



【本件リリース先】
文部科学記者会、科学記者会、
広島大学関係報道機関

令和2年7月9日

相変化材料ゲルマニウム・アンチモン・テルル (GeSb_2Te_4) 化合物中に
質量ゼロの電子 (ディラック電子) を世界で初めて発見
～グラフェンに代わる次世代デバイス材料として期待～

【本研究成果のポイント】

- 温度により結晶と非晶質を自在に変えることができる「相変化材料」のひとつとして知られるゲルマニウム・アンチモン・テルル (GeSb_2Te_4) 化合物の中に、質量ゼロの電子 (ディラック電子) を発見しました。この電子は結晶相の電気伝導を担い、さらにスピン分極した表面バンドを併せ持っていることを世界で初めて明らかにしました。
- 本研究成果により、 GeSb_2Te_4 化合物は世界中で注目されているグラフェンに代わる新材料として、また、次世代トポロジカル材料として超高速電子デバイスへの応用だけでなく、未踏の量子現象を観測する舞台としての利用が大いに期待されます。

【概要】

広島大学大学院先進理工系科学研究科のヌルママト・ムニサ助教、木村昭夫教授の研究グループと、広島大学放射光科学研究センターの宮本幸治准教授、奥田太一教授、島田賢也教授の研究グループは、東京大学物性研究所、スペイン・ロシア・アゼルバイジャンの研究グループとの国際共同研究として、広島大学放射光科学研究センターにて高輝度シンクロトロン放射光 (*1) やレーザー光を利用した角度分解光電子分光 (ARPES) 法 (*2) を用いて相変化材料 (*3) として知られる GeSb_2Te_4 化合物の詳細なバンド構造を観測したところ、ディラック電子 (*4) が電気伝導を担っていることを世界で初めて明らかにしました。さらに東京大学物性研究所の時間・角度分解光電子分光を用いて、同化合物の電子状態がトポロジカル絶縁体 (*5) と同様のものであることを初めて明らかにしました。本研究成果により、相変化材料 GeSb_2Te_4 がグラフェン (*4) に代わる新しい材料として超高速次世代デバイスへ等の応用が期待されるだけでなく、全く新しい量子現象を観測する舞台になることも期待されます。

本研究の成果は、米国の科学雑誌「ACS Nano」に2020年7月7日 (日本時間) に掲載されました。

【論文情報】

論文タイトル: Topologically Nontrivial Phase-Change Compound GeSb_2Te_4

著者名: ヌルママト ムニサ^{1,2*}, 岡本和晃², S. Zhu², T. V. Menshchikova^{3,4}, I. P. Rusinov^{3,4}, 宮本幸治⁵, 奥田太一⁵, 宮下剛夫², X. Wang², 石田行章⁶, 角田一樹², E. F. Schwier⁵, M. Ye², Z. S. Aliev⁸, M. B. Babanly⁷, I. R. Amiraslanov⁷, E. V. Chulkov⁴, K. A. Kokh⁸, O. E. Tereshchenko⁸, 島田賢也⁵, 辛埴⁵, 木村昭夫^{1,2*}

所 属：¹ 広島大学大学院先進理工系科学研究科、² 広島大学大学院理学研究科、³ トムスク国立大学、⁴ バスク国立大学、⁵ 広島大学放射光科学研究センター、⁶ 東京大学物性研究所、⁷ バクー国立大学、⁸ ノヴォシビルスク国立大学

DOI : <https://dx.doi.org/10.1021/acsnano.0c04145>

【背景】

相変化材料は、同じ固体中で結晶相とアモルファス相（* 3）の間で瞬時に電気抵抗率を数桁変化させることが可能な材料です。近年、相変化材料はコンピュータなどに使われる不揮発性メモリ（電源を切っても記憶が保持されるメモリ）などへの応用の観点から大きな注目を集めています。2010 年以降、 GeSb_2Te_4 や $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ などの化合物が、トポロジカル絶縁体と同様の特殊な電子構造を持つという理論予測がなされ、相変化材料の新たな側面にも注目が集まってきました。一方、このような数桁もの電気抵抗率の変化のメカニズムや、トポロジカルな側面の実験的検証については全く手付かずの状況でした。これらを明らかにするためには、フェルミレベル（固体中で電子が占有された最大のエネルギー）付近の詳細な電子構造への実験的なアプローチが必要となります。

【研究成果の内容】

本研究チームは、相変化材料の一つである GeSb_2Te_4 の結晶相（図1左）について、広島大学の放射光科学研究センターのシンクロトロン放射光やレーザー光を用いた角度分解光電子分光の高精度な実験を行なったところ、グラフェンによく似た直線的なエネルギーバンドを捉えました（図1中央）。この実験結果から、質量ゼロのディラック型のエネルギーバンド（通称ディラックコーン）（図1右）が GeSb_2Te_4 の結晶相の電気伝導を担っていることが世界で初めて明らかになりました。さらに東京大学物性研究所の時間・角度分解光電子分光を用いて実験を行った結果、同化合物がトポロジカル絶縁体と同様の特殊な電子状態を持つことが初めて明らかとなりました。

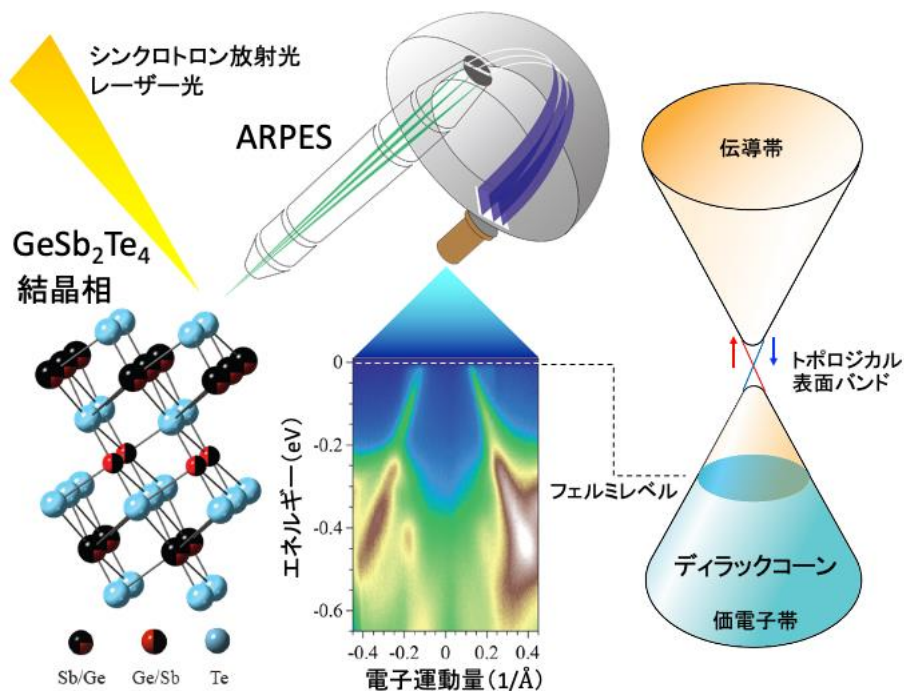


図1. (左) 相変化材料 GeSb_2Te_4 の結晶相の構造。(中央) 角度分解光電子分光 (ARPES) による実験結果。直線的なエネルギーバンドがフェルミレベルを横切っている様子がわかります。(右) 本研究成果から得られた GeSb_2Te_4 の結晶相のバンド構造の全体図 (模式図)。結晶内部 (バルク) の電子はグラフェンと同様にディラックコーンを形成しフェルミレベルを横切っています。また小さなエネルギーギャップの中に、トポロジカル絶縁体と同様のスピン分極したトポロジカル表面バンドが存在しています。

【今後の展開】

ポスト・グラフェン材料としての期待 - 世界中で注目されているグラフェン（*4）にも、応用上大きな弱点が存在します。それはグラフェンには、通常の半導体のようなバンドギャップが存在しないため、電子の伝導性を外部から制御して信号のオン・オフ比を大きくすることが難しいことで、このことが電子・光学デバイスへの応用に大きな課題になっていました。相変化材料は外部制御により大きなオン・オフ比が実現できるため、GeSb₂Te₄はグラフェンの弱点を克服できるポスト・グラフェン材料として超高速電子デバイス等への応用が期待されます。

新しい量子現象観測、スピントロニクス応用への期待 - 本研究から、GeSb₂Te₄の結晶相がトポロジカル絶縁体と同様の電子構造を持つことが明らかになりました。このことからまず、トポロジカル絶縁体を利用した未解明の全く新しい量子現象を観測する舞台となることが期待されます。またトポロジカル絶縁体の最大の特徴は「スピン流」です。キャリア制御をうまく行うことで、このスピン流を利用した次世代のスピントロニクスデバイスとしての利用も大いに期待されます。

【用語解説】

***1. シンクロトロン放射光**

光の速度（地球を一秒間に7週半する速さ）までに電子を加速し、磁場でその進行方向を曲げると、同時に進行方向に強力な光が放出されます。これがシンクロトロン放射光です。宇宙では星雲の中に放射光を見つけられますが、地上では専用の加速器が必要です。シンクロトロン放射光は、人類が手に入れた最も強力な光で「夢の光」とも呼ばれます。本実験は広島大学放射光科学研究センターで行われました。当施設は国立大学法人としては唯一の放射光施設で、数多くの国内外ユーザーが利用する、共同利用・共同研究拠点です。

***2. 角度分解光電子分光（ARPES）**

物質に光を照射すると、光電効果と呼ばれる現象によって、電子が固体表面から放出されます。この放出された光電子のエネルギーと放出角度を測定し、エネルギー保存則と運動量保存則を利用して固体内部の電子のエネルギーと運動量の間を示すエネルギーバンドを決定する手法を角度分解光電子分光と言います。光源としてシンクロトロン放射光（*1）やレーザー光などが用いられます。英語では Angle Resolved Photoelectron Spectroscopy を略して通称 ARPES と呼ばれます。

***3. 相変化材料、アモルファス**

固体は、食塩のように原子が規則的に配列した「結晶」と、窓ガラスのように原子が不規則になっている「アモルファス（非晶質）」に大きく分けられます。相変化材料は、このような結晶相とアモルファス相を加熱温度によって自在に変えることのできる材料です。これまでゲルマニウム（Ge）、アンチモン（Sb）、テルル（Te）で構成される相変化材料が結晶相とアモルファス相の間で光の反射率が大きく変化することから光記録デバイスに応用されてきました。またアモルファス相は電気抵抗率が大きく半導体的になるのに対し、結晶相で電気抵抗率がアモルファス相の1万分の1以下に低下するという特徴があります（図2参照）。この特徴を活かして、相変化メモリと呼ばれる不揮発性の記憶素子への応用も考えられています。

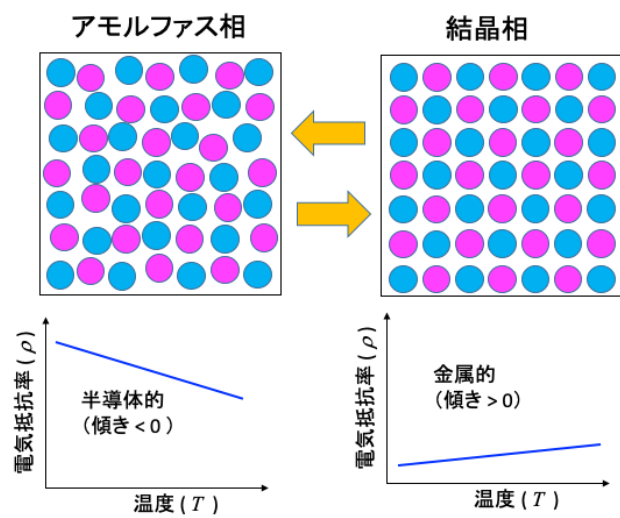


図2. 相変化材料のアモルファス相（左）と結晶相（右）の模式図。アモルファス相では電気抵抗率が大きく、半導体的であるのに対し、結晶相では電気抵抗率が数桁低く金属的に振る舞う。

***4. ディラック電子とグラフェン**

結晶中の電子は周期ポテンシャルを感じながら運動することにより幅のあるエネルギーバンドを形成します。一般に電子の運動エネルギーEは、運動量pを用いて $E = p^2 / 2m^*$ (m^* は有効質量)とあらわすことができ、縦軸にE、横軸にpをとるエネルギーバンドが放物線型になります。一方、炭素原子一層だ

けからなるグラフェンの場合、2つのエネルギーバンドが1点で交差し、その交差点の近くではエネルギーEがpに比例し、線形のエネルギーバンドを持ちます。これは質量のない光子（粒子としての光）と同じ関数のかたちをとることから、グラフェンにも質量ゼロの電子が存在するということになります。このような線形のエネルギーバンドは、物理学者ポール・ディラックが提唱した相対性理論に基づいた方程式で説明できるため、ディラック電子と呼ばれます。

グラフェンは、曲げやすく壊れにくいという機械的な性質だけでなく、みかけの質量がゼロであるディラック電子を有する点で基礎・応用の観点から注目され世界中で研究が展開されてきました。結晶中には、少なからず欠陥や不純物が存在し、一般には伝導電子がそれらにぶつかることで電気抵抗が生じます。ところが、グラフェン中のディラック電子は不純物や欠陥をものともせず「動き続ける」性質があります。その結果、グラフェンは室温付近であっても高い電子移動度（ある一定の電場でどれだけ電子が大きな加速度を得ることができるかを表す「電子の移動のしやすさ」）を示し、次世代デバイスの最有力候補として注目を浴びていました。

*5. トポロジカル絶縁体

透明なガラスは電気を通さずアルミホイルは電気を通すように、日常生活の中で「電気を通すかどうか」という感覚は物質の色を見るだけである程度判断できてしまいます。また、その自然に身に付いた感覚は、物理的な理由づけも可能であり、透明なガラスは「絶縁体」、アルミホイルは「金属」というように物質中の電子の状態で区別されます。

一方、「トポロジカル絶縁体」に属する物質は特殊で、「絶縁体」でありながら、その表面で金属と同じように電気を流す性質を持つ特殊な物質です。トポロジカル絶縁体の表面にはスピン分極した表面バンド（トポロジカル表面バンド）が存在し、電流を担う電子はスピン（電子の自転）をそろえて運動し、「光」と同じように質量を持たないのが最大の特徴です。また通常物質とは異なり、トポロジカル絶縁体の表面を動き回る電子は、普通とは違い、欠陥や不純物によって邪魔されることなく（エネルギーを損失することなく）伝導ができるということも魅力的な性質を持っています。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金基盤研究A「非共型な結晶対称性を持つ強相関物質の電子状態観測とトポロジーの解明（課題番号：18H03683、研究代表者：木村昭夫）」、同基盤研究S「トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ（課題番号：17H06138、研究代表者：初貝安弘）」などの支援を受けて行われました。

【お問い合わせ先】

【研究に関すること】

広島大学大学院先進理工系科学研究科物理学プログラム 教授 木村 昭夫

Tel : 090-6346-5384

E-mail : akiok@hiroshima-u.ac.jp

【報道に関すること】

広島大学財務・総務室広報部 広報グループ

TEL: 082-424-3749 FAX: 082-424-6040

E-mail : koho@office.hiroshima-u.ac.jp

発信枚数：A4版 4枚（本票含む）