

p 波磁性体と呼ばれる新しいタイプの磁性体を実現 電流を用いた高効率な磁化制御などへ期待

2025 年 10 月 23 日

理化学研究所, 東京大学

高エネルギー加速器研究機構

J-PARC センター, 総合科学研究機構

日本原子力研究開発機構, 科学技術振興機構 (JST)

理化学研究所 (理研) 創発物性科学研究センタートポロジカル量子物質研究ユニットの山田林介客員研究員 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻助教), プリヤ・パラル客員研究員 (東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター客員研究員), マックス・ヒルシュベルガーユニットリーダー (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻准教授), 強相関量子伝導研究チームのマックス・バーチ基礎科学特別研究員 (研究当時, 現強相関物性研究グループ研究員), 十倉好紀チームディレクター (東京大学卓越教授/東京大学国際高等研究所東京カレッジ), 創発機能設計研究ユニットの奥村駿ユニットリーダー (東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター特任准教授), 強相関量子構造研究グループの有馬孝尚グループディレクター (東京大学大学院新領域創成科学研究科教授), 量子物性理論研究グループのモリッツ・ヒルシュマン基礎科学特別研究員, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の佐賀山基準教授, 中尾裕則教授, 総合科学研究機構中性子科学センターの大石一城主任研究員, 日本原子力研究開発機構 J-PARC センターの大原高志研究主幹, 鬼柳亮嗣研究副主幹らの共同研究グループは, これまでの磁石とは異なる新しいルールで整列した金属 p 波磁性体の存在を初めて実証しました。

本研究成果は, 反強磁性体を用いたスピントロニクスや量子デバイスの応用研究への貢献が期待されます。

これまで, 奇パリティを持つ p 波型スピン分裂は理論的に予言されていたものの, 金属的な性質を持つ p 波磁性体の実験的な報告はありませんでした。

共同研究グループは, 共鳴 X 線散乱および中性子散乱と呼ばれる測定手法を利用して, 結晶中の原子配列の繰り返しの 6 倍の周期を持つ磁気構造を観測し, 金属 p 波磁性体の存在を実証しました。微細加工デバイスにおける電気抵抗測定により, p 波スピン分裂に起因する電気抵抗の方向による大きさの違い (異方性) も観測しました。

本研究は, 科学雑誌『Nature』オンライン版 (10 月 22 日付: 日本時間 10 月 23 日) に掲載されました。(この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2025/10/pr202510230000pwave.pdf> をご覧ください)。

結晶のひずみを抑えて超伝導を発現 薄膜界面における整数比の格子整合を介した物性制御

2025 年 12 月 11 日

理化学研究所, 東京大学

高エネルギー加速器研究機構

理化学研究所 (理研) 創発物性科学研究センタートポロジカルエレクトロニクス研究チームの佐藤雄貴特別研究員, 川村稔チームディレクター, 強相関量子伝導研究チームの十倉好紀チームディレクター (東京大学卓越教授/東京大学国際高等研究所東京カレッジ), 計算物質科学研究チームの有田亮太郎チームディレクター (東京大学大学院理学系研究科教授), 東京大学大学院工学系研究科の永濱壮真博士課程学生, 塚崎敦教授, 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の佐賀山基準教授らの共同研究グループは, 結晶が本来持つ低温で示すひずみを, 薄膜試料において効果的に抑制し超伝導を発現させる方法を実証しました。

本研究成果は, 物質の性質を外部から制御できる新しい手法を提案するものであり, 今後, さまざまな物質に適用することで半導体工学や超伝導電気回路といった物質工学の分野でさらなる応用が期待されます。

薄膜物質の研究においては, 高い結晶品質を持つ物質を合成するために, 通常, 基板 1 格子の上に薄膜 1 格子が成長するように物質設計がなされます。本研究ではこの基本指針に反して, テルル化カドミウム基板 5 格子の上にテルル化鉄薄膜がちょうど 6 格子成長することを発見しました。これは二つの物質の格子間隔の整数比の関係を満たす特殊な格子整合 (二つの材料の格子の合致) です。

このような整数比の格子整合においては, 基板と薄膜の結晶が対応しない箇所 (転位) が必ず生じるため, 通常は結晶の品質が損なわれると考えられていました。共同研究グループは X 線回折実験を行い, 薄膜の結晶構造を低温まで詳細に調べました。その結果, テルル化鉄が低温において本来示す結晶のひずみが, 整数比で整合した薄膜試料においては強く抑制されていること, さらにこのひずみが抑制された薄膜は低温で超伝導を示すことを発見しました。

本研究は, 科学雑誌『Nature Communications』オンライン版 (12 月 5 日付) に掲載されました。本研究における実験の一部は高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験課題 (課題番号: 2022G551) により, KEK の放射光実験施設フォトンファクトリーの BL-4C で実施されました。(この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2025/12/pr202512111400fete.pdf> をご覧ください)。

コンデンサー極板間の変位電流密度の周波数依存性が明らかに 電磁波が発生する仕組みの誤解を解く

2025 年 12 月 22 日
高エネルギー加速器研究機構

電磁気学の電場、つまり、マクスウェル方程式における電場は、クーロン電場とファラデーの誘導電場の和です。電場の変化、つまり変位電流密度にも、それらの電場に関係する 2 成分があります。交流が流れているコンデンサーの極板間の磁場の測定が行われてきた低周波では、極板間の変位電流密度はクーロン電場の時間変化であり、それが磁場を作るという解釈は間違いであることを、以前の論文で示しました（2022 年 9 月 27 日付プレスリリース <https://www.kek.jp/ja/press/202209271400> 参照）。一方、交流の周波数が高くなると、電場と磁場を同時に含む電磁波が生じますが、この時の変位電流密度は誘導電場の時間変化であることも、その論文で示しました。それでは、低周波領域で誘導電場の変位電流密度はどうなっているのでしょうか。また、高周波領域でクーロン電場の変位電流密度はどうなっているのでしょうか。

この問いに答えるために、交流が流れている平行板コンデンサーの極板間における変位電流密度の両成分について、振幅が、交流の周波数（角周波数 ω ）とともにどのように変化するかを調べました。極板は半径 r の円板とし、極板間の距離は十分狭く、極板の端の効果は無視できるとします。これまで磁場の測定が行われてきた平行板コンデンサーの代表的なサイズとして、 $r = 5 \text{ cm}$ （直径 10 cm）の場合を想定し、広い周波数域での両成分の振幅の大きさを解明しました。その結果、交流電流の振幅が常に一定であるとすると（または、電流の振幅で規格化すると）、クーロン電場の変位電流密度の振幅は周波数によらず一定であることがわかりました。また、誘導電場の変位電流密度の振幅は、低周波では極めて小さく、 ω^2 に比例して増大し、 $\omega \sim c/r$ あたりから増加が緩やかになって、やがてクーロン電場の変位電流密度と同程度の大きさになることがわかりました。ここで c は光速で、 c/r は光が距離 r を進む時間の逆数です。極板の半径 r が小さくなると、周波数 $\omega \sim c/r$ はさらに大きくなり、誘導電場成分は更に小さくなります。

具体的に大きさを比較してみます。この大きさのコンデンサーでは、交流の周波数が $f \sim 1 \text{ MHz}$ （ $\omega = 2\pi f \sim 6 \text{ MHz}$ ）のようにかなり高い場合でも、誘導電場成分の振幅はまだ、クーロン電場成分の 10^{-7} （千万分の 1）に過ぎません。このことから、磁場の測定が行われてきた周波数での変位電流密度は、磁場を作らないクーロン場の成分であるという議論は正しかったことがわかります。また、 ω が大きくなるにつれて電磁波の原因となる誘導電場の変位電流密度が大きくなり、電磁波の強度も増して次第に検出可能になることがわかります。（どの周波数あたりで検出

できるかは、むしろ検出器の感度の問題です）一方、極板間の磁場にも電磁波にも関わりのないクーロン電場の変位電流密度の振幅は一定で、常に誘導電場の成分より大きいと同程度です。このように、変位電流密度の振幅の周波数依存性に注意することで、それが関係する電磁現象に関する正しい理解が進むと期待できます。

なお、ここではコンデンサーの極板間における誘導電場の変位電流密度が次第に大きくなることを示しましたが、コンデンサーが主に電磁波が生じる場所であると言っているわけではありません。コンデンサーにつながるリード線の周りにも変動する磁場ができ、それによって誘導電場と変位電流密度ができています。周波数が上がってきたとき、主にそこから電磁波が発生します。

このように、コンデンサーの極板間における変位電流密度の二つの成分それぞれについて、その振幅の周波数依存性を調べることは、基本的な問題であるにもかかわらず、マクスウェル以来の電磁気学において検討されてこなかった問題です。American Journal of Physics に掲載された論文の Editor's note において、「これは、上級レベルの電磁気学の講義における、適切な追加教材となるだろう」と評価されました。今後、電磁気学の教科書にも追加されることになるでしょう。

論文は 11 月 1 日発行の専門誌 American Journal of Physics に掲載されました。（この記事の続きは https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2025/12/pr202512221400current-density_.pdf をご覧ください）。

海洋下のマントルに由来する岩石中に有機物を発見 上部マントル中での生物が関与しない有機物合成の証拠

2026 年 1 月 15 日
京都大学、広島大学、東北大学
高輝度光科学研究センター、早稲田大学、東京大学
高エネルギー加速器研究機構

京都大学大学院理学研究科 三津川到 博士課程学生、三宅亮 同教授、伊神洋平 同准教授を中心とし、京都大学、広島大学、立命館大学、東北大学、高輝度光科学研究センター（JASRI）、早稲田大学、東京大学、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所のメンバーで構成される共同研究チームは、南太平洋タヒチ島で採取されたマントル捕獲岩中の包有物から、多環芳香族炭化水素を主体とする有機物を発見しました。地球のマントル内部で生物とは無関係に有機物が合成されている可能性は古くから指摘されてきましたが、海洋下のマントルに由来する天然のマントル物質からそのような有機物を検出した例は極めて限られていました。本研究では、放射光 X 線 CT や顕微ラマン分光法などの分析手法を用いて、マントル捕獲岩中の微小な包有物を解析しました。その結果、包有物内

に多環芳香族炭化水素を主体とする有機物が、二酸化炭素や一酸化炭素とともに分布していることを明らかにしました。本成果は、生物が関与しない有機物合成が、海洋下のマントルでも起こり得ることを示すものであり、マントル内における有機物合成過程の全容解明に向けた重要な手掛かりとなることが期待されます。

解析の一部は、KEKの放射光実験施設フォトンファクトリーで行われました。

本研究成果は、2026年1月14日午前10時（英国時間）に英国の国際学術誌「Scientific Reports」にオンライン掲載されました。（この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2026/01/pr202601141900mantle.pdf> をご覧ください）。

氷のような乱れによって電子のスピンが低い温度でも揺らいでいる状態を発見 電子スピンの対が揺らいでいる状態を安定化させるメカニズムの解明に期待

2026年1月19日

大阪大学、理化学研究所
高エネルギー加速器研究機構
J-PARC センター

大阪大学大学院理学研究科の花咲徳亮教授らの研究グループは、原子の並びが氷のように乱れた物質において、極めて低い温度になっても電子の量子スピンの揺らいでいる状態を世界で初めて明らかにしました。

世の中の物質は、温度が下がると結晶化することがよく知られています。これは、原子間や分子間にはたらく相互作用のエネルギーが低くなるように、原子や分子が整列するためであり、熱力学第3法則の帰結とも言えます。しかし、水が凝固した氷では、 H_2O 分子の位置が完全に定まっているわけではありません。 H_2O 分子の向きを変えてもエネルギーが変わらない状態が数多く存在するため、氷は固体であっても、分子の向きが揺らいでいる特異な状態なのです。このように、物質中における全ての相互作用のエネルギーを同時に低くすることができないためにエネルギーの低い状態が数多く存在することをフラストレーションと呼びます。

物質中の各原子には電子が存在します。例えば図（a）のように、電子の量子スピンの向きが三角形の頂点にあり、電子スピンの向きを互いに逆向きに向かせようとする相互作用があると、右下の3つ目の電子スピンは上向きであっても下向きであっても相互作用エネルギーを低くすることはできません。このようなフラストレーションがあると、極めて低い温度まで電子スピンの向きが揺らいでいるのか、それとも電子スピンの向きが凍りついてしまうのかは、長年の謎でした。また、電子スピンの向きが低い温度でも揺らいでいる状態になるには、フラストレーションとともに、原子が乱れなく整列していることも必要条件だとこれまで考えられてきました。

今回、研究グループは、マグネシウムとチタンを含むスピネル型酸化物と呼ばれる物質において、チタン原子の位置が氷のように乱れているときに、電子のスピンが極めて低い温度まで揺らいでいる状態（ランダム・シングレット状態）が生じることを突き止めました。この状態では、図（b）のように、孤立した電子スピンの対が揺らいでいます。この発見から、原子の配置や種類に乱れがあっても、電子スピンの対が極めて低い温度まで揺らいでいることが明らかになりました。原子の並びの乱れが電子スピンの揺らぎに重要な役割を果たしていることを示しています。これにより、量子スピンの対が揺らいでいる状態を安定化させるメカニズムの解明が進むとともに、低い温度で物質がなぜ凍りつく、あるいは凍りつかなくなるのかという根本的な問いに対する理解が深まると期待されます。

本研究成果は、米国科学誌「PNAS (Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America)」に、12月31日（水）（日本時間）に公開されました。

本研究における実験の一部はKEKの放射光実験施設フォトンファクトリーのBL-8Bで実施されました。（この記事の続きは <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2026/01/pr202601191400spinel.pdf> をご覧ください）。