

質量のないディラック電子の磁気モーメントを精密測定

ー トポロジカル絶縁体の隠れた個性を発見ー

要旨

理化学研究所創発物性科学研究センター創発物性計測研究チームの付英双（フ・インシュアン）国際特別研究員（研究当時）（中国・華中科技大学教授）、花栗哲郎チームリーダー、強相関量子伝導研究チームの川村稔専任研究員、創発計算物理研究ユニットのモハマド・サイード・バハラミーユニットリーダー、東京工業大学応用セラミックス研究所の笹川崇男准教授らの共同研究グループ[※]は、「トポロジカル絶縁体^[1]」表面に形成される質量ゼロの「ディラック電子^[2]」が持つ磁気モーメント（磁力の大きさと向きを表すベクトル量）を精密に測定する新しい手法を開発しました。

トポロジカル絶縁体は、固体内部の電子は動くことができませんが、その表面には自由に動く電子が自然に現れる物質です。また、この表面の電子には質量がありません。このような質量ゼロの電子はディラック電子と呼ばれ、通常の電子とは異なる性質を示します。特にトポロジカル絶縁体表面のディラック電子は、電気伝導と磁性の間の強いつながりが特徴で、スピントロニクス^[3]などへの応用が期待されています。表面のディラック電子を制御するためには、磁性を特徴づける基本的な量である電子の磁気モーメントの情報が必要です。しかし、表面ディラック電子の磁気モーメントを測定できる手法はこれまで存在しませんでした。

今回、共同研究グループは、「走査型トンネル顕微鏡法／分光法(STM/STS)^[4]」を用いた磁気モーメントの新しい評価法を開発し、2種類のトポロジカル絶縁体に適用しました。その結果、2つの物質でディラック電子の運動速度がほとんど同じであるのに対し、磁気モーメントは大きさも方向も全く異なることが分かりました。

これは、トポロジカル絶縁体の隠れた個性を明らかにしたもので、磁気モーメントを通じたディラック電子の新しい制御法の開発へつながる成果です。

本研究は、国際科学雑誌『*Nature Communications*』（2月24日付：日本時間2月24日）に掲載されます。

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター
創発物性計測研究チーム

国際特別研究員（研究当時）	付 英双	（フ・インシュアン）
（中国・華中科技大学教授）		
チームリーダー	花栗 哲郎	（はなぐり てつお）
強相関量子伝導研究チーム		
専任研究員	川村 稔	（かわむらみのる）
創発計算物理研究ユニット		
ユニットリーダー	モハマド・サイード・バハラミー	（Mohammad Saeed Bahramy）
東京工業大学応用セラミックス研究所		
大学院生（研究当時）	五十嵐 九四郎	（いがらし きゅうしろう）
准教授	笹川 崇男	（ささがわ たかお）

1. 背景

「トポロジカル絶縁体」は、固体内部の電子は動くことができませんが、その表面には自由に動く電子が自然に現れる物質です。この表面の電子は質量がゼロで、「ディラック電子」と呼ばれています。トポロジカル絶縁体を強磁性体と接合させたり、大きな磁気モーメント（磁力の大きさと向きを表すベクトル量）を持つ不純物を添加して物質そのものを強磁性にしたり、あるいは強い磁場を与えたりすることにより、表面ディラック電子の置かれた環境を磁氣的にします。すると、ディラック電子の持つ磁気モーメントが影響を受け、その結果、ディラック電子は質量を獲得することが知られています。ディラック電子の質量制御はトポロジカル絶縁体の応用にとって重要な鍵の1つですが、そのためには、ディラック電子が持っている磁気モーメントの正確な評価が必要です。

電子の磁気モーメントは「 g 因子^[5]」と呼ばれる数に比例します。真空中の電子の g 因子は約 2 ですが、物質中では周囲の影響によって g 因子が 2 から大きくずれ、負の値をとることさえあります。通常、 g 因子は試料全体の磁気測定から見積もることができそうですが、トポロジカル絶縁体では試料内部の電子による寄与が非常に大きいので、表面にのみ存在するディラック電子だけの寄与を正確に見積もることは不可能です。表面金属状態の電気抵抗の磁場依存性を詳しく解析すると、原理的にはディラック電子の g 因子の大きさを見積もることができそうですが、その符号を決めることはできません。また、現実の試料では試料内部にも動ける電子がわずかに存在するため、表面金属状態の信頼できる電気抵抗のデータを得ることは極めて困難です。そのため、表面ディラック電子の g 因子を測定できる新手法の開発が求められていました。

2. 研究手法と成果

共同研究グループは、電子の磁気モーメントが磁場の方向に揃えられる効果（ゼーマン効果）に着目しました。ゼーマン効果により、電子の持つエネルギーは与える磁場に比例して変化し、その比例定数の符号と大きさは g 因子の符

号と大きさを反映します。一般に、自由に動く電子に磁場を与えると、電子が取り得るエネルギーはとびとびの値に量子化されますが、ディラック電子ではその中の 1 つのエネルギー準位がゼーマン効果の影響を特に強く受けることが理論的に分かっています。したがって、共同研究グループは、この準位のエネルギーが磁場によってどのように変化するかを調べると、 g 因子を高精度に評価できると考えました。

しかし、この手法の理論的検討を行う過程で、現実の試料ではゼーマン効果以外にも準位エネルギーの磁場依存性をもたらす外因的な効果が、2 つ存在することが分かりました。1 つは、試料中の帯電した欠陥が作る「不均一なポテンシャルエネルギーの影響」です。磁場中で運動する電子が描く軌道は磁場と共に小さくなるので、電子が感じる実効的なポテンシャルエネルギーは磁場によって変化し、そのために余計な磁場依存性が現れます。もう 1 つは、「電子速度のエネルギー依存性の影響」です。理想的なディラック電子の速度は一定ですが、現実のトポロジカル絶縁体表面の電子の速度はエネルギーによってわずかに変化し、そのためにゼーマン効果とは異なる準位エネルギーの磁場依存性が現れてしまいます。ただし、これら 2 つの外因的磁場効果の大きさは、ポテンシャルエネルギー分布と電子速度のエネルギー依存性が分かれば、理論的に正確に見積もることが可能です。すなわち、 g 因子の高精度測定を行うためには、磁場中での「電子のエネルギー準位」、「ポテンシャルエネルギー分布」、「電子速度のエネルギー依存性」の 3 種類のデータが必要になります。

これらの全てを同一のセットアップで測定できる手法が、「走査型トンネル顕微鏡法/分光法 (STM/STS)」です。STM/STS を用いると、どこにどのようなエネルギーを持った電子がどのくらい存在するか評価できます。したがって、エネルギー準位の測定とポテンシャルエネルギー分布の評価は容易です。また、電子速度のエネルギー依存性は、磁場中で多数のエネルギー準位が測定できれば解析によって求められることが既に分かっています。

ゼーマン効果は非常に小さいので、測定には高いエネルギー分解能が必要です。そのためには、熱の影響を取り除かなければなりません。また、ポテンシャルエネルギーの分布による磁場効果は場所に強く依存するので、原子レベルで正確に同じ位置で測定を行わねばなりません。本研究では、理研で開発した、磁場の影響をほとんど受けず、極めて高い安定度を持つ顕微鏡を最低 1.5 K (ケルビン: 1.5 K は約 -272°C) まで冷却し、最大 12 T (テスラ: 1 T は地磁気の約 2 万倍) までの強磁場を与えて実験を行いました。試料には、東京工業大学で作製した、「 Bi_2Se_3 」(Bi: ビスマス、Se: セレン) と「 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ 」(Sb: アンチモン、Te: テルル) という 2 つの異なるトポロジカル絶縁体の高品質単結晶を用い、物質による共通点と相違点を探ることにしました。

まず、この 2 つの物質の電子エネルギー準位をさまざまな磁場中で測定しました。この結果を解析したところ、電子速度には物質による違いがほとんどないことが分かりました (図 1)。次に、ゼーマン効果を強く示すエネルギー準位に着目し、試料表面のいくつかの場所でそのエネルギー準位の磁場依存性を高精度測定しました。ポテンシャルエネルギー分布は場所によって大きく異なるので、準位エネルギーの磁場依存性の生データは、場所ごとに異なる振る舞い

を示します (図 2)。しかし、外因的磁場依存性の効果を補正すると、同じ物質であれば、準位エネルギーの磁場依存性は、どの場所でもほとんど同じであることが分かりました (図 2)。この結果は、外因的効果が正しく取り除かれたことを意味し、補正された磁場依存性が正確にゼーマン効果を反映していることを保証するものです。

最終的に求められたディラック電子の g 因子は、 Bi_2Se_3 では「18」、 $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ では「-2」となり、2つの物質で大きさだけでなく、符号まで異なっていることが分かりました。 g 因子、すなわち磁気モーメントが持つ大きな物質依存性は、電子速度が2つの物質でほとんど同じであることと対照的です。

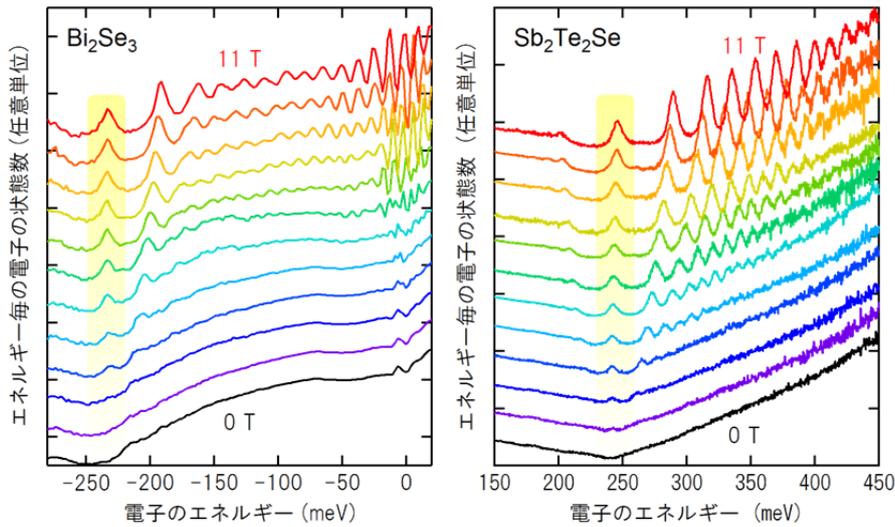


図 1 STM/STS で測定した磁場中のディラック電子のエネルギー準位

1 T (テスラ) おきに磁場を変化させて得られたデータを、縦方向にずらして表示してある。磁場中で現れるピーク構造は、電子がとり得る量子化されたエネルギー準位を示している。 Bi_2Se_3 (左) でも $\text{Sb}_2\text{Te}_2\text{Se}$ (右) でもピークの現れ方はほとんど同じである。このことは、ディラック電子の速度が2つの物質でほとんど同じであることを意味している。黄色の背景で強調したピークは、ゼーマン効果の影響を強く受ける準位であり、この準位のエネルギーの詳細な磁場依存性からディラック電子の磁気モーメントが求められる。

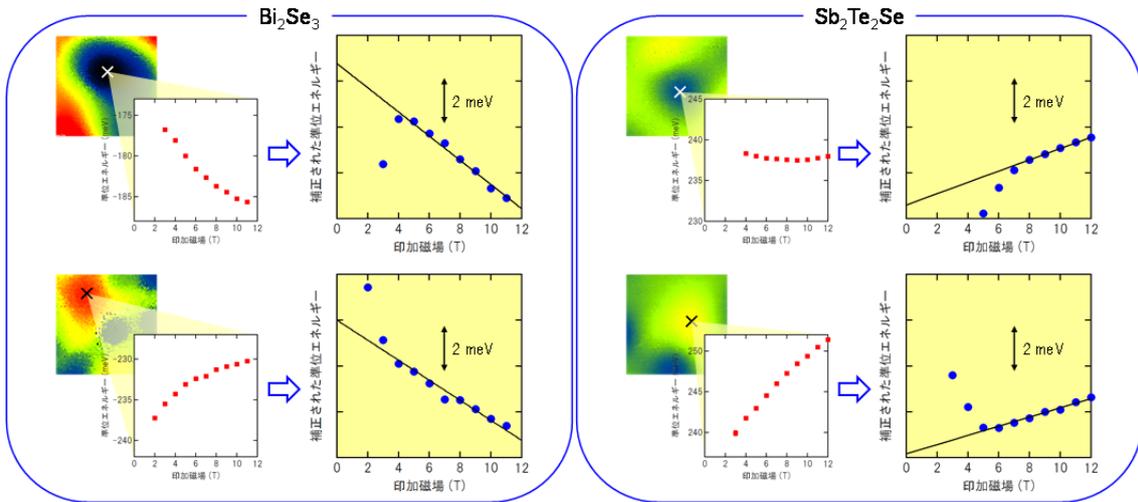


図2 ディラック電子の磁気モーメント測定

カラーマップはSTM/STSで測定したポテンシャルエネルギーの分布を示しており、色が明るいほどディラック電子に対するポテンシャルエネルギーが高いことを表している。Bi₂Se₃（左）とSb₂Te₂Se（右）において、ポテンシャルエネルギー極小の場所（上段）と極大の場所（下段）で、ゼーマン効果の影響を強く受ける準位のエネルギーの磁場依存性を測定した。すると、赤四角の点で示すように全く異なる振舞いが観測された。しかし、測定したポテンシャルエネルギーの分布を基に、外因的磁場依存性の寄与を補正したところ、青丸の点で示すように、同じ物質であれば全く同じ傾きを持つ直線上にデータ点が乗ることが分かった。この直線の傾きから、ディラック電子の磁気モーメントが求められる。低い磁場でデータが直線からずれるのは、電子の軌道が大きくなりすぎて理論モデルの適用範囲を超えてしまうためである。

3. 今後の期待

STM/STSを用いた新しい手法を用いて、トポロジカル絶縁体表面のディラック電子の持つ磁気モーメントの値を初めて正確に評価しました。実験に用いた2種類の物質（Bi₂Se₃とSb₂Te₂Se）で、電子速度はほとんど同じでありながら、磁気モーメントの値は大きく異なっていました。この結果は、ディラック電子の磁氣的性質だけを選択的に変化させることができることを示しており、磁性を介したディラック電子の制御に役立ちます。

今回、磁気モーメントの物質依存性が初めて明らかになりましたが、その起源はまだはっきりと分かっておらず、基礎物理学上の問題として残っています。今後の研究によってこの問題が解かれれば、トポロジカル絶縁体の全く新しい利用法につながるかもしれません。

4. 論文情報

<タイトル>

Observation of Zeeman effect in topological surface state with distinct material dependence

<著者名>

Ying-Shuang Fu, Tetsuo Hanaguri, Kyushiro Igarashi, Minoru Kawamura, Mohammad

Saeed Bahramy, and Takao Sasagawa

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/ncomms10829

5. 補足説明

[1] トポロジカル絶縁体

物質の内部は電流を流さない絶縁体でありながら、表面には質量のない電子によって形成される金属状態が現れる特異な物質。表面金属状態は、磁性を持たない不純物に対して安定である。また、電子の磁気モーメントの方向と電子の運動方向に強い相関があり、磁氣的性質の電氣的制御など、ユニークな応用が期待されている。

[2] ディラック電子

相対論的量子力学の基本方程式であるディラック方程式に従って運動する電子のこと。通常の質量を持つ電子の運動は、より簡便なシュレーディンガー方程式で近似的に記述できる。しかし、固体中の電子の質量は実効的に真空中の値から変更を受け、物質ごとにさまざまな値を持つ。特に、トポロジカル絶縁体表面の電子の場合は質量がないため、近似が成り立たずディラック方程式で記述しなければならない。固体物質では、トポロジカル絶縁体の表面状態のほかにも、グラフェン（炭素原子が六角形の格子状に並んだ、1原子の厚さの層）や有機導体（電気を比較的良く通す有機化合物）などでディラック電子の存在が確認されている。

[3] スピントロニクス

現在広く利用されているエレクトロニクスでは、電子の持つ電荷の自由度を制御することで情報処理等のさまざまな機能を実現している。一方、電子の持つ他の自由度である「スピン」の制御によって機能実現を目指す技術をスピントロニクスと呼ぶ。スピンは量子力学的な概念であるが、古典力学の「自転」に相当し、電子の持つ磁気モーメントと直接関係している。

[4] 走査型トンネル顕微鏡法/分光法（STM/STS）

先端を尖がらせた金属の針（探針）で物質の表面をなぞるように走査し、探針の高さをマッピングすることで、物質表面の凹凸を原子スケールで観察することができる顕微鏡。探針位置を固定し、電流-電圧特性を測定すると、その位置において、どのようなエネルギーを持った電子がどのくらい存在するかを知ることができる。

[5] g 因子

粒子の磁気モーメントは、その粒子が持つ角運動量に比例するが、両者の比を表す定数が g 因子である。真空中の電子の g 因子は約 2 の決まった値を持つが、物質中の電子の g 因子は、電子がおかれた環境の磁氣的性質によってさまざまな値をとる。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい
理化学研究所 創発物性科学研究センター

創発物性計測研究チーム

国際特別研究員（研究当時） 付 英双（フ・インシュアン）
（中国・華中科技大学教授）

チームリーダー 花栗 哲郎（はなぐり てつお）

強相関量子伝導研究チーム

専任研究員 川村 稔（かわむら みのる）

創発計算物理研究ユニット

ユニットリーダー モハマド サイド バハラミー（Mohammad Saeed Bahramy）

TEL：048-467-1327（花栗）、048-462-1111（内線 6114（川村））

E-mail：hanaguri@riken.jp（花栗）、minoru@riken.jp（川村）

東京工業大学 応用セラミックス研究所

准教授 笹川 崇男（ささがわ たかお）

TEL：045-924-5366

E-mail：sasagawa.t.aa@m.titech.ac.jp

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL：048-467-9272 FAX：048-462-4715

E-mail：ex-press@riken.jp

東京工業大学 広報センター

TEL：03-5734-2975 FAX：03-5734-3661

E-mail：media@jim.titech.ac.jp