

空間構造をもつ光の生成原理と応用 Genration and Application of Structured Light

鹿野 豊^{1,2,3}
Yutaka Shikano^{1,2,3}

群馬大学大学院理工学府¹, チャップマン大学量子科学研究所², JST さきがけ³
Graduate School of Science and Technology, Gunma University¹, Institute for Quantum
Studies, Chapman University², JST, PRESTO³

基礎科学研究から応用上まで様々なことに利用されている光は

1. 波長
2. 強度
3. 位相 (縦方向位相, 横方向位相, 幾何学的位相, 伝播位相 (Gouy 位相))
4. 偏光
5. 空間, 時間モード
6. コヒーレンス

などといった様々な自由度が存在することが知られている。また、これらを組み合わせることによって新規分光法の開拓され、様々な科学技術分野で応用されてきた。中でも、光の横方向位相を制御することで光の伝播方向に対して垂直な面 (光波面) の空間構造を制御することが出来る。この空間構造を制御された光の事を一般に「**構造化光 (structured light)**」と呼ばれている。これらの理論的背景は真空中のマクスウェル方程式から電場 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ に対する放射の方程式は

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

と導かれる。ここで、レーザーは単一周波数を持ち、空間の特定の方向に出射されるので、その状況においては単一周波数を持つ光であるという性質から

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{r})e^{i\omega t} \quad (2)$$

となり、式 (1) は

$$-k^2 \frac{\partial^2 \mathbf{U}(\mathbf{r})}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{U}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

と変換され、これはヘルムホルツ方程式と呼ばれている。ここで、 $k := \omega/c$ とした。また、空間の特定の方向に出射されるということから、伝播方向を z 軸に設

定すると、

$$\mathbf{U}(\mathbf{r}) = \phi(\mathbf{r})e^{-ikt}, \quad \left| \frac{\partial \phi(\mathbf{r})}{\partial z} \right| \ll k |\phi(\mathbf{r})| \quad (4)$$

という近軸近似が成り立つ。すると、近軸ヘルムホルツ方程式

$$i2k \frac{\partial \phi(\mathbf{r})}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi(\mathbf{r}) \quad (5)$$

が導かれる。この偏微分方程式の解は原理的に無限個あるので、無数の構造化光が知られている。代表的なものとしては、高次のガウスビームとして知られているベッセルビーム、ラゲール・ガウスビーム (別名、光渦ビーム) などがある。この理論の詳細は本 [1] を見よ。これらを基本空間モードであるガウス光から作るためには一般に光波面に対して空間的に位相を変化出来る光学素子 (例えば、空間位相変調器、らせん状の位相板) を用いることにより生成することが出来る。更に近年では、純粋な光だけでなく、電子ビームにおいても構造化光を出射することが出来るようになってきている [2]。

また、構造化光は、最初に示した光の様々な自由度を光と物質の相互作用を通して組み合わせることにより、様々な応用事例に使うことが出来る。本講演では、光の偏光と横方向位相を光軸モードをずらすという干渉計を設計することにより実効的に相互作用させ、光の偏光状態を可視化出来るという事例を紹介する [3, 4, 5]。

参考文献

- [1] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [2] H. Larocque, I. Kammer, V. Grillo, G. Leuchs, M. J. Padgett, R. W. Boyd, M. Segev, and E. Karimi, *Contemp. Phys.* **59**, 126–144 (2018).
- [3] H. Kobayashi, G. Puentes, and Y. Shikano, *Phys. Rev. A* **86**, 053805 (2012).
- [4] H. Kobayashi, K. Nonaka, and Y. Shikano, *Phys. Rev. A* **89**, 053816 (2014).
- [5] Y. Turek, H. Kobayashi, T. Akutsu, C.-P. Sun, and Y. Shikano, *New J. Phys.* **17**, 083029 (2015).