



磁場に強い超伝導を実現する新たなメカニズムを発見

～原子レベルの厚さで起こるスピンのひねりが鍵 量子コンピュータ素子などへの応用に期待～

配布日時：2021年3月5日14時

解禁日時：2021年3月5日19時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国立大学法人 大阪大学

国立大学法人 北海道大学

概要

1. NIMS は大阪大学および北海道大学と共同で、磁場によって容易に破壊される超伝導が、原子レベルの厚さでは強磁場中でも破壊されない現象を見出し、そのメカニズムを明らかにしました。磁場に強い超伝導材料開発の道筋を示すと同時に、磁性体との組み合わせで実現が期待されるトポロジカル超伝導体^{*1}の開発に大きく貢献することが期待されます。

2. 超伝導は病院でのMRI（核磁気共鳴画像法）や超高感度磁気センサーなどさまざまな分野で応用されています。その中でも特に近年注目を集めているのが、トポロジカル超伝導体と呼ばれる特殊な超伝導体です。トポロジカル超伝導体は、量子情報を長時間保持できるため、量子コンピュータの素子として利用すれば、より複雑な演算が可能になるといわれており、その実現には、超伝導体と磁性体を組み合わせたハイブリッド構造をとることが有望視されています。一方で、超伝導体と磁性体を接近させると強い「磁場」が発生しますが、超伝導は磁場（磁気）によって容易に壊れてしまうという性質があるため、トポロジカル超伝導体実現のために、磁場に対して頑強な性質をもつ超伝導体の開発が望まれています。

3. 今回、研究チームは、代表的な超伝導体であるインジウムを原子レベルの厚さまで削った超薄膜結晶を用いることで、強い磁場でも超伝導が破壊されない新たなメカニズムを発見しました。通常は磁場をかけるとスピン^{*2}との相互作用によって電子のエネルギーが変化するため超伝導が壊れます。しかし原子層の2次元結晶では、スピンの向きが電子の運動方向と直結し、スピンの回転の「ひねり」が与えられます。そのため、スピンの向きが頻繁に変化し、磁場によるエネルギー変化がキャンセルされて超伝導が壊れません。これにより、超伝導が壊れる臨界磁場は従来の理論値の3倍程度（16～20 T）にまで増強されることがわかりました。インジウム自体はごくありふれた超伝導体であり、このメカニズムは特殊な結晶構造や電子間の強い相互作用などを必要としないため、汎用性の高い一般的な原理といえます。

4. 今後は、この成果を応用して、より磁場に強い超伝導超薄膜の開発をおこないます。さらに、超伝導-磁性体ハイブリッド型のデバイスを作製し、次世代量子コンピュータの実現に欠かせないとされるトポロジカル超伝導体の開発へとつなげていきます。

5. 本研究は、NIMS 国際ナノアーキテクニクス研究拠点表面量子相物質グループの内橋隆グループリーダー（北海道大学大学院理学院物理学専攻客員教授（連携分野教員）兼務）、同先端材料解析研究拠点ナノプローブグループの吉澤俊介主任研究員、東京大学物性研究所の矢治光一郎助教（研究当時／現在 NIMS 先端材料解析研究拠点シンクロトンX線グループ主任研究員）、大阪大学大学院工学研究科物理学系専攻の坂本一之教授らにより行われました。また、本研究は、科研費基盤研究（B）「時空間反転対称性の破れた超伝導状態の実空間分光測定」（18H01876）などの一環として行われました。

6. 本研究成果は、Nature Communications 誌にて英国時間2021年3月5日午前10時（日本時間5日午後7時）に掲載されます。

研究の背景

超伝導は物質の電気抵抗が低温で消失する驚くべき現象であり、微視的な世界を支配する量子力学の状態が巨視的なスケールで現れたものです。超伝導にはMRI（核磁気共鳴画像法）や超高感度磁気センサーなど多くの応用がありますが、そこでしばしば問題になるのが超伝導は磁場（磁気的な力をもたらす空間の性質）によって容易に壊れてしまうという性質です。たとえばMRIに利用されている超伝導マグネットには特別に処理した材料が使われ、自らが発生する磁場によって超伝導が壊れない工夫がされています。

一方で近年の量子技術の発展によって、超伝導体と磁性体を組み合わせた量子マテリアル^{*3}の開発が重要になってきています。特に、次世代の量子コンピュータの素子として脚光を浴びているトポロジカル超伝導体を実現するには、超伝導体-磁性体ハイブリッド構造を採用することが有望視されています。しかし、超伝導体と磁性体を接近させるとその強い「磁場」（より正確には、磁気的な相互作用であり、実効的な磁場に相当するもの）により超伝導が壊れてしまいます。そのため、強い磁場によって壊れず、しかもデバイスの作製に適した薄膜状の超伝導材料の開発が望まれていました。最近になって、グラフェンに似たある種の結晶構造をもつ層状の超伝導物質は磁場に対して頑強であることが発見され、注目を集めました（Y. Saito et al., *Nature Physics* **12**, 144 (2016)など）、より一般的な超伝導物質にも適応可能な、新しい指導原理の発見が望まれていました。

研究内容と成果

研究チームは、代表的な超伝導体であるインジウムの薄膜を、その結晶性を保ったまま極限まで薄くし、原子レベルの厚さの2次元結晶を作製しました（図1）。たとえ磁場のない環境であってもこのような究極的な薄さで超伝導が壊れないことは予想外のことであり、すでにNIMSが世界に先駆けて実証しています。今回、その実験技術を発展させて極低温・強磁場の環境下で測定を行ったところ、超伝導が特定の方向の磁場に対して極めて頑強になることを見出しました（図2）。これは、磁性体から受ける「磁場」（磁気的な相互作用）に対しても頑強になることを意味しています。従来から考えられていたメカニズムによると、このインジウムの原子層結晶の臨界磁場は5.5~5.8T（テスラ）ですが、今回得られた臨界磁場はこの値を大きく超え、最大で16~20Tに達すると見積もられます。すなわち、約3倍も臨界磁場が増強されていることがわかりました。

そこで、研究チームは世界最高性能の光電子分光装置と第一原理計算を駆使して、この原子層結晶の電子状態とスピン状態を調べました。その結果、電子の運動方向に依存してスピンの向きが異なり、電子の運動方向が一回転するとスピンの向きも一回転するような特殊な状態をとっていることがわかりました（図3）。この状態は、いわゆるラシュバ型スピン軌道相互作用^{*4}が存在していることを示しています。このような状況では、わずかに残っている不純物や欠陥によって電子の運動方向が曲げられると、スピンの方向もそれにつれて回転してしまいます（図4(a)）。このような現象が実際に試料中で起こっていることは、電子の運動方向の曲がりとスピンの「ひねり」がほとんど同じ頻度で起こっていることから確かめることができました。

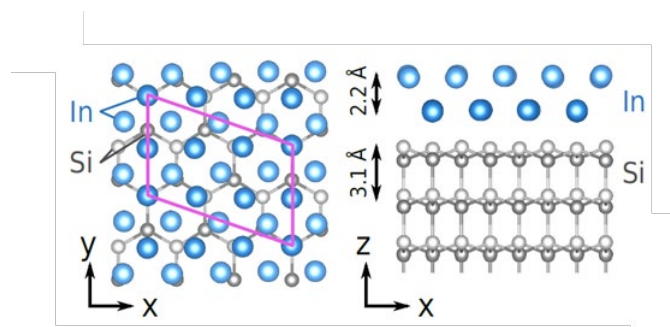


図1 本研究で作製した原子レベルの厚さをもつインジウム超薄膜の結晶構造。厚さはバルク結晶の1ユニットセルに相当する。基板はシリコン単結晶。

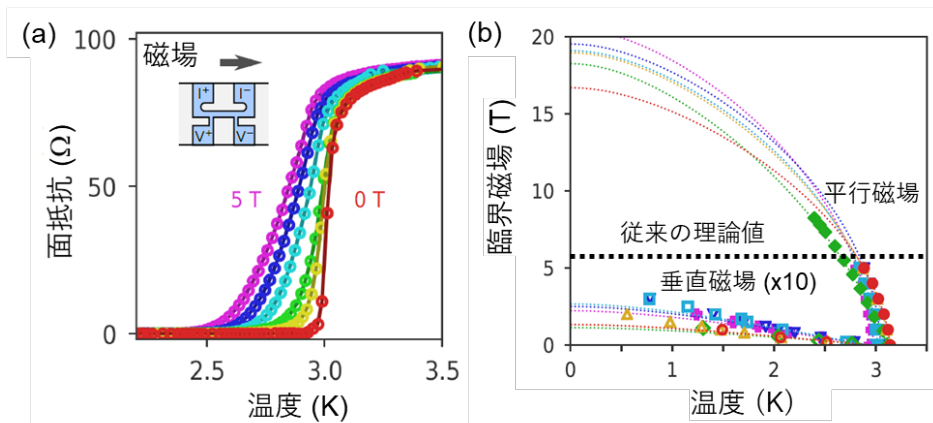


図 2 (a) 超伝導転移を示す面抵抗（単位面積当たりの抵抗値）の温度依存性と、磁場依存性。
 (b) 複数の試料を用いて測定した臨界磁場の温度依存性。臨界磁場は従来の理論値(5.5~5.8 T)を
 超え、十分に低温では 16~20 T に達することがわかる。比較のため、試料面に垂直方向に磁場
 を印加した場合の臨界磁場（10 倍に拡大）も示してある。

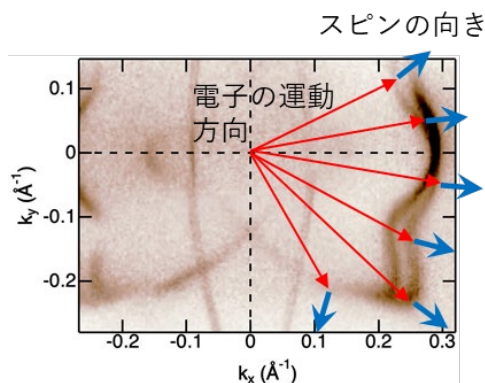


図 3 光電子分光測定と第一原理計算により得られた試料中の電子の運動量（速度に比例する
 量）とスピンの向きを示すデータ。図の色の濃い部分には電子が多く存在することを示し、中心
 からの赤い矢印はその場所における電子の運動方向を、青い矢印はスピンの向きを示している。
 電子の運動方向が回転すると、スピンも回転することがわかる。

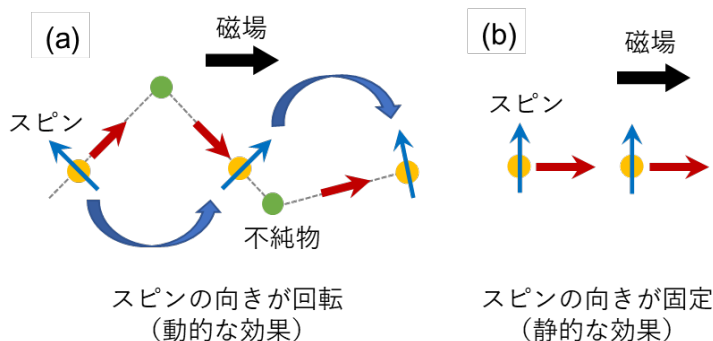


図 4 (a) 電子の運動方向が変化する度にスピンの向きが回転することを表す模式図（本研究）。
 (b) スピンが磁場に対して垂直方向に固定されることを示す模式図（先行研究）。

このスピンの「ひねり」は、超伝導状態になった電子にとって大きな意味を持ちます。すなわち、磁場に対してスピンの向きが頻繁に変わるために、ある時にはエネルギーを得してもまたある時にはエネルギーを損するので、平均するとエネルギーの損得はほとんどなくなります。磁場によって電子のエネルギーが変化してしまうことが、このような非常に薄い試料で超伝導が壊れる原因ですから、結局強い磁場があっても超伝導が壊れないこととなります。このような効果は古くから知られていましたが、今回原子レベルの厚さの結晶を作製して、スピンの強制的にひねられる状況を作り出したことで、このメカニズムが従来比で数十倍から 1000 倍程度も強く働くことを研究チームは発見しました。

今回超伝導体として用いたインジウムはごくありふれた物質であり、特殊な結晶構造や強い電子間の相互作用などを持っていません。すなわち、このメカニズムは汎用性の高い一般的な原理だということができます。また、最近報告された高い臨界磁場をもつ層状の超伝導物質との比較も、科学的に非常に興味のあるところですが、どちらもスピンの向きが電子の運動方向で決定されることを起源としています。先行研究ではスピンの向きが一方（磁場に対して垂直方向）に固定される静的な効果が原因であるのに対して（図 4(b)）、今回の研究ではスピンの向きがひねられる動的な効果が原因であり（図 4(a)）、まったく異なるものです。

今後の展開

今後は、この成果を応用して、より高い臨界磁場をもつ超伝導薄膜の開発をおこないます。すでに予備実験では、別の種類の超伝導体を用いることで、磁場に対してさらに頑強な性質が観測されています。また、実際に原子レベルの厚さの超伝導体と磁性体からなるハイブリッド型のデバイスを作製し、トポロジカル超伝導体を実現します。トポロジカル超伝導体は、次世代量子コンピュータの実現に欠かせない量子材料であり、現在世界的な研究開発がおこなわれています。トポロジカル超伝導体はその作製方法にいくつかの提案があり、すでにその存在は確認されていますが、多くは特殊な材料の組み合わせが必要です。今回得られた成果はより一般的な材料でトポロジカル超伝導体を実現する道を拓くものです。

掲載論文

題目：Atomic-layer Rashba-type superconductor protected by dynamic spin-momentum locking

著者：Shunsuke Yoshizawa, Takahiro Kobayashi, Yoshitaka Nakata, Koichiro Yaji, Kenta Yokota, Fumio Komori, Shik Shin, Kazuyuki Sakamoto, and Takashi Uchihashi

雑誌：Nature Communications

掲載日時：英国時間 2021 年 3 月 5 日 10 時（日本時間 5 日 19 時）

用語解説

(1) トポロジカル超伝導体

ある種の物質は電子状態としてトポロジカルな性質（連続変形に対する不変量が存在すること）を持っており、トポロジカルな性質をもつ超伝導体のことをトポロジカル超伝導体と呼ぶ。トポロジカル超伝導体中に発生する超伝導電流の渦中心には、マヨラナ状態と呼ばれる特異な状態が存在することが知られており、このマヨラナ状態を利用することで、量子情報を長時間保持して複雑な演算をすることのできる革新的な量子コンピュータが実現できると期待されている。

(2) スピン

電子（または他の素粒子）に付随する自由度の一つであり、物質の磁性の起源である。スピンは N 極と S 極をもつ微小な磁石とみなすことができ、イメージ的には S 極から N 極に向かう方向の矢印として表現できる。通常はスピンの方向は電子の運動方向からは独立しており、自由に变化できる。

(3) 量子材料

量子状態の制御により機能を発現することのできる材料のことであり、トポロジカル超伝導体はそのうちのひとつである。近年の量子技術の発展にもなっており、重要度を増しており、政府が 2020 年に策定した量子

技術の研究開発などの方針を示す「量子技術イノベーション戦略」にも、量子計算や量子センサーなどの開発に必要な基盤要素と位置づけられている。

(4) ラシュバ型スピン軌道相互作用

スピンと電子の直進運動との間に働く相互作用の一種であり、2 次元的な性質をもつ試料では、試料面内方向にスピンを向かせる働きがある。本研究での試料は原子レベルの厚さしかないので、試料基板面に対して垂直方向のポテンシャル勾配（電場）が大きくなり、この相互作用が現れる。