

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12531

研究課題名(和文) 軌道角運動量を運ぶ遷移放射の観測

研究課題名(英文) Observation of transition radiation carrying orbital angular momentum

研究代表者

高林 雄一 (Takabayashi, Yuichi)

公益財団法人佐賀県産業振興機構 (佐賀県産業イノベーションセンター産業振興部研究開発振興課、九州シンク・加速器グループ・主任研究員)

研究者番号：50450953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、電子ビームが固体標的に入射した際に生成される遷移放射が運ぶ軌道角運動量の初観測である。実験は、SAGA-LSの255 MeVリニアックからの電子ビームを利用して行った。電子ビームを金コートシリコンウェハに入射させて生成した遷移放射は真空窓を通して大気中へと取り出し、正三角形アパーチャー透過後の回折パターンを測定することにより、軌道角運動量の測定を試みた。研究期間内に軌道角運動量を検出するまでには至らなかったが、電子ビームのバンチ圧縮によるコヒーレントな遷移放射の生成、及び、その角度分布の測定を行うことに成功した。今後、ダブルスリットを用いて、研究を継続する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1990年代に軌道角運動量を運ぶ光(光渦)の理論が提案されて以来、光渦に関する研究が精力的に行われてきた。光ピンセット、超解像顕微鏡など応用研究も多岐に渡る。一方、アンジュレータ放射に代表されるように、相対論的電子ビームを利用した光渦の生成も行われるようになってきている。このような背景のもと、本研究では軌道角運動量を運ぶ遷移放射の初観測を目指している。アンジュレータ放射等と異なり、らせん運動をしない直進する電子から軌道角運動量を運ぶ光が生成されるのかという学術的な問いに答える点に意義がある。また、他の電子ビームを用いた手法と比べ、光渦のシンプルな生成法となり得る点にも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study is to observe transition radiation carrying orbital angular momentum. The experiments were conducted using an electron beam from the 255-MeV linear accelerator at SAGA-LS. The electron beam was injected into an Au-coated Si wafer, and the resulting transition radiation was extracted into air through a vacuum window. We attempted to determine the angular momentum of this radiation by passing it through a triangular aperture and measuring its diffraction pattern. Although we could not determine it within the scheduled period, we succeeded in generating coherent transition radiation by compressing the bunch length of the electron beam, and in observing its angular distribution. We plan to replace the triangular aperture with a double slit, as aligning the latter is easier, and to continue the present study.

研究分野：放射線物理

キーワード：遷移放射 軌道角運動量 テラヘルツ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

らせん状の波面を持つ電磁波が軌道角運動量を運ぶことが1990年代初頭に示されて以来[1]、可視域のレーザーを用いて、軌道角運動量を運ぶ光の研究が精力的に進められてきた。これらの研究では、らせん状の位相板等、特殊な光学素子にレーザーを透過させて、軌道角運動量を運ぶ光の生成が行われている。軌道角運動量のトルクを利用した微粒子操作への応用(光ピンセット)[2]、ドーナツ状の角度分布を利用した超解像顕微鏡[3]、複数の軌道角運動量を利用した高速大容量通信[4]等、応用研究も多岐に渡る。また、相対論的な電子ビームを用いて軌道角運動量を運ぶ光の生成も行われるようになっており、円偏光アンジュレータを利用する方法[5]、円偏光レーザーとのコンプトン散乱を利用する方法[6]、チャネリングを利用する方法[7]、らせん状の電子バンチを利用する方法[8]など、様々な手法が提案され、研究が進められている。

一方、本研究の海外共同研究者は、電子密度がらせん状に変調されたバンチを持つ電子ビームから生成される遷移放射の軌道角運動量に関する理論的研究を行ってきた[9,10]。遷移放射とは、高速の荷電粒子が誘電率の異なる物質の境界面に入射した際、その境界面から光が放射される現象である。また、海外共同研究者により、ある条件を満たしたときに、電子ビームがらせん状のバンチを持たなくても、軌道角運動量を運ぶ遷移放射が生成されることが理論的に示された[9,10]。円偏光アンジュレータのように[5]、らせん運動をする電子から軌道角運動量を運ぶ光が生成されることは知られているが[11]、らせん運動をしない直進する電子から軌道角運動量を運ぶ光が生成されるのは興味深い現象である。そこで、本研究では、らせん運動をしない、らせん状のバンチも持たない標準的な電子ビームから、軌道角運動量を運ぶ光が生成されるのか検証を行う。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、軌道角運動量を運ぶ遷移放射の初観測である。前述したように、らせん運動もしない、らせん状のバンチも持たない標準的な電子ビームから、軌道角運動量を運ぶ光を生成する点に特色がある。また、本手法では、電子ビームを固体標的に入射させるだけで軌道角運動量を運ぶ光が生成可能であり、他の電子ビームを用いた手法よりもシンプルである。さらに、本手法は、軌道角運動量を運ぶチェレンコフ放射の生成にも応用できることが理論的に示されている[9,10]。遷移放射やチェレンコフ放射は世界各地の電子加速器施設において、ビーム診断技術として使用されるとともに、コヒーレントなテラヘルツ光源としても研究が進められており、波及効果は大きいと考えられる。

### 3. 研究の方法

図1に実験装置の概念図を示す。実験は、九州シンクロトロン光研究センター(SAGA Light Source: SAGA-LS)の255 MeVリニアックからの電子ビームを利用して行った。海外共同研究者の理論的検討によると、軌道角運動量を運ぶ遷移放射を生成するには、ある条件を満たす必要がある[9,10]。それは、電子ビームの大きさが、検出する光の波長と比べて十分小さいことである。SAGA-LSのリニアックにおけるビームサイズは0.1 mmから1 mm程度なので、この条件を満たす波長はテラヘルツ波の領域になる。そして、この条件が満たされるとき、遷移放射の全角運動量のビーム進行方向に対する成分 $l$ は0になることが海外共同研究者によって示されている[9,10]。つまり、ビームの進行方向に対する軌道角運動量を $l$ 、スピン角運動量を $s$ とすると、 $j = l + s = 0$ となるのが、この手法のポイントとなる。この式から、 $l = -s$ となるので、スピン角運動量、つまり、偏光状態を選択して光を取り出せば、その光は軌道角運動量 $l = -s$ を持つことになる。本研究では、スピン角運動量として、 $s = \pm 1$ の光を選択することにより、それぞれ軌道角運動量 $l = \mp 1$ を持つ光を取り出すことを試みる。

光の軌道角運動量を確認する方法として、シングルスリット、ダブルスリット、正三角形アパーチャーなど様々な開口における回折現象を利用した手法があるが、本研究では、正三角形アパーチャーを採用することにした[12]。正三角形の辺の長さとして、10 mmから50 mmのものを用意した。

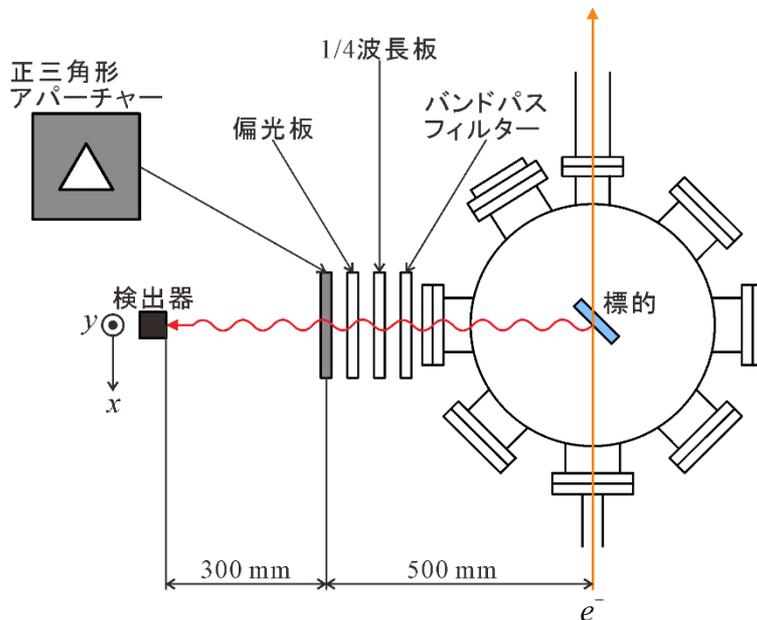


図1：実験装置の概念図．

標的として、直径4インチ(101.6 mm)の金コートシリコンウェハ(金コートの厚さ100 nm, シリコンウェハの厚さ525  $\mu\text{m}$ )を用いた．図1に示したように、標的はビームの進行方向に対して45°傾け、90°方向に生成される遷移放射を、真空窓を通して大気中へと取り出した．まず、中心周波数 $f = 0.3$  THz (中心波長 $\lambda = 1$  mm), バンド幅 $\Delta f/f \approx 1/3$ のバンドパスフィルターによって特定の波長を選んだ後、1/4波長板、偏光板によって偏光状態( $s = \pm 1$ )を選択した．テラヘルツ遷移放射の検出器として、焦電検出器を採用した．検出部の直径は5 mm, 検出感度は70 kV/Wであった．焦電検出器の入り口には赤外線成分を除去するため、厚さ60  $\mu\text{m}$ のブラックポリプロピレンシートを取り付けた．そして、焦電検出器を2次元ステージに設置し、検出器の位置をスキャンすることによって回折パターンを測定した．

#### 4．研究成果

##### (1) 電子ビームのバンチ圧縮

インコヒーレントな遷移放射の強度は弱く、通常の検出器では検出できるレベルにないので、電子ビームのバンチ圧縮を行い、コヒーレントな遷移放射の生成を試みた．SAGA-LSのリニアックは6本の加速管から成るが、第1加速管のRF位相を最大加速位相から約90°ずらす、いわゆる velocity bunching の手法を用いてバンチ圧縮を行った．バンチ圧縮後のバンチ長は約0.6 mm (約2 ps)と見積もられた．図2に、ビーム電流と遷移放射強度の関係を示す．遷移放射の強度は、ビーム電流の2乗に比例して増加しており、コヒーレントになっていることが確認された．

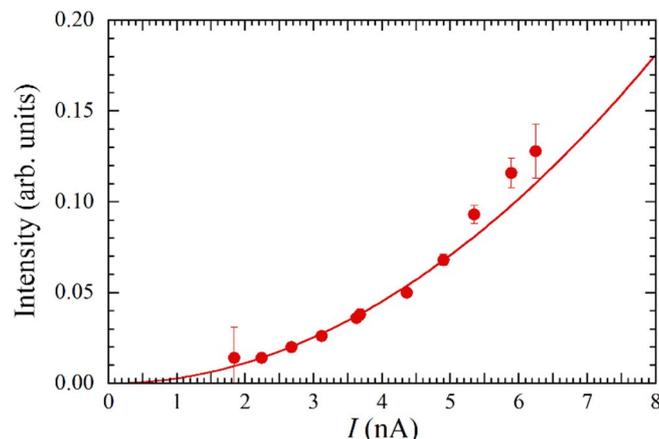


図2：電子ビームの電流値 $I$ と遷移放射強度の関係．実線は電流値の2乗でフィットした式を示す．

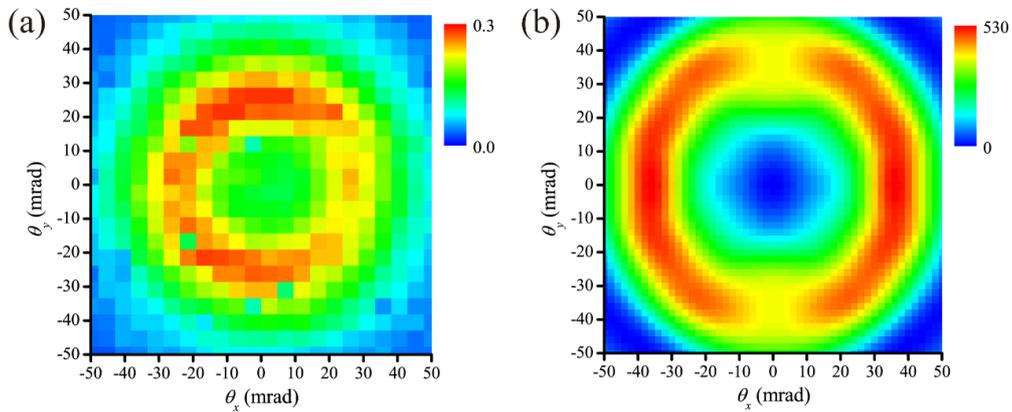


図3：遷移放射の角度分布の(a)測定結果と(b)計算結果．

### (2) 遷移放射の角度分布の測定

初めに遷移放射の角度分布の測定を行った．標的から検出器までの距離は 500 mm であった．この測定ではバンドパスフィルターは用いたが，1/4 波長板と偏光板は使用しなかった．測定結果を図 3(a)に示す．遷移放射に特徴的な中心に窪みのある角度分布が観測された．

電子がまとっている電磁波の特徴的な大きさは， $\gamma\lambda$  ( $\gamma$ はローレンツ因子， $\lambda$ は電磁波の波長)で表すことができる． $\gamma\lambda$ と比べ，ターゲットが十分大きい場合は，遷移放射の角度分布は Ginzburg-Frank の理論式に従い， $1/\gamma$ の角度においてピークを持つが，ターゲットが小さい場合は，ピーク角度が  $1/\gamma$ よりも大きくなることが知られている[13]．本実験条件では， $\gamma\lambda \approx 430$  mm と計算され，ターゲット(直径 101.6 mm)よりも大きい．実際に図 3(a)から，ピーク角度は約 25 mrad となり， $1/\gamma \approx 2$  mrad よりも大きいことが見て取れる．ターゲットが有限の大きさを持つことを考慮して求めた遷移放射の角度分布の計算結果を図 3(b)に示す．計算結果の方が測定結果よりも，ややピーク角度が大きくなったが，おおむね中心に窪みのある角度分布を再現していた．

### (3) 遷移放射の回折パターン

図 1 のセットアップを用いて，正三角形アパーチャーによる遷移放射の回折パターンの測定を行った．図 4 に測定例を示す．この測定では 1/4 波長板と偏光板を使用しなかったため，スピン角運動量  $s = 1$  と  $s = -1$  が混じったものに対応する．主に，3 つのスポットが観測されたが，これは正三角形アパーチャーを用いたときに予想される典型的なパターンである[12]．

次に，1/4 波長板と偏光板を挿入しスピン角運動量を選択して回折パターンの測定を行ったが，図 4 と同様の回折パターンが得られ，大きな違いが見られなかった．原因として，正三角形アパーチャーのミスアライメントが考えられる．そこで，次のステップとして，正三角形アパーチャーの代わりに，ダブルスリットを用いることを検討している．ダブルスリットの場合，それぞれのスリットを通過した光量の大きさから，容易にアライメントを行うことができると考えられる．今後，ダブルスリットを用いて研究を継続する予定である．

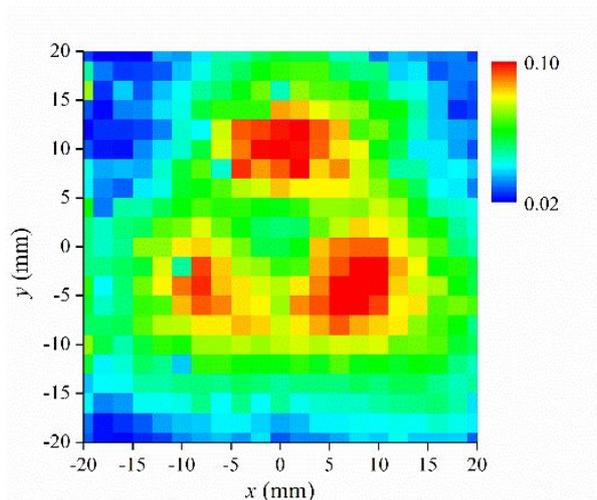


図4：正三角形アパーチャーによる遷移放射の回折パターンの測定結果．

## 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] D. G. Grier, *Nature* **424**, 810 (2003).
- [3] S. W. Hell and J. Wichmann, *Opt. Lett.* **11**, 780 (1994).
- [4] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. M. Barnett, and S. Franke-Arnold, *Opt. Express* **12**, 5448 (2004).
- [5] S. Sasaki and I. McNulty, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 124801 (2008).
- [6] Y. Taira, T. Hayakawa, and M. Katoh, *Sci. Rep.* **7**, 5018 (2017).
- [7] S. V. Abdrashitov, O. V. Bogdanov, P. O. Kazinski, and T. A. Tukhfatullin, *Phys. Lett. A* **382**, 3141 (2018).
- [8] E. Hemsing, A. Knyazik, M. Dunning, D. Xiang, A. Marinelli, C. Hast, and J. B. Rosenzweig, *Nat. Phys.* **9**, 549 (2013).
- [9] O. V. Bogdanov, P. O. Kazinski, and G. Yu. Lazarenko, *Phys. Rev. A* **100**, 043836 (2019).
- [10] O. V. Bogdanov, P. O. Kazinski, and G. Yu. Lazarenko, *JINST* **15**, C04052 (2020).
- [11] M. Katoh, M. Fujimoto, H. Kawaguchi, K. Tsuchiya, K. Ohmi, T. Kaneyasu, Y. Taira, M. Hosaka, A. Mochihashi, and Y. Takashima, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 094801 (2017).
- [12] J. M. Hickmann, E. J. S. Fonseca, W. C. Soares, and S. Chávez-Cerda, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 053904 (2010).
- [13] S. Casalbuoni, B. Schmidt, P. Schmüser, V. Arsov, and S. Wesch, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12**, 030705 (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	隅谷 和嗣  (Sumitani Kazushi)  (10416381)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・研究員   (84502)	
研究分担者	馬込 栄輔  (Magome Eisuke)  (40408696)	公益財団法人佐賀県産業振興機構(佐賀県産業イノベーションセンター産業振興部研究開発振興課、九州シンク・ビームライングループ・副主任研究員   (87202)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ロシア連邦	Tomsk Polytechnic University		