

非線形逆コンプトン散乱によるガンマ線渦の発生とらせん波面測定

Generation of gamma-ray vortices by nonlinear Compton scattering and measurement of their helical wavefronts

平 義隆¹⁾ 神門 正城²⁾ 小瀧 秀行²⁾ 林 由紀雄²⁾ 黄 開²⁾
大東 出²⁾ 川瀬 啓悟²⁾ 早川 岳人²⁾

Yoshitaka TAIRA Masaki KANDO Hideyuki KOTAKI Yukio HAYASHI Kai HUANG
Izuru DAITO Keigo KAWASE Takehito HAYAKAWA

¹⁾分子研 ²⁾量研

(概要)

本研究では、全く新しい量子ビームである軌道角運動量(Orbital angular momentum: OAM)を運ぶエネルギー100 keV以上のガンマ線を世界に先駆けて開発し、素粒子や原子核、物性研究への応用開拓を行うことを最終目標とする。OAMを運ぶガンマ線の発生には、研究代表者が世界で初めて見出した電子ビームと高強度円偏光レーザーの非線形逆コンプトン散乱法を用いる。関西研のマイクロトロンとJ-KARENを用いて2次高調波ガンマ線の円環状の空間分布及び光学的手法によりOAMの起源であるらせん波面を測定することを目的とする。

キーワード：ガンマ線、軌道角運動量、非線形逆トムソン散乱、高強度レーザー

1. 目的

近年、OAMを運ぶ新規量子ビーム源の開発及び応用研究が活発に行われている。図1にOAMを運ぶ光の概要を示す。OAMを運ぶ光は、螺旋波面を形成し横方向平面内で位相が変化する。また、その空間分布は特徴的な円環形状になる。OAMを運ぶビームは、現在までに25 keV以下の光において発生されているが、エネルギー100 keV以上のX線(ガンマ線)に関して、その発生に成功したという例は無い。

研究代表者は、2017年にOAMを運ぶガンマ線が非線形逆コンプトン散乱によって発生できることを世界で初めて理論的に見出した[1]。その概要を図2に示す。通常の逆コンプトン散乱は、高エネルギー電子によるレーザー光子の散乱によってガンマ線が発生する過程である。ここで、ピークパワーがテラ～ペタワット級の高強度レーザーを使用すると高次高調波ガンマ線が発生し、n次の高調波は1次ガンマ線に対してn倍のエネルギーを持つ。2次の高調波X線が円環状の空間分布になることは図2左下に示すように米国のBrookhaven National Laboratory(BNL)すでに測定されていた[2]。研究代表者はこの円環分布が螺旋波面に由来し、n次の高調波ガンマ線が $(n-1)\hbar$ のOAMを運ぶことを理論的に示すことに初めて成功した(\hbar はプランク定数)。

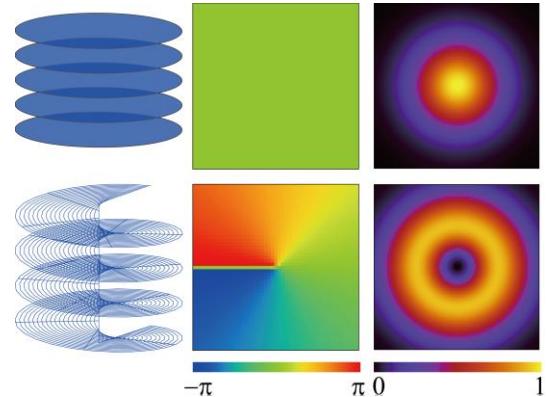


図1:通常の光(上段)とOAMを運ぶ光(下段)の概要。左から波面、位相、強度分布を表す。

今後は、この円環形状のガンマ線がらせん波面を形成していることを実証する。研究代表者が考案したらせん波面の測定方法には、レーザー強度因子 $a_0 = 3$ 程度の高強度円偏光レーザーが必要である。高エネルギー電子加速器と高強度レーザーを併用している世界でも稀な関西研において研究を実施し、世界に先駆けてらせん波面を形成するガンマ線の発生を実証する。

2. 方法

2019年(平成31年)度は円偏光レーザーを発生し、非線形逆コンプトン散乱で発生する2次高調波ガンマ線の円環分布を測定することを目標とする。また、現状の電子ビームサイズがレーザーサイズに比べて10倍以上大きいので、収束用磁石を設計製作しガンマ線の光子数を増加させる。

2-1. 円偏光レーザーの発生。

OAMを運ぶガンマ線の発生において、円偏光レーザーを使用することが本質的である。直線偏光レーザーを $\lambda/4$ 板に通して円偏光レーザーを発生する。

2-2. 電子ビーム収束用磁石の設計・製作・設置。

現状、電子ビームサイズがレーザーサイズよりも大きい200~300 μm であるため、電子ビームを数10 μm 程度まで収束しガンマ線の光子数を増加させる。

2-3. 非線形逆コンプトン散乱で発生する2次高調波ガンマ線の円環分布測定。

2019年度は、図3左に示すような2次高調波ガンマ線の円環分布を測定することを目標とする。直径約20 mmの円環分布を測定するため、関西研にあるイメージングプレートの分解能で十分である。2次高調波ガンマ線の光子数の計算値は、電子ビームを収束していない状態で $4.4 \times 10^4 \text{ photons/sec}$ であり、1時間程度の測定で十分な統計が得られる。

実際のガンマ線は、図3右に示すように1次と2次の高調波ガンマ線が同軸上に発生する。1次ガンマ線の強度が2次よりも高いために、検出器を置いていただけでは円環分布を測定することはできない。

そこで、1次よりも2次ガンマ線のエネルギーが高いことを利用し、検出器の前に鉛板を設置して測定を行う。厚さ3 mmの鉛板の場合、1次ガンマ線の最大強度のエネルギー180 keVの透過率は3%であり、2次ガンマ線の最大強度310 keVの透過率は25%であるため、2次高調波ガンマ線の強度が高くなり円環分布を測定できる。

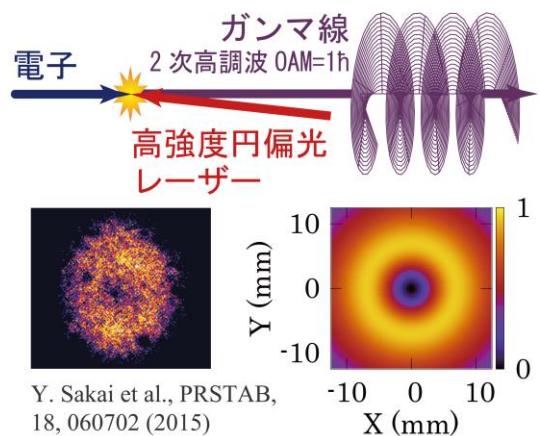


図2:(上)非線形逆コンプトン散乱によるOAMを運ぶガンマ線発生の概要。
(左下)2次高調波空間分布の測定結果。
(右下)計算した空間分布。測定と良い一致を示す。

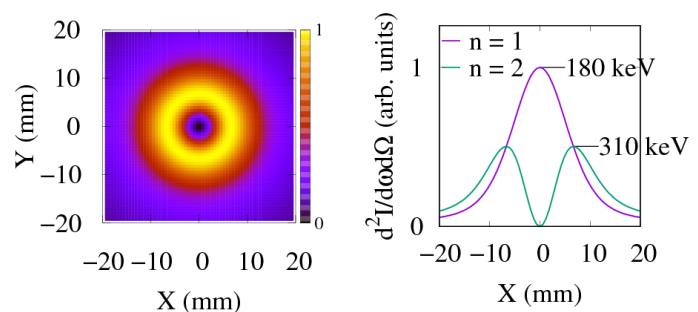


図3:(左)発生点から距離3 m位置での2次高調波ガンマ線の空間分布。電子エネルギー150 MeV, $a_0 = 2$ で計算した。(右)1次($n = 1$)と2次($n = 2$)高調波ガンマ線の1次元強度分布。

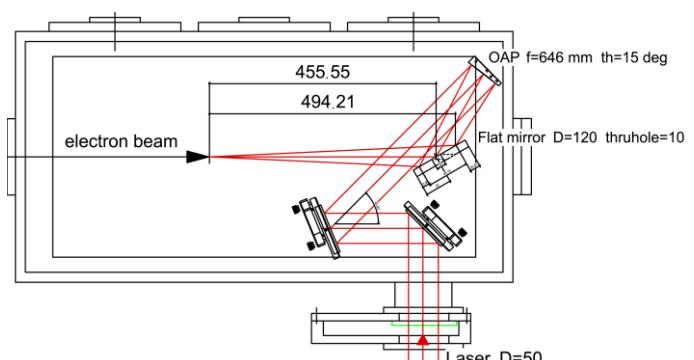


図4:コンプトンチャンバー内のレーザー集光の概要。

レーザー集光の概要を図 4 に示す。焦点距離 646 mm の軸外し放物面鏡(OAP)を用いてレーザーを集光し電子ビームと衝突する。OAP と衝突点の間に直径 10 mm の穴の開いたミラーを設置し、電子ビームはその穴を通って下流に輸送される。

3. 結果及び考察

レーザーは、パワーアンプモード、エネルギー -0.8 J 、パルス幅 48 fs (FWHM)、入射ビーム直径 50 mm 、集光ビームサイズ水平 $20 \mu\text{m}$ 、垂直 $12 \mu\text{m}$ (FWHM)、 $a_0 = 0.9$ 、繰返し 1 Hz の条件で運転した。

円偏光レーザーの発生は、コンプトンチャンバー隣のペリクルチャンバー内に $\lambda/4$ 板を設置して行った。偏光子を用いて測定した直線偏光度の測定結果を図 5 に示す。 $\lambda/4$ 板の角度が 45 度の時に直線偏光度が最も低くなり 0.31 であった。しかし、 $\lambda/4$ 板の評価のためにオフラインで 785 nm のレーザーを用いて行った測定では、直線偏光度は 0.09 まで低下していた。今後、J-KAREN レーザーで直線偏光度が低下しない原因を調査する。

電子ビーム集束用磁石の製作については、物品の納品は完了したが組み立てが間に合わなかったので、本実験には使用していない。2020 年度に組み立てを行う。

実験時には、マイクロトロンの電子銃用レーザーが不安定であることが原因で電子ビームの位置と電荷量が不安定であった。そのため、ガンマ線検出用に設置している検出器の出力信号にバックグラウンドの制動放射ガンマ線が重畠されており、明確なコンプトン散乱ガンマ線信号は計測できなかった。2020 年度中に電子銃用レーザーのオシレータを交換し、電子ビームの安定化を図る。

また、今回の実験では電子ビームとレーザーのタイミング調整にストリークカメラを使用せず、光電子増倍管によりレーザー散乱光と電子ビーム起因の X 線を計測して土数 ns 程度に調整した。しかし、電子ビームが不安定の状況で広い範囲をタイミングスキャンしてガンマ線信号探索を行なったが、明確なガンマ線起因の信号を計測できなかった。次回実験ではタイミング調整にストリークカメラを使い、電子ビームとレーザーの調整範囲を絞ってタイミング調整を行う。

なお、レーザー室からターゲットまでのレーザーエネルギー伝送効率は、実験終了後に計測したところ 14.8% であった（穴あきなしで 55~60% が通常）。これは穴あきのミラーを用いたことを考慮しても低い値であり、コンプレッサ後のミラーにダメージもあったことからビームコリメーション調整が十分でなく、ビーム径が設計値よりも小さかったと思われる。今回コリメーションは可変形鏡の後で行ない、コンプレッサ直前でビーム計測を行い調整したが、次回はコンプレッサ後の実際のビームサイズを計測できるような改良を行う予定である。（J-KAREN のコンプレッサ、ミラーについては大きな影響は与えていないことは確認済み。）

4. 引用(参照)文献等

1. Y. Taira, T. Hayakawa, M. Katoh, “Gamma-ray vortices from nonlinear inverse Thomson scattering of circularly polarized light”, Scientific Reports, 7, 5018, (2017).
2. Y. Sakai et al., “Observation of redshifting and harmonic radiation in inverse Compton scattering”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 18, 060702, (2015).

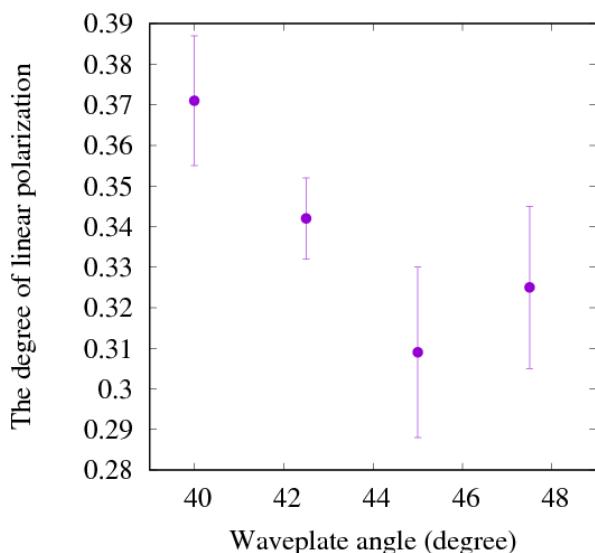


図 5: $\lambda/4$ 板の角度に対する直線偏光度の変化。