



光渦 (Optical vortex)

丸山智幸 (日本大学生物資源科学部)

近年、「光渦」いう言葉が光学，ビーム物理学分野を中心にちまたを賑わせています。この光は「軌道角運動量を持つ光」と言われます。図1の上段に直進する光の同位相面を示しますが，通常の光では軌道角運動量は進行方向に対して垂直方向を向き，角運動量の進行方向成分は光子のスピンだけです。これに対し，右図の光渦ではビーム軸を中心に渦を巻いており，この螺旋構造が進行方向に沿った軌道角運動量を運ぶことになります。

この光渦はAllen等 [1] によって提案され，その後構成する光子の波動関数であると徐々に考えられるようになり，軌道角運動量を運ぶ光子の存在が一気に注目を浴びることになったのです。

光渦は円偏光したレーザー光線によって人工的に作られ，照射による物質のスピン構造変化，光渦による情報伝搬など応用分野で注目されてきました。しかし，ブラックホールの強い重力中で光渦が発生するなど [2]，自然界で作られる可能性が議論され，自然科学分野でも関心が寄せられるようになっていきます。日本でも非線形コンプトン散乱によるガンマ線渦の生成実験が計画され [3]，核反応への応用も考えられています。

以下に，光渦の電磁場の具体的な形を説明することにしましょう。まず， z 軸をビーム軸とし，電磁場ベクトルを \tilde{A}_μ とし，ローレンツゲージで $\tilde{A}_0 = 0$ ととることにします。偏極ベクトル ϵ を用いて，電磁場ベクトルを $\tilde{A} = [0, \epsilon A(\mathbf{r}, t)]$ と書くと， $\partial_\mu \partial^\mu A = 0$ が成り立ちます。このとき解としてビーム方向の運動量 \hat{p}_z と角運動量成分 \hat{L}_z の固有状態を取ると，波の垂直成分がベッセル関数で与えられ，ベッセルビームと呼ばれる光渦の一種となります。すなわち， \hat{L}_z の固有値がゼロでない状態の光子が渦光子ということです。

さて，実際の電場はビーム軸の近辺に集中していますので，ビーム軸に垂直成分がガウス型になるラゲール・ガウス (LG) ビームで光渦は記述されることになります。そこで，光子のエネルギーを k とし，電磁場を $A(\mathbf{r}, t) = u(\mathbf{r}) \exp(ikz - ikt)$ と書き， $u(\mathbf{r})$ の z 方向の変化は小さいとして，近軸近似 $\nabla_z^2 A = e^{ikz} (k^2 + 2ik\nabla_z + \nabla_z^2) u(\mathbf{r}) \approx e^{ikz} (k^2 + 2ik\nabla_z) u(\mathbf{r})$ をとります。 $u(\mathbf{r})$

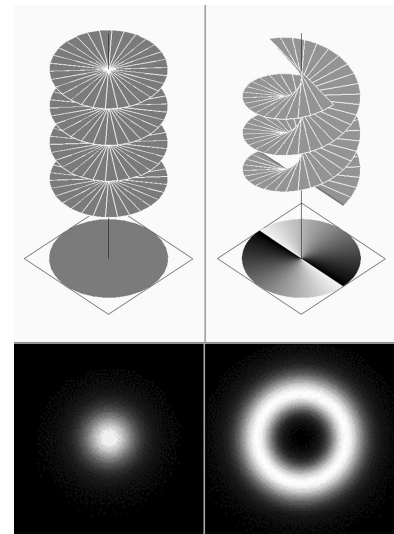


図1: 上段は同位相面，下段はビームの垂直面に対する強度分布を示す。左が $L = 0$, $p = 0$ ，右側が $L = 2$, $p = 0$ の光。分子科学研究所，藤本氏からの提供。

は、ヘルムホルツ方程式 $(\nabla_x^2 + \nabla_y^2 + 2ik\nabla_z) u(\mathbf{r}) = 0$ で与えられ、以下の形で書かれます。

$$u(\mathbf{r}) = \frac{2w_0}{w(z)} G \left[\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}, \frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right] \exp \left[\frac{ikzr^2}{2(z^2 + z_R^2)} - iN_{LP} \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_R} \right) \right],$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + z^2/z_R^2}, \quad z_R = kw_0^2/2. \quad (1)$$

ここで、 w_0 はビームの太さを表すパラメーター、 G は $(-\nabla_x^2 - \nabla_y^2 + x^2 + y^2)G = 2N_{LP}G$ を満たす2次元調和振動子波動関数と一致します。そこで、 G を \hat{L}_z の固有値 L を持つ固有関数にとると、 G は円筒座標 ($x = r \cos \phi$, $y = r \sin \phi$) を用いて以下のように書かれます。

$$G(x, y) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p + |L|)!}} e^{iL\phi} r^{|L|} \mathcal{L}_p^{|L|}(r^2) e^{-r^2/2}, \quad N_{LP} = 2p + |L| + 1. \quad (2)$$

\mathcal{L}_p^n はラゲール陪関数で、この波がLG波と呼ばれ、光渦の中心的な形と考えられています。この式で現れる $\exp(iL\phi)$ という因子が波の螺旋構造を作り、量子力学では波動関数の軌道角運動量を表します。この波は運動量が z 軸に平行な成分を含んでおらず、 z 軸から少し斜めに傾いた成分で構成され、それらが位相をずらしながら進むことで全体として z 方向に軌道角運動量を作り出しています。LG波は \hat{p}_z の固有状態ではないので、波の太さは一様ではなく、 $|z|$ とともに広がっていきます。こんな書き方をすると、不思議さはないように感じられますが、トポロジカルな性質 [4] など多くの興味深い性質があります。そして、渦光子が単体で存在し、自然現象で生成されるのか、という疑問には、核物理学の研究者として大いに興味をそそられます。

最近、分子科学研究所の加藤氏等によって、強磁場中で円運動する電子からの放射は光渦の性質を持っていることが示され、シンクロトロン放射を用いた検証実験が行われています [5]。このことは自然にある強磁場下、例えば中性子星表面やガンマ線バーストで光渦が発生している可能性を示唆しています。それらでガンマ線渦が発生するとすれば、放出ガンマ線と原子核の反応において相対軌道角運動量が大きくなり、反応チャネルが大きく変化する可能性があります。

ガンマ線渦の生成では1光子ずつ発生するので、量子論的効果が大きく、この実験が実現すれば、 \tilde{A}_μ が光子の波動関数であることが確認できます。我々は電子のコンプトン散乱で散乱断面積の角度・エネルギー分布をみることで、図1の右下図で示したような中空構造をもつガンマ線渦の強度分布の確認ができることを示しました [6]。ただし、光渦の性質が顕著に表れるためには、軸近傍に強度が集中する必要がある一方、ベッセルビームでは平面波との違いが現れません。

光渦の電磁場が渦光子の波動関数であることが確認されたわけではなく、その量子論的性質は十分解明されてはいません。しかし、上記のガンマ線渦の研究を行うことは、渦光子の量子論的性質の解明に貢献することでしょう。また、 \hat{L}_z の固有状態波動関数を用いた、電子渦や中性子渦等も提案されています。そして、天体系でのガンマ線渦の発生および光核反応に関連した研究が、今後、核物理においても発展していくものと期待されます。

[1] L. Allen, *et al.*, Phys. Rev. A **45**, (1992) 8185.

[2] F. Tamburini, Nat. Phys. **7**, (2011) 195.

[3] Y. Taira, T. Hayakawa, and M. Katoh, Sci. Rep. **7**, (2017) 5018.

[4] 戸田泰典, 物性研究・電子版 Vol. 4, (2015) 041205.

[5] M. Katoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, (2017) 094801; Sci. Rep. **7**, (2017) 6130.

[6] T. Maruyama, T. Hayakawa, and T. Kajino, arXiv:1710.09369.