

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：63903

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18305

研究課題名(和文)直線偏光アンジュレータを用いた放射光渦の発生

研究課題名(英文)Development of fast-switchable vortex radiation with planar undulators in tandem

研究代表者

藤本 将輝(Fujimoto, Masaki)

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・助教

研究者番号：50780491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：大気中で観測可能な深紫外領域で2次光が発生するように2台のアンジュレータをそれぞれ水平偏光、垂直偏光で動作させて干渉光を生成し、カメラで光学像を観測する実験を行った。バンチャ電磁石で干渉位相を制御しながら、偏光度分布の測定を行い、反転した光渦の重ね合わせを示す偏光分布の観測に成功した。偏光子を通した光の回折像から特異点を観測する実験を行ったが、光渦の抽出には至っていない。一方、干渉位相を変化させることで、ラジアル偏光と呼ばれる軸周りに偏光ベクトルが径方向に分布するベクトルビームの発生に成功した。

本研究は自然科学研究機構分子科学研究所の低エミッタンス蓄積リングUVSOR-IIIを用いて実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光渦やベクトルビームといったトポロジカル光は特異点と特徴的な偏光特性をもち、さまざまな分野で研究、実用に展開されている。放射光を用いた本研究におけるラジアル偏光の発生は、放射光を用いたトポロジカル光の発生研究もまた近年盛んであり、本研究はアンジュレータ光の重ね合わせを用いたラジアル偏光の新しい発生手法を開拓した。

放射光として発生した極端紫外領域の光渦を物性実験に利用する研究がすでに開始している。真空紫外領域からX線に至るまでの短波長光の発生を得意とする放射光を用いた光渦・ベクトルビーム発生手法の拡大により、物質科学研究におけるトポロジカル光の新しい応用展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have conducted an experiment to observe the optical image of superposition of second harmonics from two undulators with operating horizontally and vertically polarized mode in the DUV region, where is observable in the atmosphere. The polarization distribution which indicates superposition of inverted optical vortices was successfully observed by controlling the interference phase with a buncher magnet. After that, we tried to observe singularity, characterizes optical vortex, from the diffraction image of light that passed through a polarizer, but optical vortices have not been extracted.

On the other hand, by changing the interference phase, we succeeded in generating a kind of vector beam called radial polarization, in which the polarization vector is distributed in the radial direction around the axis.

This research was carried out using UVSOR-III, the storage ring with low emittance of the Institute for Molecular Science, National Institute for Natural Sciences.

研究分野：放射光物理

キーワード：放射光 光渦 アンジュレータ 加速器 ベクトルビーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光波面が位相特異点の周りを螺旋状に伝播する現象は光渦と呼ばれる。光渦は 1970 年代にその現象の存在が理論的に予言されていたが、1992 年に N. R. Heckenberg らによって格子欠陥をもつ回折格子に円偏光レーザー光を通すことで発生可能であることが実験的に示された。特に、ラゲールガウシアンモードの電磁波が光渦であり、このような光が軌道角運動量を運ぶことが L. Allen らによって示され、光渦の存在は一躍注目を集めることとなった。一般に光渦の性質として、(1)位相特異点の周りを螺旋状に伝播する波面、(2)螺旋波面の構造に応じた軌道角運動量、(3)円環状の強度分布が挙げられる。光渦は物体に軌道角運動量を与えて回転運動を誘起することから、光で微粒子を非接触操作する光ピンセットや物質加工のさらなる微細化を可能にするほか、光渦の軌道角運動量を量子情報として取り扱うことで情報通信の大容量かつ高速化が期待されるなど、様々な分野での応用研究が活発に展開されている。

電子加速器で加速した高エネルギー電子ビームを円偏光アンジュレータに通すことで発生する放射光の高次光が自発的に光渦となることは 2008 年に S. Sasaki らによって理論的に予言された。放射光による光渦は 2013 年にドイツの電子蓄積リング BESSY-II を用いて初めて観測され、続いて我が国の UVSOR-III でも観測された。放射光源はレーザー光源では発生が困難な波長領域での高輝度光の発生を得意としており、真空紫外光や X 線といった波長領域で分子・原子といったよりミクロな系に対する放射光光渦の軌道角運動量を利用した応用研究がすでに始まっている。一方、円偏光アンジュレータに比べてより単純な磁場構造をも直線偏光アンジュレータの高次光はエルミートガウシアンモード(HG モード)となり、特に偶数次光は光軸に非対称な波面構造をもつことが報告されている。本研究はこの性質を利用し、直線偏光アンジュレータ放射光かららせん状の波面を生成する。

2. 研究の目的

(1) 直線偏光アンジュレータ 2 次光がもつ特異な波面を利用し、2 台のアンジュレータの干渉によってらせん状の光波面を得る。光学素子を用いた光渦発生とは異なり、本手法は素子の光学特性に左右されない。このため、極端短波長や波長可変といった放射光の特性を損なうことなく放射光光渦を得る。

(2) 放射光渦の波面方向を簡便に切り替える手法を確立する。円偏光アンジュレータによる光渦放射における磁極配列の切替のような大きな機械的動作を必要としないため、光渦の軌道角運動量変調実験などへの応用を可能とする。

3. 研究の方法

2 台のアンジュレータからそれぞれ水平・垂直偏光を発生すれば、2 次光は直交した HG10 モードの重ね合わせとなる。このとき、2 次光の干渉を 45 度方向に直交する直線偏光成分に展開すれば、互いに反転した螺旋状の位相分布を持つ直線偏光が得られる。これはすなわち反転した光渦の重ね合わせに等しく、偏光子を用いてこれを取り出す。また、干渉位相相差の半波長シフトによって、さらに偏光方向と位相分布の組み合わせが逆転する。

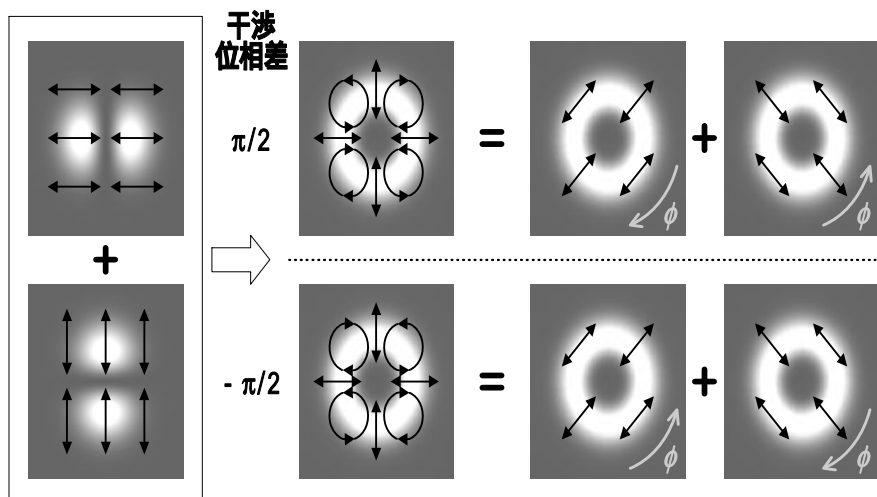


図 1: 光渦生成プロセスの概略図。光モード像中に黒矢印で偏光を示す。

分子科学研究所における 750MeV 電子蓄積リングである UVSOR-III のビームライン BL1U は、光クライストロンと呼ばれる構成の 2 台の直列設置されたアンジュレータおよびその間にバンチャーを有する。各アンジュレータは同一仕様の偏光可変型(Apple-II)であり、前段・後段アンジュレータを水平および垂直偏光モードに設定して真空紫外領域の放射光を発生する。BL1U の設置されたアンジュレータの磁場周期数は 10 であり、およそ 10 パーセントの帯域幅をもつ準単色光を発生する。バンチャーは並列 3 極の偏向電磁石から構成され、電子ビームにバンプ軌道を与えることで後段アンジュレータへの入射に遅延を発生する。このとき、前段および後段のアン

ジュレータで発生する光の干渉位相差に変化を与える。光渦生成の確認は、BL1Uにおいて深紫外領域で発生したアンジュレータ光を石英窓を通じて大気中に取り出し、紫外領域に感度を持つ高感度 CCD カメラを用いて干渉光の観測を行う。狭帯域のバンドパスフィルターを用いて取り出す。このとき、アンジュレータの磁極間隔を変えて2次光波長をフィルターの透過波長に合わせる。光渦発生の干渉条件の調査および発生確認は、ダブルスリットなどの回折素子を大気中に設置した光学系に組み込み、光渦特有の回折パターンを検出を行う。光渦の回折パターンは、特異点付近で干渉縞が波面のらせん方向に歪むことが報告されており、この性質を利用して回折パターンを観測しながら偏向電磁石の磁場を変えて光渦発生の条件を調査し、また、さらに磁場強度の変化によって波面のらせん方向が逆転することを確認する。

4. 研究成果

波長 266 nm および 355 nm の深紫外領域で2次光が発生するように2台のアンジュレータをそれぞれ水平偏光、垂直偏光で動作させ、1パーセント程度の帯域幅をもつバンドパスフィルターで干渉光を生成し、CCD カメラで観測する実験を行った。バンチャ電磁石の磁場を変えて干渉位相を制御しながら、まずはじめに回転検光子法による偏光度分布の測定を行った。図 2(a)に観測した偏光度分布を示す。暗部は円偏光、明部は直線偏光を示しており、不完全ながら軸周りに円偏光と直線偏光が交互に現れる分布の観測に成功した。これは反転したらせん波面をもつ光渦の重ね合わせによるものと考えられ、ワイヤグリッド偏光子をアンジュレータの偏光方向に対して45度に設置し、光渦の抽出を試みた。ナイフエッジによる回折パターンから特異点を観測する実験を行ったが、光渦発生を特徴づけるパターンの観測には至っていない。主因として、アンジュレータ配置が直列であることから観測点でのビームサイズが異なり、強度差をもった干渉により光渦発生に必要な偏光状態が得られていないことを検討している。本助成は2019年度で終了したが、引き続きアンジュレータ光の重ね合わせによる光渦発生の開発を行っていく予定である。

一方、干渉位相を変化することで、ラジアル偏光と呼ばれる偏光ベクトルが放射状に分布するベクトルビームの発生に成功した。実験は光渦の発生実験と同じ、大気中で観測可能な波長 266 nm で行った。図 2(b)に CCD カメラで撮影した放射光の重ね合わせの像と、ワイヤグリッド偏光子を用いた回転検光子法によって測定した光軸周りの偏光ベクトル分布を示す。ラジアル偏光は光渦と同様、中心に特異点を有し、円環状の強度分布を有する。光強度の大きい円環部では80パーセント程度の直線偏光を示し、径方向に最大となるおよそ軸対称な偏光ベクトルを観測した。放射光を用いたラジアル偏光を含むベクトルビームの発生は偏向電磁石部におけるエッジ放射によるものが知られており、テラヘルツ帯域での観測が報告されている。また近年、2台の円偏光アンジュレータ放射の2次光を重ね合わせることで anti-vortex と呼ばれるベクトルビームの発生が可能となっている。本研究におけるラジアル偏光の発生は、放射光を用いた新しいベクトルビームの発生手法を開拓するものである。ラジアル偏光は、レーザー加工や光ピンセットなどその軸対称偏光を利用した研究、実用が幅広く行われており、また近年では強集光によって光軸方向に電場ベクトルを発生する性質を利用した新しい応用が注目されている。放射光を用いた短波長ラジアル偏光の発生によって、それらの性質を利用した新しい物質科学への展開が期待される。

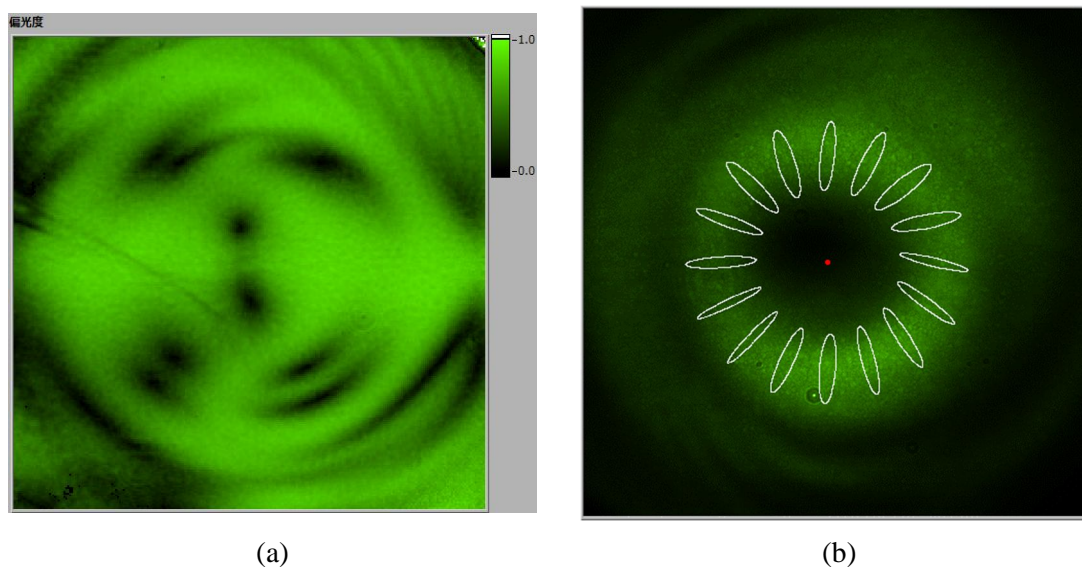


図 2(a): 直交する直線偏光アンジュレータ2次光重ね合わせの偏光度分布。(b): 干渉位相を変えて観測したアンジュレータ光の強度分布および軸周りの偏光状態。偏光子角度に対する偏光ベクトルの大きさを包絡線で示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤本将輝
2. 発表標題 タンデムアンジュレータを用いたラジアル偏光放射の発発生
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本将輝
2. 発表標題 2台の直線偏光アンジュレータを用いたトポロジカル光発生
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考