



平成 29 年 12 月 1 日

国立大学法人 広島大学
国立大学法人 山梨大学

新奇超伝導体に特殊なスピン電子構造を発見 - スピントロニクスデバイス開発と超伝導研究に新たな光 -

【本研究成果のポイント】

新奇層状超伝導体 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ に隠されたスピン偏極電子状態を発見
電子エネルギーによってスピン電子構造に変化が現れる事を発見
超伝導状態と電子スピンの関係を研究する上で重要な試料であること

【概要】

広島大学放射光科学研究センターの奥田太一教授、宮本幸治助教、広島大学大学院理学研究科博士課程3年のWu Shilongらの研究グループは、広島大学大学院理学研究科木村昭夫教授と山梨大学大学院附属クリスタル科学研究センターの長尾雅則助教、綿打敏司准教授、田中功教授らの研究グループと共同で、最近発見されたランタン(La)と酸素(O)およびビスマス(Bi)と硫黄(S)からなる、超伝導を示す層状化合物中に隠されたスピン偏極電子状態が存在する事を発見しました(図1)。

本物質はBiやLaといった大きなスピン軌道相互作用を持つ元素が用いられており、その電子状態はスピン軌道相互作用が重要な役割を担うと理論的に示唆されました。従来、このような大きなスピン軌道相互作用をもつ物質は、結晶が空間反転対称性をもつ場合はスピン偏極した電子状態を生じ、対称性をもたない物質ではスピン偏極した電子状態は存在し得ないと考えられていました。

しかし最近、結晶全体に空間反転対称性を持つ物質でも局所的にその対称性が破れた構造を持っていればスピン偏極電子状態が生じる可能性が理論的に指摘されていました。今回研究グループは広島大学放射光科学研究センター(HiSOR)に設置された高分解能スピン・角度分解光電子分光装置を用いて、最近発見された層状の超伝導物質において局所的なスピン偏極電子状態が存在することを初めて発見しました(図2)。またそのスピン偏極電子構造が電子の持つエネルギーに依存して変化することも突き止め、さらに、この物質ではスピン偏極した電子が超伝導に直接かかわっていることがわかりました。

本結果は、層状化合物の表と裏に隠されたスピン偏極電子状態が存在することを意味しており、本物質がデュアルゲートスピントランジスタなどのスピントロニクスデバイス応用にもつながると期待されます。

本研究成果は、ロンドン時間の平成29年12月4日午前10時(日本時間:平成29年12月4日午後7時)に、「Nature Communications(ネーチャーコミュニケーションズ)」にオンライン掲載される予定です。

掲載雑誌: Nature Communications

URL: <https://www.nature.com/ncomms/>

論文題目: Direct evidence of hidden local spin polarization in a centrosymmetric superconductor $\text{LaO}_{0.55}\text{F}_{0.45}\text{BiS}_2$

著者: Shilong Wu, K. Sumida, K. Miyamoto, K. Taguchi, T. Yoshikawa, A. Kimura, Y. Ueda, M. Arita, M. Nagao, S. Watauchi, I. Tanaka and T. Okuda

doi: 10.1038/s41467-017-02058-2

【背景】

電子には電荷に加えスピンの自由度があります。スピンはそれ自身が微小な磁石の性質を持ちます。例えば、強磁性体^{注1}ではスピンがある方向に揃っているため物質全体が磁石の性質を持ちます。一方、一般に非磁性体^{注2}ではスピンのランダムな方向を向いている（もしくは上向きと下向きのスピンのキャンセルしている）ため物質は磁石の性質を持ちません。しかし、スピン軌道相互作用^{注3}が大きな重い元素を含む物質の場合、表面や界面など結晶性が破れている部分には非磁性体でもスピンの揃う現象が生じることが知られており（ラシュバ効果^{注4}）、新たなスピン偏極電子状態として近年注目されています。このような非磁性体中のスピン偏極電子状態は次世代のスピンを利用した電子デバイス技術（スピントロニクス^{注5}）への応用が期待されることから盛んに研究がおこなわれています。

しかし最近、結晶全体が空間反転対称性^{注6}を有していても局所的にその対称性が破れているような場合には、局所的なスピン偏極電子状態が生じ得ることが理論的に予想されていました。そのような物質の候補として最近発見された新しい超伝導物質である $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ があります。この物質は図1のような構造を持つ層状物質で中央の LaO 層が二つの BiS_2 層に挟まれた結晶構造を持ちます。全体としては空間反転対称性を持ちますが、 BiS_2 層だけを見ると対称性が破れており、また Bi というスピン軌道相互作用の大きな重元素が含まれていることから局所的なスピン偏極電子状態を持つ可能性があると指摘されていました。さらにこの物質は $T_c \sim 3 \text{ K}$ で超伝導転移を起こす超伝導物質であることがわかっています。もし、この物質の価電子バンドがスピン偏極していれば、超伝導にこのスピン偏極電子が直接かかわっていることが予想され、スピン一重項状態と三重項状態^{注7}の電子対（クーパーペアと呼ばれる）がともに超伝導に寄与している特殊な超伝導物質である可能性があり、超伝導研究においても大変興味深い物質です。

【研究成果の内容】

今回、広島大学、山梨大学の研究グループは高品質の $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ 結晶を作製し、広島大学の放射光科学研究センター（HiSOR）で高分解能のスピンおよび角度分解光電子分光^{注8}により、この物質のスピン電子状態を測定しました。その結果伝導帯の電子状態は明確にスピン偏極しており、対称点に対してスピン偏極度が反転するラシュバ型スピン偏極電子状態を有することが分かりました（図2）。また高い束縛エネルギーの電子状態はラシュバ型ではなくドレッセルハウズ型^{注9}と呼ばれる異なるスピン電子状態になっていることも分かりました（図3）。

【今後の展開】

今回の研究は、空間反転対称性のある物質でも局所的な対称性の破れが存在すれば電子のスピンが偏極することを実験的に示したものです。これまでそのような物質として MoS_2 や WSe_2 が報告されていましたが、これらの物質は表面に垂直なスピン偏極を示すのに対し、今回発見された $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ では面内にスピン偏極した物質である点が大きく異なっています。さらに $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ は約 3 K で超伝導となること

が知られており、今回発見したスピン偏極電子状態が超伝導状態を担っていると考えられることから、新しいタイプの超伝導物質としても非常に興味深い物質です。また、層状構造のおもて面と裏面がそれぞれ逆向きにスピン偏極しているため、両面を使ったデュアルゲートスピントランジスタ^{注10}として利用出来る可能性があり、次世代のスピンを利用したデバイスへの応用も期待されています。

【用語説明】

- (注1) **強磁性体**：隣り合うスピンの同一の方向を向いて整列し、全体として大きな磁気モーメントを持つ物質。外部磁場が無くても自発磁化を持つことができ、いわゆる磁石のことである。
- (注2) **非磁性体**：強磁性体と異なり、電子のスピンの上向きのもので下向きのもので物質内で同数あり打ち消し合っているため、全体としては磁気モーメントを持たず、磁石の性質を持たない物質。
- (注3) **スピン軌道相互作用**：電子が電界中を運動することにより磁界を感じる相対論的効果。この効果により非磁性体であっても運動方向にスピンの向きが揃う現象（ラシュバ効果やドレッセルハウス効果など）が生じる。
- (注4) **ラシュバ効果**：物質表面や界面におけるポテンシャル勾配によるスピン軌道相互作用により、ポテンシャル勾配の方向と物質中の電子の運動方向の両者に垂直な方向に電子のスピンの向きが揃う（＝偏極する）現象。スピンは電子バンドの等エネルギー面においてヘリカル（面内に時計回りや反時計回り）な構造を示す。
- (注5) **空間反転対称性**：空間座標(x,y,z)を(-x,-y,-z)と変換することを空間反転と呼び、そのような変換前後で物理量が不変である場合、空間反転対称性があると言う。
- (注6) **スピントロニクス**：従来のエレクトロニクスでは電子の持つ電荷を利用してトランジスタの動作やメモリーとしての機能を実現していたが、電子スピンの上向き、下向きの違いを利用して同様の機能を実現しようとする電子デバイス技術。電荷を利用するエレクトロニクスデバイスに比べ消費電力を大幅に減らすことができるなどの利点があり、実現に向けた研究が行われている。
- (注7) **スピン一重項状態と三重項状態**：電子のスピンの向きによって、電子対の組み方は二種類存在する。電子のスピンの向きが同じ方向のものをスピン三重項状態、反対向きをスピン一重項状態と呼ぶ。
- (注8) **スピンおよび角度分解光電子分光**：固体に光を照射すると物質の表面から電子が放出される。放出された電子は光電子と呼ばれ、その光電子のエネルギーや運動量、スピン状態を測定すると、物質がどのような電子・スピン状態をとっているかが分かる。
- (注9) **ドレッセルハウス効果**：ラシュバ効果では物質表面や界面において電場勾配が生じるが、III-V族半導体などの極性物質では異なる原子間に電場が生じる。このようなミクロな電場が原因となって生じるスピン軌道相互作用をドレッセルハウス効果とよぶ。そのスピン構造はラシュバ型のようなヘリカル構造ではなく複雑なスピン構造を持つ。
- (注10) **デュアルゲートスピントランジスタ**：ラシュバ効果などによるスピン偏極電子状態は電場でスピンの向きを制御することができるため、スピンを利用したトランジスタ（スピントランジスタ）が実現できると考えられている。今回観測したLaOBiS₂型の物質は図1に示したように表と裏のBiS₂層がそれぞれ逆向きのスピン偏極を有していると考えられるため表と裏の両面を利用したトランジスタが実現可能と考えられており、そのようなトランジスタをいう。両面が利用できるため速いトランジスタ動作が

期待できる。

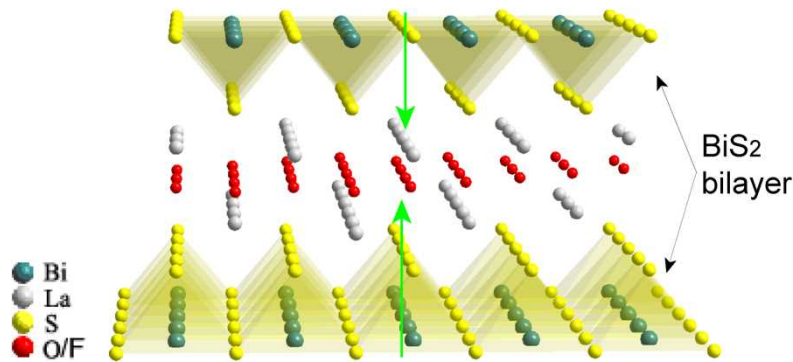


図1 : LaOBi₂S₂の結晶構造。二枚の BiS₂ 層が中央の LaO 層によって隔てられた層状構造をしている。表と裏の BiS₂ 層は互いに逆向きの構造をしており、各層を見ると対称性は破れているが、全体を見ると中心対称性が保たれている。

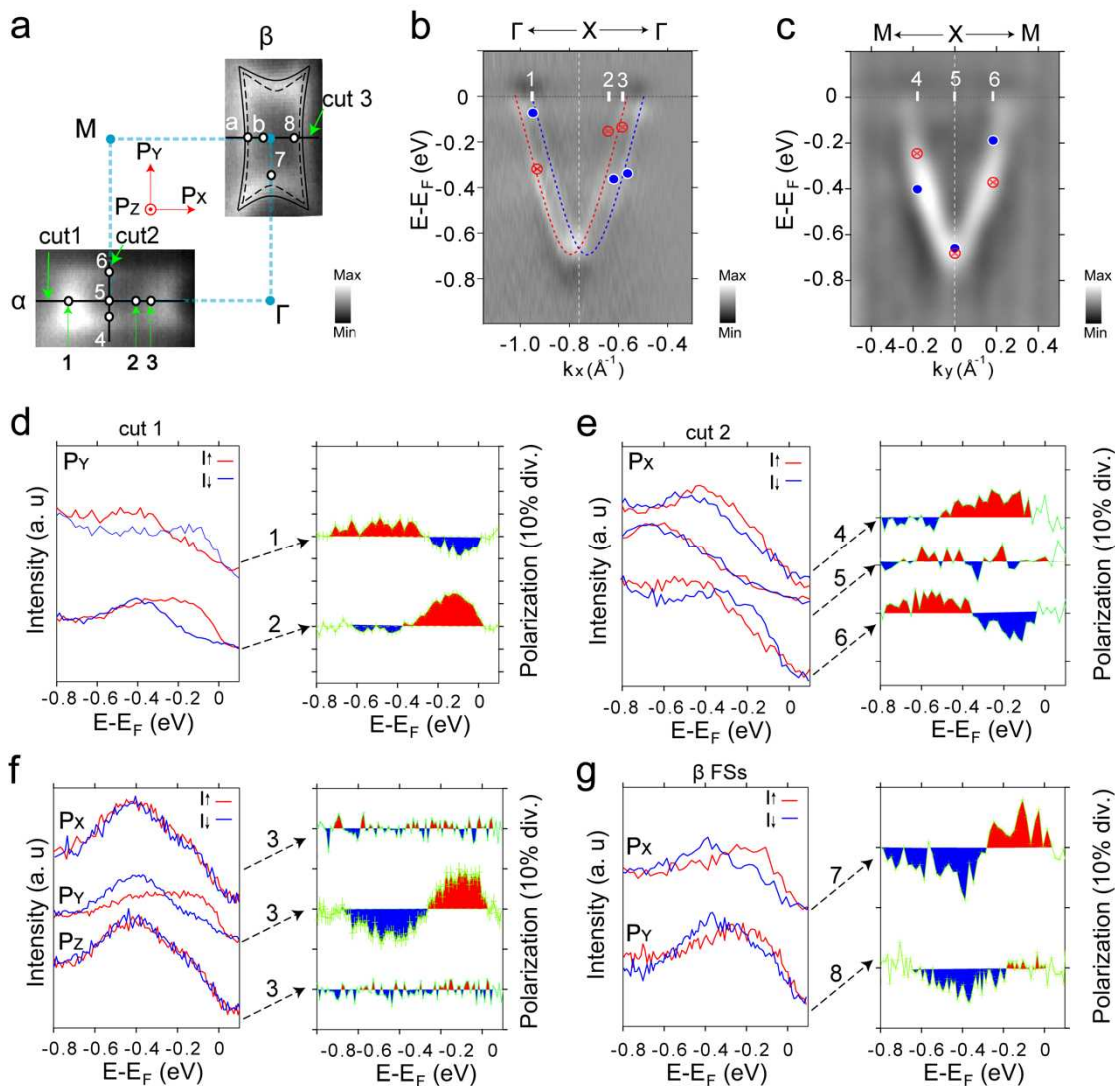


図2 : スピン分解光電子分光により観測されたスピン偏極した電子状態。図 d,e,f,g 中の赤と青で示されたスペクトルがそれぞれ上向き下向きスピンの状態を表す。両者が異なっていることがスピン偏極している証拠である。

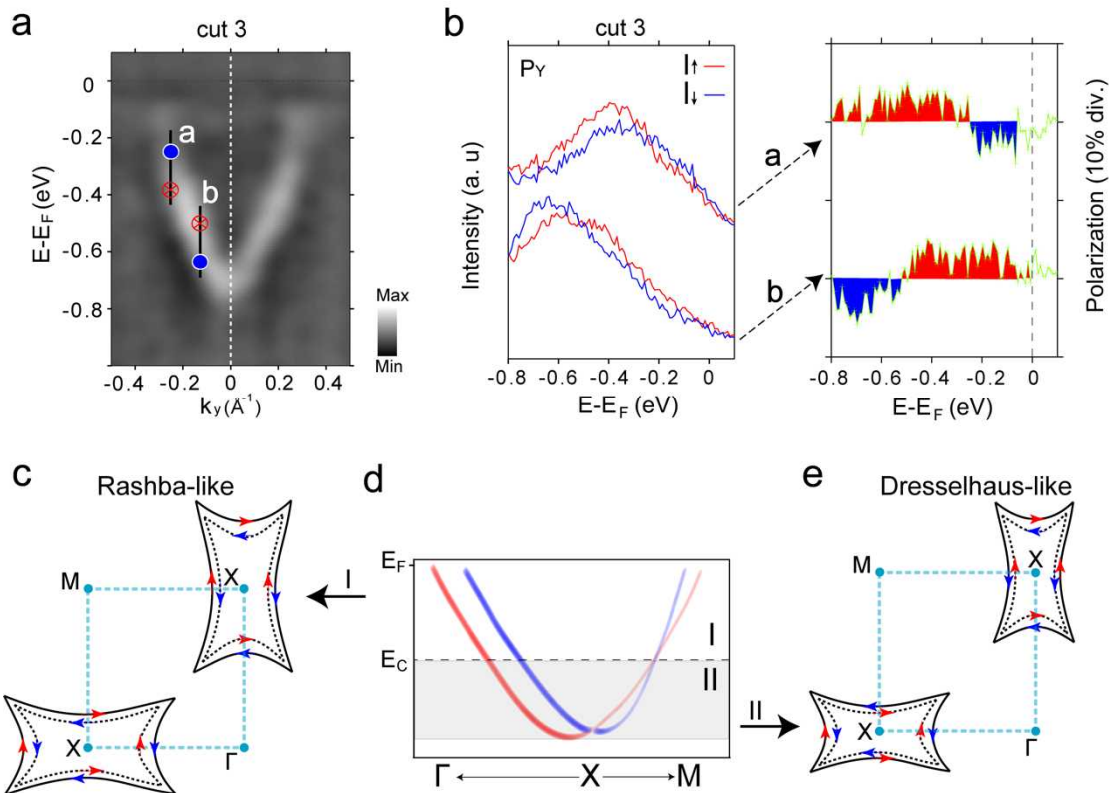


図3：スピン電子状態のエネルギーによる変化。図bに見られるように図aの”a”点と”b”点でスピンの状態が反転しており、図dに示すように領域IとIIではそれぞれ異なるスピン構造(c,e)をもつことが示唆される結果を得た。

【問い合わせ先】

広島大学放射光科学研究センター 教授 奥田 太一
 E-mail: okudat@hiroshima-u.ac.jp
 TEL: 082-424-6996 FAX: 082-424-6294

広島大学大学院理学研究科 物理学専攻 教授 木村 昭夫
 E-mail: akiok@hiroshima-u.ac.jp
 TEL: 082-424-7400 FAX: 082-424-0719

山梨大学大学院 総合研究部附属クリスタル科学研究センター
 助教 長尾 雅則
 E-mail: mnagao@yamanashi.ac.jp
 TEL: 055-220-8610 FAX: 055-220-8270

【取材申込み先】

広島大学 財務・総務室広報部広報グループ
 E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp
 TEL: 082-424-6762 FAX: 082-424-6040

山梨大学 総務部総務課広報企画室
 E-mail: koho@yamanashi.ac.jp
 TEL: 055-220-8006 FAX: 055-220-8799

発信枚数：A4版 5枚（本票含む）