

平成 23 年 5 月 23 日

報道関係各位

東京大学物性研究所
理化学研究所

スピッキラリティが誘起する自発的ホール電圧を磁場で制御する

1. 発表者:

Luis Balicas (米国国立高磁場研究所 専任研究員 / 元 東京大学物性研究所 客員准教授)

町田 洋 (東京工業大学大学院理工学研究科 助教
/ 元 東京大学物性研究所 日本学術振興会特別研究員)

中辻 知 (東京大学物性研究所 准教授)

小野田繁樹 (理化学研究所基幹研究所 専任研究員/元 東京大学物性研究所 客員准教授)

2. 発表概要:

ホール効果は 19 世紀の発見以来、磁場、あるいは、強磁性に伴う磁化の存在が必ず必要とされてきましたが、我々は磁気秩序の存在しないゼロ磁場下で、巨大なホール効果が、電子スピンの自発的に形成するスピッキラリティによって出現することを発見しました。今回は、そのスピッキラリティとゼロ磁場ホール効果が磁場の強度と方位により制御可能であることを見出しました。これは、低エネルギー損失、かつ、単層で作動するホール素子を用いた新しいタイプの不揮発性メモリの可能性を示す点で、基礎科学的だけでなく応用上も重要と考えられます。

3. 発表内容:

現在の CPU の揮発性メモリは、そのメモリ維持のためにリフレッシュ動作が必要となり、消費電力が大きいという欠点を持ちます。一方で、不揮発性メモリはメモリ維持のための電力を必要としないために、低炭素化にとって不可欠な技術です。開発の進む不揮発性メモリとして、磁気抵抗メモリ (MRAM) がありますが、その動作には多層膜のトンネル接合を必要とし構造的に複雑とな

っています。さらに、メモリの読み・書きの際の電流駆動による発熱、また、強磁性のヒステシスによる本質的なエネルギー損失が存在します。そこで、単層で作動する構造的に単純なホール素子を用いた異常ホール効果を利用して、散逸を大幅に削減した新しいメモリ機構の開発が社会的な要請となっています。

19世紀の発見以来、異常ホール効果の発現には、これまで磁場、あるいは磁気秩序（注1）に伴った磁化成分が必要とされてきました（図1A）。そのような状況の下、我々はゼロ磁場で磁化のない状態で自発的に現れる新しいホール効果を発見しました（図1B）。(町田、中辻、小野田、田山、榊原、*Nature* Vol. 463, p. 210 (2010).) これは幾何学的フラストレーション（注2）により安定化されたスピン液体（注3）状態において、スピンの作る立体角（スピんキラリティ（注4））の巨視的秩序が巨大な仮想磁場（図2A）を作るために現れると考えられます。この新しい機構では磁化のヒステシスに伴うエネルギー損失・発熱はなく（図3d）、また、従来の異常ホール効果を凌ぐ大きな信号が弱磁場で得られるため、このホール電流の機構解明は、基礎学術的に重要な課題であるのみならず、メモリの消費電力の低減を実現し、不揮発性メモリを用いた低エネルギー消費の情報処理を実現する技術基盤を与えると考えられます。

今回は、このゼロ磁場ホール効果を実現した $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の純良単結晶を用いてホール伝導率の磁場とその方向依存性を詳細に調べたところ、この立方晶の物質の[111]方向に磁場をかけた場合に特に巨大なヒステシスを伴った自発的ホール伝導度が現れることがわかりました（図3a~d）。この現象の現れる低温ではスピンはアイスルール（注5）に従い、スピんアイス（注5）と呼ばれる水の氷と同じ構造を取ることがわかっています（図2B）。このスピンの配置では、特に[111]面に最も大きなスピんキラリティの成分が現れることが期待され、そのことと一致することがわかりました（図3e）。また、氷では現れない量子性がこのホール効果の発現に重要となっていることを強く示唆しております。この発見は東京大学物性研究所、理化学研究所、米国国立高磁場研究所の共同研究によるもので、米国物理学会誌『*Physical Review Letters*』に掲載されます。

この成果は、上記の新しい自発的ホール効果、また、それを用いた今後のホール素子に基づくメモリ機構の開発のための重要な一歩となると考えられます。さらに、スピんアイスという新しい磁性現象で現れた量子効果の研究は、量子スピン液体（注3）という新たな磁性体を理解するうえでも、今後さらなる重要な知見を与えることが期待されます。

4. 発表雑誌: 米国物理学会誌「*Physical Review Letters*」に5月25日オンライン掲載予定。

5. 問い合わせ先:

東京大学物性研究所 准教授 中辻 知

<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/>

独立行政法人理化学研究所 基幹研究所 専任研究員 小野田 繁樹

http://www.riken.go.jp/lab-www/cond-mat-theory/onoda/index_j.html

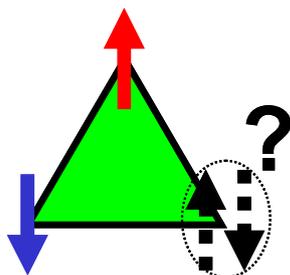
6. 用語解説:

(注1) 磁性体・磁気秩序・強磁性体

磁性体とは、内部に各電子の回転運動に起因した微小な磁石(スピン)を有する物質である。通常冷却すると、巨視的な数の電子スピンの何らかのパターンで整列する**磁気秩序**を示す。主として、磁石としての巨視的な磁化を示す鉄・コバルト・ニッケルなどの**強磁性体**、磁化が内部で打ち消されている反強磁性体、スピンの秩序化しない常磁性体などに分類される。

(注2) 幾何学的フラストレーション

下図は正三角形の頂点上にある矢印が電子スピンを表す。矢印は上下の向きを取れるとして、隣り合うスピンは必ず反対向き(反強磁性的)にしかとれないとすると、どうしても配列が一つにさだまらず、スピンはフラストレーションを感じる。このように、三角形を基調とした構造を持つ磁性体は、その構造ゆえにすべてのスピン対に好まれる関係を完全には充足できない。このことを**幾何学的フラストレーション**と呼ぶ。 $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の構造である、正四面体をベースとしたパイクロロ格子は、幾何学的フラストレーションが現れる典型的な格子である。



(注3) スピン液体、量子スピン液体

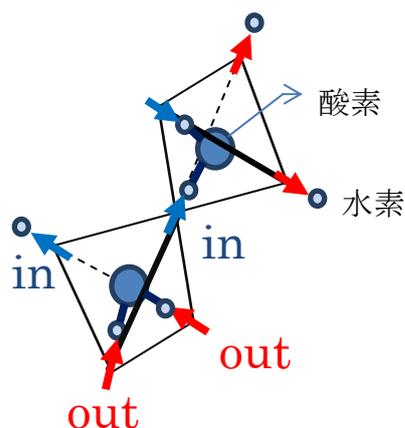
磁性を担うイオンに束縛された各電子のスピンの向きが、時間的にも空間的にも一定の方向に留まらず、揺らいでいる状態を**スピン液体**と呼ばれている。特に量子揺らぎのためにスピンの固体にならず、絶対零度まで液体である場合、**量子スピン液体**と呼ばれる。

(注4) スピンキラリティ

電子のスピンは向きを持っているが、物質中で近接する3つの電子スピンの立体構造をとる場合、そのスピンが見込む立体角に、左手系ならプラス、右手系ならマイナスの符号を掛けたものをスピンキラリティと呼ぶ(図2A)。結晶構造のキラリティとは独立に、スピン空間に右手系と左手系の区別をもたらす。

(注5) アイスルール・スピンアイス

氷では、 H^+ イオンがパイロクロア格子構造(図4)の頂点の位置から少し変位する。その変位の向きは、下図に示すように2-in 2-outの構造をとりアイスルールと呼ばれる。これは共有する2つの正四面体の中心に位置する O^{2-} イオンのうち、どちらの向きに水素結合を形成するかによって決まり、その場合の数は各四面体ごとに6通りある。同様な状況は、下図の矢印を上下の向きしか向かないイジングスピンの置き換えたスピンアイスと呼ばれる磁性体にも現れる。すなわち、四面体の各頂点にその重心方向に向けたイジングスピンを配置し、それらの間に強磁性の相関を考えると、イジングスピンは上記の2-in 2-outの構造をとりアイスルールを満たす。ここでも、その場合の数は6通りで、最低エネルギーの状態がひとつに定まらないという意味で幾何学的フラストレーションが有効となっている。



7. 添付資料:

この資料と同じ内容は以下のURLにおいて pdf の形式でダウンロードが可能です。

<http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/Pr2Ir2O7-ZHE.pdf>

また、関連した内容は以下の URL においても公開しております。

http://satoru.issp.u-tokyo.ac.jp/research_Pr2Ir2O7.html#Pr2Ir2O73

この資料の内容を含んだ関連した詳しい解説を以下でダウンロードできます。

http://www.riken.jp/lab-www/cond-mat-theory/onoda/Pr2Ir2O7_j2.pdf

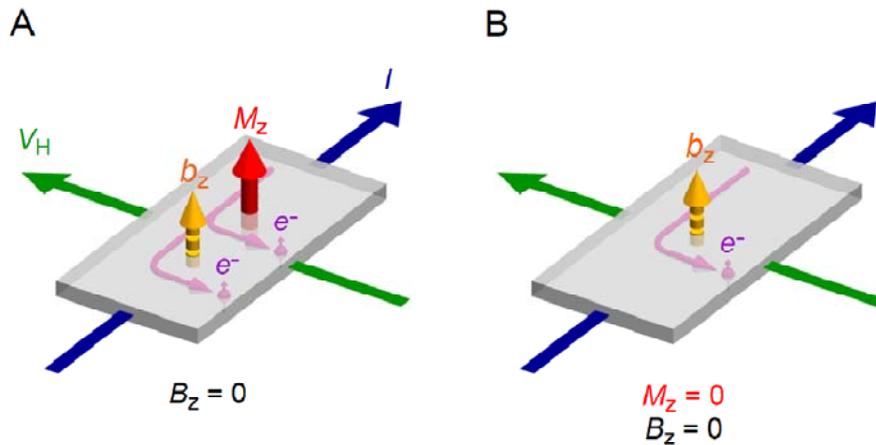


図1 (A) 強磁性体における異常ホール効果。自発磁化 M の発生とともにゼロ磁場 ($B = 0$) でホール効果が自発的に現れる。自発磁化は相対論的スピン軌道相互作用を通じて仮想的な内部磁場 b を生成し、電子の運動方向を電流に垂直方向に曲げる。(B) スピンの秩序を伴わないホール効果。ゼロ磁場 ($B = 0$) の自発磁化 M のない状態においてもホール効果が自発的に現れる。この場合、電子の運動を曲げる要因となる仮想的な内部磁場 b は、スピンの秩序化によってもたらされると考えられる。

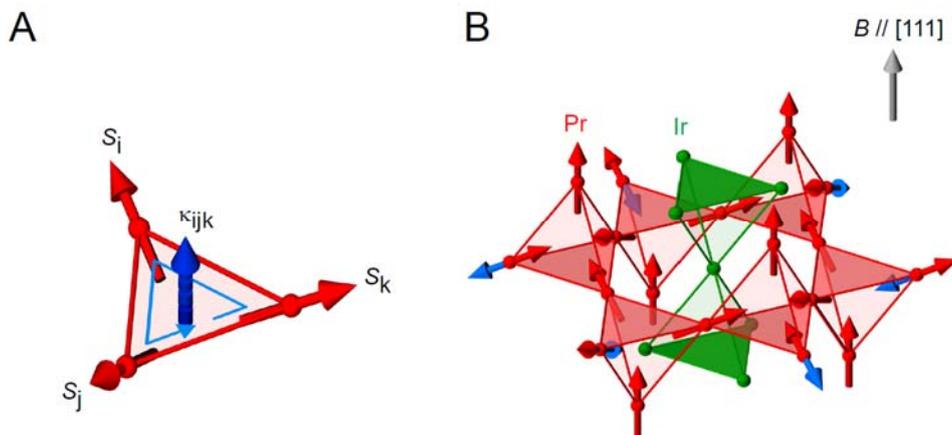


図2 A) 3つの隣接する非共面な配置をとるスピンによって、スカラースピンの秩序化 $\kappa_{ijk} = \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \times \mathbf{S}_k$ が定義される。B) $\text{Pr}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の結晶構造。Pr 原子 (赤丸) と Ir 原子 (緑丸) はそれぞれパイロクロア格子を組む。Pr モーメントは各四面体の重心方向に向くか、それとは反対方向に向くかの2通りの自由度しかもたないイジングスピンである。青と赤の矢印で示されるモーメントを持つ Pr スピンの向きは、零磁場では青色の矢印の向きが安定で、二つのスピンが内向き、二つのスピンが外向きという、所謂、アイスルールを満たす。[111]方向の磁場中ではメタ磁性転移を経て赤色の矢印の向きが安定化する。

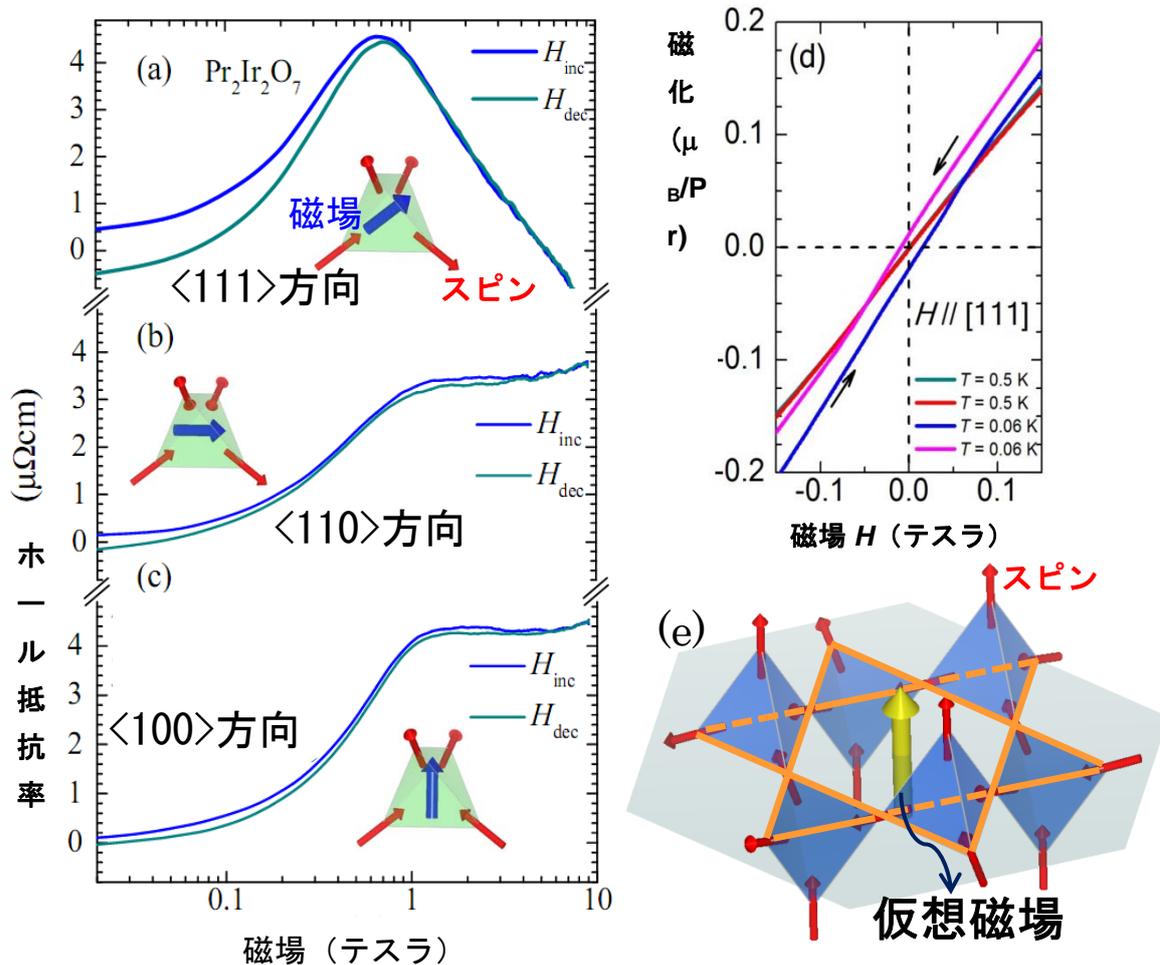


図3 (a,b,c) 0.5 K におけるホール抵抗率の磁場とその方位依存性。ゼロ磁場における自発成分をとみなすホール抵抗のヒステレシスは磁場を[111]方向にかけた場合に特に大きく現れる。(d) 磁化は同じ温度で測定しても全くヒステレシスが現れないことから、このホール効果は、磁化と磁場のいらない自発的なものであることを示す。同時に磁化のヒステレシスがなことは、ホール抵抗の符号の反転に必要な損失が従来の強磁性体のそれに比べて大幅に抑えられることを示す。(e) このホール効果に伴う自発的軌道電流は(111)のカゴメ面に主に現れており、これはスピン S の作るキラリティ、あるいはそれによる仮想磁場の主成分 K が[111]方向を向いていることを示す。