

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

OBSERVATION OF LIGHT'S ORBITAL ANGULAR MOMENTUM FROM HELICAL UNDULATOR HARMONICS

佐々木茂美^{#, A)}, 宮本篤^{A)}, 加藤政博^{B)}, 許斐太郎^{B)}, 保坂将人^{C)}, 山本尚人^{C)}

Shigemi Sasaki^{#, A)}, Atsushi Miyamoto^{A)}, Masahiro Katoh^{B)}, Taro Konomi^{B)}, Masato Hosaka^{C)}, Naoto Yamamoto^{C)}

^{A)} Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

^{B)} UVSOR, Institute for Molecular Science

^{C)} Nagoya University Synchrotron radiation Research center

Abstract

A spiral interference pattern between fundamental and second harmonic radiations from two tandem-aligned helical undulators was observed by scanning a fiber multi-channel spectrometer placed at the end of beamline downstream of S1 straight section in UVSOR. With these experiments, interference patterns were in good agreement with those by theoretical prediction for right and left circular polarization modes. Also, similar interference measurement was done by using a CCD camera. With this measurement, we observed a rotation of spiral pattern by changing the undulator gap.

1. はじめに

光に量子化された軌道角運動量の性質を付与することは、1990年代にレーザー光学分野の研究者により、近軸光線において実現可能であることが示された[1]。近年可視光領域のレーザーを光源として、転位の入った回折格子などの光学素子を用いて光に軌道角運動量(OAM)を付与し、液体中に浮遊する微小物体の位置を光軸のまわりに回転させることのできる光学ピンセットなどの応用研究が盛んに行われている[2]。また、放射光科学分野でもスパイラルゾーンプレートやスパイラル位相子を用いて硬X線ビームに OAM を付与する試みが成功しており、この新奇な性質を放射光利用実験のための新たなプローブとして用いることが提案されている[3]。一方、放射光源としての円偏光アンジュレータからの高次光が OAM を運ぶことは、本報告の著者の一人(S. S.)によって理論的に予想されており[4]、最初の実験的検証は 2013 年に、リングエネルギーを 917 MeV まで

下げた BESSY-II でなされた[5]。これは、光の OAM という性質が波面の位相が光軸のまわりで空間的に変化していることを意味しているため、回折限界エミッタンスより大きいエミッタンスではこの性質を検出することが難しいからである。つまり、BESSY-II では、リングエネルギーを下げた観測する OAM 光の光子エネルギー(99 eV)で回折限界光が得られるようにした。

他方、UVSOR-III は真空紫外線域の放射光実験施設では、世界で唯一の紫外線域回折限界光を発生可能な光源リングであり、この利点を生かし我々は高次光が持つ軌道角運動量を近い将来に放射光利用研究に活用することを目指し、UVSOR 光源リングに設置された 2 台の APPLE 型偏光可変アンジュレータから発生される可視光から紫外線域の放射光を用いて、光の軌道角運動量という新奇な放射光の性質解明のための実験を行った。Figure 1 は、APPLE-II 型アンジュレータから OAM 光が発生される模式図である。

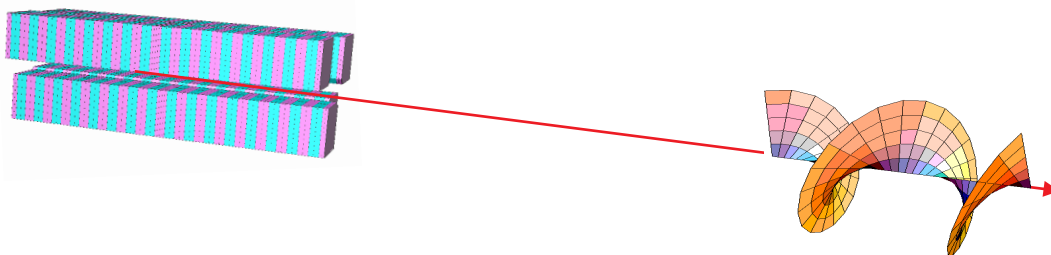


Figure 1: Schematics of APPLE-II undulator generating OAM light.

2. 実験の概要と結果

Figure 2 は実験に用いた 2 台のアンジュレータの模式図である。これら 2 台の APPLE-II 型アンジュ

レータは、UVSOR リングの S1 直線部に設置されており、2 台のアンジュレータの間には自由電子レーザー実験に用いるバンチコンプレッサー電磁石システムが設置されている。本実験ではこの電磁石を上流側及び下流側のアンジュレータ光の軸合わせのためのステアラーとして使用した。

[#] sasakis@hiroshima-u.ac.jp

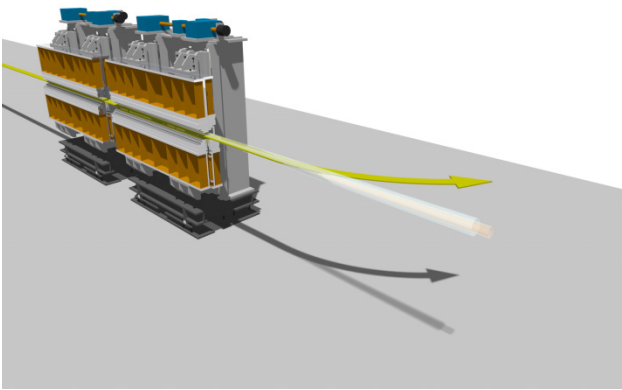


Figure 2: Schematic drawings of undulator set-up.

これまでに行った2回の実験で、UVSOR-S1 直線部に挿入された2台のAPPLE-II型アンジュレータから放射される光の干渉パターンをBL-1ビームラインの最下流に設置した可視-紫外域に感度を持つファイバマルチチャンネル分光器とCCDカメラを用いて測定した。

実験は、波長245nmにおいて、軌道角運動量を持たない($l=0$)直線偏光したアンジュレータ放射と $l=+1$ 及び $l=-1$ の左右円偏光した円偏光アンジュレータからの2次光を干渉させ、光の強度分布をファイバマルチチャンネル分光器をスキャンして測定した。その結果、それぞれ右回りと左回りの螺旋状の強度パターンを観測した。Figure 3に実験結果の例を示す。

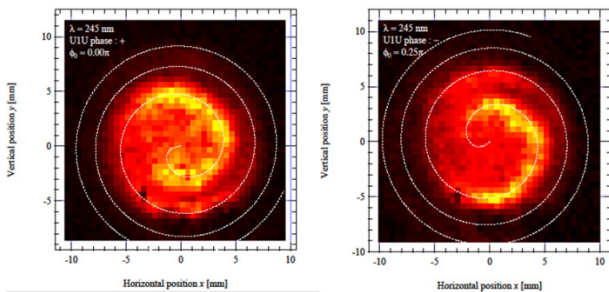


Figure 3: Observed interference patterns for right and left handed circular polarization, respectively.

また、直線偏光アンジュレータ放射に代えて、円偏光アンジュレータからの1次光を用いた場合にも同様の螺旋状強度パターンが観測された。

これらの結果から、円偏光アンジュレータからの2次光は、右回りあるいは左回りという円偏光のヘリシティに対応して $l=\pm 1$ の軌道角運動量を持つことが明らかになった。

Figure 4は、CCDカメラで観測した干渉パターンの連続撮影の1ショットである。連続撮影はアンジュレータギャップを開けながら行い、スパイラル干渉パターンがギャップの変化に伴って回転することが明らかとなった。このような、干渉パターンの動的観測を行い、スパイラル干渉パターンが回転することを見出したのは本実験が世界最初である。

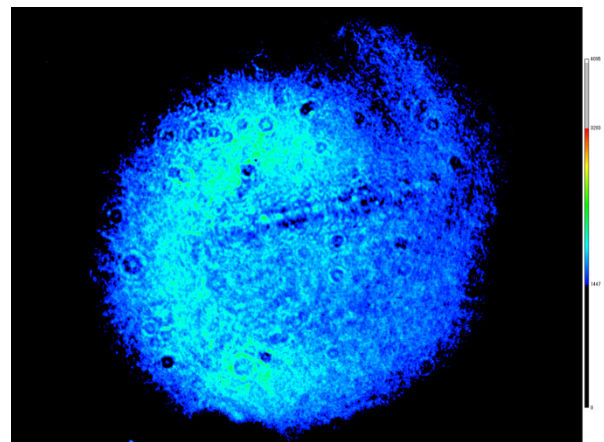


Figure 4: Observed image captured with CCD camera.

3. まとめ

これまでの実験では、 $l=0$ と $l=\pm 1$ の間の干渉しか観測しておらず、BESSY-IIで行われた実験の検証と干渉パターンがアンジュレータギャップの変化に伴って回転するという実験事実しか得られていない。今後の実験では、 $l=+1$ と $l=-1$ の干渉実験、 $l=0$ と $l=\pm 2$ の干渉実験を試み、系統的かつ定量的な実験結果を得る予定である。

本研究などで明らかになりつつある円偏光アンジュレータ放射の高次光が運ぶ軌道角運動量という新奇な性質は、放射光および自由電子レーザーの利用研究に新しいプローブをもたらすことが期待される。

参考文献

- [1] L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, and J.P. Woerdman, Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992).
- [2] M. Padgett, *et al.* Physics Today, p.35, May, 2004, <http://www.gla.ac.uk/schools/physics/research/groups/optics/>
- [3] M. VanVeenendaal and I. McNulty, Phys. Rev. Lett. **98**, 157401 (2007).
- [4] S. Sasaki, I. McNulty, Phys. Rev. Lett. **100**, 124801, 2008.
- [5] J. Bahrndt, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 034801, 2013.