

軸対称偏光レーザーを用いて発生するガンマ線の空間分布測定

SPATIAL DISTRIBUTION MEASUREMENT OF GAMMA RAYS GENERATED BY USING AN AXIALLY SYMMETRIC POLARIZED LASER

平義隆[#]

Yoshitaka Taira[#]

UVSOR, Institute for Molecular Science

Abstract

Energy-tunable and quasi-monochromatic polarized gamma rays are generated by scattering of a high-energy electron beam and a polarized laser. The spatial distribution and polarization characteristics of gamma rays generated by linearly and circularly polarized lasers have been investigated by theory and experiment. The polarization state of these lasers is uniform in the beam cross section. On the other hand, it is possible to generate lasers with spatially variant polarization. A laser whose polarization is radially distributed is called a radially polarized laser, and one whose polarization is azimuthally distributed is called an azimuthally polarized laser. These polarization states are called axially symmetric polarization because they are symmetric about the central axis. In this paper, I report on measurements of the spatial distribution of gamma rays generated by scattering of an axially symmetric polarized laser and electron beam.

1. はじめに

高エネルギー電子ビームとレーザーの散乱によって発生するガンマ線には、エネルギー可変、高偏光、低発散角、高強度といった特徴がある。ガンマ線のエネルギーは散乱角度に依存するため、発生点の下流にコリメータを設置して取り込む角度範囲を制限することでエネルギー広がり数%の準単色ガンマ線を発生する事も可能である。この手法は、逆コンプトン散乱やレーザーコンプトン散乱と呼ばれる。また、電子静止系における入射光のエネルギーが電子の静止エネルギーよりも十分に小さければ逆トムソン散乱と呼ばれる。また、この散乱過程では、レーザーの偏光が保存されるため、直線偏光レーザーや円偏光レーザーを使う事で直線偏光ガンマ線や円偏光ガンマ線を発生する事が出来る。この手法によりガンマ線を発生している施設は、世界に数か所あり[1-3]、原子核物理実験や非破壊測定技術の開発、スピン偏極陽電子源の開発[4]、磁気コンプトン散乱や陽電子消滅分光法による材料分析[5]などが行われている。

直線偏光や円偏光は、ビーム断面で偏光の空間分布が一様である。それに対して、偏光分布が不均一なレーザーを発生する事も可能である。具体的な例として、放射状に偏光が分布しているラジアル偏光や方位角方向に分布しているアジマス偏光が挙げられる。これらは、光軸に対して偏光分布が対象であるために軸対称偏光レーザー、またはベクトルビームと呼ばれる[6]。

直線偏光や円偏光レーザーと電子ビームの散乱によって発生するガンマ線の偏光特性は理論的に調べられている[7-10]。偏光レーザーを用いて発生するガンマ線の空間分布は、その偏光状態によって変化する。直線偏光の場合、レーザーの偏光軸に対して90度方向に引き伸ばされた分布を示す。円偏光の場合は、同心円状の空間分布を示す。また、ガンマ線の偏光状態は散乱角や方位角によって変化する。直線偏光の場合、レーザ

ーの偏光とガンマ線の中心軸の偏光は一致するが、散乱角や方位角によってガンマ線の偏光軸は変化する。一方で、円偏光の場合、中心軸は円偏光であるが散乱角が大きくなると偏光度が低下する。直線偏光ガンマ線の偏光軸が散乱角によって変化する事は NewSUBARU において1次元スキャンにより測定された[11]。また、UVSOR において、円偏光ガンマ線の偏光が散乱角によって変化的ことが1次元スキャンによって測定された[12]。直線偏光や円偏光ガンマ線に関する先行研究に対して、軸対称偏光レーザーから発生するガンマ線の偏光特性は理論的にも実験的にも分かっていない。

電子からの放射は、リエナール・ヴィーヘルト・ポテンシャルを用いて計算することが出来る。レーザー電場によって電子ビームの横方向の運動が誘起され、その運動によって電子から放射される電磁波の偏光特性が決まる。直線偏光のレーザーと電子の相互作用では、レーザーの偏光軸に沿って正弦波に従う電子の運動が誘起され、直線偏光ガンマ線が発生する。円偏光レーザーの場合は、電子のらせん運動が誘起されて円偏光ガンマ線が発生する。軸対称偏光レーザーの場合は、これら偏光レーザーと偏光特性が異なるために、特異な横方向運動が誘起され、偏光特性の変化したガンマ線が発生すると予想できる。

本研究では、軸対称偏光レーザーから発生するガンマ線の偏光特性を明らかにすることを目的としている。現状、軸対称偏光レーザーを用いて発生するガンマ線の空間分布を測定した。結果の概要をここにまとめる。詳細は学術雑誌に発表予定である。

2. 偏光レーザーの発生

ガンマ線の発生には波長 800 nm の TiSa レーザーを使用している。パルスエネルギー 2.2 mJ、パルス幅 1.8 ps (FWHM)、繰返し 1 kHz である。レーザーの偏光は、直線偏光であるため、 $\lambda/2$ 波長板を光路上に置いてその角度を回転すれば偏光軸を任意の角度に変更できる。また、 $\lambda/2$ 波長板の代わりに $\lambda/4$ 波長板を光路上に置けば

[#] yostaira@ims.ac.jp

円偏光レーザーを発生できる。

軸対称偏光レーザーの発生にはいくつかの方法が開発されている[6]。その中で簡便な方法として S-waveplateを用いた方法がある。S-waveplate((RPC-0800-12-AR, Altechna)は、空間変調波長板と呼ばれ、波長板断面の位置によってファスト軸とリターダンスが変化する。光路上に S-waveplate を設置すると、入射光が直線偏光の場合、出射光は軸対称偏光になる[13]。さらに、S-waveplate に対する直線偏光軸を変えることで、ラジアル偏光からアジマス偏光まで連続的に変える事ができる。一方で、入射光が円偏光の場合、出射光は円偏光の光渦になる[13]。光渦の Topological charge は ± 1 であり、円偏光のヘリシティによって、topological charge の符号も反転する。電子ビーム衝突点において軸対称偏光レーザーが発生することは、空間分布がドーナツ形状になっている事と、偏光子を透過するレーザーの空間分布が軸対称になっている事を測定することで確認した。

ガンマ線は、電子ビームの進行方向に対して水平 90度方向から偏光レーザーを入射する事で発生した。電子蓄積リングは、エネルギー750 MeV のシングルバンチモードで運転し、電流値 20 mA であった。ガンマ線の最大エネルギーは 6.6 MeV、繰返しは 1 kHz である。ガンマ線発生点から 6.6 m の位置に 2次元検出器を設置する事でガンマ線の空間分布を測定した。2次元検出器は、Advacam 社の CdTe イメージセンサー(AdvaPIX TPX3)であり、ピクセルサイズ 55 μm 、有効面積 14.08 \times 14.08 mm、センサーの厚さ 1 mm である。1条件の測定時間は20分間であった。電子ビームのローレンツ因子を γ 、ガンマ線の散乱角を θ とすると、このイメージセンサーは $\pm 1.5\gamma\theta$ の範囲を測定できる。

3. ガンマ線の空間分布

Figure 1 に、直線偏光、円偏光及びラジアル偏光レーザーを用いて発生したガンマ線の空間分布の測定結果を示す。直線偏光レーザーの場合、ガンマ線はレーザーの偏光軸に対して 90度方向に引き伸ばされた空間分布を示している。さらに、偏光軸に沿って $\gamma\theta = 1$ の付近は強度の低い節が現れる。円偏光レーザーの場合、ガンマ線の空間分布は、同心円状になっている。ただし、電子ビームのエミッタンスの影響で垂直方向に比べて水平方向の幅が僅かに大きい分布である。

ラジアル偏光レーザーを用いて発生するガンマ線は、直線偏光レーザーの場合に現れていた強度の低い節が無い。また、円偏光レーザーの場合と比較すると、ラジアル偏光の場合は空間分布が同心円状ではなくわずかに縦長である。これは、ラジアル偏光のドーナツ状の強度分布が一様ではなく、水平偏光成分の強度が他の偏光成分よりも相対的に強いためにガンマ線が縦長の空間分布になったと考えられる。

4. まとめと今後の予定

750 MeV 電子ビームと偏光レーザーにより発生するガンマ線の空間分布を測定した。軸対称偏光レーザーによって発生するガンマ線の空間分布が、直線偏光ガンマ線や円偏光ガンマ線に比べて変化する事が実験的に確かめられた。今後は、発生するガンマ線の空間偏光分布

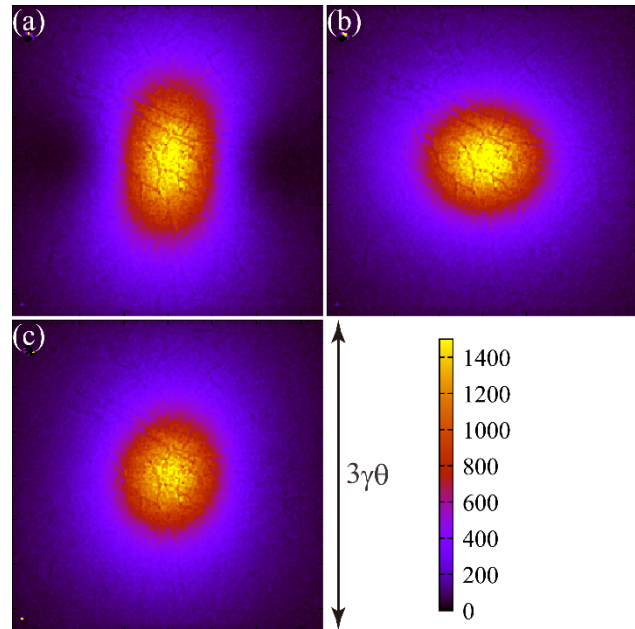


Figure 1: Measured spatial distribution of gamma rays generated by (a) horizontally linearly, (b) circularly, and (c) radially polarized lasers. The polarization axis of a linearly polarized laser is horizontal direction.

を測定する。具体的には、直径 1 mm の鉛コリメータを用いて空間的に広がったガンマ線の一部を切り出し、そのガンマ線をターゲットに照射する。ガンマ線の偏光が直線偏光の場合、コンプトン散乱ガンマ線の微分散乱断面は方位角方向で非対称性を示す。したがって、ターゲットで散乱されるガンマ線の方位角分布を複数の検出器を用いて測定する事で、コリメータを通過したガンマ線の偏光軸を測定する事ができる。さらに、コリメータを 2次元スキャンしながら同様の測定を行う事で、ガンマ線の空間偏光分布を測定することができる。

謝辞

電子蓄積リングの運転に関して、UVSOR 清水氏、太田氏(現 JASRI)、林氏、山崎氏に感謝する。また、レーザーの保守管理について UVSOR 岡野氏に感謝する。

参考文献

- [1] H. W. Wang *et al.*, “Commissioning of laser electron gamma beamline SLEGS at SSRF”, Nuclear Science and Techniques, 33, 87 (2022).
- [2] T. Ari-Izumi *et al.*, “Spatial profiles of collimated laser Compton-scattering gamma-ray beams”, Journal of Instrumentation, 18, T06005 (2023).
- [3] J. Yan *et al.*, “Precision control of gamma-ray polarization using a crossed helical undulator free-electron laser”, Nature Photonics, 13, 629 (2019).
- [4] T. Omori *et al.*, “Efficient propagation of polarization from laser photons to positrons through Compton scattering and electron positron pair creation”, Phys. Rev. Lett., 96, 114801 (2006).

- [5] Y. Taira *et al.*, “Development of gamma-ray-induced positron age–momentum correlation measurement”, *Rev. Sci. Instrum.*, 93, 113304 (2022).
- [6] Q. Zhan *et al.*, “Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications”, *Adv. Opt. Photon.*, 1, 1 (2009).
- [7] S. H. Park *et al.*, “Spatial distribution and polarization of gamma-rays generated via Compton backscattering in the Duke/OK- 4 storage ring FEL,”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 475, 425 (2001).
- [8] C. Sun *et al.*, “Theoretical and simulation studies of characteristics of a Compton light source”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 14, 044701 (2011).
- [9] V. Petrillo *et al.*, “Polarization of x-gamma radiation produced by a Thomson and Compton inverse scattering,”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 18, 110701 (2015).
- [10] Z. Chi, “Polarization transfer from a laser to x rays via Thomson scattering with relativistic electrons: A dipole radiation perspective”, *Journal of Applied Physics*, 128, 244904 (2020).
- [11] S. Miyamoto, “Laser Compton scattering gamma-ray beam source at NewSUBARU storage ring”, *International Workshop of Laser Compton Scatter Gamma Rays at Electron Storage Rings* (2014).
- [12] Y. Taira *et al.*, “Measurement of the spatial polarization distribution of circularly polarized gamma rays produced by inverse Compton scattering”, *Physical Review A*, 107, 063503 (2023).
- [13] A. Matijosius *et al.*, “Formation of optical vortices with topological charge $l = 1$ and $l = 1/2$ by use of the S-waveplate”, *Optics Communications*, 324, 1 (2014).