

資料

光渦レーザーを磁性体に超高速でプリントする方法を提案 —新しい光源・光渦を電子物性制御に応用 今後の実験研究の発展に期待—

茨城大学理学部の佐藤 正寛 准教授と東京大学大学院の大学院生で物性研究所所属の藤田 浩之 氏の研究グループは、トポロジカルなナノスピン欠陥が安定に生存するカイラル磁性体薄膜に、軌道角運動量を持つ（ひねり構造を持つ）レーザー光（光渦）を照射することで、ピコ（ 10^{-12} ）秒からナノ（ 10^{-9} ）秒という超高速で、スキルミオンや複数のスキルミオンの結合状態といった多様なナノ欠陥を生成する方法を理論的に提案しました。

スキルミオンなどのトポロジカル磁気構造は次世代スピントロニクスにおける情報伝達の担い手として期待されており、その生成・制御方法が精力的に研究されています。また光渦は、軌道角運動量という新しい自由度を持つ光源として、その応用の可能性が近年精力的に探索されています。本研究は、光渦の科学と磁性・スピントロニクスを融合した新しい領域に位置するものであり、新しい光源である光渦を電子物性制御に応用する具体的な方法を提供しています。今後の実験研究の発展が期待されます。

今回の成果は、Physical Review B オンライン版の Editor's Suggestion に選出され、2017年2月16日に掲載されました。

近年、光渦と呼ばれる新しいレーザー光が広い周波数帯で実現しており、注目されています。位相が揃った（コヒーレントな）高強度の電磁波であるレーザー光は、身近な例ではレーザーポインタなど様々な分野で応用されています。通常のレーザー光（ガウシアンビーム）では、その伝搬方向と垂直な面での強度分布は、中心で最も高く、中心から離れるほど低下していきます。一方、ガウシアンビームとは異なる性質を持つ光渦【解説1】は、伝搬軸周りの軌道角運動量を持つレーザーであり、それ故に強度分布が中心軸上でゼロになる特異性を持ちます。したがって、光渦の強度分布は一般に多重リング構造となります。

新しい光源であるこの光渦の応用は、これまで多くの研究者によって考えられてきており、「強力な光渦を金属薄膜に照射し金属結晶を蒸発させ、強度の弱い中心部分に針（ニードル）構造を生成する」、「光渦をマイクロメートルスケールの微粒子に照射し、光渦の角運動量を微粒子に転写することで微粒子を回転させる」といった現象が実現しています。しかしながら、これまで光渦により固体電子物性を制御しようという試みはほとんど成されていませんでした。一方、通常のレーザー光を用いた磁性体の磁性制御の研究は、磁気光学やスピントロニクス【解説2】の観点から近年急速に発展しています。このような状況を踏まえ、本研究グループは、光渦の特徴を活かした新しい磁性制御の方法について理論的に考察しました。

光渦の強度分布はリング構造を持つため、光渦の照射対象としては、同様に円状の磁気構造がエネルギー的に安定に存在し得る磁性体が相応しいと考えられます。本研究グルー

プは、そのような対象として、スキルミオンと呼ばれるトポロジカル磁気欠陥【解説3】が実現する、カイラル磁性体薄膜【解説4】を選択しました。カイラル強磁性体及び反強磁性体における、スキルミオンをはじめとするトポロジカルに安定な磁気欠陥構造は、スピントロニクス分野において情報伝搬の為の新しいキャリアとして期待されており、理学だけでなく工学的な関心からも、その制御方法が精力的に研究されています。

ところが、カイラル磁性体の磁気欠陥と光渦との間には克服しなければならないミスマッチがあります。典型的なトポロジカル欠陥【解説3】の大きさは10-1000ナノメートルです。一方、光渦の焦点を絞る際の限界値はおおよそ光渦の波長で決まり、10-1000ナノメートルの波長に対応するのは紫外から可視光領域の光渦となります。しかしながら、そのような光の周波数は 10^{14-16}Hz 程度であり、磁性体のスピンの集団運動(スピン波など)の典型的な周波数であるテラヘルツ($\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$)からギガヘルツ($\text{GHz}=10^9\text{Hz}$)に比べると速すぎるため、紫外線や可視光の光渦の振動に磁性体の電子スピンは追いつけません。一方、 THz や GHz の光渦の波長はマイクロメートル以上の大きさを持つ為、スキルミオンに比べて大きすぎます。

そこで本グループは、このミスマッチの解決法の一つとして、紫外や可視光の光渦の熱の効果を考えました。すなわち、磁性体の低エネルギー励起は電子スピンによって形成されますが、紫外や可視光領域の高エネルギー光子を吸収する電子励起も必ず磁性体に存在します。その電子励起状態は超高速で様々な自由度に緩和し、電子スピンはそれを熱として感じるようになります。本研究では、光渦によってリング状に生成する熱の効果を考慮に入れて、光渦照射下のカイラル磁性体【解説5】の磁気ダイナミクスを、ランダウ・リフシッツ・ギルバード方程式によって微視的に解析しました。

解析の結果、スキルミオンと同程度のビーム径の高強度光渦をカイラル磁性体に照射することで、高い確率でスキルミオンやリング状の磁気欠陥(2個以上のスキルミオンまたはアンチ・スキルミオンの結合状態)【解説3】を、ピコ秒からナノ秒で超高速に生成できることを明らかにしました【図4】。これまで、主にカイラル磁性体金属において、電流によってスキルミオンを生成する方法が幾つか提案されてきましたが、本研究の提案は、金属と絶縁体の両方のタイプのカイラル磁性体に応用可能であり、かつ、スキルミオン以外のより複雑なトポロジカル磁気欠陥を生成する方法も提供しています。さらに、本グループは、この光渦の方法がカイラル「強」磁性体だけでなくカイラル「反」強磁性体にも適用できることを明らかにしました。

スキルミオンをはじめとするトポロジカルに安定なナノスピン構造は、次世代スピントロニクスの情報処理の省エネルギーキャリアとして有望視されています。また、紫外、可視光、 THz 領域を含む広い周波数帯において光渦の生成方法が発展又は確立しており、メタマテリアル技術の急速な発展に伴い光渦の制御技術は近年猛烈な勢いで進展しています。本研究の予言は、これら2つの著しい発展を遂げている分野の連結を図る新しい提案と言えます。

【解説 1】

光渦とは、軌道角運動量 L をもつ電磁波レーザーであり、円筒座標系におけるマックスウェル方程式の近似解として定義される。光渦は、スピン角運動量 S を持つ円偏光とは別の概念であり、光渦の全角運動量は $L+S$ で与えられる。通常の軌道角運動量を持たないレーザー（ガウシアンビーム）では、その伝搬方向と垂直な断面における電場強度分布は中心が最も強く、そこから動径方向に向かって単調に強度は減衰する。一方、軌道角運動量を持つ光渦では、軌道角運動量の存在により伝搬軸周りで定義される位相が軸周りで整数回だけ回転しており、その軸上で特異性を回避する為中心軸上の電場（または磁場）強度が常にゼロになる。この構造ゆえ、光渦はガウシアンビームとは異なりリング状の強度分布を持つ（図 1）。

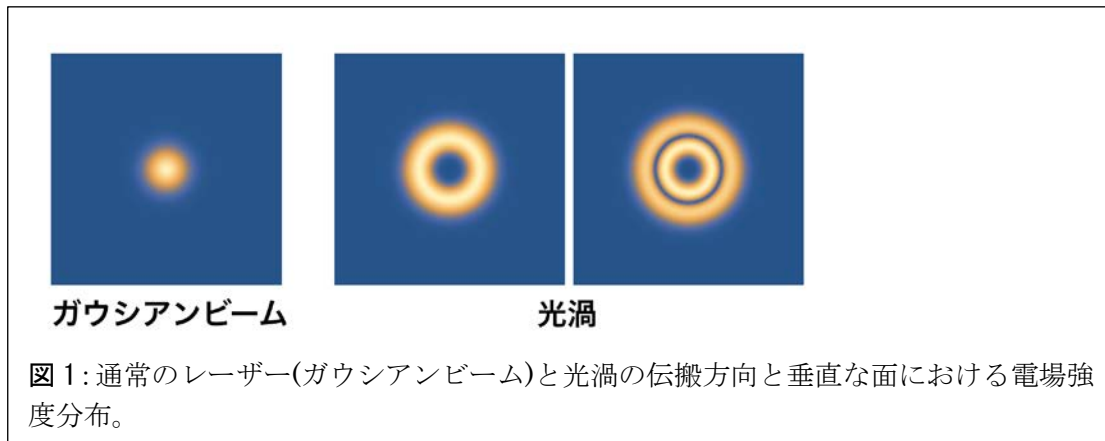


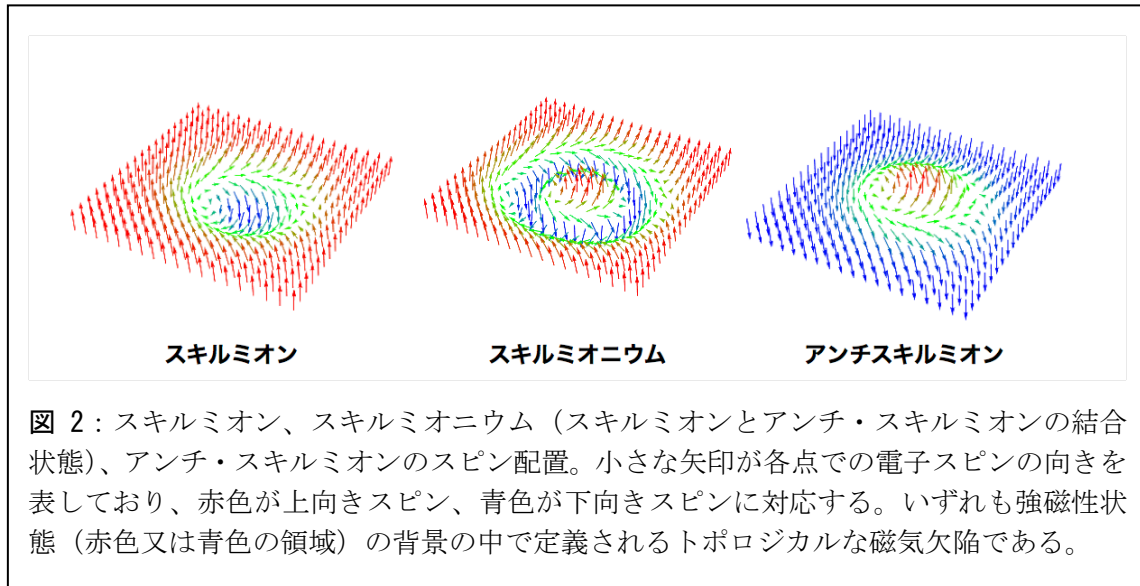
図 1: 通常のレーザー(ガウシアンビーム)と光渦の伝搬方向と垂直な面における電場強度分布。

【解説 2】

エレクトロニクス（電子工学）は、電荷の流れ（すなわち電流）を用いて高速情報処理方法の開発・制御を目指す学問である。スピントロニクスとは、エレクトロニクスの技術に加えて、電子スピンや固体中の素励起が持つ角運動量の自由度も巧みに活用することで、より高効率高性能高速の情報処理方法の構築を目指す学問と言える。スピントロニクスデバイスを構築する上で、熱・電流・光・音波などの様々な方法を用いて磁性を制御する新しい方法を確立することは、非常に重要である。本研究「光渦によるカイラル磁性体の磁気構造制御の研究」は光によるスピントロニクスの研究と見なすことが出来る。また、磁気光学は、光と磁性体の間の相互作用やそれで行き起こされる物理現象を探求する、長い歴史を持つ学問である。例えば、磁性体に光を照射した際に生じるファラデー効果やカー効果が、磁気光学で良く知られた研究題材である。我々の研究は磁気光学の新しい成果と見なすこともできる。

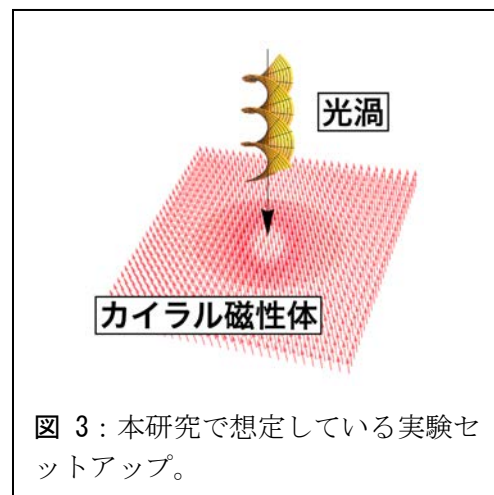
【解説 3】

磁性体では、トポロジカルな磁気欠陥が現れる場合がある。磁気欠陥とは、スピンの空間的周期構造（強磁性相、反強磁性相、らせん磁性相など）が実現する磁性体の中に現れる、局所的に磁気構造を乱す構造体を指している。磁気欠陥の磁気構造を滑らかに変形（連続変形）しても欠陥を取り除くことが出来ないとき、その磁気欠陥をトポロジカルな欠陥と呼ぶ。トポロジカルな欠陥は何らかのトポロジカル不変量で特徴づけすることができ、この値は連続変形の下で不変である。本研究でも登場する代表的なトポロジカル磁気欠陥のスキルミオン、アンチ・スキルミオン、スキルミオニウム（スキルミオンとアンチ・スキルミオンが合体した構造）を図 2 に示してある。スキルミオンはポントリャーギン指数と呼ばれるトポロジカル数で特徴付けることが出来る。スキルミオンとアンチ・スキルミオンのポントリャーギン指数は各々 1 と -1 である。



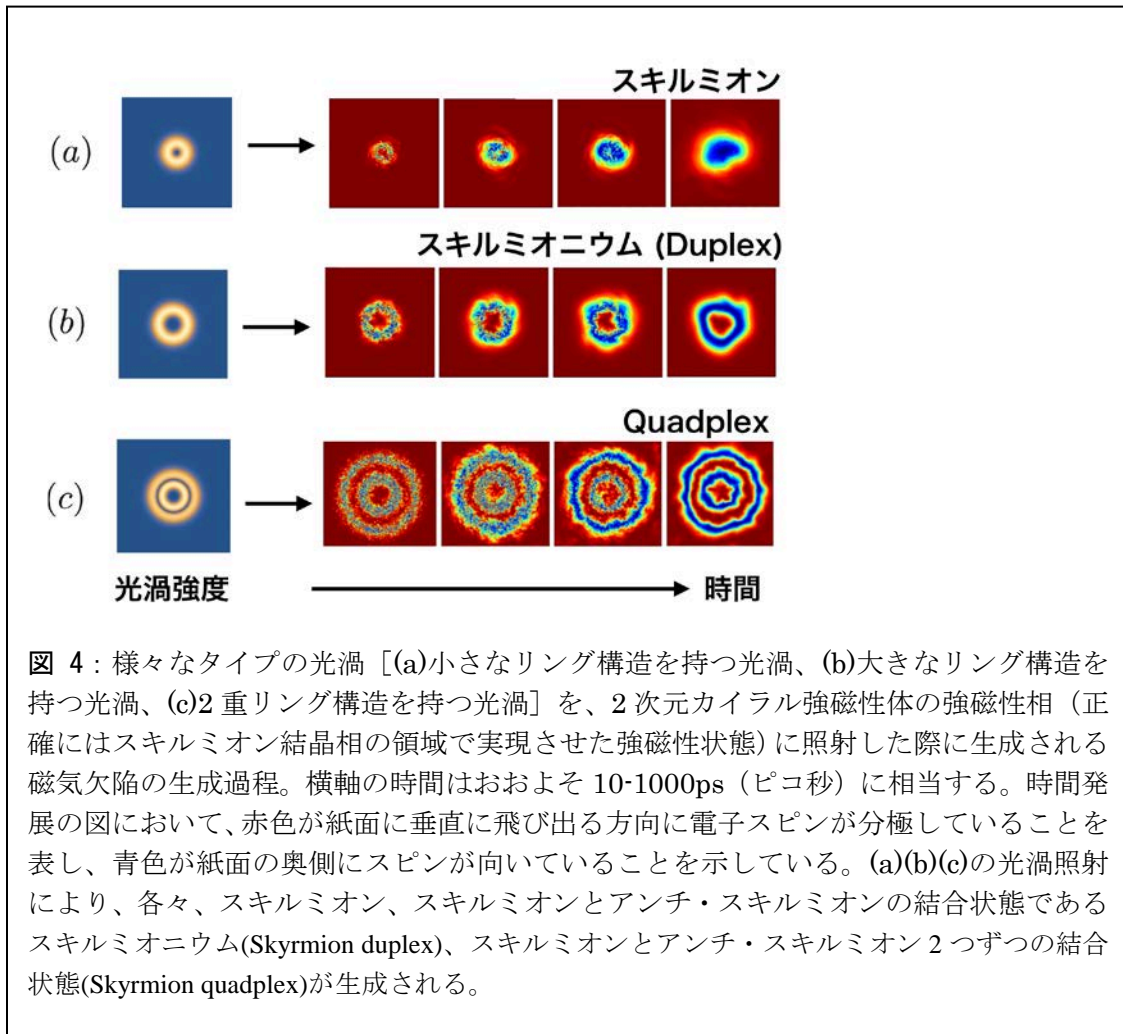
〔解説 5〕

本研究で考えている実験設定は図 3 で与えられる。リング状の強度分布を持つ光渦を 2 次元カイラル強磁性体に照射することで、磁性体にリング状の温度分布が生じ、それによりスكىルミオンやスكىルミオニウムをはじめとする多様な磁気欠陥が生成される。カイラル強磁性体薄膜に外部磁場を印加すると、磁場の増加とともに、らせん磁気秩序相、スكىルミオン結晶相、強磁性相が現れることが知られている。スكىルミオン結晶相では、多数のスكىルミオン (図 2) が三角格子を形成している。本研究では、できるだけスكىルミオンを含む磁気欠陥が生成されやすくする為に、スكىルミオン結晶相が真の熱平衡状態として実現する磁場領域において、準安定な強磁性状態を光渦の照射対象として選んでいる。



〔解説 4〕

カイラル磁性体とは、空間反転 (パリティ) 対称性が破れた、キラルな結晶構造をもつ磁性体である。右手系と左手系が定義できる結晶がキラルな結晶の典型例である。カイラル磁性体では、空間反転対称性の破れに伴い、しばしば隣接する電子スピン間にジャロシンスキー守谷 (DM) 相互作用が発生する。電子スピン間の標準的な交換相互作用は 2 つのスピンを平行 (または反平行) に揃えようとするが、DM 相互作用は 2 つのスピン間の角度を 90 度にしようとする。交換相互作用と DM 相互作用の競合の結果、カイラル磁性体では、しばしばスピンの向きが滑らかに変化する、トポロジカルな磁気欠陥がエネルギー的に安定に存在しやすい傾向が生じる。スكىルミオンやスكىルミオニウムは、あるクラスの 2 次元カイラル磁性体でエネルギー的に安定な欠陥構造である。



◆ 発表論文の情報

<論文タイトル>

Ultrafast generation of skyrmionic defects with vortex beams:

Printing laser profiles on magnets

<著者名>

Hiroyuki Fujita, and Masahiro Sato

<雑誌名>

Physical Review B (Editor's Suggestion)

<掲載日>

2017年2月16日オンライン掲載