

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286081

研究課題名(和文) シンクロトロン放射による真空紫外コヒーレント光渦ビームの発生

研究課題名(英文) Generation of Coherent VUV Vortex beam by Synchrotron Radiation

研究代表者

加藤 政博 (KATO, Masahiro)

分子科学研究所・極端紫外光研究施設・教授

研究者番号：30185871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：回折限界高エネルギー電子ビームを円偏光アンジュレータを通すことで軌道角運動量を運ぶ光、光渦、の生成に成功し、それが螺旋状の波面を有することを空間的にコヒーレントな光渦ビーム同士の干渉実験で実証するとともに、ビーム中心での位相特異点の存在をダブルスリットを用いた回折実験で実証することに世界で初めて成功した。また、この現象の背景に、円軌道放射という極めて普遍的な放射現象により螺旋状の波面を有する放射場が生成されるという意外な事実があることを世界で初めて理論的に示した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in generating an optical vortex beam, which carries the orbital angular momentum from a diffraction-limited high energy electron beam passing through a circular polarization undulator. We have demonstrated that it has a spiral wave-front by interfering two spatially coherent optical vortex beams. We have demonstrated for the first time that a phase singularity exists at the beam center by a double-slit diffraction experiment. As the underlying physics of this phenomenon, we have shown theoretically for the first time that radiation from an electron in circular motion possesses a spiral wave-front and carries orbital angular momentum.

研究分野：ビーム物理学、加速器科学、量子ビーム科学

キーワード：加速器 放射光 角運動量 コヒーレンス 電磁波

1. 研究開始当初の背景

シンクロトロン光はテラヘルツから X 線に至る広大な波長域で良質な光源として基礎学術研究から産業応用まで幅広い分野で用いられている。我々は分子科学研究所のシンクロトロン光源 UVSOR において、新奇な光源開発専用のアンジュレータやレーザー装置、ビームラインを整備してきた。偏光可変のコヒーレントシンクロトロン光を含む様々な新奇な光の発生に成功してきている。通常の円偏光の光は量子論的にはスピンを有する光子とみなされるが、一方で波面(等位相面)が螺旋でその中心点では電磁場強度がゼロとなるような光が存在する。そのような光は光渦とも呼ばれ、スピンとは別に、軌道角運動量を有することが理論的に示された。このような光は今日ではレーザー光源を用いて比較的容易に発生でき、情報通信やイメージング、ナノテクノロジーなど様々な応用を目指して実験的研究が活発に行われるに至っている。しかし従来の実験研究の大部分は、レーザー光源を用いていることから、可視光領域を中心とする限られた波長領域で行われてきた。

一方、シンクロトロン光の分野でも、円偏光アンジュレータの高次光が光渦である可能性が佐々木(広島大学)らにより理論的に示され、最近、これがドイツのチームにより実験的に検証された。アンジュレータ光は原理的にはマイクロ波から X 線まで広大な波長域で強力であるが、とりわけ、レーザー光源では出すことの難しい、真空紫外線や X 線の領域で優位である。アンジュレータによる光渦の発生は、これまで可視光近傍に限られてきた光渦研究を、X 線に至る広大な波長域に拡大する可能性を秘めている。これらの短波長域の光は、特に物質科学において強力な研究手段となっていることから、短波長光渦は物質科学における全く新しい研究手段をもたらす可能性がある。

我々が UVSOR において構築を進めてきた BL1U 光源開発専用ビームラインは、低エネルギー且つ高輝度な電子ビームを利用できること、直列に配置された可変偏光アンジュレータ 2 台を有し、実験配置の自由度の高い専用ビームラインを有するなど、アンジュレータによる光渦発生の基礎研究を進めるに、世界的にもほとんど唯一且つ最高と言ってよい研究環境を有しており、光学実験の容易な紫外光領域での光渦の特性に関する基礎研究、物質との強い相互作用の期待できる真空紫外領域での応用に向けた先導的研究を世界に先駆けて進めることが可能である。

2. 研究の目的

本研究では、我々の構築してきた光源開発専用ビームライン UVSOR-BL1U を利用して、コヒーレントな光渦ビームを紫外・真空紫外域で発生し、その基本特性の実験的検証、自由電子の光渦放射の基礎理論の構築、真空紫

外光渦と物質系との相互作用に関する先導研究を世界に先駆けて実施することを目的とした。シンクロトロン光源を用いることで、これまでレーザーを用いて研究の行われてきた赤外・可視・紫外域だけでなく、真空紫外域から X 線の領域における光渦ビームの発生とその利用に道を拓くことを目指すものである。

3. 研究の方法

分子科学研究所極端紫外光研究施設のシンクロトロン光源 UVSOR-III の光源開発用ビームラインに設置されている 2 台の直列円偏光アンジュレータを利用し、空間的にコヒーレントな光渦ビームの生成とその光渦性の実験的検証を進める。UVSOR-III は電子エネルギーが 750MeV とシンクロトロン光源としては比較的低い。一方で、電子ビームの指向性の高さが低エネルギーシンクロトロン光源の中では世界最高水準にある。この結果、紫外・真空紫外領域で空間的にコヒーレントな、いわゆる回折限界もしくはそれに近いシンクロトロン光を生成できる。このような光源特性は、空間的な構造を持つ光、光渦の研究を遂行するのに世界的にもまれな理想的な研究環境であり、上記の光源開発専用ビームラインを用いることで、世界を先導する研究を行うことができる。

光源開発専用ビームラインにおいて、より具体的には、光渦特有の螺旋状の波面や光軸中心における位相特異点の存在を、2 台のアンジュレータからの光の干渉を利用した手法により調べる。この手法は 2 つの光ビームの相対的な位相差を調べるものであるが、絶対的な位相構造に関しては間接的な情報を与えるに過ぎない。これと相補的となる実験として、様々な形状のアーチャによる回折を利用した手法を用いて、絶対的な位相構造を実験的に検証することを試みる。このような試みはシンクロトロン光起源の光渦に対して用いられたことはなく世界で初めての試みとなる。

光源側の実験と並行して、光渦と物質系の相互作用に関する基礎実験に挑戦する。このような試みも世界的には未だ行われておらず、この分野を先導する研究となる。もっとも単純な物質系である孤立原子系との相互作用を調べる研究などを、分子科学研究所内外の専門家と協力して進める。このためにビームラインに集光鏡及び真空紫外分光器を設置し、これら光学的機器の光渦性に対する影響も実験的に検証する。

これら実験研究に加えて、自由電子からの光渦放射に関する理論的検討、特に、放射場の運ぶ角運動量に関する検討を進める。アンジュレータによる光渦の発生は、レーザー光を特殊な光学素子を通すことで光渦に変換する手法とは決定的に異なり、これは荷電粒子が直接光渦を放出することを意味しており、基礎物理として大変に興味深い現象であ

る。本研究期間内に、その背景にある物理を明らかにすることを目指す。

4. 研究成果

2 台の直列に配置されたアンジュレータのうち 1 台から通常光を、また、もう一台から光渦を同じ波長で生成し、これらの強度干渉を観測すると、波面形状の違いにより、渦状の干渉パターンが観測できる。この手法により、アンジュレータ光の 1 次光（通常光）と 2 次光、3 次光の干渉パターンを計測した結果、明瞭な干渉パターンを得ることができた（図 1）。これらは、2 次光が 1 次の光渦、3 次光が 2 次の光渦である、という理論的予想と完全に一致する。高調波の次数が増えるのに伴い渦の次数が増えることを世界で初めて実証することができた。

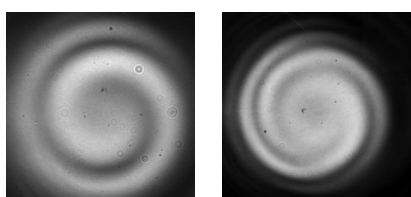


図 1 . 2 台のアンジュレータにより発生した光渦の干渉パターン（左；1 次光と 2 次光、右；1 次光と 3 次光）。1 次光と 2 次光では一重の渦模様、1 次光と 3 次光では二重の渦模様が明瞭に観測された。

ダブルスリット、三角スリット、円形アパーチャ、ナイフエッジなどの様々なアパーチャを用いた回折実験を行い、ダブルスリット、ナイフエッジでは波面の渦性と光軸中心での位相特異点の存在を明瞭に示すデータを世界に先駆けて得ることができた（図 2）。

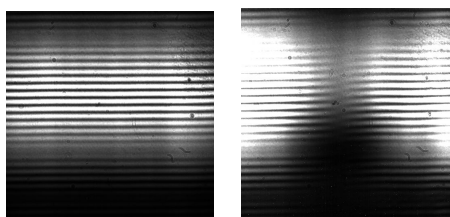


図 2 . ダブルスリットによるアンジュレータ一次光（左）二次光（右）による回折パターン。一次光は通常の平面波と同じ縞状構造を示すのに対し、二次光では中心に断裂と縞の位置のずれが明瞭に観察できた。

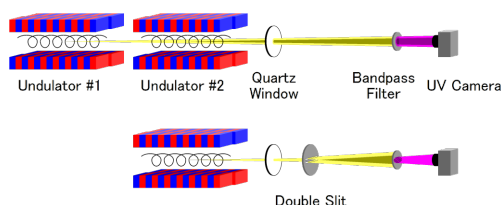


図 3 . 実験セットアップ。(上)干渉実験、(下)回折実験。電子ビームは図の左から右に進み、

同じ方向にアンジュレータ放射する。

実験のセットアップを図 3 に示す。図 1、2 に示すような明瞭な干渉パターンは実験に利用した UVSOR 加速器の電子ビームが紫外領域（波長 355nm）において回折限界に達しており、空間的にコヒーレントな光渦が生成できていることを示すものである。この成果は現在学術誌に投稿中である。

このアンジュレータからの光渦ビームにさらに時間コヒーレンスを付与するにはコヒーレント高調波発生と呼ばれる技術を利用することができる。このためには波長 800nm のチタンサファイアレーザーを電子ビームと相互作用させ、その高調波を渦光として発生させればよい。本研究期間では、このためのレーザー輸送系の構築を進めたが、加速器の改造作業などのため、最終的な実験には至らなかったが、実験装置は既に整っており、レーザー輸送テストを近日中に実施し、高調波発生の実験を 2017 年前半に実施予定である。

加速器中を運動する高エネルギー電子が光渦を放射する。これはレーザー分野で行われている通常光を光学フィルターなどを用いて渦光に変換する手法とは本質的に異なっている。電子が出す放射そのものが渦性を持っているのである。この点について考察を進めた結果、円軌道を描いて運動する電子からの放射が渦性を有していることを世界に先駆けて理論的に示すことができた。また、その放射場が軌道角運動量を運ぶことも理論的に示すことができた。円軌道を描く電子からの放射は、サイクロトロン放射、シンクロトロン放射、円偏光コンプトン散乱など、宇宙物理学やプラズマ物理学で重要となる放射過程の基礎である。例えば天体の磁気圏など宇宙には磁場と高エネルギー電子が共存する場所があり、そのような場所では、自然に、軌道角運動量を運ぶ光が生成されているはずである。こういった光が自然界で何かこれまで考察されていなかった役割を果たさないだろうか。この疑問を得たことが本研究の最大の成果であると考えている。この成果は Physical Review Letters 誌に掲載された。

真空紫外光渦と物質系との相互作用に関する先導的な実験研究として、原子物理学の研究チームとの協力の下、孤立原子との相互作用を調べる実験を行うことができた。今回の研究期間内では残念ながら光渦特有の現象を見出すことはできなかったが、世界に先駆けた実験であり、その結果は Physical Review A に掲載された。空間的構造を有する光渦と孤立原子との相互作用は、円偏光すなわちスピンを有する光との相互作用とは本質的に異なる一面を持つことが示唆される興味深い結果であり、今後も継続して実験・理論両面から研究を進めていく必要がある。

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 2 件)

T. Kaneyasu, Y. Hikosaka, M. Fujimoto, T. Konomi, M. Katoh, H. Iwayama, E. Shigemasa, “Limitations in photoionization of helium by an extreme ultraviolet optical vortex”, Physical Review A, 査読有, Vol. 95, 2017, 023413-1~7
M. Katoh, M. Fujimoto, H. Kawaguchi, K. Tsuchiya, K. Ohmi, T. Kaneyasu, Y. Taira, M. Hosaka, A. Mochihashi, Y. Takashima, “Angular Momentum of Twisted Radiation from an Electron in Spiral Motion”, Physical Review Letters, 査読有, Vol.118, 2017, 094801-1~5

〔学会発表〕(計 8 件)

藤本将輝, 加藤政博, 保坂将人, 持箸晃, 高嶋圭史, 川瀬啓悟, 松葉俊哉, 円偏光アンジュレータから発生する光渦の観測, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 03 月 17 日~20 日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

加藤政博, 自由電子による光渦の放射, ビーム物理研究会 2016, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 03 月 17 日~20 日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

加藤政博, 自由電子による光渦の放射, ビーム物理研究会 2016, 2016 年 11 月 24 日~26 日, SPring-8 (兵庫県佐用郡佐用町)

M. Fujimoto, M. Katoh, N. S. Mirian, M. Hosaka, A. Mochihashi, Y. Takashima, Y. Taira, S. Sasaki, Observation of Wavefront Structure of Helical Undulator Radiation, International Beam Instrumentation Conference (国際学会), 2016 年 09 月 11 日~15 日, Barcelona, Spain

藤本将輝, 加藤政博, ミリアン ナジメ, 保坂将人, 高嶋圭史, 持箸晃, 平義隆, 佐々木茂美, 円偏光アンジュレータから発生する光渦の観測, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年 08 月 08 日~10 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市)

M. Hosaka, K. Miyamoto, S. Sasaki, K. Kuroda, T. Konomi, N. Yamamoto, N. S. Mirian, M. Katoh, 7th International Particle Accelerator Conference (国際学会), 2016 年 05 月 08 日~13 日, BEXCO, Busan, Korea

N. S. Mirian, M. Katoh, M. Hosaka, N. Yamamoto, T. Konomi, K. Kuroda, A. Miyamoto, K. Miyamoto, S. Sasaki, “Fresnel and Fraunhofer Diffraction of Optical Vortex Beam from Helical Undulator”, 第 29 回日本放射光学学会年会, 2016 年 01 月 09 日~11 日, 柏の葉カンファレンスセンター(千葉県柏市)

S. Sasaki, A. Miyamoto, M. Hosaka, N.

Yamamoto, T. Konomi, M. Katoh, “Analysis of Lights' Orbital Angular Momentum from Helical Undulator Harmonics”, 6th International Particle Accelerator Conference (国際学会), 2015 年 05 月 03 日~08 日, Richmond, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 政博 (KATOH, Masahiro)
分子科学研究所・極端紫外光研究施設・教授
研究者番号: 30185871

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

許斐 太郎 (KONOMI, Taro)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教
研究者番号: 20634158

保坂 将人 (HOSAKA, Masahito)
名古屋大学・シンクロトロン光研究センター・准教授
研究者番号: 60290897

山本 尚人 (YAMAMOTO, Naoto)
名古屋大学・シンクロトロン光研究センター・助教

研究者番号：60377918

高嶋 圭史 (TAKASHIMA, Yoshifumi)

名古屋大学・シンクロトロン光研究センタ

ー・教授

研究者番号：40303664

(4)研究協力者

藤本 将輝 (FUJIMOTO, Masaki)

佐々木 茂美 (SASAKI, Shigemi)

ミリアン ナジメ (MIRIAN, Najmeh)

持箸 晃 (MOCHIHASHI, Akira)