

反強磁性体で世界最大の自発磁気効果をもつ低消費電力磁気メモリ材料： 反強磁性体におけるワイル粒子の発見

1. 発表者：

- 富田 崇弘 (東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任助教)
見波 将 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 特任研究員/
研究当時：金沢大学自然科学研究科数物科学専攻 博士後期課程)
有田 亮太郎 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授/
理化学研究所 創発物性科学研究センター チームリーダー 併任)
中辻 知 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 教授/
東京大学物性研究所 量子物質研究グループ 特任教授/
トランススケール量子科学国際連携研究機構 併任)

2. 発表のポイント：

- ◆ 世界最大の横磁気効果を持つ反強磁性体金属を発見しました。
- ◆ ワイル粒子と呼ばれる固体中の相対論的粒子が巨大な横磁気効果の起源であることを示しました。
- ◆ 漏れ磁場が少なく数百ガウスで磁化反転可能な反強磁性材料のため、高集積可能な新しい不揮発性メモリの材料として期待されます。

3. 発表概要：

スマートフォンやタブレットなどの内蔵ストレージに採用されているメインメモリには、電源をオフにするとデータが失われる「揮発性メモリ」が使われており、データ保持に過度な電力消費をしてしまいます。消費電力削減のために、強磁性体の磁化方向を利用して電力供給せずともデータ保持が可能な不揮発性記憶素子を使用したメモリ開発が進んでいますが、今後急速に増える情報量とともに集積化が進めば、記憶素子間の漏れ磁場の影響によりメモリ容量の限界が来ると考えられています。

今回、東京大学大学院理学系研究科の中辻 知教授、見波 将特任研究員と東京大学物性研究所の富田 崇弘特任助教、Taishi Chen 特任研究員、Mingxuan Fu 特任研究員らの研究グループは、東北大学大学院理学研究科の是常 隆准教授、理化学研究所の北谷 基治特別研究員、金沢大学ナノマテリアル研究所の石井 史之准教授、東京大学大学院工学系研究科の有田 亮太郎教授らの研究グループと協力して、マンガン化合物 Mn_3Ge の反強磁性体 (図 1 a) において、これまでにないゼロ磁場での巨大な異常ホール効果を見だし、同時にネルンスト効果 (図 2 a, b) と呼ばれる磁気熱量効果が反強磁性体の中で最大値を示すことを発見しました。従来の強磁性体材料では磁化に比例した横磁気効果、すなわち異常ホール効果や異常ネルンスト効果が現れるのが一般的でしたが、従来の概念を打ち破り磁化がほぼない反強磁性体で従来の強磁性体金属と同程度のサイズの効果がゼロ磁場室温で見いだされました。従来の強磁性体の場合、自発磁化による漏れ磁場の影響がありましたが、反強磁性体の場合はスピンを反対向きに揃っているため全体のスピンが作り出す漏れ磁場はほとんどありません。特に、異常ホール効果は電流と垂直に得られる起電力応答のため素子構造が単純であること、マンガン化合物が二元系の廉価で毒性のない元素で構成されていることから不揮発性メモリ素子への展開が可能です。また反強磁性体材料は、理論的に強磁性体より高速動作が可能であることから、今後、消費電

力を抑えたビッグデータの記録および高速処理をともに可能とする反強磁性不揮発性メモリ材料として期待できます。

本研究成果は *Nature Communications* オンライン版に掲載されました。

4. 発表内容：

① 研究の背景

スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末のメインメモリとして主に利用されている揮発性メモリは、CPU から直接アクセスできる記憶素子で、記憶保持に大きな電力を消費します。近年、次世代メモリとしてより高速で記憶保持に電力を消費しない不揮発性メモリの開発が盛んに行われています。なかでも、強磁性体材料を用いた不揮発性メモリは磁気の方角を記録する「磁気メモリ」で HDD 等での記録実績もあり、すでに実用化されつつあります。一方で強磁性体の記憶素子はスピンの向きを揃えた、いわば小さな磁石を集積化させて使用しているため、記憶素子同士の磁気的な干渉などにより高密度化に限界があるという重大な弱点を抱えており、この点の解決が強く求められています。デバイスの高性能化を進めていく上で CPU の高性能化だけではシステム全体の高速化には繋がらず、プログラムやデータ転送を高速化する必要があります。現在の強磁性体不揮発性メモリではまだ CPU との動作速度の違いがシステム全体の高速化が進まない要因の1つとなっており、集積化と高速化の両立が次世代メモリ材料には求められています。

本研究グループは反強磁性体という磁気構造に着目し、反強磁性体のホール効果をメモリ材料に利用できないかという研究を進めてきました。ここでホール効果とは、電流により物質中の電子が移動し磁場を感じることで曲げられ、電流方向と垂直な方向に起電力を示す現象です。正負の磁場や磁化で、ホール抵抗の符号が変化するためメモリ材料として理想的な現象で 100 年ほど前に発見されていました。磁性体で現れるホール効果は異常ホール効果と呼ばれ、磁化に比例することが古くから知られています。従来の強磁性体では物質内部でスピンが同方向に揃う強磁性体により電子が感じる磁場を作りますが、反強磁性体ではスピン同士が反平行や幾つかのスピンの互いに打ち消し合う配置をとるため異常ホール電圧は無視できるほど小さく注目されませんでした。特に、反強磁性体では理論的に強磁性体を凌ぐ高速動作が可能で、異常ホール効果を用いた不揮発性メモリ材料の構想はあったものの、従来のゼロ磁場で異常ホール効果を示す材料ではシグナルが小さく実現不可能とされてきました。

② 研究内容と成果

(研究成果)

本研究グループは、2015 年に世界に先駆けて反強磁性体物質 Mn_3Sn (注1) のゼロ磁場の巨大な異常ホール効果を、2016 年には Mn_3Ge (注1) において同現象を発見しました。今回、磁化が小さい反強磁性材料にも関わらず、反強磁性体として過去最大の異常ホール効果とネルンスト効果をゼロ磁場の Mn_3Ge で発見し、ワイル粒子に起因する物質のトポロジカル効果であることを突き止めました。

ネルンスト効果とはホール効果と対をなす磁気熱現象であり、与えられた熱流と垂直に起電力が現れる現象です。従来のゼーベック効果(注2)と異なり物質の熱流と起電力方向の配置が異なるため、熱電性能の自由度をさらに上げる革新的な技術です。磁性体の場合のネルンスト効果は異常ネルンスト効果と呼ばれ、 Mn_3Ge では低温でも反強磁性磁気構造は変わらず 100 K ではゼロ磁場で最大 $1.2 \mu V/K$ (図2b)を示します。従来は強磁性体のように内部に大きな磁場が発生するものでしか巨大な横磁気効果、すなわちホール効果やネルンスト熱起電力が発

生しませんでした。反強磁性体で異常ホール効果と同様に異常ネルンスト効果でも大きな起電力が発生するということはあたかも内部に巨大な仮想磁場があるかのように見えます。

(研究内容)

反強磁性体で見られた巨大な仮想磁場の起源は Mn_3Ge のカゴメ格子と呼ばれる磁気構造(図1 a)に起因するトポロジカルな効果であると考えられています。1つのマンガン元素あたり数ミリ μB という値で、一般的な強磁性体の1000分の1に相当するような非常に小さな磁化です。磁化測定の結果では、数百ガウスという比較的小さい磁場によって磁化の反転が見られ(図2)、ホール効果と同様にネルンスト効果の電圧の符号が磁場の符号で反転することも観測されました。

また第一原理計算を用いた物質のバンド計算から、外から磁場や内部の磁化により生じる磁場ではない仮想磁場(図1 c、注3)が電子を曲げると考えられており、仮想磁場の起源として正負のワイル粒子(図1 c、注4)と呼ばれるモノポールが作る運動量空間の磁場が実空間での仮想磁場として存在することが予言されていました。これは固体のトポロジカル効果(注5)と呼ばれています。

本研究で行ったワイル粒子を考慮した第一原理計算と動的平均場近似を併用した計算から、得られた異常ホール効果と異常ネルンスト効果は実験結果と一致することが分かりました。ワイル粒子で生じる際の重要な2つの現象である、「カイラル異常と呼ばれる電流と磁場を平行にかけた際に現れる負の磁気抵抗効果」と「大きなプラナーホール効果」も同時に観測することに成功しました(図3 a, b、注6)。以上の一連の結果は、ワイル粒子により引き起こされたことを示しており、理論から提案された新しいトポロジカル現象を実験的に検証した重要な結果です。

③ 社会的意義・今後の展望など

今回観測した Mn_3X ($X = \text{Sn}, \text{Ge}$)の巨大な異常ホール効果が、トポロジカル効果に由来する現象であると示せたことは、反強磁性体での不揮発性メモリ材料の構想を大きく前進させる成果と言えます。 Mn_3Sn だけでなく同一磁気構造の Mn_3Ge においても同様に見られたトポロジカル効果は、スピン構造に依存したゼロ磁場での類似物質探索、すなわち Mn_3Z のZサイトの置換による最適化によりゼロ磁場の巨大な異常ホール効果を示す物質が見つかる可能性を示唆しています。二元化合物 Mn_3Ge は非常に安定な物質で、比較的簡便な方法で物質合成が可能であり、さらにクラーク数が高く安価で毒性の無い元素で構成されているため、工業用途での使用が可能で、金属故の耐久性もあるため実用材料としても優れた特性を兼ね備えています。今後、反強磁性体は、強磁性体で問題となる漏れ磁場による素子間の干渉効果も問題とならず、また一般に強磁性体よりも3桁以上の速い動作性能を示すため高速化にも繋がります。トポロジカル反強磁性体を用いた高速動作・高密度メモリの実用化を目指した研究開発が急速に進んでいくことが期待されます。

ゼロ磁場の巨大な異常ホール効果が現れる機構については、学術的にも大変興味を持たれているテーマとなっています。 Mn_3Ge のスピン構造は Mn_3Sn と同様に磁気八極子(注7)を有しており、これに起因する電子構造のトポロジカル効果すなわちワイル粒子が生成されることにより仮想磁場が生じ、ゼロ磁場の異常ホール効果並びに異常ネルンスト効果の発現機構に関与していることが理論的に提案されています。今後、学術的には反強磁性体で巨大な異常ネルンスト効果を解明するため、トポロジカル効果がさらに顕在になる低い温度での研究を行っていく予定です。

ネルンスト効果では、材料選択の自由度が生まれ高効率な熱電素子開発、環境発電技術への幅広い応用が想定されます。また反強磁性体のため磁場に影響があるような電気機器の局所冷却などでも利用が期待されます。

なお、本研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST) 「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域(研究総括：上田正仁)における研究課題「電子構造のトポロジーを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創成」課題番号 JPMJCR18T3 (研究代表者：中辻 知)、戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)、「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」研究領域(研究当時、総括：谷口 研二、研究副総括：秋永 広幸)における研究課題「トポロジカルな電子構造を利用した革新的エネルギーハーヴェスティングの基盤技術創製」課題番号 JPMJCR15Q5 (研究代表者：中辻 知)、並びに文部科学省 科学研究費補助金新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」課題番号 15H05882 (研究代表：播磨 尚朝)における研究計画班「A01：局在多極子と伝導電子の相関効果」課題番号 15H05883 (研究代表者：中辻 知)、科研費(No.16H06345, 強相関物質設計と機能開拓—非平衡系・非周期系への挑戦—)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「NEDO 先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/ワイル磁性体を用いた熱発電デバイスの研究開発」の一環として行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature Communications*」

論文タイトル：Anomalous transport due to Weyl fermions in the chiral antiferromagnets Mn_3X ,
 $X = Sn, Ge$.

著者： Taishi Chen*, Takahiro Tomita*, Susumu Minami, Mingxuan Fu*, Takashi Koretsune, Motoharu Kitatani, Muhammad Ikhlas, Daisuke Nishio-Hamane, Rieko Ishii, Fumiyuki Ishii, Ryotaro Arita, Satoru Nakatsujii† (* : equal contribution, †: corresponding author)

DOI 番号：10.1038/s41467-020-20838-1

アブストラクト URL：https://www.nature.com/articles/s41467-020-20838-1

6. 問い合わせ先：

【研究に関すること】

東京大学物性研究所 量子物質研究グループ

特任助教 富田 崇弘 (とみた たかひろ)

E-mail：ttomita@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 / 東京大学物性研究所 量子物質

研究グループ / トランススケール量子科学国際連携研究機構

教授 中辻 知 (なかつじ さとる)

E-mail：satoru@phys.s.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室

TEL：03-5841-8856 E-mail：kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 広報室
E-mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院工学系研究科 広報室
TEL : 03-5841-6009 E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

金沢大学 総務部広報室
TEL : 076-264-5024 E-mail : koho@adm.kanazawa-u.ac.jp

理化学研究所 広報室
E-mail : ex-press@riken.jp

東北大学大学院理学研究科・理学部 広報・アウトリーチ支援室
TEL : 022-795-6708 E-mail : sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho@jst.go.jp

【JST事業に関すること】

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ
嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町
TEL : 03-3512-3531 FAX : 03-3222-2066
E-mail : crest@jst.go.jp

7. 用語解説 :

(注1) 反強磁性体 Mn_3X ($X = Sn, Ge$)

2015年並びに2016年に本研究室で開発された反強磁性体で、世界で初めて巨大な異常ホール効果が発見された物質。400 K以下で共面スピン構造を示します。

(注2) ゼーベック効果

物質に温度差が印加されると、高温部と低温部で電荷濃度に偏りが生じ、その間に起電力(熱起電力)が発生する現象。温度差 1℃あたりの起電力の大きさをゼーベック係数と呼びます。

(注3) 仮想磁場

運動量空間において、ワイル点の磁気電荷がつくる仮想的な磁場で、異常ホール効果や異常ネルンスト効果の起源となります。

(注4) ワイル粒子 (ワイルフェルミオン)

ワイル粒子に対応した素粒子は自然界ではまだ観測されていません。低エネルギー凝縮系物質において出現する粒子の1つで、磁性体のバンド構造中に現れることが予想されています。

(注5) トポロジカル効果

電子は量子力学的に波動関数で一般に表されます。その波動関数の位相情報が物質の巨視的な性質、たとえばホール効果として現れる場合があります。これは波動関数を作る電子構造の幾何学的な性質が重要であり、トポロジカルな性質と呼ばれています。

(注6) カイラル異常とプラナーホール効果

「カイラル異常」とは、ワイル粒子が持つ輸送特性の1つで、磁場と電流が平行に現れる際、磁場の増加とともに2つの正負のワイル点間でチャージポンピングが起こり、電気抵抗が下がる特性をいいます。また「プラナーホール効果」とは、通常のホール効果の配置とは異なり、磁場を電圧または電流と同じ面内方向に印加することで現れる異方的な磁気抵抗効果です。

(注7) 磁気八極子

磁石はN極とS極の2つの極を持っていますが、磁性体の各格子点に配置されたスピンも2つの極を持ち、これは磁気双極子とも呼ばれています。複数の格子点に配置されたスピンを1つのユニットと考えた際に作られる特徴的なスピンの組み合わせをクラスター磁気多極子といい、構成するスピンの数が1、2、3と増えるにつれて、磁気双極子、磁気四極子、磁気八極子というようにその組み合わせで名前が変わっていきます。反強磁性金属 Mn_3X ($X = Sn, Ge$) のスピン構造では、3種類のスピンのユニットを組み、クラスター磁気八極子と考えられます。クラスター多極子では、磁化の総和がゼロとなる組み合わせにおいても、強磁性体で見られるような巨視的な応答が現れることがわかっています。

8. 添付資料：

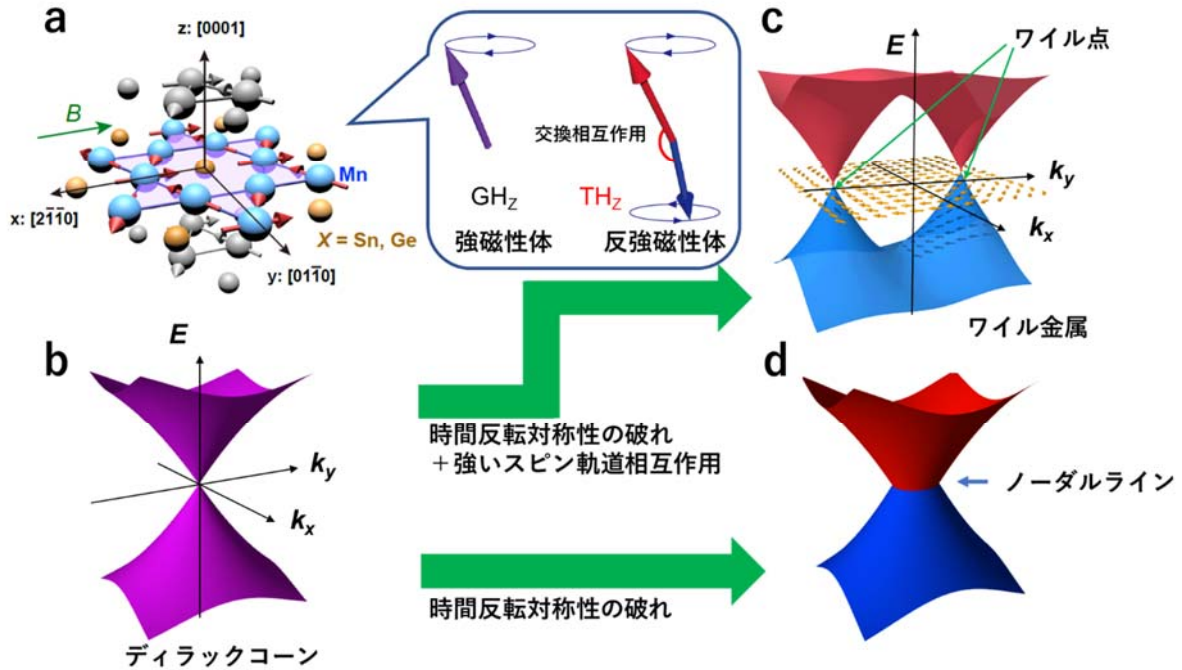


図 1：反強磁性体 Mn₃Ge のワイル粒子生成の概念図。(a) 反強磁性体 Mn₃Ge の実空間での結晶構造と磁場中での磁気構造。z = 0 面と z = 1/2 面の二層を持つカゴメ格子構造と呼ばれる三角形ベースの結晶構造。磁場 $B \parallel [2\bar{1}\bar{1}0]$ にかけた場合の逆スピン三角構造と呼ばれる Mn (マンガン) スピンの磁気構造の様子。反強磁性体における反強磁性磁気共鳴周波数は交換結合に起因する交換磁場に比例するため、強磁性体に比べて圧倒的に高くなり、テラヘルツ帯の高速動作が可能。(b) 運動量空間でのディラックコーンが対称点にあった際、(c) 磁性体の時間反転の破れによりノーダルラインが現れます。さらに強いスピン軌道相互作用が現れることで、(d) 2点を残したギャップが開くことで運動量空間内に正負のワイル点を持つワイル金属状態が生成されます。

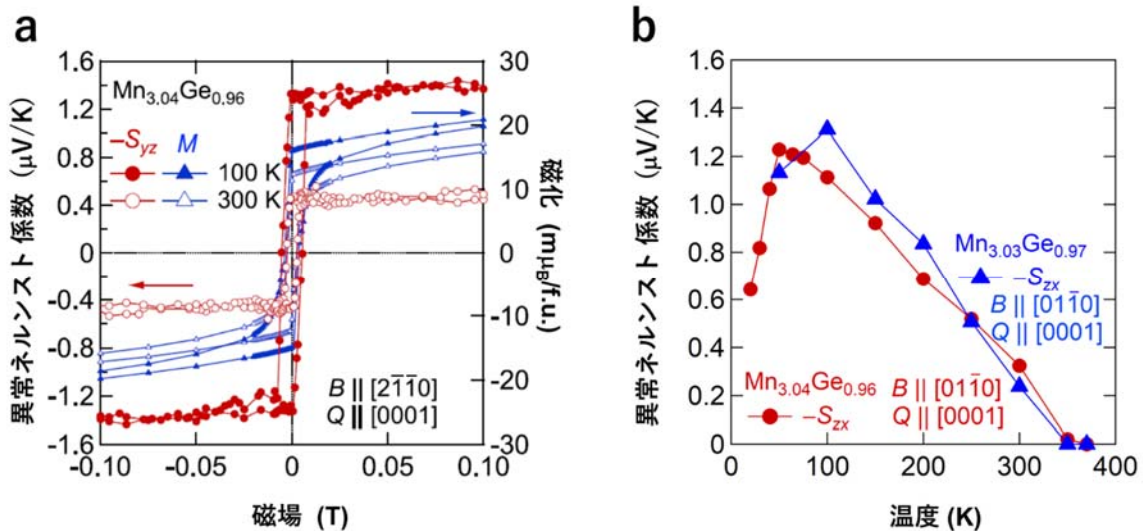


図2 : (a) Mn_3Ge におけるネルンスト係数と磁化の温度依存性。ゼロ磁場でもネルンスト効果がこのため異常ネルンスト効果を示します。(b) ゼロ磁場での異常ネルンスト効果の温度依存性。温度 100 K にてネルンスト係数が最大値を示します。

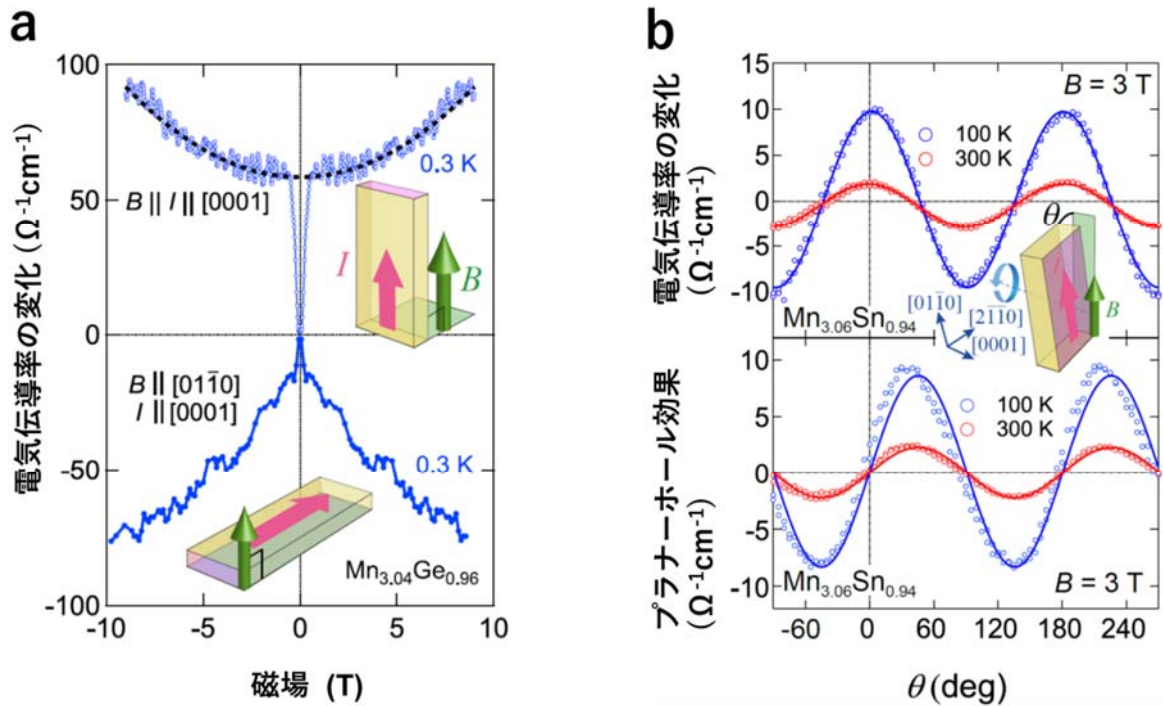


図3 : (a) 反強磁性体 Mn_3Ge の電気伝導率の磁場変化。磁場 B が電流 I と垂直の場合には、正の磁気抵抗 (負の電気伝導率) を示すのに対して、磁場と電流が平行の際に負の磁気抵抗 (正の電気伝導率) が現れます。これは磁場と電流が平行の際に、磁場の増加にともなう正負のワイル点間のチャージポンピングにより、電気抵抗の減少が見られるカイラル異常と呼ばれる現象で、ワイル粒子が生成された際に現れる特異な効果と考えられています。(b) 電気伝導率とプラナーホール効果の角度依存性がともに余弦曲線と正弦曲線となることは、カイラル異常の効果を表しています。