

令和5年3月10日

報道機関 各位

中央大学

励起光でスピン流と電流を見分ける方法を発見 時間の進み方を逆転した時の性質と励起光の回る向きを利用する新しい方法

<概要>

中央大学の荒川直也 理工学研究所専任研究員と米満賢治 理工学部教授は、金属に円偏光した光（励起光）をあてた時のスピホール効果と異常ホール効果の理論を構築し、スピホール効果で生成するスピン流と異常ホール効果で生成する電流では、円偏光した励起光の回る向きを変えた時の振る舞い（ヘリシティ依存性）が異なることを解明しました。そして、この違いは、時間の進み方を逆転した時の、電流とスピン流の性質の違いに由来することを特定しました。

本成果は2023年3月10日に「Communications Physics」でオンライン公開されます。

<発表のポイント>

- 円偏光した励起光の回る向きを変えた時の振る舞い（ヘリシティ依存性）で、異常ホール効果で生成する電流とスピホール効果で生成するスピン流を区別できることを発見した。
- 上記の違いは、電流とスピン流の時間の進み方を逆転した時の性質（時間反転対称性）の違いに由来する、普遍的な性質であることを解明した。
- 円偏光した励起光の回る向き（ヘリシティ）を使うことで、スピン流のみまたは電流のみを利用できる。

<研究の背景>

金属に光をあてると、様々な非平衡量子状態^{注1)}を実現できます。例えば、円偏光^{注2)}した励起光^{注3)}を金属にあてることで、金属を磁石にしたり、異常ホール効果を誘起したりできます。異常ホール効果とは、磁場がなくても、外部からかけた電場と垂直な方向に電流を生成する輸送現象です。

また、光をあてた金属では、励起光の振動数や振幅、偏光を変えることで、非平衡量子状態を制御できます。その最大のメリットは、物質の種類を変えることなく、励起光を変調するだけで、状態を変えられる点です。

これまでの研究では、光をあてた金属のスピホール効果が未開拓でした。スピホール効果とは、外部からかけた電場に垂直な方向にスピン流^{注4)}を生成する輸送現象です。スピン流は、電流を使うエレクトロニクスとは本質的に異なる学理を持つだけでなく、次世代メモリや発熱によるロスの少ない熱電変換素子などの応用の可能性を持っています。もし、光をあてた金属のスピホール効果を励起光で制御する方法を確立できれば、励起光の変調だけでスピン流を制御できるだけでなく、物質を変えずにスピン流を利用した応用への道を切り拓くことができます。しかし、光を当てた金属のスピホール効果の性質と異常ホール効果の性質の相違点が未解明でした。

＜研究の内容と成果＞

本研究では、円偏光した光をあてた金属のスピホール効果を開拓し、異常ホール効果との相違点の解明を目指しました。具体的には、金属として Sr_2RuO_4 の有効モデル^{注5)} を使い、円偏光した励起光をあてた場合のスピホール効果と異常ホール効果（図1）の理論を構築し、それらが励起光の振動数や振幅、ヘリシティ^{注6)} を変えた場合にどのように変わるのかを理論的に調べました。

研究の結果、円偏光した励起光のヘリシティを変えると、スピホール効果で誘起されるスピンの向きは変わらずに保たれ、異常ホール効果で誘起される電流の向きは反転することがわかりました。このヘリシティ依存性は光の振動数や振幅を変えても成立することもわかりました。

さらに、スピ流と電流の異なるヘリシティ依存性が時間反転対称性^{注7)} の違いに由来していることを解明しました。スピ流は時間反転で向きが不変に保たれ、電流は向きが反転します（図2）。また、右回り円偏光を時間反転すると左回り円偏光になるので、時間反転で円偏光のヘリシティが変わります。それらの事実を踏まえ、スピ流と電流の時間反転対称性の違いが上記のヘリシティ依存性の違いの原因であると特定しました。

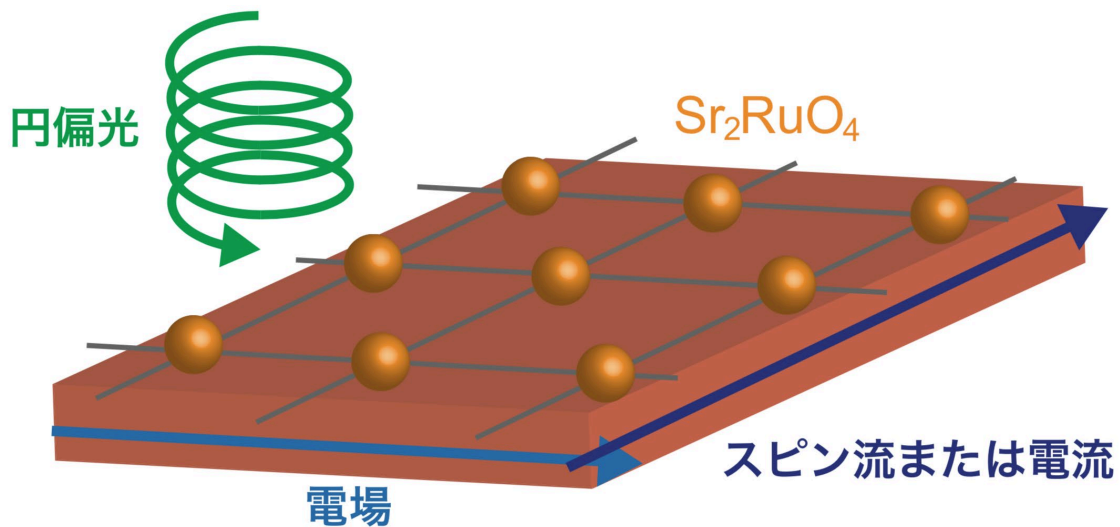


図1. 円偏光した光をあてた Sr_2RuO_4 のスピホール効果と異常ホール効果の概念図。スピホール効果では電場に垂直なスピ流が生成され、異常ホール効果では電場に垂直な電流が生成される。

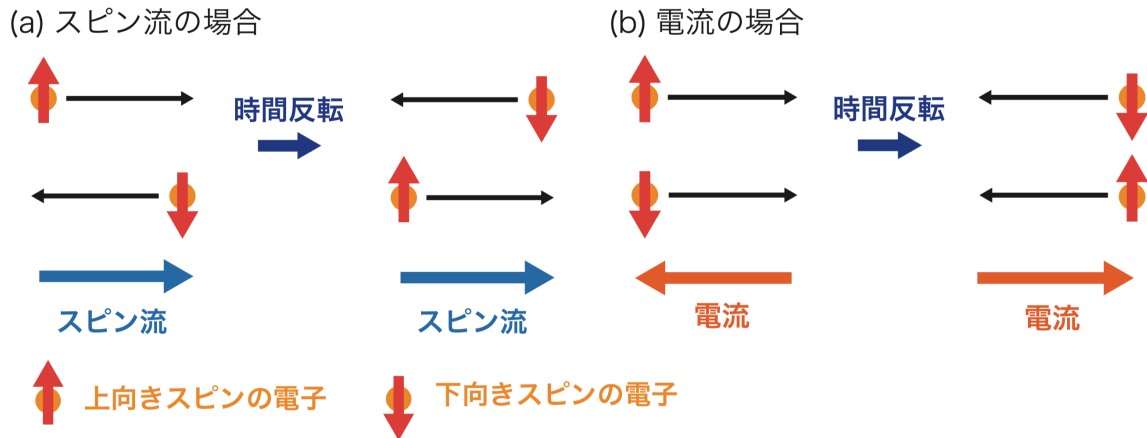


図2. 時間反転した場合のスピン流と電流の変化。スピン流は上向きスピンの電子の流れと下向きスピンの電子の流れの差に比例。電流はそれらの流れの和に比例。時間反転すると、スピン流は不変に保たれ、電流は反転する。

<今後の展望>

今回、金属のスピンホール効果によるスピン流と異常ホール効果による電流が、励起光のヘリシティを変えたときの流れの向きの変わり方で区別できることがわかりました。この性質は時間反転対称性に由来する普遍的な性質であるため、今回対象とした Sr_2RuO_4 だけでなく、他の金属でも成立する性質です。また、スピンホール効果や異常ホール効果だけでなく、その他の輸送現象でスピン流や電流を生成した場合にそれらが励起光の回る向きによってどう変わるか（光のヘリシティ依存性）で区別できる可能性が示唆されます。

本研究の成果により、光のヘリシティを利用することで、電流はゼロでスピン流だけが流れる状況やスピン流がゼロで電流だけが流れるような状況を実現できる可能性があります。それを利用することで、スピン流や電流の片方だけが存在する状況で実現できる新しい現象の発見や応用への発展につながると期待できます。

<用語解説>

注1) 非平衡量子状態

量子力学で記述される非平衡状態。平衡状態は時間変化が全くない状態なのに対し、非平衡状態は時間変化がある状態。例えば、机の上に置いた鉛筆は平衡状態、空の雲は非平衡状態。

注2) 円偏光

偏光の一種。光の進行方向に対し、ネジの歯車のように右回りもしくは左回りに回転しながら進む光。右回り円偏光と左回り円偏光がある。

注3) 励起光

金属などの物質の電子を励起させて、電子の状態を変化させるためにあてる光。パンプ光とも呼ばれる。励起光で変化させた状態を調べるために使われるプローブ光とは別のもの。

注4) スピン流

スピン角運動量の流れ。スピン角運動量は、通常の電子の回転とは異なる、電子の内部自由度の回転に由来する量。

注5) 有効モデル

物質の電子状態を再現するモデル。物質の電子状態とは、その物質中で電子がどのような状態を取るかを表すもの。

注6) ヘリシティ

円偏光の回る向き of 自由度。光の進行方向に対して右ネジの向きに回るか左ネジ向きに回るかの自由度。ヘリシティを変えることは、右回り円偏光から左回り円偏光（もしくはその逆）に変えることに対応。

注7) 時間反転対称性

時間の進み方を逆転（時間反転）した時の性質。時間反転して元と同じに戻る場合は「時間反転対称性が保たれている」と言い、元に戻らない場合は「時間反転対称性が破れている」と言う。

<研究支援>

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST 「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」における No. JPMJCR1901、科学研究費補助金 No. JP22K03532、No. JP19K14664、No. 16K05459、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」における No. JP-MXS0118067426 などの支援を受けて行われました。

<論文情報>

- 雑誌名 : Communications Physics
- 論文タイトル: Symmetry-protected difference between spin Hall and anomalous Hall effects of a periodically driven multiorbital metal (周期的に駆動された多軌道金属のスピンホール効果と異常ホール効果の対称性に保護された相違点)
- 著者 : Naoya Arakawa, Kenji Yonemitsu (荒川直也、米満賢治)
- DOI 番号 : 10. 1038/s42005-023-01153-9
- URL : <https://www.nature.com/articles/s42005-023-01153-9>

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

荒川 直也 (あらかわ なおや)
中央大学理工学研究所 専任研究員
E-mail: arakawa@phys.chuo-u.ac.jp

米満 賢治 (よねみつ けんじ)
中央大学理工学部 教授
E-mail: kxy@phys.chuo-u.ac.jp
電話番号 : 03-3817-1772

<報道に関すること>

中央大学広報室
E-mail: kk-grp@g.chuo-u.ac.jp