

らせんに巻いた電子スピンによる巨大な光のアイソレーター効果の発見
-新しい原理によるギガヘルツ・テラヘルツ帯電磁波制御素子の実証-

1. 発表者：

- 木林 駿介（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 修士課程（当時））
高橋 陽太郎（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 特任准教授・理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー）
関 真一郎（理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー・科学技術振興機構 さきがけ研究者）
十倉 好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長・東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆らせん型のスピン配列を持つ磁性体中で、光の進行方向に依存して吸収係数が最大400%変化する現象を発見
- ◆電子スピンの集団運動が、光の電場と磁場の両方に応答することを利用したギガヘルツ・テラヘルツ帯のアイソレーターの新原理を実証
- ◆ギガヘルツ・テラヘルツ帯の電磁波整流デバイス、制御素子の実現に道筋

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の高橋陽太郎 特任准教授、木林駿介大学院生（当時）、十倉好紀 教授および理化学研究所創発物性科学研究センターの関真一郎 ユニットリーダーらの研究グループは、物質中に生じるらせん型に配列した電子スピンの光の進行する向きに依存して光吸収を大きく変化させる機能性を有していることを発見しました。

研究グループは、らせん型に電子スピンの配列したとき、ギガヘルツからテラヘルツの周波数帯（注1）にエレクトロマグノン（注2）と呼ばれるスピンの集団運動が現れることを発見しました。さらに、らせん型のスピン配列が持つ「磁性」と「カイラリティ」という二つの性質によって、エレクトロマグノンが巨大な磁気カイラル効果（注3）を示すことを明らかにしました。磁気カイラル効果によって、光の進行方向に依存して吸収係数を最大400%変化させることに成功しました。

将来の大容量通信等さまざまな応用が期待されている高周波のギガヘルツ帯からテラヘルツ帯では、光（電磁波）の制御のための技術開発が行われています。この結果はアイソレーター（注4）や、物質の光吸収を外部の電場や磁場で操作可能な光（電磁波）制御素子としての展開が期待できます。

4. 発表内容：

<研究の背景>

カイラリティ（キラリティ）と呼ばれる性質は、右手と左手のように鏡像を重ね合わせることができない対称性の関係を指し、タンパク質や糖類、水晶など身の回りに一般的に見られます。通常、物質のカイラリティは物質の原子配列によって決まります。一方、電子スピンは物質の磁性の源であり、磁石としての性質だけでなく記録媒体、携帯電話などに使われているア

アイソレーター等、現在のエレクトロニクスの基盤の一つとして利用されています。物質の性質を対称性によって予測すると、物質がこの二つの性質、「カイラリティ」と「磁性」をあわせ持つ時、磁気カイラル効果（注2）と呼ばれる光学現象の存在が期待できます。磁気カイラル効果は、図2のような光の進行方向に依存して物質の光応答が変化する方向2色性という特殊な現象を引き起こします。更に光が物質によって吸収される方向は、カイラリティ（右手系と左手系）の入れ替えや、磁化（磁石の向き）によっても制御することができます。このため、電磁波や光の送受信の信号の干渉を防ぐアイソレーター、透過方向が簡単に制御できる素子など、新しい原理に基づく電磁波制御デバイスとして幅広い応用が期待できます。しかし、これまで磁気カイラル効果を示す物質は特定の原子配列を持つ物質に限定され、その効果自体も非常に小さいものでした。磁気カイラル効果を電磁波制御や光学素子に用いることを考えた時、新しい磁気カイラル効果のメカニズムを開拓することが期待されていました。

<研究内容>

物質中の原子やスピンなどが規則的に整列している時、それらが同じ周期（リズム）で動く集団運動が、物質の性質を決める重要な役割を担っています。スピンの集団運動はスピン波、マグノン（注2）などと呼ばれ、ギガヘルツからテラヘルツの周波数帯にあらわれます。研究グループは、らせん型スピン配列を持つ磁性体中で、スピンの集団運動が磁気カイラル効果を示すことを明らかにしました。

物質中の磁石の源である電子スピンは、磁石の向きと同じく図1のように矢印で表すことができます。カイラリティを示す構造として代表的ならせん構造と同じように、スピンの向きがらせん型に並ぶ時にも右巻き、左巻きの二通りの配列が存在します。らせん型に配列したスピンを用いると、原子配列によらず多くの物質にカイラリティを持たせることが可能です。今回、スピンのみに由来した磁気カイラル効果の実現を目指し、その効果が最も期待できるスピンの集団運動の光応答でその効果を検証しました。実験では、らせん型のスピン配列を持つ物質である $\text{CuFe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{O}_2$ ($x=0.035$ 、Cu：銅、Fe：鉄、Ga：ガリウム、O：酸素) を用いて光応答を調べました。

磁気カイラル効果は電気磁気光学効果と呼ばれる現象の一つで、その特徴として（非相反）方向2色性と呼ばれる現象を引き起こします。これは図2にあるように、互いに対向して進む光に対して物質が異なる光学応答を示す現象であり、物質そのものがアイソレーターと呼ばれる素子と同じ働きをします。電子スピンの集団運動であるマグノンの光学応答を調べると、図3のように光の進行方向に強く依存した光吸収が観測されました。その大きさは、光の吸収係数が最大で400%変化するという巨大なものです。この共鳴における方向2色性の存在は、マグノンが通常の磁気応答に加えて光の電場成分にも応答していることを意味しています。電場応答と磁場応答をあわせ持つマグノンはエレクトロマグノンと呼ばれ近年大きな注目を集めています。エレクトロマグノンにおいてこのような巨大な方向2色性が実現しているのは、カイラリティと磁性が共にらせん型のスピン配列に由来しているためです。

更に磁気カイラル効果の面白い点は、光が透過する方向と吸収する方向が、物質の磁化の方向、もしくは図1のようなカイラリティ（右巻き、左巻き）の反転で、入れ替わるということです。実際にスピン配列のカイラリティを右巻きと左巻きで入れ替えると、光が吸収される方向が入れ替わることを確認しました。また外部磁場によって磁化の向きを反転することで、方向2色性が反転することも確認しました。これは、磁気カイラル効果による光応答が高い操作性を持つこと示しています。

<展望>

今回の研究によって、物質がらせん型のスピン配列というありふれた磁気構造を持つ時には、巨大な磁気カイラル効果がスピンの集団運動（エレクトロマグノン）に現れるという一般的な性質を明らかにしました。これは、これまで特定の原子配列でのみ実現可能と考えられてきた磁気カイラル効果が広く存在することを示す結果です。

エレクトロマグノンの周波数はギガヘルツからテラヘルツと呼ばれる、高周波の電磁波領域に位置しています。この帯域は、現在よりも多くの情報のやり取りが可能な大容量通信、新しい計測技術の開発などさまざまな応用が期待されていますが、そこで使用される電磁波の制御技術の開発は発展途上にあります。エレクトロマグノンの磁気カイラル効果は、新しい原理に基づくギガヘルツ帯からテラヘルツ帯でのアイソレーターとしての展開が期待できます。特に外部の磁場や、カイラリティの制御によって光や電磁波の進行方向を制御できることから、操作性の高い素子となり得ます。また逆に、エレクトロマグノン共鳴を用いた光によるカイラリティや磁化の制御といった新しい物質制御の可能性も期待できることから、今後の幅広い研究・応用へ展開が可能です。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」（オンライン版 8月1日付）

論文タイトル：Magnetochiral dichroism resonant with electromagnons in a helimagnet

著者：S. Kibayashi, Y. Takahashi*, S. Seki and Y. Tokura

DOI：10.1038/ncomms5583

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 特任准教授

高橋 陽太郎（たかはしようたろう）

7. 用語解説：

（注1）： ギガヘルツからテラヘルツの周波数帯

光や電波は、振動する電場と磁場からできている電磁波の一種です。一秒間に電場や磁場が振動する回数である周波数によって、その性質は大きく異なります。ギガヘルツ帯の電磁波は、携帯電話などの通信や気象レーダーなどさまざまな場所で使用されています。しかし、将来の更なる大容量通信の実現には、高周波化が必要とされています。一方、ギガヘルツ帯よりも周波数の高いテラヘルツ帯は研究レベルにおいてもアクセスが難しかったため未踏の領域とも呼ばれていました。しかし現在では、テラヘルツ帯の電磁波を使うことで大容量通信、セキュリティシステム、バイオセンシングなど多くの応用が期待できることから、大きな注目を集めています。

（注2）エレクトロマグノン、マグノン

量子力学によれば、あらゆる振動は仮想的な粒子（準粒子）として取り扱うことが可能です。磁性体中の磁化の振動に関する準粒子がマグノンになります。通常のマグノンは振動磁場のみに応答しますが、振動電場に応答するマグノンはエレクトロマグノンと呼ばれます。

（注3）磁気カイラル効果

物理学では対称性を用いることで物質のさまざまな性質を予測することができます。物質にカイラリティと磁性が存在したとき、時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れます。この結果、光の進行方向が反転した時に、物質中での光の吸収係数が変化する非常に特異な現象が起こります。これを磁気カイラル効果といい、このような現象は非相反という言葉で表されるため、非相反方向2色性とも呼ばれます。

(注4) アイソレーター

アイソレーターとは光（電磁波）を一方向にのみ通す素子をさします。レーザー光線を使う時には、光が逆方向に戻るのを防ぐために使用されます。また情報通信で電磁波を送信する時には、電波の逆流を防ぎ信号の質を保つために使用されています。通常物質では光の吸収率は光の進行方向を反転しても変わりません。このため、現在使用されているアイソレーターではファラデー効果と呼ばれる現象が使われています。一方、今回の研究では物質そのものが光の進行方向に依存した光吸収を示すアイソレーター効果を実現しました。この新しい原理を用いると、デバイスの簡素化、高効率化が期待できます。

8. 添付資料：

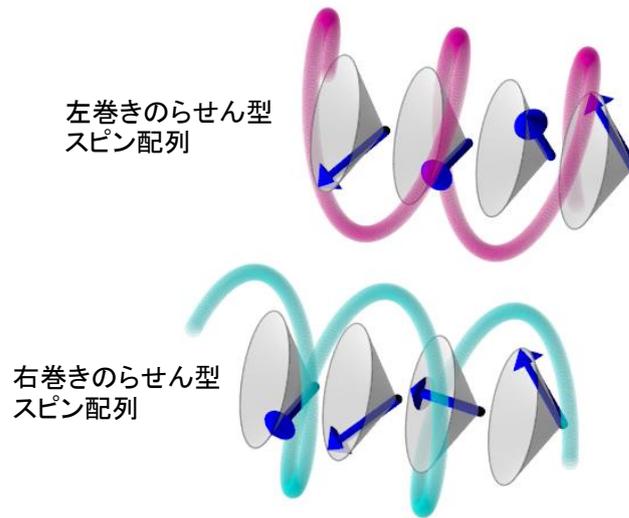


図1：らせん型に配列した電子スピン

矢印で示された電子スピンの向きがらせん型に配列するとき、らせん型の構造と同じように右巻きらせんと左巻きらせんという異なるカイラリティを持つ状態が存在する。

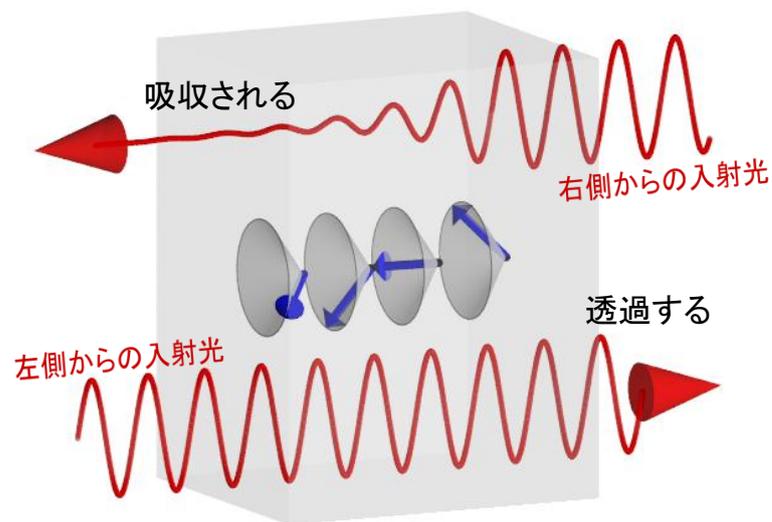


図2：磁気カイラル効果による方向2色性の模式図

磁気カイラル効果によって起こる方向2色性のために、物質中を互いに向き合って進む光には、異なる光学応答が観測される。例えば左右から同じように光が入射しても、右から入射した光は吸収されるが、左から入射した光はそのまま透過する。

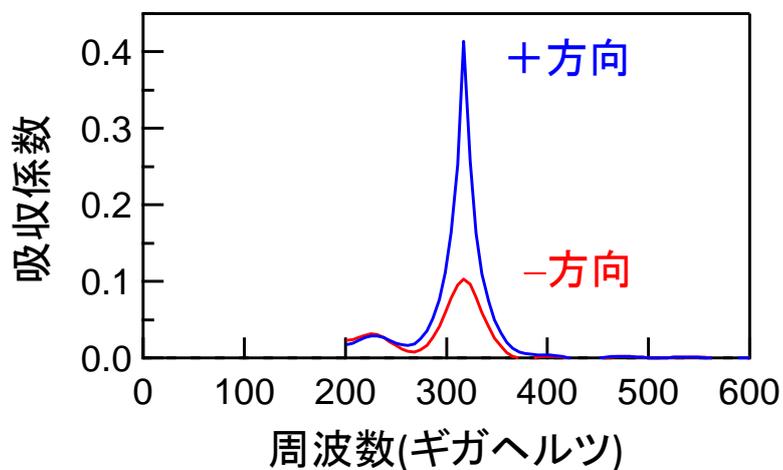


図3：エレクトロマグノンの共鳴における方向2色性のスペクトル
320ギガヘルツ付近の吸収係数が光の進行方向（+方向、-方向）によって大きく変化している。ここでは磁気カイラル効果によって400%にも達する巨大な方向2色性を実現した。