

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1

## 物質内の電子を「光速」近くまで加速し、 質量を 2 倍以上に大きくすることに成功

～ディラック電子の特殊相対論的な振る舞いを利用し、

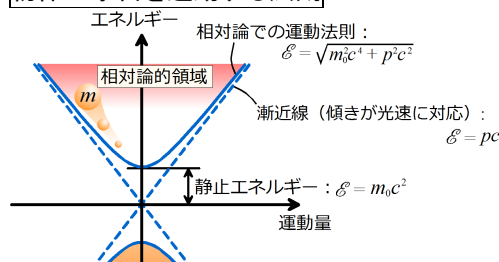
テラヘルツ波により物質中の電子を「光速」近くまで加速～

横浜国立大学大学院工学研究院の武田淳教授・片山郁文准教授・南康夫助教、物質・材料研究機構 MANA-ナノシステム分野の長尾忠昭グループリーダーらの研究チームは、物質内の電子<sup>[注 1]</sup>をテラヘルツ波<sup>[注 2]</sup>によって「光速」近くまで加速させ、その質量を 2 倍以上に大きくすることに成功しました。

通常、荷電粒子は、大型加速器を用いない限り相対論的速度（光速に近い速度）まで加速させることができません。本研究では、高い強度のテラヘルツ波をビスマス<sup>[注 3]</sup>に照射し、内部の電子を大きく揺さぶりました。そして、ビスマス内の電子（ディラック電子）の運動が特殊相対論<sup>[注 4]</sup>によって記述されることを利用し、テラヘルツ波により、サブピコ秒<sup>[注 5]</sup>毎に電子の速さ、位置、質量などを調べました。その結果、ビスマス内の電子は特殊相対論で言うところの「光速」<sup>[注 6]</sup>の 89%まで瞬間的に加速され、質量は 2.4 倍に増加することがわかりました。ビスマスの場合、この「光速」は真空中の光速の 1000 分の 1 程度であり、電子の加速に大掛かりな加速器を必要としない点が特徴です。また、今回の研究により、電子がビスマス内を運動する法則と物体が宇宙を運動する法則とが似ていることを突き止め、より直感的に電子の運動をとらえることができるようになりました。

本研究成果は 2015 年 11 月 2 日（英国時間）発行のネイチャー・パブリッシング・グループの学術誌「Scientific Reports」に掲載されました。[http:// www.nature.com/articles/srep15870](http://www.nature.com/articles/srep15870) にアクセスすればどなたでも閲覧可能ですので、是非本文もご覧ください。なお、本研究は科学研究費補助金（課題番号 20671002, 23104713, 23241034, 23760045, 25104712, 25800177）の支援のもとに行われました。

物体が宇宙を運動する法則



電子がビスマス内を運動する法則



### <掲載論文>

【題名】 Terahertz-induced acceleration of massive Dirac electrons in semimetal bismuth  
(半金属ビスマス内の質量をもつディラック電子の高強度テラヘルツ波による加速)

【著者名】 Yasuo Minami, Kotaro Araki, Thang Duy Dao, Tadaaki Nagao, Masahiro Kitajima, Jun Takeda, and Ikufumi Katayama  
(南康夫、荒木光太郎、タン・D・ダオ、長尾忠昭、北島正弘、武田淳、片山郁文)

【掲載誌】 Scientific Reports

本件に関するお問い合わせ先

横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 武田淳

Tel/Fax: 045-339-3953

E-mail: jun@ynu.ac.jp

<http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/>

# 物質内の電子を「光速」近くまで加速し、 質量を2倍以上に大きくすることに成功

～ディラック電子の特殊相対論的な振る舞いを利用し、  
テラヘルツ波により物質中の電子を「光速」近くまで加速～

## <研究背景>

近年、時間幅 100 フェムト秒(1 フェムト秒=1000 兆分の 1 秒)を切る超短パルスレーザー光源を比較的容易に入手できるようになり、サブピコ秒オーダー(1 ピコ秒=1 兆分の 1 秒)の超高速分光技術が大きく発展しました。電子の応答を観測・制御するというのが超高速分光技術の主な目的のひとつであり、光エレクトロニクス分野、量子エレクトロニクス分野における重要なキーテクノロジーとなっています。電子制御技術はセンサー、メモリー、スイッチなどに活用されるため、現在もなお盛んに研究・開発がなされています。特に、情報通信や大規模計算分野においては超高速化の要求が高まっており、それらを支える小型デバイスの開発や新素材の探索が行われ、ナノ構造体やメタマテリアルなどを対象とした研究が進められています。

超短パルスレーザー光源はこれらのような電子制御技術の発展を促すばかりではなく、本研究で用いたテラヘルツ波の発生と検出においても重要な役割を果たしています。最近では、超短パルスレーザーを用いた高強度テラヘルツ波の発生方法が確立されたことで、テラヘルツ波照射による物質の状態変化に関する研究——原子の振動を大振幅で駆動する研究や、半導体中の電子を増殖させる研究など——が多数報告されています。しかし、これまでに実現されてきたテラヘルツ波誘起の状態変化は非常に小さいものが大半でした。

武田教授らの研究グループは、有効質量が真空中の自由電子の 0.001～0.05 倍程度である半金属ビスマスの伝導電子に注目して研究を行ってきました。伝導電子の質量が非常に軽いという特徴は、超高速スイッチング素子を実現するための鍵であり、高強度テラヘルツ波の照射により大きな性質の変化が期待できます。

## <研究内容と成果>

最近、武田教授らの研究グループはビスマス(図 1)を対象とした研究において、遠赤外領域の透過率がテラヘルツ波の照射強度により大きく異なることを発見しました(図 2)。そして、ビスマス中の電子の質量が照射するテラヘルツ波の強度により変化

することがその原因であることを明らかにしました。

解析には、ビスマスのもつ特殊なバンド構造の束縛条件を課した運動方程式を用いました。ビスマス内の伝導電子の運動は、特殊相対論で記述される宇宙を運動する物体の運動と類似しており、エネルギーと運動量の関係は双曲線で表されます(図 3)。この類似性を利用することで、テラヘルツ波の照射によって伝導電子がビスマス内をどのように運動するのか直感的に理解できるようになりました。サブピコ秒の周期で振動するテラヘルツ波を利用することで、電子のエネルギーと運動量を時々刻々と追うことが可能となり、ビスマス内の伝導電子は最大で「光速」の 89%まで加速されていることがわかりました。ここで言う光速とは、電子がそれ以上速く運動できないという意味での「光速」を指し、ビスマス内では真空中の光速の 1000 分の 1 程度の値です。特殊相対論に登場する  $\beta$  (物体の速さを光速で除したもの) をビスマス内の電子の運動法則に対応させて定義すると、 $\beta = 0.89$  (「光速」の 89%) となったことを意味しています(図 4)。また、ビスマス内の電子の有効質量は、テラヘルツ波を照射しない場合、つまり、電子が静止している場合の質量(静止質量)に比べて、最大で 2.4 倍にまで増加していることがわかりました(図 5)。

また、この解析法を利用することの利点のひとつとして、実空間での電子の運動を記述できることが挙げられます。これによりますと、高強度テラヘルツ波の照射により、ビスマスの面内方向に 100 ナノメートル(1 ナノメートル=100 億分の 1 メートル)のオーダーで電子が移動していることがわかりました。また、テラヘルツ波が完全にビスマスを透過した後も電子はすぐには元の位置に戻らないことがわかりました(図 6)。実空間での運動はこれまでの解析方法(ドルーデ解析)からはわからなかったことです。今回の研究で用いた解析法では、電子が集団で同じ運動をするなどという大胆な近似をしており、電子同士に働く反発力などは考慮していません。しかし、厳密な計算によっても、今回の研究で得られた結果と凡そ近いものになるものと考えられます。

## <今後の展開>

電子の運動を制御するために、いわゆる直流電源を用いる場合には、サブピコ秒という短時間の電圧を電氣的に印加することは現在の技術では不可能です。また、従来の直流電源を用いて長時間電圧を印加した場合はジュール熱が発生し、試料が変質することが予想されます。今回の研究では、テラヘルツ波のサブピコ秒オーダーの非常に短い時間のみ電圧を印加するため、その発熱の問題を回避できる点も超高速信号処理デバイスとして利用する際には利点となります。応用にあたり、今回の研究が

室温で行われた点も特筆に値します。超高速スイッチング素子としての実用化を目指し、今後はこの電子の特異な応答をマクロな電流として捉えることを目標に研究を進めます。

<添付資料>

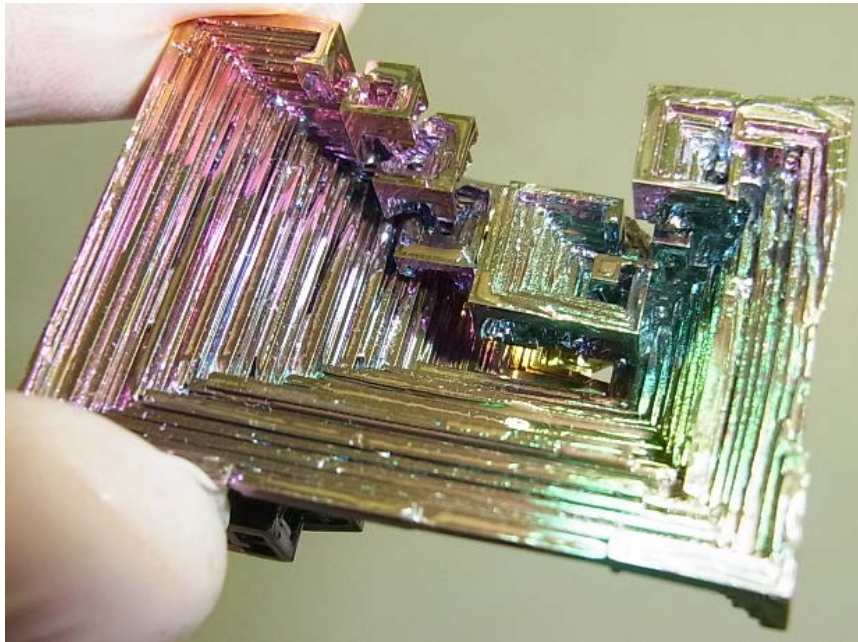


図1 ビスマスの結晶。

### テラヘルツ波照射

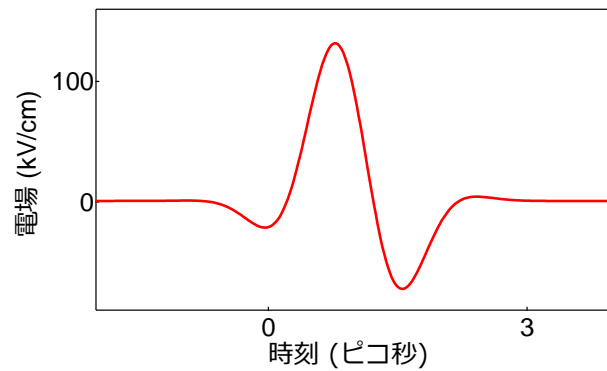
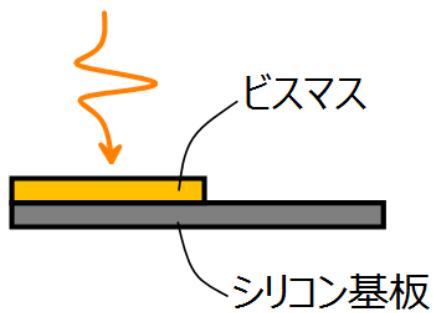
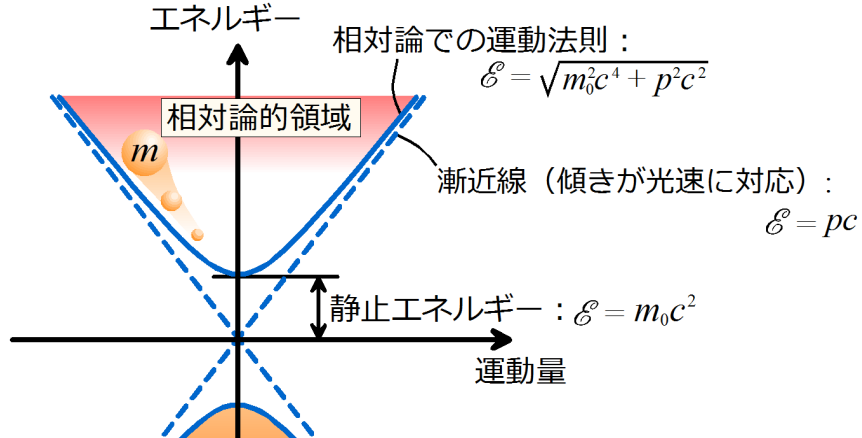


図2 (左)シリコン基板上に作製したビスマスの製膜部へテラヘルツ波を照射し、透過率を測定するときの模式図。(右)テラヘルツ波がどのようなものか、電場と時間の関係を描いたもの。最大電場が 130 kV/cm 程度であり、いわゆる高強度テラヘルツ波である。

物体が宇宙を運動する法則



電子がビスマス内を運動する法則

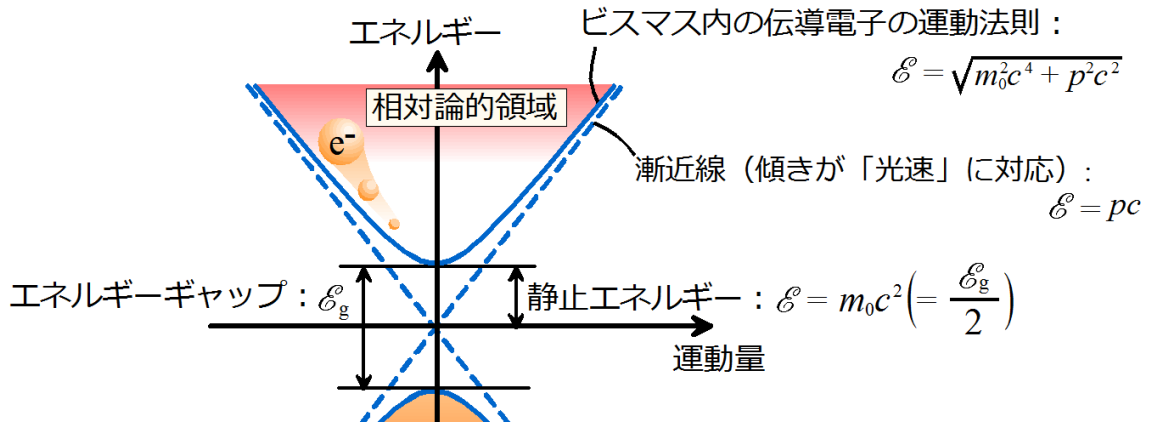


図 3 (上) 物体が宇宙を運動する法則をエネルギーと運動量で表したものと、(下) 電子がビスマス内を運動する法則をエネルギーと運動量で表したもの。縦軸はエネルギー、横軸は運動量である。

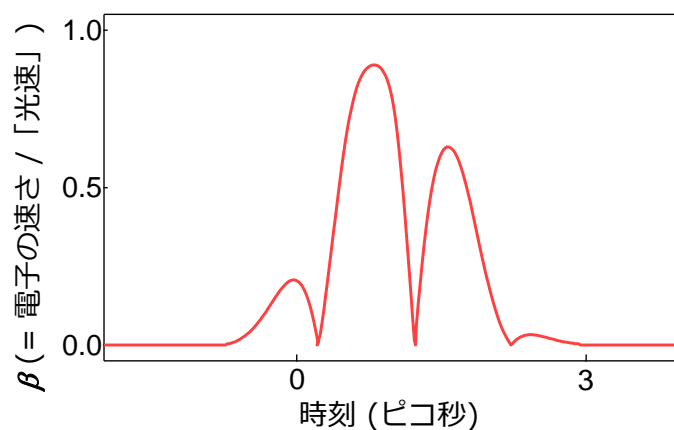


図 4 図 2(右)に示したテラヘルツ波の照射により相対論の  $\beta$  がどう変化するか、時々刻々と追ったもの。

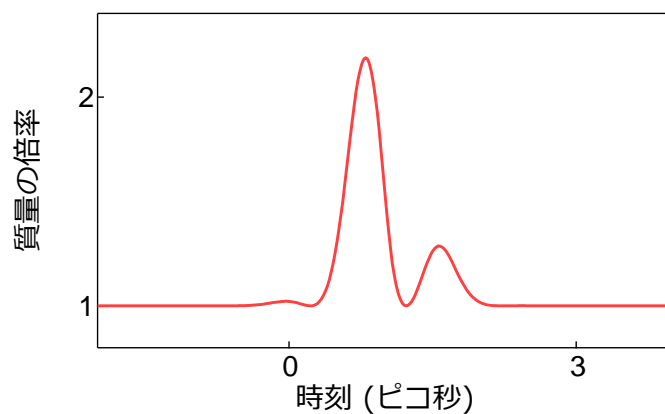


図 5 図 2(右)に示したテラヘルツ波の照射によりビスマス内の電子の質量がどのように増大するか、時々刻々と追ったもの。

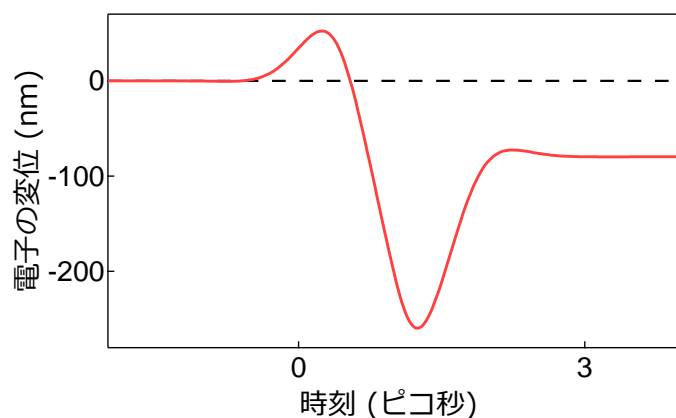


図 6 図 2(右)に示したテラヘルツ波の照射によりビスマス内の電子が実空間でどのように変位するか、時々刻々と追ったもの。テラヘルツ波が透過した後(3 ピコ秒以降)、通常、電子は元の位置に戻るが、高強度テラヘルツ波を照射した場合には変位したままである点が特徴的である。

## <用語解説>

### [注 1] 物質内の電子

例えば、水素原子は原子核と電子 1 個で構成されている。量子力学などの現代物理学では 1 個の電子は原子核の周りを雲のように取り囲んでいるものとして扱う。物性物理学においても厳密にはそのように扱う必要がある。今回はより簡潔に扱うために、古典的な電子の描像、つまり、1 個の質点として扱う手法を用いた。この扱いにより、運動量と位置が同時に決定されることになる。

より深い理解のために参考となる専門書:

C. キッテル「キッテル固体物理学入門」(丸善)、アシュクロフト・マーミン「固体物理の基礎、上・I～下・II」(吉岡書店) など。

### [注 2] テラヘルツ波

よく知られている電波や光は電磁波であり、波長によって呼び方が異なる。テラヘルツ波も電磁波であり、10 ミクロンから 1 ミリ程度の波長のものを指す。テラヘルツ波は電波と光のちょうど間の波長の電磁波のことであり、水に吸収され、金属に反射されるという性質をもつことが知られている。しかし、つい最近まで積極的に発生、計測するのが困難であったことから、この波長域の研究はあまり進んでいなかった。テラヘルツ波の積極的利用が可能となった現在、物質の振動などとの相互作用を利用して、バイオ計測、分子計測、物性計測などといった工業～研究領域の広い領域で利用されている。

より深い理解のために参考となる専門書:

テラヘルツテクノロジーフォーラム「テラヘルツ技術便覧」(NGT)、斗内政吉「テラヘルツ技術」(オーム社)、西沢潤一「テラヘルツ波の基礎と応用」(工業調査会) など。

### [注 3] ビスマス

原子番号 83。元素記号 Bi。室温では半金属に分類される。スピン軌道相互作用などにより特徴的なバンド構造をもつ。今回の研究ではこの特徴的なバンド構造——ビスマス内の電子の運動法則を決定するエネルギーと運動量の関係——が特殊相対論で記述される物体の運動法則とよく似ていることを利用して解析を行った。また、最近、ビスマスをベースとした化合物において興味深い性質が次々と発見されており、非常に盛んに研究されている。世界中でデバイス応用を見据えた研究も行われており、社会基盤に大きな影響を及ぼす可能性を秘めた物質のひとつである。

より深い理解のために参考となる専門書:

日本金属学会「半導体と半金属 基礎と応用」(アグネ技術センター) など。



#### [注 4] 特殊相対論

よく知られた静止した物体の質量そのものがエネルギーをもつという式(静止エネルギー)  $E = mc^2$  が登場する理論体系のことである。この静止エネルギーと運動エネルギーを合わせた物質のもつ全エネルギーは  $E = (m^2c^4 + p^2c^2)^{0.5}$  で表され、双曲線を描く。物体の運動する速さが光速に比べて十分に小さいとき( $v/c \ll 1$  のとき)、この全エネルギーは  $E = mc^2 + mv^2/2$  と、馴染みの深い静止エネルギーと運動エネルギーの和で表される。

より深い理解のために参考となる専門書:

藤井保憲「時空と重力」(産業図書)、高原文郎「特殊相対論」(培風館) など。

#### [注 5] ピコ秒

時間の単位。1ピコ秒とは  $10^{-12}$  秒、つまり、1兆分の1秒のことである。

より深い理解のために参考となる専門書:

国立天文台「理科年表 平成27年」(丸善)、鈴木博之、光永正治「超高分解能分光法とその応用」(電子情報通信学会)、小林孝嘉(訳)「超短光パルスレーザー」(共立出版) など。

#### [注 6] 相対論で言うところの「光速」

ここでの「光速」は、電子が物質内でそれ以上速くは運動できないという意味で用いており、実際の光速とは異なる。

より深い理解のために参考となる専門書:

御子柴宣夫「半導体の物理」(培風館)、浜口智尋「半導体物理」(朝倉書店)、小長井誠「半導体物性」(培風館) など。