



自然科学研究機構

分子科学研究所



名古屋大学  
NAGOYA UNIVERSITY



広島大学

## 高エネルギー電子による光渦放射の精密観測に成功

分子科学研究所の加藤 政博教授、広島大学の佐々木 茂美名誉教授、名古屋大学の保坂 将人特任准教授らは、高エネルギーの電子が光渦と呼ばれる特異な光を放射する現象を精密に観測することに成功した。高エネルギー電子が螺旋運動する際に放出するシンクロトロン光の中心に位相特異点と呼ばれる光渦特有の構造が存在すること、エネルギーの高いシンクロトロン光ほどその波面が密な渦構造となっていることを世界で初めて実験的に示した。また、高エネルギー電子がこのような特異な光を放射する機構を、相対性理論を用いて説明することに成功した。これらの成果は、今日、基礎学術研究から産業利用まで広く利用されているシンクロトロン光の新しい利用法の開拓に結びつくものであるが、さらに重要なことは、宇宙の様々な場所に広く存在する高エネルギー電子によって自然現象として光渦が放射されることを理論的・実験的に明らかにした点である。光渦という奇妙な光が自然界でどのような役割を果たしているのか、未踏の研究領域の存在を示す成果である。

本研究成果は、2017年7月21日(英国時間午前10時)に英国の科学雑誌 **Scientific Reports** オンライン版に掲載されました。

### 1.研究の背景

光は電磁波と呼ばれる波です。電場や磁場が振動しながら空間を伝わります。波の山の部分をつなぎ合わせたものが波面と呼ばれます。普通の光の波面は進行方向に垂直な平面(正確には球面)です。これに対して、今から25年ほど前に光渦と呼ばれる奇妙な光が存在することが理論的に明らかにされました。光渦は、螺旋状の波面を持ちます。また、光渦は軌道角運動量を運んでいると考えられており、物体に照射されるとそれをねじるような力(トルク)を与えることが実験的に検証されています。また、原子や分子などに照射されると、通常の光では起こらないような光反応を引き起こす可能性があると考えられています。

光渦は、今日ではレーザー光を特殊な光学素子を通すことで人工的に合成する手法が確立されており、情報通信、ナノテクノロジー、イメージングなど様々な分野での実用化を目指して研究が活発に進められています。一方で、自然科学の分野では光渦に関する研究はこれまでほとんど行われていません。数少ない例外としては、回転するブラックホールの周辺

の強い重力場の影響で光渦が放射されるとする理論的な研究があります。あるいは、もし天文観測により宇宙から飛来する光渦が検出されたら、それは宇宙人が光通信をしているのかもしれない、これによって宇宙人の存在を検証できる可能性がある、とする論文もあります。これらの先行研究から、光渦というのは自然現象で簡単に生み出されるものではない、というのがこれまでの常識であったことがよくわかります。

今からおよそ 10 年前に、佐々木らは、アンジュレータと呼ばれるシンクロトロン光発生装置から放射される光に光渦の成分が含まれている可能性を理論的に示しました。最近になって、加藤らは、この現象の背景となる物理過程について考察し、円軌道を描いて運動する電子の放出する光は螺旋状の波面を持ち軌道角運動量を運ぶ光渦である、ということを実験的に示しました (2017/02/27 分子研プレスリリース [https://www.ims.ac.jp/news/2017/02/27\\_3639.html](https://www.ims.ac.jp/news/2017/02/27_3639.html) 参照)。円運動する電子はその円運動の周期と同じ周波数の光 (基本波と呼ばれます) とその整数倍の周波数の光 (倍波) を放出しますが、おもしろいことに基本波は普通の光ですが、倍波は光渦だったのです (図 1)。

磁場の中を運動する電子はローレンツ力と呼ばれる力を受けて磁力線に巻きつくように円や螺旋を描いて運動します。宇宙には高エネルギーの電子は広く存在します。一方で、磁場を帯びた天体も数多く存在します。地球もその一例ですし、超新星爆発の後に残される中性子星が非常に強い磁場を帯びていることもよく知られています。上記の理論的予想が正しいならば、磁場を帯びた天体の周辺を始めとする自然界の様々な場所で、光渦は自然現象として生み出されているはずです。

佐々木らの研究を受けて、その実験的な検証が数年前にドイツの放射光施設で初めて行われました。円偏光アンジュレータと呼ばれる装置の中で螺旋運動する電子の放射する光の波面が螺旋状であることを示す結果が得られています。しかし、この実験では、理論的に予想される光渦放射の重要な特性の多くが未検証のままでした。これは、ドイツのチームが取扱いの難しい真空紫外線を用いて実験を行ったためです。分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR-III は小型で電子エネルギーが低く、その一方で、電子ビームの指向性が極めて高いという、世界的にも極めてまれな性能を有するシンクロトロン光源です。分子科学研究所、広島大学、名古屋大学などの共同研究チームは、この UVSOR-III を用いることで、ドイツのチームが成し得なかった光渦の精密観測を試みたのです。

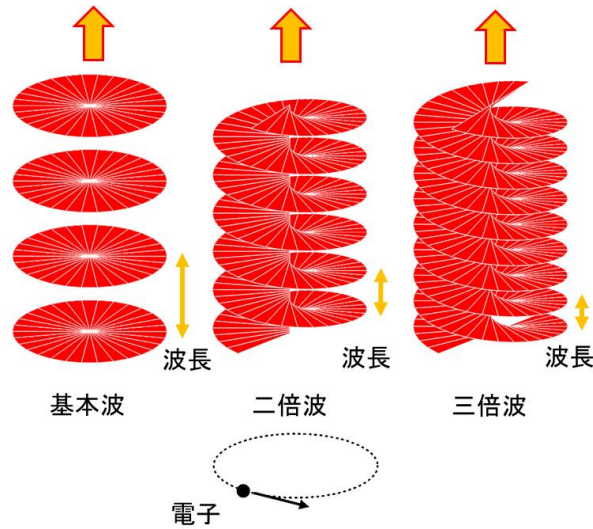


図1. 円運動する電子が放出する光の波面。光は図の上方へ進行している。電子は基本波と呼ばれる光以外に基本波の整数倍の振動数（整数分の一の波長）をもつ倍波を合せて放出する。基本波は通常の光と同じく波面が平面であるのに対し、倍波は波面が螺旋状になる。

## 2.研究の成果

共同研究チームは、分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR-III を用いて、高エネルギー電子を螺旋運動させ、その放射する光の性質を精密に観測しました。ダブルスリットを用いた回折実験により、倍波の中心に位相特異点と呼ばれる不思議な構造が出来ていることを世界で初めて観測することに成功しました（図2）。また、基本波や倍波を同時に発生してこれらを干渉させることで、振動数の高い倍波ほど波面の渦構造が密になっており大きな角運動量を運んでいることを世界で初めて観測することに成功しました。一方、高エネルギー電子が光渦を放射する機構に関して理論的な考察を行い、電子からの放射が電子の進行方向に集中するという相対性理論の効果によりこの現象が説明できることを見出しました。

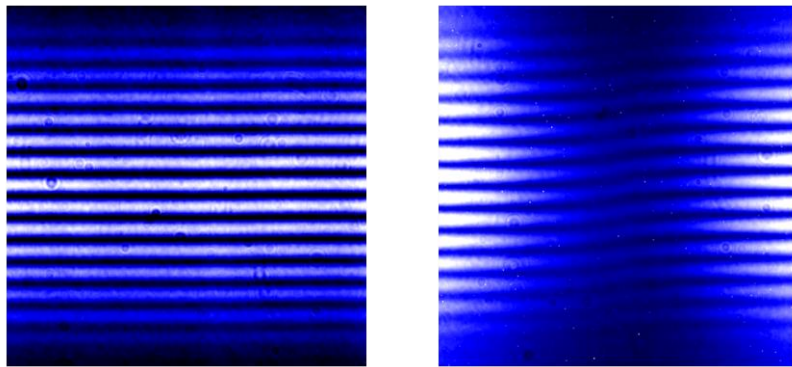


図2. ダブルスリット回折実験結果. 円軌道を描く電子が放射する光を、ダブルスリットを通すと、基本波（通常の光）からは直線状の回折模様が生じるが、二倍波（光渦）では中心付近にゆがみを伴う回折模様が生じる。これは光の中心に、光の位相が急激に変化する位相特異点が存在することを示している。

### 3.この研究の社会的意義と今後の展開

本研究の成果は、円軌道放射という自然界で極めて一般的にみられる現象によって光渦が放射されることを示しています。光渦は、実験室で人工的に作り出される特殊な光である、というこれまでの常識とは全く正反対に、自然界の様々な場所で普遍的に存在するものであることが明らかになりました。それでは光渦は自然界でどのような役割を果たしているのでしょうか。これまで研究者の考えたことのなかった全く手つかずの新しい研究領域の存在が浮かび上がってきました。自然科学研究機構では、「光渦が拓く新しい自然科学」というテーマで分野融合型共同研究プロジェクトをこの春からスタートさせました。今後の研究成果が待たれます。

一方、本研究で明らかになった光渦放射現象を利用することで、全く新しい光渦発生装置が開発できる可能性があります。これまでの光渦を利用した研究は可視光を中心とする比較的狭い波長範囲で進められてきました。これに対して、円軌道を描く電子は、その物理的なパラメタに応じて、電波からガンマ線まであらゆる波長域の光（電磁波）を出すことができます。この現象を応用することで、光渦があらゆる波長域で利用できるようになり、物質科学などより幅広い領域で新しい研究ツールとなる可能性があります。可視光の光渦は既に顕微鏡の空間分解能の向上に利用されていますが、こういったことがシンクロトロン光を用いたX線顕微鏡でも可能となるかもしれません。今後の研究により光渦と物質が特異な相互作用をすることがわかれば、分子の構造を観測する新しい手法が開拓されるかもしれません。

### 4.用語解説

#### ・アンジュレータ

周期的に極性の入れ替わる磁場を発生し、高エネルギーの電子ビームを蛇行運動させて、強力なシンクロトロン光を発生する装置。

#### ・ダブルスリット

光を通さない板に二本のスリットをある距離をおいて平行に設けたもの。ヤングの干渉実験に用いられた。

### 5.論文情報

掲載誌：Scientific Reports

論文タイトル：

Helical Phase Structure of Radiation from an Electron in Circular Motion

円軌道放射の螺旋波面構造

著者：

M. Katoh, M. Fujimoto, N. S. Mirian, T. Konomi, Y. Taira, T. Kaneyasu, M. Hosaka, N. Yamamoto, A. Mochihashi, Y. Takashima, K. Kuroda, A. Miyamoto, K. Miyamoto, S. Sasaki

掲載日：2017年7月21日

DOI：10.1038/s41598-017-06442-2

## 6.研究グループ

分子科学研究所、広島大学、名古屋大学、高エネルギー加速器研究機構、九州シンクロトロン光研究センター、産業技術総合研究所、東京大学の共同研究

## 7.研究サポート

文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラム

科学研究費補助金 基盤研究 B26286081、C26390112、A17H01075