

資料

マルチフェロイクス（強誘電磁性体）へのレーザー照射による
スピン流生成・制御方法についての新理論を構築
— “レーザーで磁石をひねる” 超高速スピントロニクスの新機構の提案—

茨城大学理学部の佐藤 正寛 准教授、ジュネーブ大学（スイス）の高吉 慎太郎 博士、マックスプランク研究所（ドイツ）の岡 隆史 博士（同研究所グループリーダー）の研究グループは、強誘電性と強磁性を同時に有するマルチフェロイック磁性体にレーザーを照射し、ピコ（ 10^{-12} ）秒という超高速の早さでスピン秩序をひねる方法を理論的に提案しました。それによって得られるスパイラル状態を使うことで、スピン流を誘起することができます。

スピン流は、次世代電子技術の有望な分野として注目されているスピントロニクスにおける最も重要な概念のひとつです。本研究の予言は、スピン流の新たな生成方法を提案するものとして、今後の実験等による研究が期待されます。

今回の成果は、Physical Review Letters のオンライン版に、2016年9月28日に掲載されました。

固体結晶の巨視的な性質は、一般にその中に含まれる莫大な数の電子が担っています。例えば、固体中の電子が微小な電場で流れやすい状況であればその固体は金属であり、逆に何らかの理由で電場を印加しても電子が流れにくい場合は絶縁体となります。また、絶縁体についても、多様な性質に応じてそれらを分類することが出来ます。

電子の重要な属性として、電荷とスピン（電子自体が N 極と S 極をもつ磁石の性質を持っており、それをスピンと呼ぶ）があります。絶縁体の中で、電場を印加すると負電荷をもつ電子が正電荷のイオンの位置からずれやすい（電気分極が発生する）物質は、誘電体と呼ばれます。一方、磁場の印加により、電子スピンの協調して応答する物質を磁性体と呼びます【解説 1】。

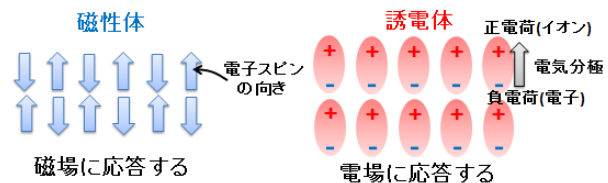
それに対し、近年、誘電体と磁性体の性質を同時に有する物質群が注目されており、複数（マルチ）個の強い（フェロ）秩序を有することから「マルチフェロイクス」と呼ばれ、その豊かな物性が精力的に研究されています。標準的な誘電体や磁性体がそれぞれ電場と磁場にのみ応答するのに対して、磁性と誘電性が強く結合しているマルチフェロイクスにおいては、電場と磁場の両方でその磁性を制御することが可能です。これは電場と磁場の両方の成分をもつレーザーに対して特別な応答を示すことを示唆します。研究グループでは、この誘電性と磁性の絡み合いに着目し、スピнкаイラリティ機構を持つマルチフェロイクス群に、テラヘルツ領域の円偏光レーザーを照射することで、ジャロシンスキー守谷相互作用（DM 相互作用）【解説 2】を誘導できることを理論的に明らかにしました【解説 3】。磁性体では通常隣接する電子スピンの向き（N 極から S 極に向かう矢印）が平行に揃

う傾向が強いのにに対し、DM 相互作用は、隣接電子スピン間の角度をひねらせようとします。磁性体の中の DM 相互作用の大きさは磁性体の微視的な性質で決定されており通常変化させることはできませんが、研究グループの予言では、レーザー照射によりマルチフェロイクスのスピン秩序をひねらせることが出来る【解説4】ことを示唆しています。

スピン秩序をひねらせることは、スピン流の生成と密接に結びついています。スピン流【解説5】は、近年精力的に研究が進められているスピントロニクス【解説6】における最も重要な概念のひとつであり、エレクトロニクスの主役である電流に代わる新しい情報伝達の担い手として、多様なスピン流生成方法が探求されています。本研究の予言は新しいスピン流生成方法の提案と解釈することもできます【解説7】。

【解説1】

磁性体と誘電体のイメージ図。磁性体では電子スピンが整列しており、誘電体では電子が陽イオンの位置からずれて微小な電気分極が発生し、その微小分極が整列している。

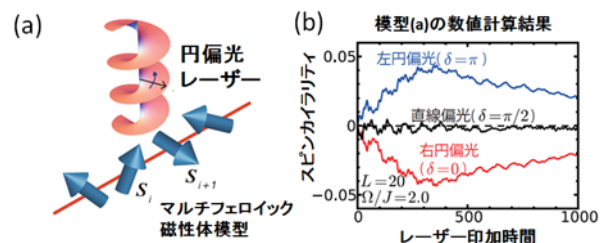


【解説2】

ジャロシンスキー守谷 (DM) 相互作用とは、磁性体のハミルトニアン (エネルギーを司る量) の中で、位置 r と r' に存在する電子スピン (電子スピンはベクトルで表される) S_r と $S_{r'}$ の外積で定義される相互作用である。数式では、 D を定数のベクトルとして、 $D \cdot (S_r \times S_{r'})$ と表現される。外積を最小または最大にするには、2つのスピン間の角度を 90 度にする必要がある。つまり DM 相互作用は隣接スピン間角度をひねらせる効果を持つ。

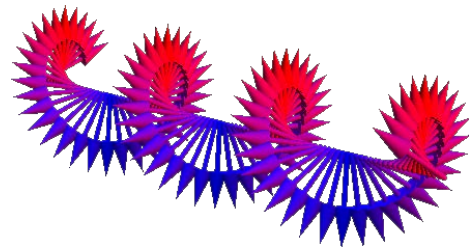
【解説3】

研究グループは、まず、スピнкаイラリティ機構を持つマルチフェロイクスに左(右)円偏光レーザーを印加すると正(負)符号の結合定数を持つ DM 相互作用が創発することを、レーザー周波数が高い領域において、解析的に証明した。さらに現実的な状況を踏まえて、有限周波数の円偏光レーザー中の簡単な 1 次元量子磁性体マルチフェロイクス模型(図(a))の量子力学的運動方程式を数値的に解析した。その結果、左(右)円偏光を印加した場合、正(負)のスピнкаイラリティの期待値 $\langle (S_i \times S_{i+1})_x \rangle$ が発生することを明らかにした(図(b))。レーザーによる正(負)のカイラリティの発生は、解析的な予言と完全に合致する結果である。



【解説 4】

DM 相互作用により生成されるスパイラルスピン秩序状態のイメージ図。各矢印は磁性結晶の各イオンの位置に住む電子のスピンの向き。通常の磁性体では【解説 1】のように隣り合うスピンの向きが平行に揃うが、DM 相互作用の存在下では、右図のようにスピン秩序はひねられる。



【解説 5】

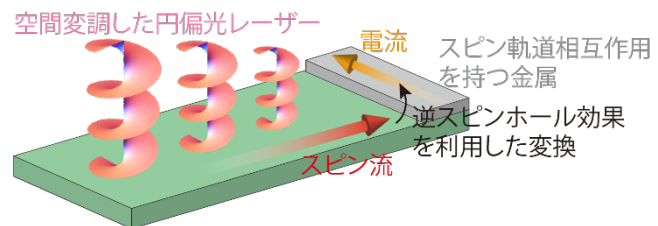
個々の電子は電荷とスピンという属性をもつ。多数の電子が一方向に流れれば、これは電荷の流れであり、電流と呼ばれる。一方、多数の電子のスピンがある方向に揃ったまま流れれば、電荷の他にスピンも運ばれていることになり、これをスピン流と呼ぶ。

【解説 6】

電子の電荷の流れ—すなわち電流—を利用して効率的かつ高速な情報伝達・処理方法を目指す学問をエレクトロニクス(電子工学)と呼ぶ。エレクトロニクスの知識に加えて、電子のスピン自由度も活用してより高性能の情報処理方法を目指す学問分野をスピントロニクスと呼ぶ。

【解説 7】

レーザーが誘起する DM 相互作用によりスピン流を発生させる実験セットアップ。スピン流を生成するにはレーザー強度を空間変調させる必要があり、これは近年発展しているメタマテリアルによるプラズモニクス技術で実現可能と考えられる。



◆ 発表論文の情報

<論文タイトル>

Laser-Driven Multiferroics and Ultrafast Spin Current Generation

<著者名>

Masahiro Sato, Shintaro Takayoshi, and Takashi Oka

<雑誌名>

Physical Review Letters

<掲載日>

2016年9月28日オンライン掲載