

古典的なヤングの干渉実験で、新しい光の性質「光子の渦巻き」を明らかに！

和田 真一*¹
Wada Shin-ichi

加藤 政博*^{2,3}
Kato Masahiro

1. はじめに

「光渦」という光の名称を聞いたことがあるでしょうか？「ひかりうず」と読みます。理論的に予測されたのは 20 世紀の末で、21 世紀に入って盛んに基礎実験や応用研究が行われるようになった、非常に新しい光の形態の 1 つです。この光を、放射光という最新の加速器技術をベースにした特殊な光発生装置で生成し、200 年以上前に開発された古典的な波の計測手法であるヤングの二重スリット実験で計測する、という新・旧織り交ぜることで実現できた実験の紹介になります¹⁾。一見するとつながりのないように思える「光渦」と「放射光」、そして「ヤングの二重スリット実験」の三者が、実は非常に相性がよく、それによって光の粒一つひとつが「渦」を持っていることを明らかにすることができました。

2. 光渦とは

穏やかな水面に石を投げるとその着地点から幾重もの波が円形に広がります。このような曲線を波紋

と呼んでいます。光の波が三次元の空間で広がる場合は、波紋は波面と呼ばれる面の広がりで見えることができます。この面は球の表面であることから球面波と呼ばれています。そして、波の発生源が非常に遠い場合はこの球面は平面で近似でき、平面波と呼ばれます。光の波長に対応する波の山や谷が形づく球面波（ランプ光源が近い場合）や平面波（ランプ光源が非常に遠い場合やレーザー光の場合）で、光の伝搬を表現することができます。例えば光の波の山だけを捉えると、**図 1(a)** のように平面波が順次に伝搬する様子が描けます。

一方、このような通常の平坦なもしくは球状の波面とは異なり、らせん状の波面を示す特殊な光「光渦」と呼ばれる光が存在することが分かりました（**図 1(b)**）。通常の光では中心軸の右側が波の山になっていれば左側も山になっています。平面波です。ところが光渦では右側が山なのに左側は谷であったりします。そして、三次元で捉えた中心軸から上下方向では、山から谷もしくは谷から山への途中の状

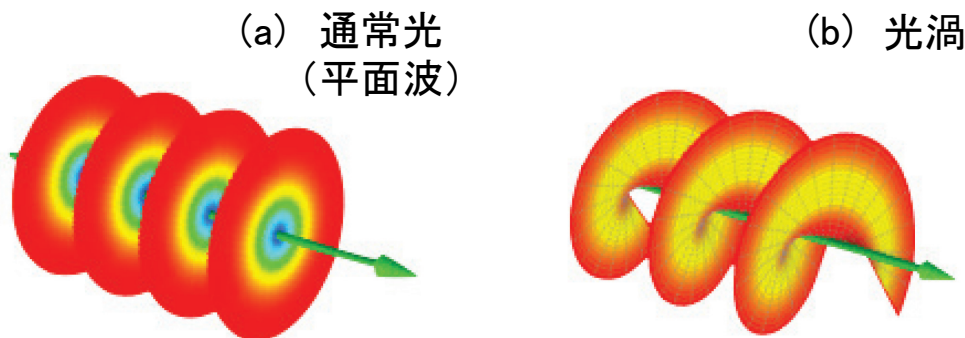


図 1 (a)通常の光（平面波）と (b)渦を巻きながら進行する光渦の概念図²⁾

態になっていることになります。先ほどの山だけの平面波の平面上を、光渦では山から谷へ、そしてまた山に1周していることになります。ですので中心軸上は、山でも谷でもないという位相特異点と呼ばれる強度がゼロの奇妙な状態となります。通常の光では波の山が平面（あるいは球面）をなすのに対し、光渦では中心軸の周りをぐるぐると渦を巻くらせんになっているのです（注：光の偏光方向が回転する円偏光とは異なります）。

このような光渦は1992年に理論的に存在が示され³⁾、その後実験的にも様々な方法でこの光渦が発生できるようになりました。今日のレーザー・光学技術を使えば、特別な光学素子を1枚通すことで光渦を生成することができます。対して筆者らは、ヘリカルアンジュレータという装置を用いた放射光に注目しました。光速に近いスピードで運動する電子が磁石の中で力を受けて曲がる時に、放射光と呼ばれる指向性が高く強度の強い光が発生します。特に、アンジュレータと呼ばれるたくさんの小さな磁石を磁場の向きが交互になるように順番に並べた装置の中を電子が通過すると、電子は左右や上下に細かく揺さぶられて強い光が発生します。磁石の配置を工夫するとバネの形状のように回転しながら進行するらせん運動を電子にさせることもできます。このような電子から放射される光には、電子のらせん運動が光の渦として転写され光渦となります⁴⁾。

光には波動性と粒子性の二面性がありますが、私たちが通常、光と呼んでいるものは、たくさんの光の粒「光子」の集団です。先に説明した光渦の特徴「渦を巻きながら進行」「中心には光が存在しない」ことは、波の性質を持ったたくさんの光子の集団が、

一斉に波打ちながら規則正しく回転する様子を想像すると、理解しやすいのではと思います。しかしながら先に説明したアンジュレータから発生する光の描像では、らせん運動する電子から光子は1粒1粒放射されます。それでは、そのような1粒の光子でも光渦の特徴を持っているのでしょうか？

この光子1粒での渦巻き性質を調べるために、ヤングの二重スリット干渉実験を行いました。穏やかな池の中の少し離れた場所に同じタイミングで2つの石を投げ入れると、2か所で波紋が発生し、それらの波が重なる場所ではきれいな波の模様が生じます。これは干渉と呼ばれる現象で、波の山や谷がある条件のもとで強め合ったり弱め合ったりするために生じます。イギリスの物理学者 Thomas Young が示したヤングの二重スリット干渉実験は、この池の波と同じ現象を、光を使って行う実験になります。距離が近い2つの狭いすき間(スリット)に、波がそろった光を同時に照射すると、その先に光の干渉による光の明暗縞が生じます。ヤングの実験は光の波動性を検証する実験として有名な方法ですが、通常は十分に明るい光源を用いて行うところを、本研究では光子一つひとつが検出できる程度に極端に光の強度を下げた実施しました。このような極めて弱い光を用いた単一光子状態の実験では、光子は波動であると同時に粒子でもあるという光の二重の性質を明らかにします。1個の光子が2つのスリットを同時に通過し、自分自身と干渉するという不思議な様子を観測することができるのです。このような実験は光子計数領域での干渉実験と呼ばれます。筆者らは、世界で初めて、このような実験を光渦の光子に対して行いました。

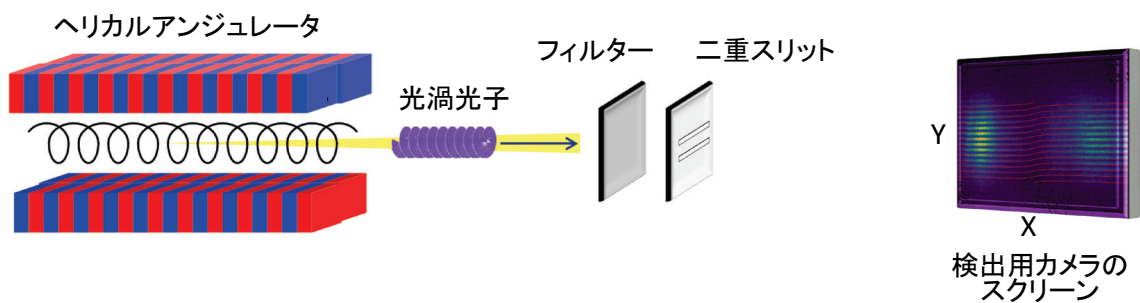


図2 実験の概略図

ヘリカルアンジュレータと呼ばれる磁石の配列で、高速な電子をらせん運動させることで光渦を発生させ、二重スリットを通過して干渉した結果をカメラで撮影。光子一つひとつが持つ渦特性を検証した。ヘリカルアンジュレータ内に描いた黒線は電子の運動の様子を示す

3. ヤングの二重スリット干渉実験

実験は、標準的なヤングの二重スリット干渉実験ですが、電子から発生する放射光という特殊な光を用いていることと、光子一つひとつが識別できる特殊なカメラを用いていることが特徴です。図2は実験の模式図です。分子科学研究所の放射光源UVSOR-IIIのBL1Uと呼ばれるアンジュレータからの放射光を取り出せるビームラインで、実験を実施しました。アンジュレータを通過する電子から発生した放射光のうち、波長フィルターで波長選別（第二高調波の355 nm）することで光渦の性質を持つ成分だけを透過させました。減光フィルターで光子が1つずつ通過するような条件を作り出し、幅0.1 mm、間隔1 mmの二重スリットを通過した後の干渉の様子を、高感度な超高速カメラで撮影しました。光学素子の使用を最小限に抑えることで、ヘリカル波面構造を維持しながら、単一光子計数領域に迫る非常に低い光子数の検出を達成することができました。

4. 計測結果

図3にその実験結果を示します。図3(a)は、二重スリット通過後の光を非常に短い時間の間(200 μ s 間)だけ撮影したたくさんの写真のうちの1枚になります。この写真ではおよそ130個の輝点が撮影されており、これら一つひとつがこの短時間の間に検出された光子に対応します。この画像では輝点の分布に規則性はなく、光子は一見ランダムに散乱して検出されているように見えます。図3(b)はこのような連続写真を5枚重ねてみました。光のスポットは左右に偏り出しましたが、まだランダムに分布しているように見えます。しかし、積算を100枚まで増やしていくと、まだらですが干渉縞が現れ始めました(図3(c))。画像を5000枚(1秒間の撮像に相当)重ねた結果を、図3(d)に示します。干渉縞は完全に明瞭な縞パターンを示すようになりました。カメラの検出位置によって二重スリットからの距離(光の波の位相差)が異なることから、光の波の性質による干渉として縞模様が現れています。このように一見ランダムな光子分布が、積算していくことできれいな干渉縞を描き出す様子は、参

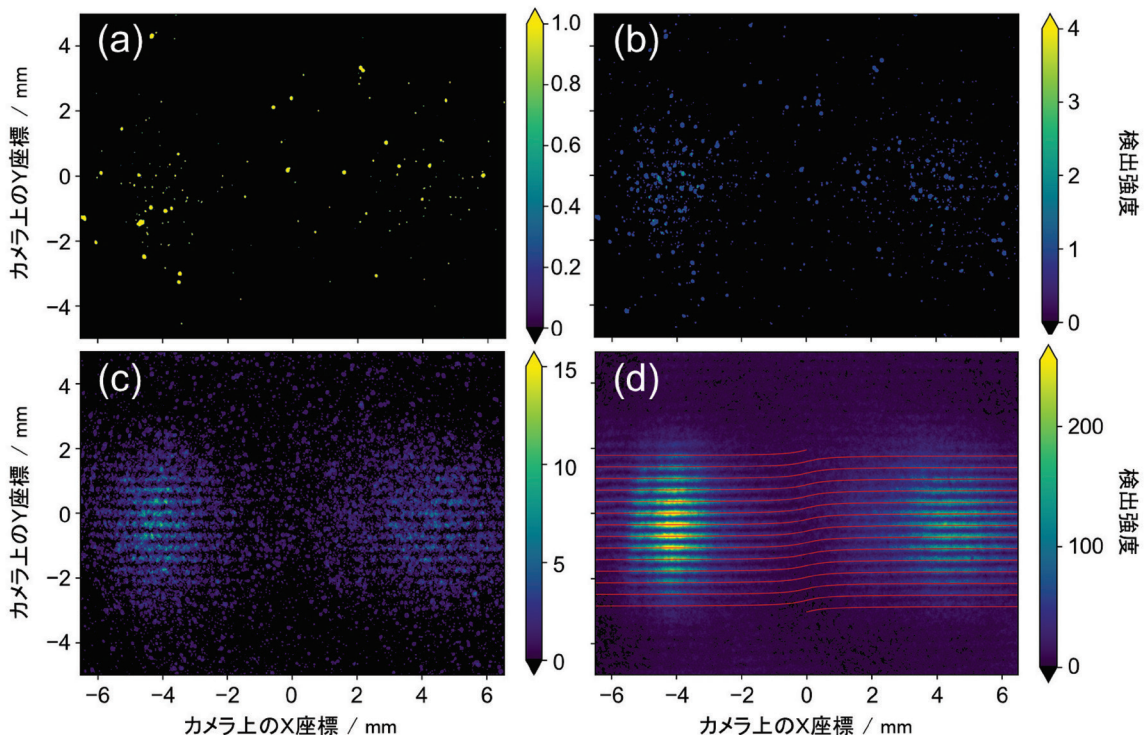


図3 渦を巻きながら進行する光渦における、光子計数領域でのヤングの二重スリット干渉実験
(a)は200 μ sの間だけ撮影した1枚の撮像画像であり、画像を(b)5枚、(c)100枚、そして(d)5000枚重ねて得られた結果

参考文献 1) の補足動画⁵⁾ で視覚的に確認することができます。これがヤングの二重スリット干渉実験の結果で、放射光源から飛来してきた光の1つの粒「光子」が「同時」に2つの狭いスリットを通り抜け、光の波の性質による干渉をその先のカメラで検出していることを示しています。この結果は光の粒「光子」の粒子性と波動性の両面を端的に示す現象としてよく知られています⁶⁾。

この二重スリットの干渉で生じた幾本もの横縞に加えて、中央部に暗い領域が観測されました。図3(d)のこの領域を、見やすいように画像のコントラストを変えて拡大したものが図4になります。横縞の干渉線が、中央部に歪んで1つ隣の縞にズレているのが分かります。通常の光ではこのような結果は観測されません。中央部が暗くなっていることと歪んでいることは、それぞれ、光渦が位相特異性(光強度がゼロ)を中心を持つことと、波面が渦を巻きながら進行する特徴(らせん状の波面に由来する位相差)を反映しています。この結果は、本実験条件で干渉した場合の理論縞(図3(d)や図4中の実線)と良い一致を示します(この干渉縞の歪みについての理論的な解釈に関心がある場合は参考文献

1,4) を参照してください)。単一光子であっても、光渦の性質を持つ強力な証しです。

5. 今後の展開

光子の数を数えることができる実験条件下で、アンジュレータから放射される光渦を用いたヤングの二重スリット干渉実験を行うことで、単一光子であっても光渦の特徴を示すことを実証することに成功しました。本研究の結果は、らせん運動をする高エネルギー電子から自発的に放出される光子一つひとつが、渦巻き波面の性質を本質的に持ち得ることを示しています。このような高エネルギー電子のらせん運動は、自然界に普遍的に存在する現象です。例えば磁場を帯びた天体の周辺にはこういう電子はたくさんいるはずですが、光渦は特別な光ではなく、普遍的な存在の可能性を秘めています。

これまでの光渦研究はレーザー光源が利用できる可視光領域等で行われてきました。しかし、アンジュレータからの放射光を利用すれば、光渦の波長領域を大きく拡張することができます。放射光が得意とする極端紫外領域やX線領域では、光渦の渦巻きの間隔が桁違いで短くなります。物質との相互作用がより顕著になるこの波長領域で、このような光渦がどのような特徴を示すのか、新しい物理現象や材料加工技術、計測技術への展開が期待されます。

参考文献

- 1) S. Wada, *et al.*, *Sci. Rep.*, **13**, 22962 (8 pages) (2023)
- 2) 出典元: Wikimedia Commons https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helix_oam.png
- 3) L. Allen, *et al.*, *Phys. Rev. A*, **45**, 8185-8189 (1992)
- 4) M. Katoh, *et al.*, *Sci. Rep.*, **7**, 6130 (8 pages) (2017)
- 5) <https://www.nature.com/articles/s41598-023-49825-4#Sec7>
- 6) Y. Tsuchiya, *et al.*, *Adv. Electron. Electron Phys.*, **64A**, 21-31 (1986)

(*¹ 広島大学大学院 先進理工系科学研究科, *² 広島大学 放射光科学研究所, *³ 自然科学研究機構 分子科学研究所)

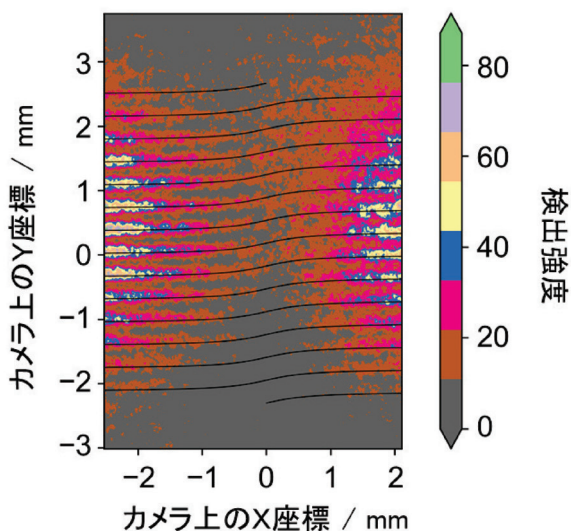


図4 光渦の特徴を示すヤングの二重スリット干渉実験
中央部の暗部に、通常の光では観測されない干渉縞の歪みが観測される