、新奇な物理現象を発見 ～量子コンピューターへの応用時、量子ビット作製の指針となることが期待～

◆発表のポイント

- ・トポロジカル超伝導体（注 1）は、次世代量子コンピューターへの応用が期待されています。以前、本学の研究グループは $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がスピン三重項トポロジカル超伝導体であることを発見しました。
- ・今回、同グループはスピン三重項超伝導転移が結晶の歪みを引き起こすことを新たに明らかにしました。
- ・本研究成果は、量子コンピューターへの応用に向けての材料基礎を築くものです。

岡山大学大学院環境生命自然科学研究科 2 年の伊藤海飛大学院生、高柳颯太大学院生（研究当時。現在、株式会社デンロコーポレーション）、同大学術研究院環境生命自然科学学域の俣野和明助教（研究当時。現在、岡山理科大学理学部物理学科准教授）、鄭国慶教授、物質構造科学研究所の中尾裕則教授らの研究グループは、トポロジカル超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ が超伝導転移に伴って結晶を歪ませる新奇な物理現象を発見しました。本研究成果は、米国東部時間の 8 月 22 日付で、米国物理学会速報誌「*Physical Review Letters*」にオンラインで掲載されました。

トポロジカル超伝導体（注 1）は、従来の超伝導体とは異なり、波動関数に「ひねり」が存在し、その表面電子状態が次世代の量子コンピューターの応用に期待されています。本研究で未知の物性が明らかになったことは、産業応用に向けた材料基礎の構築として注目されています。

超伝導体結晶の歪みを初めて捉えた瞬間、二人で顔を見合わせて歓喜したことは、一生の宝物です。



伊藤大学院生



高柳大学院生
（研究当時）

PRESS RELEASE

■発表内容

<現状>

近年、「トポロジー」という数学的な概念を用いて物理現象を理解する新しい試みが注目を集めています。従来の導電体は、表面と内部のトポロジーが同じで、表面も内部も同様に電気を通します。しかし、トポロジカル物質では事情が異なります。例えば、トポロジカル絶縁体では、電子を記述する波動関数に「ひねり」があり、内部では電流が流れませんが、表面では電流が流れる特性を持っています。

同様に、トポロジカル超伝導体でも特徴的な表面状態が現れます。特に、磁束が通る渦糸中心では、「マヨラナ粒子」（注 2）と呼ばれる励起状態が現れ、量子コンピューター（注 3）などの次世代デバイスへの応用が期待されています。

しかし、トポロジカル超伝導体は稀有な存在で、その物性はまだ十分に解明されていません。なかでも、「スピン三重項超伝導体」（注 4）は、その波動関数が左右反転に対して符号が逆転する性質を持ち、トポロジカル超伝導体の一種とされています。

<研究成果の内容>

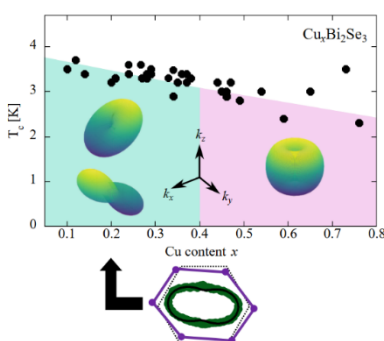
研究グループは、トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 のセレン（Se）層間に銅（Cu）を挿入することによって、超伝導体を合成しました。

本グループは 2016 年に、銅（Cu）を 30%程度挿入した $\text{Cu}_{0.3}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ （注 5）において、トポロジカル超伝導状態が実現することを世界で初めて証明しました。しかし、この物質の性質については、まだ十分に解明されていません。

今回の研究では、結晶構造が果たす役割や超伝導と結晶格子の振動（フォノン）との関係を調査しました。高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所にある放射光実験施設「フォトンファクトリー」を活用して、結晶構造の変化を精密に調べました。その結果、温度を下げていくと、超伝導転移に伴って結晶が歪み始めることを発見しました。

同グループはさらに、この現象はスピン三重項超伝導状態の特性である 2 成分秩序変数（波動関数）が格子振動と結合した結果であることを示しました。

この成果は、トポロジカル超伝導研究を前進させたもので、また、量子コンピューターへ応用する際に量子ビット作製の指針となることが期待されます。



図：超伝導転移温度と銅の含量 x との関係。 $x=0.4$ を境に、超伝導波動関数が異なる。下の挿入図は $x<0.4$ 領域で結晶の面が歪む様子を示している。面に垂直方向も歪む。



PRESS RELEASE

<社会的な意義>

トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体は、材料科学・物性物理学の新しい研究分野として注目されているだけでなく、次世代の材料・デバイスとしても大いに期待されています。本研究成果は、量子コンピューターへの応用に向けての材料基礎を築くものです。

■論文情報

論文名：Spontaneous Lattice Distortion in the Spin-triplet Superconductor $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

掲載紙：Physical Review Letters

著者：俣野和明、高柳颯太、伊藤海飛、二田晴也、横山武蔵、Maria Mihaescu、中尾裕則、鄭国慶

DOI: doi.org/10.1103/ddvn-8c9n

■研究資金

本研究は、科学研究費助成事業（No. 22H04482, No. 25K07207）および岡山工学振興会の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

注1：トポロジカル超伝導体、トポロジカル絶縁体、トポロジカル物質

トポロジー（位相幾何学）は数学の分野の一つで、形が連続するか否かを議論する学問です。例えば、ドーナツとコーヒーカップは同一と考えられますが、ボールは違うものとみなされます。これは、ドーナツとコーヒーカップは穴が1つ空いており連続的に変形することが可能ですが、ボールには穴がなくドーナツとは異なるものとみなされるためです。穴の数をトポロジカル不変数といいます。物理的性質をトポロジカル不変数で記述される物質はトポロジカル物質と呼ばれます。トポロジカル超伝導体やトポロジカル絶縁体などが典型例です。

なお、超伝導は金属がある臨界温度を超えて冷却されたときに起こる、電気抵抗がゼロになる現象です。超伝導を起こす物質を超伝導体と呼びます。超伝導状態にあるときは、電気がエネルギーを失わずに物質の中を流れます。リニア新幹線や医療機器のMRI等にすでに応用されています。

注2：マヨナラ粒子

自然界には粒子と反粒子が対となって存在し、一般に粒子と反粒子が異なります。粒子と反粒子が同一になる特殊な場合があり、その粒子のことをマヨナラ粒子と呼びます。イタリアの天才物理学者 E. マヨナラに由来しています。

注3：量子コンピューター

量子のもつ「重ね合わせ」や「量子もつれ」といった原理を利用し、超高速の演算を行うコンピューターです。トポロジカル量子コンピューターは特にシステムに障害が発生した場合でも正常に機能し続けることができる次世代の量子コンピューターとして開発が進んでいます。



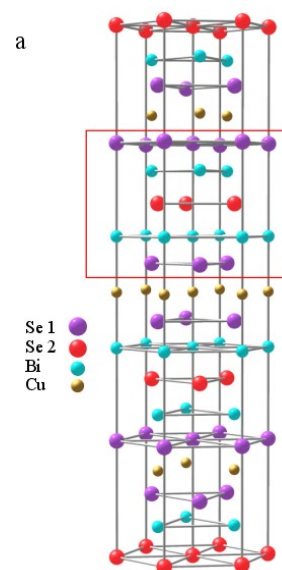
PRESS RELEASE

注4：スピン三重項超伝導

2つの電子がそのスピン（電子の自転）の向きを同じ方向にして対を作り、それによって起こる超伝導をスピン三重項超伝導といいます。それに対して、2つの電子がそのスピンを逆向きにして作った対によって引き起こされる超伝導をスピン一重項超伝導といいます。現在までに発見された超伝導体は、圧倒的大多数はスピン一重項超伝導体です。

注5： $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 超伝導体

トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の層間に銅原子を挿入することで超伝導を発現させることに成功した物質です。右図のような結晶構造を持っています。



<お問い合わせ>

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域

教授 鄭 国慶

(電話番号) 086-251-7813

(FAX) 086-251-7830



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



岡山大学は持続可能な開発目標 (SDGs) を支援しています。