

## タンデムアンジュレータによるベクトルビーム発生

### CYLINDRICAL VECTOR BEAM GENERATED BY TANDEM HELICAL UNDUALTORS

松葉俊哉<sup>#, A)</sup>, 川瀬啓悟<sup>B)</sup>, 宮本篤<sup>C)</sup>, 佐々木茂美<sup>D)</sup>, 藤本将輝<sup>E)</sup>, 許斐太郎<sup>F)</sup>, 山本尚人<sup>F)</sup>, 保坂将人<sup>G)</sup>,  
加藤政博<sup>E), G)</sup>

Shunya Matsuba<sup>#, A)</sup>, Keigo Kawase<sup>B)</sup>, Atsushi Miyamoto<sup>C)</sup>, Shigemi Sasaki<sup>D)</sup>, Masaki Fujimoto<sup>E)</sup>, Taro Konomi<sup>F)</sup>,  
Naoto Yamamoto<sup>F)</sup>, Masahito Hosaka<sup>G)</sup> and Masahiro Katoh<sup>E), G)</sup>

<sup>A)</sup> Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

<sup>B)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>C)</sup> Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

<sup>D)</sup> School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University

<sup>E)</sup> Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences

<sup>F)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>G)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

#### Abstract

Vector beam has spatially dependent polarization state which the polarization direction varies with azimuthal angle about the beam axis. Such beams can be generated by superposing of optical vortices. Therefore, we have proposed and demonstrated a scheme to produce vector beam by superposing optical vortices from helical undulators in tandem using the technique akin to “cross undulator”. In this paper, we present the detail of the scheme and the experimental results.

#### 1. はじめに

強度や位相、偏光状態が空間的に分布する structured light と呼ばれる光が、近年注目を集めている [1]。その一つにベクトルビームもしくは軸対称偏光ビームと呼ばれる光があり Fig. 1 左図にその偏光分布の例を示す。これは中心に暗点を持つドーナツ状の強度分布となっているが、その偏光状態が場所によって異なるもので、各位置での電場がビーム中心から径方向に振動するようなラジアル偏光がその一例である。また、光渦 (Fig. 1 右図) と呼ばれるものは同様にドーナツ状の強度分布をもつが偏光状態が一様でその位相が光軸まわりの方位角に沿って変化する。近年までこれらのような光はレーザーと光学素子の組み合わせで発生することが殆どで、可視光や赤外といった波長域では発生方法が確立されており、情報通信やナノテクノロジー、超高解像顕微鏡などへの応用が研究されてきた。

真空紫外や X 線領域での発生法の研究も次第に進展し、特に加速器ベースの光源において光渦を生成する研究が行われ、円偏光アンジュレータの高次光やらせん状にバンチングされた電子ビームからの放射が光渦であることが実証された [2-4]。一方、ベクトルビームについてはエッジ放射や遷移放射がラジアル偏光であることが知られているにとどまっていたが、我々は波長可変で強力なベクトルビームを短波長域で生成可能な手法を考案し実証実験を行った [5]。本論文ではその詳細について発表する。

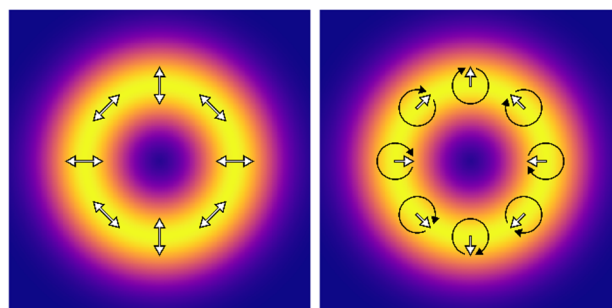


Figure 1: A schematic illustration of vector beam (left) and optical vortex (right). The arrows in left figures are indicated the polarization directions. The white arrows in the right figure indicate instantaneous electric field vector, and circular arrows indicate the handedness of circular polarization.

#### 2. 原理

ベクトルビームは旋回面と円偏光の回転方向が互いに反対の 2 つの光渦を重ね合わせることで生成できることはよく知られている。我々は、円偏光アンジュレータの高次放射は光渦になっていることから、右円偏光と左円偏光のアンジュレータ高次放射を重ね合わせることで、ベクトルビームを生成できると考えた。ジョーンズベクトルを用いて右円偏光と左円偏光の 2 次光の重ね合わせを表すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, \phi) &= E(r) \left( \exp[i(\phi)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} + \exp[-i(\phi + \alpha)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \right) \\ &= 2E(r) \exp \left[ i \left( -\frac{\alpha}{2} \right) \right] \begin{bmatrix} \cos(\phi + \alpha/2) \\ -\sin(\phi + \alpha/2) \end{bmatrix}, \quad (1), \end{aligned}$$

<sup>#</sup>matsubash@hiroshima-u.ac.jp

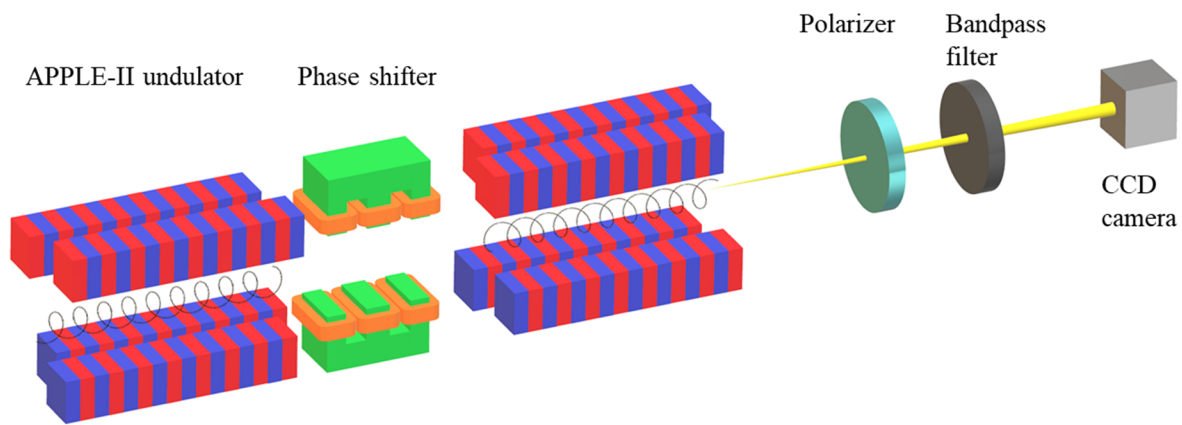


Figure 2: Schematic illustration of the experimental configuration.

$(r, \phi)$ は極座標、 $\alpha$ は光の位相差を表す。最後の項は振動方向が $-(\phi + \alpha/2)$ となる直線偏光を表しており、偏角 $\phi$ の増加に従って直線偏光の向きが逆回転するように変化する。これはベクトルビームの中の anti-vortex mode と呼ばれるモードである。また、光の位相差を変えると各位置の偏光の向きが一斉に変化する。

放射光源における光の重ね合わせはクロスアンジュレータと呼ばれる手法で実現されている[6]。直列に並んだ 2 台のアンジュレータでそれぞれ水平偏光と垂直偏光を発生させ、下流でバンドパスフィルターを通すことでそれらの波束を伸ばして重ね合わせる手法で、2つのアンジュレータ光の位相差を変えることで左右の円偏光を切り替える用途で用いられている。この手法を 2 次元的に応用し、直列に並んだ 2 台の円偏光アンジュレータから放射される光渦を重ねあわせることができるはずである。

### 3. 実験

実験は分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR-III の光源開発用ビームライン BL1U を用いて行った。UVSOR-III は通常 750MeV 運転であるが、なるべく低エミッタンスで実験するため 500 MeV にエネルギーを下げて実験を行った。

概要を Fig. 2 に示す BL1U には 2 台の APPLE-II 型アンジュレータが直列に並んでおり、その間にバンパ軌道を作って光の位相を調整するウィグラー型電磁石 (フェーズシフター) が挿入されている。アンジュレータは 1.056 m の長さで、磁石列の周期が 88 mm 、周期数が 10 でアンジュレータの中心間は 1.6 m 程度離れている。アンジュレータ光は真空窓を通過してまっすぐ下流に取り出され、248 nm  $\pm$  1 nm のバンドパスフィルターとワイヤグリッド偏光子を通して下流のアンジュレータから 7.5m の位置に置かれた CCD カメラ (BITRAN BK50-UV) でその強度分布が測定される。CCD のサイズは 1024  $\times$  1024 ピクセルで 1 ピクセルあたり約 13  $\mu$ m である。アンジュレータはそれぞれ逆の円偏光を発生するように設定され、バンドパスフィルターの波長と 2 次光の波長

を一致させている。

直線偏光の 2 次元的な分布状態をみるために、偏光子の透過軸の角度を 30 度刻みで 360 度変えて、12 の透過軸角度で光の強度を取得した。

また実験結果と比較するために Synchrotron Radiation Workshop (SRW) と呼ばれる計算コードを用いてシミュレーションを行った。SRW は光渦のシミュレーションなどに用いられた実績があり[4]、本研究のシミュレーションに適用できる。

### 4. 結果

Figure 3 に実験及びシミュレーションの結果を示す。上の行が実験で得られた強度分布、下の行がシミュレーションによるもので、左から 1 列目が偏光子を入れずに取得した強度分布、2 列目以降は偏光子の透過軸を図左上の矢印方向に設定したものである。直線偏光の向きが場所によって変わっていること、偏光子を回すと強度の大きい部分が逆方向に回転することが確認できる。

この時、強度が最大となる角度が各位置での偏光の向きとなるため、Fig. 3 に示したデータからビームのある位置における偏光の向きを解析できる。各点の偏光の向きの解析結果を Fig. 4 に示す。解析点は中心から半径 1.33, 1.98, 2.63, 3.28 mm の円の上で 15 度ごとに各円上に 24 点ずつ設定し、強度の変動が小さい点をビーム中心とした。各点で、強度の偏光子角度への依存性として得られたデータに対して sin 関数と一様なバックグラウンドを足した関数でフィッティングをかけて、その結果から偏光の向きと直線偏光度を求めている。外側の円では偏光の向きの回転が崩れてくるが、内側の円周上では角度位置が変わるとともに偏光の向きが回転していく様子が見て取れ、ベクトルビームとなっていることが確認できる。また、中心からの距離が変わることによっても微妙に偏光の向きが変化する。これはアンジュレータ光の位相が放射される角度に依存するため、上流と下流のアンジュレータで観測面の中心からの距離に応じた位相の変化量が異なるためである。

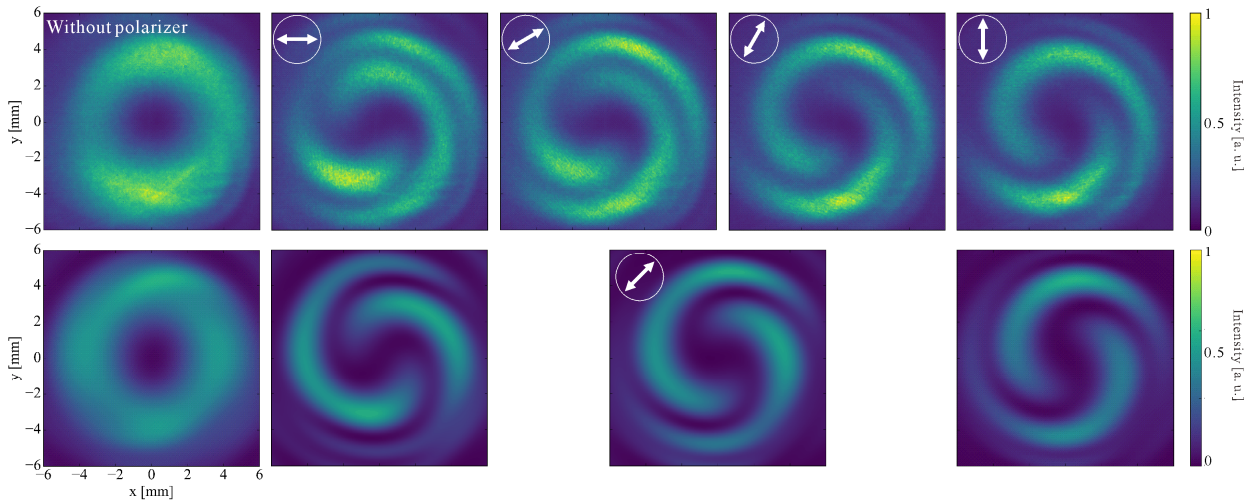


Figure 3: Obtained intensity distributions. Experimental and simulated results are shown in the top and bottom row respectively. Most left column shows intensity without polarizer, and others shows intensity through polarizer. The azimuth angles of polarizer are shown in the top left of each figure by the white arrow. These angles are 0, 30, 60, 90 degrees in experiments and 0, 45, and 90 degrees in simulations.

次にフェーズシフターを使ってアンジュレータ間に  $0.12 \mu\text{m}$  程度の軌道長の伸びを作り、アンジュレータ光間に  $180$  度の位相差をつけて同様のデータを取得し解析した。Figure 5 に得られた偏光の分布を示す。Fig. 4 の分布から概ね  $90$  度回転したものになっており、Eq. (1) の結果と矛盾しない。

Figure 4 における直線偏光度を Fig. 6 に示す。直線偏光度は強度の偏光子角度依存性のフィッティング結果で  $\sin$  関数の振幅全幅とそれにバックグラウンドを足した全強度との比を取っている。シミュレーションでは、バンドパスフィルターで波束が伸びる効果を適切に取り込めないため、文献[6]に従って一律に  $15\%$  偏光度が減少するとして扱った。どちらも  $60\text{-}80\%$  近い偏光度となっており概ね一致する。

## 5. まとめ

逆回転するアンジュレータ光渦を重ね合わせることでベクトルビームを生成する手法を提案し、実証実験を行った。重なった光は anti-vortex mode のベクトルビームとなっておりフェーズシフターで光の位相差を変えることで全体を任意の向きに回転できる。この手法を用いることで将来建設される回折限界放射光源において短波長でのベクトルビーム生成が可能となる。

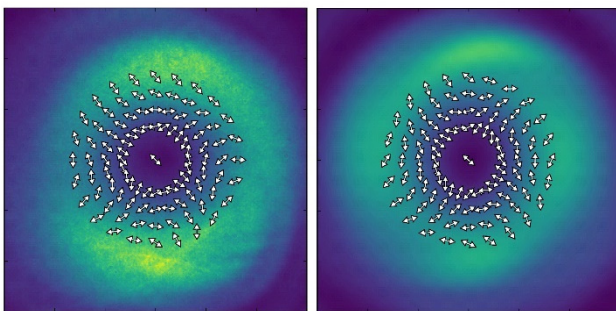


Figure 4: Distributions of directions of polarization on observing plane. Right and left figure show experimental and simulated results respectively. [5]

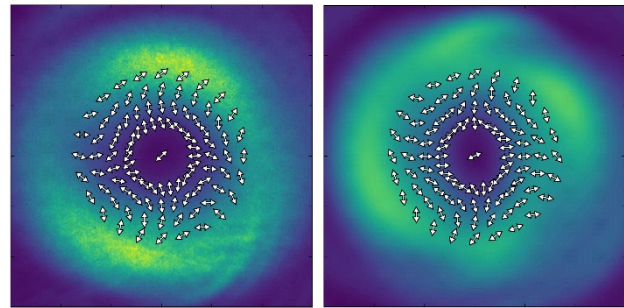


Figure 5: Distributions of directions of polarization on observing plane with phase shifter operation. Phase shifter is operated for path lengthening about  $0.12$ . Right and left figure show experimental and simulated results respectively. [5]

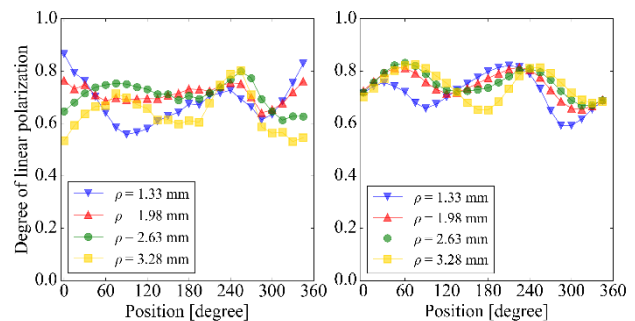


Figure 6: Degree of linear polarization on the observing plane. The left and right figures are measurements and simulation results corresponding to Fig. 4. The horizontal axis and  $\rho$  indicate the position as azimuthal angle and distance from center. [5]

## 謝辞

本研究は科研費 JSPS 科研費 17H01075、自然科学研究機構分野融合型共同事業、分子科学研究所協力研究の助成を受けたものです。UVSOR BL1U は文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラムの補助を得て建設されたものです。

## 参考文献

- [1] H. Rubinsztein-Dunlop *et al.*, *J. Opt.* 19, 013001 (2017).
- [2] E. Hemsing *et al.*, *Nat. Phys.* 9, 549 (2013).
- [3] J. Bahrtdt *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 111, 034801 (2013).
- [4] M. Katoh *et al.*, *Sci. Rep.* 7, 6130 (2017).
- [5] S. Matsuba *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 113, 021106 (2018).
- [6] K. J. Kim, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 219, 425 (1984).