

# 光の軌道角運動量を擬似プラズモンに転写することに成功

## —光渦と物質の相互作用に関する新発見—

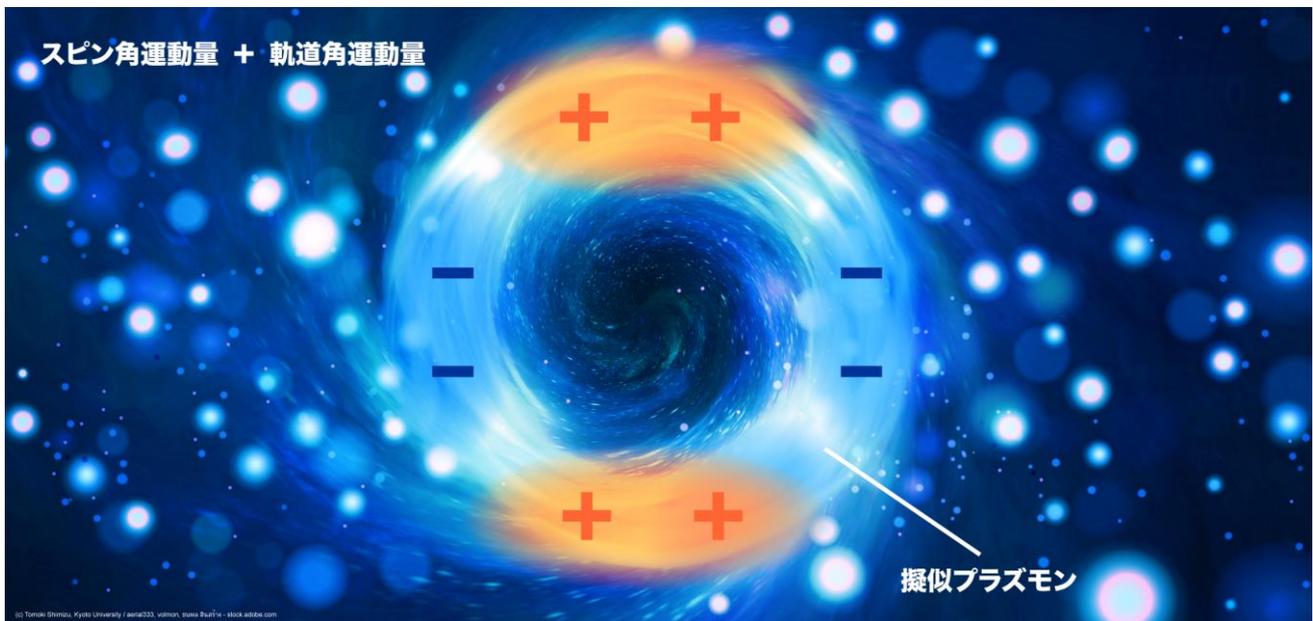
### 概要

京都大学大学院理学研究科 田中耕一郎 教授（高等研究院物質—細胞統合システム拠点（iCeMS=アイセムス）連携主任研究者）、有川敬 理学研究科助教、平岡友基 同博士課程学生、森本祥平 同修士課程学生（研究当時）らの研究グループは、カナダ École de technologie supérieure François Blanchard 教授、北海道大学 電子科学研究所 笹木敬司 教授らとの共同研究で、光の軌道角運動量を擬似プラズモン（電子の集団運動）に転写することに成功しました。

光が偏光回転に由来するスピン角運動量を持つことは古くから知られており、光と物質の相互作用においてやり取りされることは良く知られています。近年の研究によって光は波面の回転に由来する軌道角運動量を持つことが明らかになりましたが、物質とのやり取りに関しては未解明な点が多いのが現状です。

本研究グループは、テラヘルツ領域の光と波長以下の溝を持つ金属円盤（メタマテリアル）を用い、光の軌道角運動量が擬似プラズモンに転写される様子を可視化しました。軌道角運動量は光の新しい自由度として光通信や量子情報分野での利用が検討されており、本成果により新しい光科学技術の発展が期待されます。

本成果は、2020年6月13日に米国の国際学術誌「Science Advances」にオンライン掲載されました。



本研究のイメージ図（©清水智樹／京都大学）

## 1. 背景

光が偏光回転に由来するスピン角運動量を持つことは 100 年以上前から知られていました。それに加えて、光が軌道角運動量を持つことが解ったのは比較的最近で、1992 年のことです。光の軌道角運動量は、電磁場振動の位相の回転に由来しており、軌道角運動量を持つ光を光渦と呼びます。スピン角運動量が左右の円偏光に対応した $\pm\hbar$ の2値だけしか取れないのに対して、軌道角運動量は $l\hbar$  ( $l$ は整数)と理論的には無限の値をとることができるのが大きな特徴です。そのため、新しい光の自由度として大きな注目を浴びており、世界中で様々な研究が行われています。

その中で物理学的に興味を持たれているのは、光渦と物質の相互作用です。角運動量の存在は光と物質の相互作用の仕方を大きく左右します。例えば円偏光を用いると、スピン角運動量を物質に与えることによってマクロな物体を自転運動させることができます。それに対して、光渦では軌道角運動量を物質に与えることで公転運動を誘起することが知られています。また、より小さな電子との相互作用においても角運動量のやり取りは発生し、電子の量子力学的状態を変化させることができます。2016 年には単一原子を用いた研究により、電子に光渦の軌道角運動量が転写されることが実験的に証明されました。次の関心は固体物質中の電子との軌道角運動量のやり取りに関する法則ですが、未解明な点が多いのが現状です。

## 2. 研究手法・成果

本研究グループは、金属中の電子の集団運動であるプラズモンに着目しました。金属円盤のプラズモンへの軌道角運動量転写は理論的には予測されていました。しかし、その様子を可視化することは実験的には困難でした。そこで本研究グループは、テラヘルツ領域の近接場イメージング技術を用いることでこの問題を解決しました。また、通常は近赤外域に存在するプラズモンをテラヘルツ周波数領域に移動させるために、金属円盤に波長以下の溝をつけたメタマテリアル構造を採用し、擬似プラズモンを利用しました。

図1は軌道角運動量を持たない光を用いた場合(上段)と、持つ光を用いた場合(下段)に励起される擬似プラズモンの違いを観測したものです。上段の結果を見ると、外側の円で示した試料外周沿いの電場が青(-)→赤(+)->青(-)→赤(+)-と符号が変化していることがわかります。この変化を角度 $\varphi$ の関数として示したのが中央のグラフの赤線です。この角度依存性は、右側に示した双極子型プラズモンが励起されている時に見られる $\cos(2\varphi)$ の形(黒色破線)をしており、双極子型プラズモンが励起されていることが確認できます。ここで観測された双極子型プラズモンは、 $\pm\hbar$ の角運動量を持っており、昔から知られているスピン角運動量の転写で説明されます。一方、下段の軌道角運動量( $+\hbar$ )を持つ光の場合では青(-)と赤(+)-が共に3回現れており、電場の符

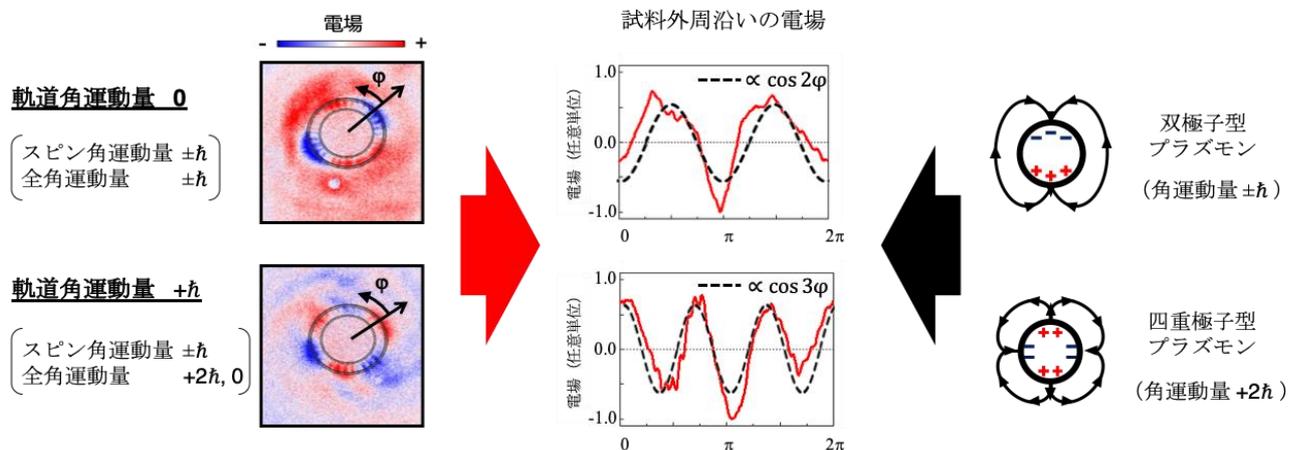


図1 軌道角運動量の有無によって異なる擬似プラズモンが励起されている様子。

号変化の回数が増えている様子が観測されました。中央のグラフに示した電場の角度依存性は  $\cos(3\phi)$  の形になり、このことは右側に示した四重極子型プラズモンが励起されていることを示しています。観測された四重極子型プラズモンは  $+2\hbar$  の角運動量を持つため、スピン角運動量の転写だけでは励起できません。従ってこの結果は、スピン角運動量 ( $\hbar$ ) に加えて軌道角運動量 ( $\hbar$ ) も金属円盤に転写されていることを意味しています。

本研究グループは、同様の実験を軌道角運動量 ( $+2\hbar$ ) の場合など様々な条件で行い、また電磁場解析シミュレーションとの比較も行いました。それらの結果から、光渦と擬似プラズモンの相互作用は全角運動量 (スピン角運動量 + 軌道角運動量) が保存されるという遷移選択則に従うことを明らかにしました。選択則は光と物質の相互作用の仕方を規定するものであるため、非常に重要な知見が得られたことを意味しています。

### 3. 波及効果、今後の予定

軌道角運動量は光の新しい自由度として光通信や量子情報分野での利用が検討されています。光の軌道角運動量を効率よく金属中の電子に転写できることが示されたことで、固体デバイス応用の新しい可能性が広がります。また、擬似プラズモンの周波数は金属構造の大きさを制御することができるため、様々な周波数帯の光に対応可能です。本成果により、軌道角運動量を利用した新しい光科学技術の発展が期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本成果は以下のプロジェクトによる支援を受けて行われました。

- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(A)「超高強度テラヘルツ電磁場による半導体電子状態の動的制御」(田中耕一郎、26247052)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(S)「テラヘルツ高強度場物理を基盤とした非線形フォトエレクトロニクスの新展開」(田中耕一郎、17H06124)
- ・科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 ACCEL「半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開」(RD: 田中耕一郎、PM: 深澤亮一、Grant Number JP17942998)
- ・科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「高強度テラヘルツ光による究極的分光技術開拓と物性物理学への展開」(田中耕一郎)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究(B)「テラヘルツ近接場測定技術を用いた擬似局在表面プラズモンの時空間分解測定」(有川敬、16K17529)
- ・日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)「光の軌道角運動量を用いた固体物性研究」(有川敬、19K05306)

#### <用語解説>

**光の偏光回転:** 光の電場と磁場の振動方向が回転しながら伝搬する状態。円偏光。

**スピン角運動量:** 電子などの粒子が持つ基本的な性質の一つ。光の場合、偏光回転の方向(右回りか左回り)に応じて  $\pm\hbar$  のどちらかの値をとる。 $\hbar$  は換算プランク定数。

**軌道角運動量:** 回転運動の強さと向きを表す物理量。

**擬似プラズモン:** 通常近赤外や可視、紫外線領域に存在する金属のプラズモン(電子の集団運動)応答を、テラヘルツ周波数領域のような低周波数領域で擬似的に再現したもの。

**遷移選択則:** 光を照射した時に、物質の状態変化が起きるか起きないかを定める規則。

**<研究者のコメント>**

新しいタイプの遷移選択則を実験的に実証することは非常に貴重な経験でした。様々な条件で行なった実験結果の細部にまで選択則が表れており、物理学における保存則の普遍性に改めて驚かされました。

**<論文タイトルと著者>**

タイトル：Transfer of orbital angular momentum of light to plasmonic excitations in metamaterials

(メタマテリアルにおけるプラズモン励起への光の軌道角運動量の転写)

著者：T. Arikawa, T. Hiraoka, S. Morimoto, F. Blanchard, S. Tani, T. Tanaka, K. Sakai, H. Kitajima, K. Sasaki, K. Tanaka

掲載誌：Science Advances

DOI：10.1126/sciadv.aay1977