

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2015

課題番号：26390112

研究課題名(和文) シンクロトロン放射光の偏光・位相精密測定による光の軌道角運動量の解明

研究課題名(英文) Reveal Light's Orbital Angular Momentum of Synchrotron Radiation with precision measurements

研究代表者

佐々木 茂美 (SASAKI, Shigemi)

広島大学・放射光科学研究センター・教授

研究者番号：00542284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：回折限界光源UVSOR-IIIの直線部に挿入された2台の円偏光アンジュレーターから発生する次数の違う高次光の干渉パターンをマルチチャンネル分光器と紫外線域CCDカメラを用いて観測した。これらの測定で、1重、2重、3重の渦状干渉パターンが現れることを確認した。この結果は左右円偏光の全てのモードにおいて理論的予想と非常によく一致した。また、偏光子を回転することにより渦状干渉パターンも回転することを見出した。これら新奇な性質は物質科学の新たな探針となることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Spiral interference patterns between two different harmonic radiations from two tandem-aligned helical undulators were observed by a scanning fiber multi-channel spectrometer and a UV-CCD camera placed at the end of beamline downstream of S1 straight section in UVSOR-III. Using these measurements, various interference patterns such as single, double, and triple spirals were observed which concur with the theoretical predictions for every mode in the right or left circular polarization. The rotation of an interference pattern by rotating a polarizer was also observed. These exotic properties of helical undulator harmonics may be utilized to develop a new research probe for materials science.

研究分野：ビーム物理

キーワード：光渦 光の軌道角運動量 円偏光アンジュレーター 高次光 干渉 回折

1. 研究開始当初の背景

光が真空中や媒質中を伝播する際の位相の特異点の出現や軌道角運動量(OAM)を運ぶ新奇な性質は Laguerre Gaussian(LG)モード及び Hermite-Gaussian(HG)モードと呼ばれる状態と関係しており、レーザー光学研究分野において近年大きな注目を集めている[1, 2]。なぜなら、LGモードでは光の伝搬軸(光軸)の周りに波面がらせん状に伝搬するので、ポインティングベクトルが光軸に対して一定の角度で傾いており、光軸に垂直な面内にも力が働く。そのため、物体を光軸の周りに回転させることができるなど、種々の応用が考えられている。LGモードの研究は、主に可視光領域のレーザーによるものが先行していたが、最近になってシンクロトン放射光(SR)を用いた硬 X 線領域(数 keV ~ 数十 keV)でもらせん状位相子など特殊な光学素子を通すことにより LG モードが発現することが実証された[3]。これを受けて、OAM を運ぶ LG モードの特性を活かし、硬 X 線領域で OAM 誘起 X 線二色性をプローブとした物性研究の手法が提案されている[4]。

一方、本課題申請者は、申請に先立つこと5年前の2008年に、可変偏光アンジュレーターからの高次光が偏光状態に応じて LG モードあるいは HG モードの光を発生することを理論的に初めて見出した[5]。図 1 に示すように、円偏光アンジュレーターの中を走る電子が放射する光について、次数 n の高次光に関して光の電場の位相が光軸を中心に $2\pi(n-1)$ だけ変化する。一方、偏向電磁石からの放射光は LG モード成分を持たないが、垂直直線偏光成分の電場位相の空間分布は直線偏光アンジュレーターからの2次光の HG モードと等価であることを明らかにした。HG モードは特殊な偏光光学素子(位相子)を用いることでそれに等価な LG モードに変換可能である。即ち、円偏光アンジュレーター光でなくても位相子を用いて LG モードへ変換し、それを利用することができる。

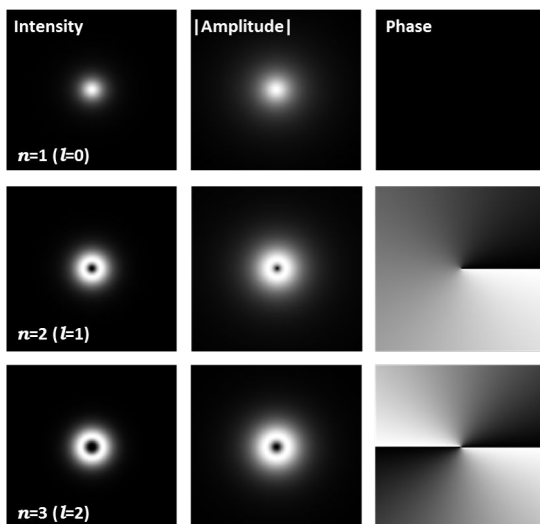


図 1. 円偏光アンジュレーターから放射する光の空間分布: (左から)光強度、電場振幅、電場の位相。上段:1次光、中段:2次光、下段:3次光。

2. 研究の目的

真空紫外線や軟 X 線は、物質中の電子状態と強い相互作用をするため、機能材料研究に有効である。一例として、比較的浅い内殻電子を元素選択的に励起することが出来るため、軽元素から重元素までの幅広い物質を研究対象にすることができる。もし、LG モードを真空紫外線・軟 X 線領域で利用できれば、この波長領域の上記特徴を活用した OAM 依存の全く新しい物性研究手法を構築することが出来ると考えられる。

本研究では、円偏光アンジュレーターからの高次光が OAM を運ぶという物理現象、即ち、LG モードの理論予測[5]を実験的系統的な実証を試みる。

3. 研究の方法

UVSOR-III は電子ビームエネルギー750 MeV、エミッタンス 17.5 nm-rad の第3世代光源リングである。ユーザー運転モードで利用可能な放射光の波長範囲は、真空紫外線域から軟 X 線域までであるが、軌道角運動量検証実験にはユーザー運転の間に設けられているマシンスタディー用ビームタイムを利用し電子ビームエネルギーを下げて実験を行った。回折限界エミッタンスは光源のサイズと角度広がり積を用いて $\Delta x \Delta \theta = \lambda / 4\pi$ で定義される。この式より $\epsilon_x = 17.5$ nm-rad で回折限界光となる波長は 220 nm 以上、エネルギーは 6 eV 以下であることが分かる。4章に示すように実験は全て波長 245 nm 以上で行ったので 750 MeV のリングエネルギーで既に回折限界光源と見なされる。しかし、干渉パターンの鮮明度はわずかのビーム広がりによっても落ちるので、強度分布の分解能を上げるためにトポロジカルチャージの次数に応じてリングエネルギーを 600 MeV、500 MeV、400 MeV に下げて実験した。

光が軌道角運動量を持っていることを検証する方法として最も簡便な方法の一つは異なる軌道角運動量子数を持つ光どうしの干渉パターンを見ることである。我々は UVSOR-III の一つの直線部にバンチャーを挟んで2台直列に設置された APPLE 型可変偏光アンジュレーターを用い、上流、下流のアンジュレーターでそれぞれ異なる次数の高次光を発生させ、モノクロメーターあるいは狭帯域バンドパスフィルタを通った後の光の干渉パターンを観察した。さらに、異なる次数の光同士の干渉実験の後、下流のアンジュレーターのみを用いて円偏光モードの2次光を光源とするナイフエッジによる回折実験を行った。図 2 に2台のアンジュレーターからの放射の干渉実験の概念図を示す。この図に示すように、光源と CCD カメラの間には、集光光学系は挿入せず、バンドパスフィルタと必要に応じて偏光子のみを置いた。図 3 に回折実験セットアップの概略図を示す。回折実験では、光源リングからの光取出し窓から 425 mm の位置に焦点距離 2 m の

凸レンズを置き、焦点位置に置いたアイリスを通した後にバンドパスフィルタとナイフエッジを置き、CCD カメラでフレネル回折パターンを撮像した。

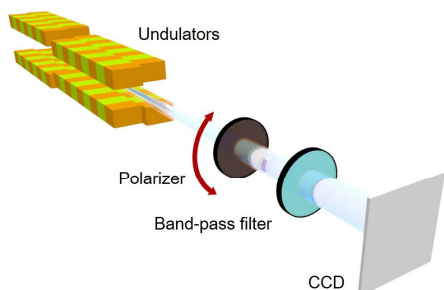


図 2. 光干渉実験のセットアップ

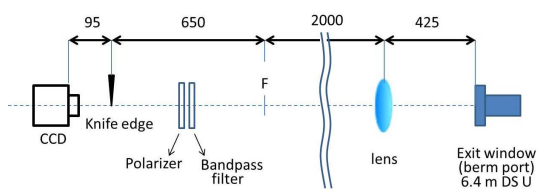


図 3. ナイフエッジによるフレネル回折実験のセットアップ

4. 研究成果

(1) 異なった軌道角運動量を運ぶ光どうしの干渉実験

図 4 と図 5 にファイバー分光器をスキャンして得られた基本波と 2 次光の干渉パターンと、基本波と 3 次光の干渉の CCD 画像を示す。

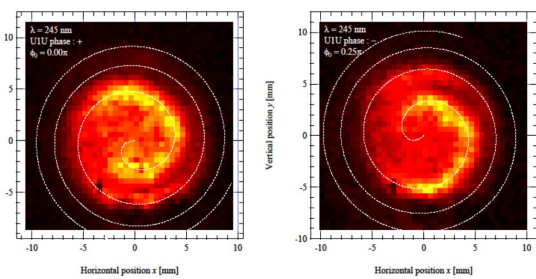


図 4. ファイバー分光器をスキャンして得られ干渉パターン. 上流 U: 円偏光 2 次光, 下流 U: 直線偏光 1 次光, $E = 600 \text{ MeV}$, $\epsilon_0 = 11 \text{ nm-rad}$, $\lambda = 245 \text{ nm}$.

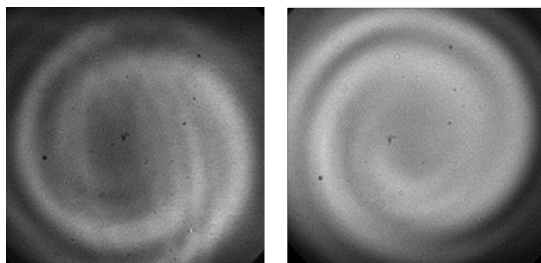


図 5. 逆ヘリシティードウしの円偏光 1 次と 3 次光の 2 重スパイラル干渉パターン. UV-CCD カメラによる撮像, バンドパスフィルタ: 透過波長 355 nm , バンド幅 $\Delta\lambda = 1.3 \text{ nm}$, $E = 500 \text{ MeV}$, $\epsilon_0 = 5 \text{ nm-rad}$, $\lambda = 355 \text{ nm}$.

(2) 軌道角運動量を運ぶ光による回折実験

図 6 にナイフエッジによる回折実験のセットアップでスクリーンに写った下流の円偏光アンジュレーターからの 2 次光の強度分布と、ナイフエッジをビーム軸中心付近に置いたときに生じたフレネル回折パターンを示す。

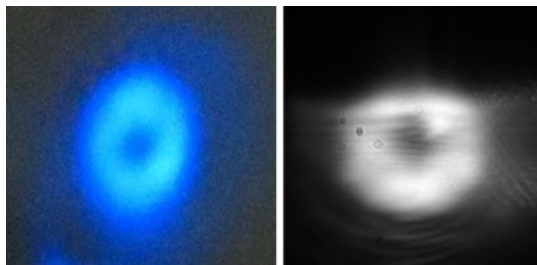


図 6. 焦点付近に置いたスクリーンに写った円偏光 2 次光の強度分布 (左) と、ナイフエッジによって生じたフォーク型に分岐したフレネル回折縞. $E = 500 \text{ MeV}$, $\epsilon_0 = 8 \text{ nrad}$, $\lambda = 355 \text{ nm}$.

本研究では、円偏光アンジュレーターからの高次光が LG モードにあること、即ち OAM を運ぶという物理現象を系統的实验により実証した。本成果は放射光の新奇な性質が物質科学研究の新しいプローブとなる可能性を持っていることを示した。

< 引用文献 >

- D.G. Grier, Nature **424**, 810 (2003).
- M. Padgett, J. Courtial, and L. Allen, Physics Today, p. 35, May, 2004.
- A.G. Peele, et al., J. Opt. Soc. Am. **A 21**, 1575 (2004).
- M. van Veenendaal and I. McNulty, Phys. Rev. Lett. **98**, 157401 (2007).
- S. Sasaki and I. McNulty, Phys. Rev. Lett. **100**, 124801 (2008).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

S. Sasaki, A. Miyamoto, M. Hosaka, N. Yamamoto, T. Konomi, M. Katoh, "Analyses of Light's Orbital Angular Momentum from Helical Undulator Harmonics", Proc. of IPAC '15, Richmond, VA, May, 2015, pp.1563-1565. (査読無し)

佐々木 茂美, 「円偏光アンジュレーター高次光が運ぶ光の軌道角運動量」, 加速器 Vol 11, No. 4, 2014, pp.221-229 (査読有り)

佐々木茂美、宮本篤、加藤政博、許斐太郎、保坂将人、山本尚人, 「円偏光アンジュレーター高次光が運ぶ光の軌道角運動量観測」, Proc. The 11th PASJ Meeting, 2014, pp.19-20 (査読無し)

〔学会発表〕(計7件)

保坂将人、N. S Mirian、加藤政博、山本尚人、許斐太郎、黒田健太、宮本篤、宮本幸治、佐々木茂美、「円偏光アンジュレータから発生する光渦の回折実験」,日本物理学会第71年次大会,東北学院大 泉キャンパス,2016年3月22日

佐々木茂美、宮本幸治、宮本篤、許斐太郎、山本尚人、保坂将人、黒田健太、Najmeh Mirian、加藤政博、「円偏光アンジュレータからの OAM 光干渉実験と解析」,第29回放射光学会年会,柏の葉カンファレンスセンター,2016年1月10日

S. Sasaki, A. Miyamoto, M. Hosaka, N. Yamamoto, T. Konomi, M. Katoh, T. Imazono, M. Koike, 'Experimental Evidences of Light's Orbital Angular Momentum carried by Helical Undulator Radiation Harmonics', Int'l Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation SRI2015, July, 7, 2015, New York, NY, USA.

S. Sasaki, A. Miyamoto, M. Hosaka, N. Yamamoto, T. Konomi, M. Katoh, "Analyses of Light's Orbital Angular Momentum from Helical Undulator Harmonics", 6th Int'l Particle Accelerator Conf., May 3-8, 2015, Richmond, VA, USA.

佐々木茂美、宮本篤、加藤政博、許斐太郎、保坂将人、山本尚人、今園孝志、小池雅人、「軌道角運動量を持つ円偏光アンジュレータ高次光干渉実験」,第28回放射光学会年会,立命館大学びわこ・くさつキャンパス,2015年1月12日

佐々木茂美、宮本篤、加藤政博、許斐太郎、保坂将人、山本尚人、今園孝志、小池雅人、「解説限界光から発する軌道角運動量を持つ光とその応用」,先端放射光源に関する研究会,岡崎カンファレンスセンター,2014年11月21日

佐々木茂美、宮本篤、加藤政博、許斐太郎、保坂将人、山本尚人、「円偏光アンジュレータ高次光が運ぶ光の軌道角運動量観測」,第11回日本加速器学会年会,青森,2014年8月9日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 茂美 (SASAKI, Shigemi)

広島大学・放射光科学研究センター・教授
研究者番号: 00542284

(2)研究分担者

小池 雅人 (KOIKE, Masato)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原

子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究員

研究者番号: 50354973

今園 孝志 (IMAZONO, Takashi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号: 50370359

宮本 篤 (MIYAMOTO, Atsushi)

広島大学・放射光科学研究センター・助教
研究者番号: 90403617

(平成26年度のみ)

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

加藤 政博 (KATOH, Masahiro)

保坂 将人 (HOSAKA, Masahito)

山本 尚人 (YAMAMOTO, Naoto)

許斐 太郎 (KONOMI, Taro)

宮本 幸治 (MIYAMOTO, Koji)

黒田 健太 (KURODA, Kenta)

Johannes Bahrdt (BAHRDT, Johannes)

Ian McNulty (McNULTY, Ian)