

報道機関 各位

平成 29 年 5 月 19 日
国立大学法人 電気通信大学

100%バレー分極状態を初めて実現 —バレートロンクスへの新たなアプローチ—

研究成果のポイント

- ❖ 量子効果が顕著になる強磁場領域で、予測に反する電気伝導度の急激な上昇を観測
- ❖ 100%バレー^{*1}分極が達成されたことを理論解析により証明
- ❖ バレー自由度を制御する「バレートロンクス」に向けた、新たなアプローチを見出した

概要

電気通信大学情報理工学域 III類(理工系) 物理工学プログラムの伏屋雄紀准教授およびパリ高等物理化学学校の Kamran Behnia 教授らの国際共同研究グループ^{*}は、強磁場(約 50テスラ)において、ビスマスの電気伝導度が従来予測を裏切り、急激に上昇することを発見しました。詳細な理論解析を行うことで、この上昇の起源は完全バレー分極にあることを突き止め、磁場を用いて初めて 100%バレー分極状態に達成したことを証明しました。

電子は電荷の自由度(プラス、マイナス)を持ちます。これを制御・利用するための研究および技術がエレクトロニクスです。磁性の起源である電子のスピン角運動量の自由度を利用することもでき、それはすでに実用化が進んでいます(スピントロニクス)。本研究が着目したバレー(谷)とは、電子の運動量に起因した自由度で、それを制御・利用する「バレートロンクス」の応用に向けた期待が近年急速に高まっています。電荷やスピンは電子1個の性質であるのに対し、一つのバレーは電子の集団(10^{17} 個程度)により形成されます。したがって、電子集団を丸ごと制御しなくては、バレーを制御したことにはなりません。これまで、バレーを形成する電子の数を磁場で変える(バレー分極)ことは可能でしたが、バレーの電子集団を丸ごと生成・消滅することはできませんでした。

このたび、伏屋准教授らの国際共同研究グループは、3つの電子バレーを持つビスマスの特殊な電子状態に着目し、加える磁場の強度や方向を調整することで、バレーを形成する電子集団を完全に消す(100%バレー分極)ことに初めて成功しました。しかも、バレーを1つだけ消すか、2つ同時に消すかを、磁場方向で簡単に制御できることも見出しました。

本研究結果は、ビスマスでの象徴的な事例に留まらず、シリコン(バレーは6つ)やゲルマニウム(バレーは8つ)など、よく知られる半導体におけるバレー制御の研究に対しても新たな方向性をもたらすものです。本研究成果は、英国科学雑誌「Nature Communications」に 2017 年 5 月 19 日に掲載されます。

※国際共同研究グループ

華中科技大学
パリ高等物理化学学校 (ESPCI ParisTech)
ロスアラモス国立研究所
電気通信大学大学院情報理工学研究科

教授 Zengwei Zhu 研究員 Jinhua Wang, Huakun Zuo
教授 Kamran Behnia, 研究員 Benoît Faugué
研究員 Ross D. McDonald
准教授 伏屋雄紀



国立大学法人
電気通信大学
Unique & Exciting Campus

電気通信大学は 2018 年に創立 100 周年を迎えます。

研究の背景

【バレートロニクスからみて】電子が持つ電荷の自由度を利用するのがエレクトロニクス、スピン角運動量の自由度を利用するのがスピントロニクスです。エレクトロニクスはもはや現代の私たちの文明になくてはならない技術ですし、スピントロニクスもすでに私たちの生活の一部を担っています。(例えば巨大磁気抵抗(GMR)効果はハードディスクで広く利用されています。)一方、次世代のエレクトロニクスを目指して、電子が持つ別の自由度を制御して利用するための研究も急ピッチで進められています。その次世代エレクトロニクスとして期待されているのが、バレーの自由度を利用する、バレートロニクスです。

電荷やスピンは電子1個が持つ性質であるのに対し、バレーは電子が多数集まって初めて現れる性質です。(典型的なもので、およそ $10^{13} \sim 10^{18}$ 個)したがって、バレーの自由度を制御するためには、これまでの電荷やスピンを制御することと随分異なるアプローチが求められます。現在、その新しいアプローチが熱心に模索されると同時に、その原理についての基礎研究も求められています。

【巨大磁気抵抗からみて】今回の研究は、バレートロニクスとは別に、磁気抵抗に関する新現象の発見、という側面も持ちます。強磁性体を用いた巨大磁気抵抗は前述の通り応用化も進み、その現象を発見したフェールとグリュンバルクには、ノーベル物理学賞(2007年)が送られました。一方、磁性を持たない物質(非磁性体)の中にも巨大磁気抵抗を示すものがあります。その代表格はビスマスで、10テスラ程度の磁場を加えると、電気抵抗は100,000,000%も増大します。その効果はカピッツァ(ノーベル物理学賞, 1978年)によって1928年に発見されていました。しかし、磁場に比例して増大するビスマスの磁気抵抗(線形磁気抵抗)の起源は、発見から90年が過ぎようとする現在においても完全には解明されておらず、固体物理学における最古級の謎として知られています。近年、ディラック電子系やワイル金属と呼ばれる新しい研究対象においても、線形磁気抵抗現象が次々に発見され、再び多くの研究者がその謎解きに取り組んでいます。

その線形磁気抵抗の謎を解き明かすためには、量子極限^{*2}とよばれる強磁場領域での磁気抵抗の研究が非常に重要な役割を果たします。これまで、ビスマスは量子極限において半金属から半導体へと転移し、電気伝導度は大きく降下すると考えられてきましたが、その詳細は明らかになっていませんでした。

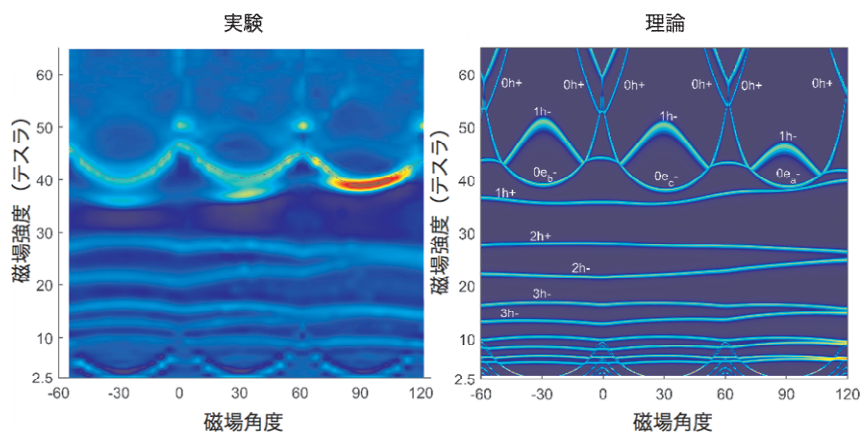


図1 ビスマスにおける磁気抵抗の磁場角度依存性。左の実験結果を解析することによって得られたのが右の理論結果。実験で明るい色の部分が理論で非常によく再現できている。この結果から、強磁場中ビスマスの電子状態が明らかとなり、100%バレー分極が達成されていることが証明された。(0e_a⁻, 0e_b⁻, 0e_c⁻と記された線より強磁場側で完全バレー分極を達成している。)

研究の内容

こうした問題に対して、今回の国際共同研究グループは、ビスマスに対して加える磁場の強度や方向を様々に変化させ、その特徴的な性質を次々に明らかにしてきました。そして今回、従来の30テスラを大幅に超える、65テスラまでの磁場を用いて探査したことで、電気伝導度が急激に上昇することを発見しました。このことは従来の「半導体になり、伝導度は大きく降下する」という予想と正反対の結果で、大きな驚きでした。

さらに同研究グループは、磁気抵抗の測定結果(特に磁場方向依存性)を理論計算により詳しく解析することで、その伝導度の急上昇が100%バレー分極によるものであることを突き止めました(図1)。これまで磁場により完全バレー分極を達成できた例はなく、今回のビスマスでの報告が初めてとなりました。その上、3つある電子バレーのうち1つだけを消し去るか、あるいは2つを同時に消し去るかということ、磁場の方向を変えるだけで制御できるということも新たに見出しました(図2)。

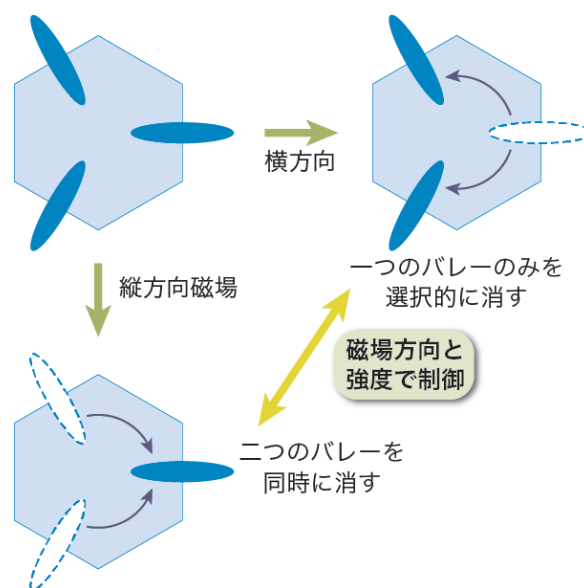


図2 ビスマスでは、3つの電子バレーが存在する。縦方向に磁場を加えれば、二つのバレーに属していた電子が残りのバレーに移動し、100%バレー分極が達成される。この場合、2つのバレーを消したことになる。一方、その垂直方向に磁場を加えれば、一つのパレーに属していた電子が残りの二つのバレーに移動し、1つのバレーだけを消すことができる。今回の結果では、単に100%バレー分極が達成されたというだけではなく、磁場の方向、強度によって消し去るバレーの個数を明確に制御できることも初めて示された。

研究の意義

本研究によりこれまで実現できなかった、磁場による100%バレー分極状態が、ビスマスにおいて実現可能であることが初めて示されました。ではこの現象はビスマスにだけしか現れない現象か、というところではありません。物理学の歴史を紐解けば、実は数々の現象がビスマスによって初めて発見され、その後の爆発的な研究につながっていたことがわかります。今後、他の物質でも実現可能か?さらに低い磁場でも達成されるか?など、様々な分野へ波及し、バレーエレクトロニクス of 新たな展開が生まれていくことが大いに期待されます。

また、そうした応用に向けた展開のみならず、基礎研究の面でも、本研究は量子極限における新たな電子状態の発見という点で、物質科学の基盤的理解を深めることに寄与しました。

用語解説

※1 バレー

半導体や半金属では、電子のエネルギーの極小点(極大点)が複数現れる場合があり、それぞれの極小点近傍をバレー(谷)と呼ぶ(図3)。シリコンの場合バレーの数は6つ、ゲルマニウムは8つである。ビスマスは負電荷を持つ電子のバレーが3つ、正電荷(正孔、ホールとよばれる)のバレーが1つある。

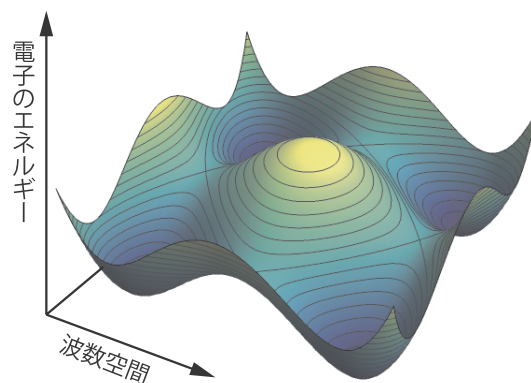


図3 バレーのイメージ。各エネルギーの極小(極大)点近傍をバレーとよぶ。上の場合、極小点のバレーは4つ。(極大は1つ。)

※2 量子極限

磁場中で電子は回転運動する(サイクロトロン運動)。この回転半径(の二乗)は磁場に反比例する。つまり、加える磁場が強ければ強いほど、回転運動の半径が小さくなる。こうした見方は、電子が粒子であるとの考えに基づいている。一方、マイクロな世界で成り立つ量子力学によると、電子は粒子でありながら、波でもある。ただしその波の波長は十分短い(通常金属であれば、およそ $10^{-8}\text{cm} = 1\text{Å}$)ので、電子の運動は粒子の性質で説明できることが多い。しかし、磁場が非常に強くなり、回転運動の半径が電子の波長と同程度になったとき、粒子の性質と波の性質が渾然一体となり、純粋に量子力学的な状態になる。この状態を「量子極限」とよぶ。通常の金属で量子極限に到達するには、数百テスラというとても強い磁場を必要とするため、量子極限は現代物理学においても未開拓の分野となっている。ところが、半金属のビスマスでは、わずか1テスラ程度で簡単に量子極限に到達することができる。(強いネオジム磁石の磁束密度が1テスラ程度。)最近、こうした半金属の特徴を生かして、量子極限を探索し、未知の現象を開拓しようとする研究が活発に行われている。

※3 巨大磁気抵抗効果

金属に磁場を加えると、その電気抵抗が変化する。これを磁気抵抗効果という。その効果の大きさは、磁場のない時の抵抗との比(磁気抵抗比、MR)をとって表される。通常金属であれば、たかだか数%程度である。強磁性体の人口格子膜を巧みに利用すれば磁気抵抗比は50%以上になる。この「巨大磁気抵抗効果」を発見した功績により、フェールトグリーンベルクはノーベル物理学賞(2007年)を受賞した。

今回のビスマスはそのような強磁性体を用いた巨大磁気抵抗とはそのメカニズムが全く異なる

るが、やはり大きな磁気抵抗効果を示すことで知られる。ビスマスの巨大磁気抵抗は定量的にはまだ理解できておらず、固体物理学における長年の謎となっている。

<問合せ先>

(研究関係)

国立大学法人 電気通信大学 情報理工学域 III類(理工系) 物理工学プログラム

准教授 伏屋 雄紀

電話 : 042-443-5571

E-mail : fuseya@uec.ac.jp

(報道関係)

国立大学法人 電気通信大学

総務課広報係 (担当:金子、渡辺)

電話 : 042-443-5019

E-mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp



国立大学法人
電気通信大学
Unique & Exciting Campus

電気通信大学は 2018 年に創立 100 周年を迎えます。