

スピントロニクス材料研究でブレイクスルー

—理想的なスピン偏極電子を世界最高性能の電子スピン分析装置で発見—

ポイント

- ・ スピンを揃えて新奇絶縁体表面を高速で動く理想的な重さゼロ電子を世界で初めて発見
- ・ 世界最高解像度を有するスピン分解光電子分光装置の開発が観測成功の鍵
- ・ 新世代デバイス用の新規多機能材料開発の新たな展開に期待

研究の概要

国立大学法人 広島大学【学長 浅原利正】放射光科学研究センター【センター長 谷口雅樹】(以下「HiSOR」という)の宮本幸治助教、奥田太一准教授を中心とする研究グループは、独自に開発した世界最高性能(従来の100倍の解像度)をもつ高効率スピン角度分解光電子分光装置(電子スピン分析装置)を用いて、新奇トポロジカル絶縁体表面上の重さゼロ電子を観測し、その電子状態を世界で初めて解明しました。その結果、この重さゼロ電子が、今までに発見されたものよりも、はるかに広いエネルギー範囲にわたり、極めて高いスピン¹⁾の配列度をもつことを明らかにしました。よって、本研究物質が、スピントロニクス材料として理想的な性質を持つことを突き止めました。この研究成果により、次世代の大容量超低消費電力型のスピントロニクスデバイスや超高速コンピューターの開発をより一層加速させると期待されます。

本研究成果は、米国の科学雑誌「フィジカル・レビュー・レターズ(Physical Review Letters)」に掲載される予定です。

研究の背景

通常、固体中では、重さを持った電子が固体内部を動き回っています。つまり、固体内部の電子の動きを高速化すれば、演算速度が速い CPU やメモリー等を開発することが可能となります。

そうした中、近年、固体中をより高速で移動できる重さゼロの電子、いわゆるディラック電子が、特殊な絶縁体(トポロジカル絶縁体)³⁾で発見され、注目を集めています。通常の絶縁体は電圧をかけても電気は流れませんが、この特殊な絶縁体は、結晶表面に重さゼロの電子があるため、表面に電気が流れるという性質を有しています。さらに、この電子は、スピン¹⁾を揃えて固体内を動くという、非常にユニークな性質を持っているため、エレクトロニクスを超えた次世代の大容量超低消費電力デバイス技術であるスピントロニクス⁴⁾の材料として、現在脚光を浴びています。

しかしながら、トポロジカル絶縁体の研究を進展させる上で、克服すべき2つの大きな問題がこれまで指摘されてきました。第一点目は、今までに発見されたトポロジカル絶縁体自体に起因する問題です。それは、固体内部からの漏れ電流が、表面電流を覆い隠してしまうという問題です。この漏れ電流は、固体内部の絶縁性が不十分なために生じています。ところが、ごく最近になってこの問題を解決する物質として、新奇トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ および $\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$ (Bi:ビスマス、Te:テルル、Se:セレン) が発見されました。しかし残念ながら、その電子スピン状態の観測までには至っていませんでした。

第二点目は、トポロジカル絶縁体の表面電子状態を観測する装置の性能の問題です。電子スピン状態を観測する最も有力な手法は、電子の運動量・エネルギー・スピンを直接観測できるスピン角度分解光電子分光法⁴⁾です。しかし、従来のスピン角度分解光電子分光装置では、非常に効率の悪いスピン検出器を使用していたため、劣悪な解像度での測定を余儀なくされてきました。そのため、トポロジカル絶縁体の表面電子におけるスピン偏極度(スピンを揃える度合い)を正確に評価することができませんでした。

加えて、これまで発見されていたトポロジカル絶縁体は、非常に狭いエネルギー範囲でしか、表面電子のスピンを揃える能力がなく、そのことは、多機能デバイスを作成する上での大きな障害となっていました。

研究の内容

本研究グループは、HiSOR において電子がもつすべての自由度(運動量・エネルギー・スピン)を高解像度で測定することを目指して、従来のスピン分析技術とは一線を画する新しいスピン検出器を作成し、その新スピン検出器と高分解能角度エネルギー分析器とを組み合わせた高効率スピン角度分解光電子分光装置⁵⁾を開発しました。この装置を用いて、世界最高解像度でトポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ および $\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$ の表面上を運動する電子の速度分布とそのスピン状態とを精密に調べました。その結果、本物質の表面電子は、今まで発見されたトポロジカル絶縁体のものよりもスピンを揃える能力が極めて高く、広いエネルギー範囲にわたって高スピン偏極度を実現していることが明らかとなりました。

今後の展望

本研究で観測した新奇絶縁体の表面電子は、広いエネルギー領域において、高スピン偏極度を保ちながら表面を超高速で移動し、かつ結晶内部には流れ込まない性質を有しています。このことは、本研究物質が、スピントロニクス材料として理想的な性質を持つことを示しています。そのため本研究成果は、スピンを利用した次世代の大容量超低消費電力デバイスの開発に、さらなる大きな広がり新たな展開とを与えるものと期待されます。

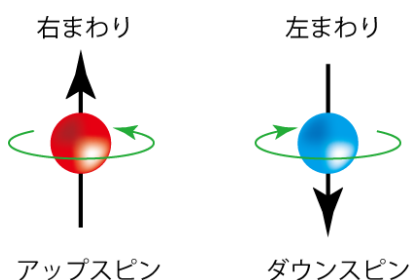
研究体制

本研究は、HiSOR の共同研究委員会により採択された研究課題(課題番号: 11-B-12)のもと実験が行われました。また、本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金:基盤研究(A)「高効率スピン分解光電子分光法の高度化とスピントロニクス材料の3次元スピン解析」(平成23~25年度、研究代表者:奥田太一)、基盤研究(B)「高効率スピン偏極光電子分光による表面磁性の研究」(平成19~21年度、研究代表者:奥田太一)、基盤研究(B)「トポロジカル絶縁体の新物質の開発とヘリカルスピン構造の解明」(平成23~25年度、研究代表者:木村昭夫)、基盤研究(B)「空間反転対称性の破れたナノ超伝導体のスピン分解フェルミオロジー」(平成20~22年度、研究代表者:木村昭夫)の助成を受けて実施されました。

用語解説

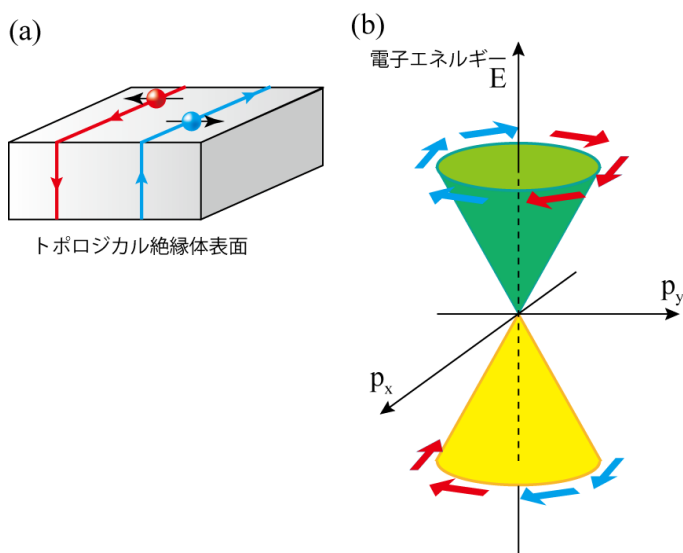
1) スピン

電子の自転に由来した磁石の性質のことです。自転の方向に対応して、電子にはアップスピン(上向きスピン)とダウンスピン(下向きスピン)の2種類の状態があります。通常の金属や半導体では、同じ数のアップスピンとダウンスピンの電子が存在し互いにキャンセルしていますが、強磁性体(磁石)では片方の向きのスピンの電子の数が多くなるため、強い磁化が発生します。



2) トポロジカル絶縁体

物質の内部は絶縁体(電気を流さない)状態ですが、その表面では通常の絶縁体とは異なり、特殊な金属状態が実現している新奇絶縁体です。その表面金属状態は重さを持たず、スピンをそろえて動き回ります(図(a))。この様子を、横軸を電子の運動量、縦軸を電子のエネルギーとして表すと、下図の(b)の様に電子エネルギーと運動量が比例関係にあります。さらに、これを2次元表面の運動量として表すと、円錐となることから、一般にディラック・コーンと呼ばれます。トポロジカル絶縁体を利用した次世代の大容量超低消費電力スピンドバイスの開発や、超高速の電子を利用した次世代型のスーパーコンピュータの開発に大きな期待が寄せられています。



3) スピントロニクス

電子の電氣的性質である電荷と、磁氣的性質であるスピンとを共に利用して動作させる全く新しい電子素子(トランジスタやメモリーなど)技術のことです。この技術の究極の形として、電子1個1個のスピンアップとダウンをそれぞれ電気信号の「1」、

「0」に置き換えて信号処理を行うことが考えられています。これにより、微弱な電流でも明瞭に区別できるため、低消費電力の次世代電子素子の最有力候補として研究が進められています。

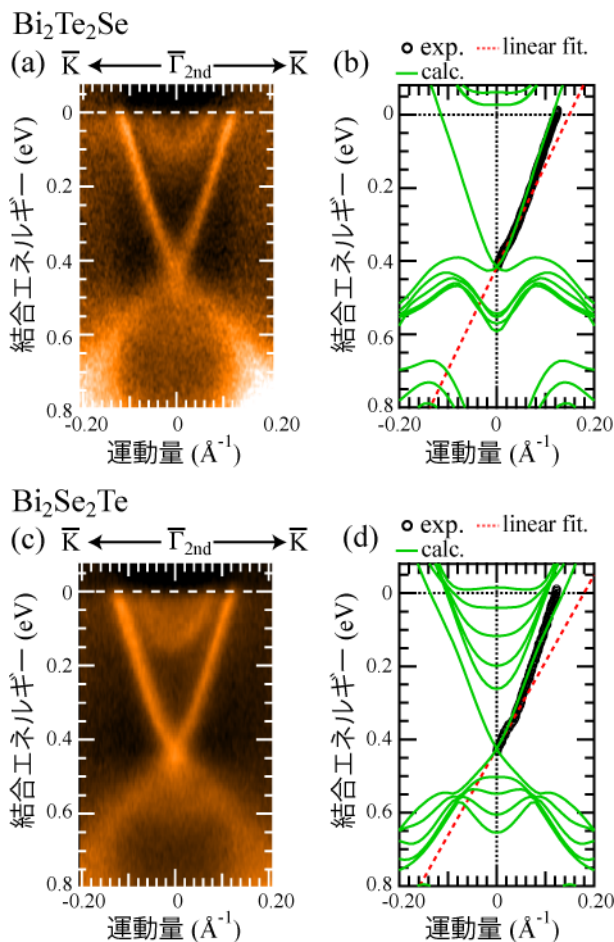
4) スピン角度分解光電子分光

結晶の表面に紫外線を照射して、光電効果により結晶外に放出される電子(光電子)の角度(運動量)・エネルギーを分析すると同時にスピン分析を行う測定手法です。物質内にある電子の運動量・エネルギーに加えスピンの状態も観測することができます。そのため、スピンが関与する様々な物理現象を理解し、それらを有効に活用した高機能性材料や次世代電子・磁気デバイスの研究開発に大変有力な手法です。

5) 高効率スピン角度分解光電子分光装置

東京大学および広島大学が共同開発した従来の100倍以上の効率をもつスピン検出器と、高性能の光電子アナライザとを組み合わせることで、100倍の解像度(10倍のエネルギー分解能、10倍の波数分解能)で固体中の電子スピンの動きを可視化できる装置です。

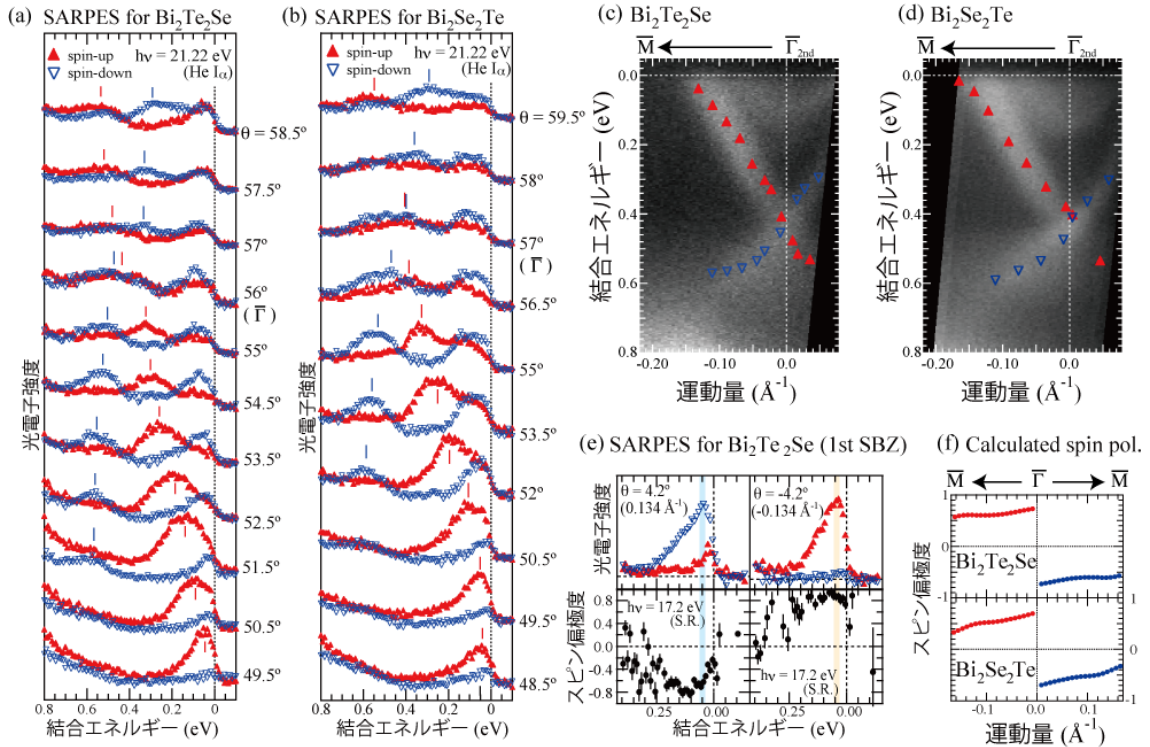
・トポロジカル絶縁体における重さゼロ電子の直接観測(研究成果)



トポロジカル絶縁体の表面電子の運動量とエネルギーとの関係が直線的な関係をもつ、重さゼロの電子であることを観測した。

また、この電子が 1 秒間に 4×10^5 m 移動できることも突き止めた。

トポロジカル絶縁体の表面電子におけるスピン構造の直接観測



スピン角度分解光電子分光測定により、トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ と $\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$ のそれぞれについて、電子の運動量を変化させながらスピン電子構造を観測した結果を(a),(b)図に示す。(青色:ダウンスピン、赤色:アップスピン)

これらの結果から、縦軸を電子のエネルギー、横軸をその運動量に表記したものを図(c),(d)に示す。▼がダウンスピンを、▲がアップスピンを表し、主さゼロ電子がスピン偏極していることは明らかである。

また、結合エネルギー0eVでのスピン偏極度を精密に測定した結果、77%を超える非常に大きな値であることを突き止めた。さらに、この高スピン偏極度は、結合エネルギー600meVまで維持されており、従来のトポロジカル絶縁体よりもはるかに広範囲に渡ってスピンを高配位させる能力をもつことも明らかにした。

特にディラック・コーンの上下でスピンの配列しているという結果は本研究以外に知られておりません。このような理想的なスピン偏極電子の発見は、スピントロニクス材料のさらなる多機能化を促進すると考えられる。