

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⁾ 中新 信彦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 Nobuhiko Nakanii

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、非線形逆コンプトン散乱、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) で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初めて示した (\hbar はプランク定数)。

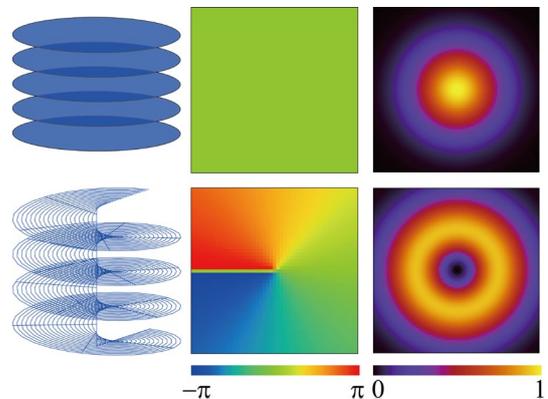


図 1: 通常的光(上段)と OAM を運ぶ光(下段)の概要。左から波面、位相、強度分布を表す。

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

2020年(令和2年)度は2019年度に引き続き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指す。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。

2020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指す。直径約20mm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。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3mmの鉛板の場合、1次ガンマ線の最大強度のエネルギー180keVの透過率は3%であり、2次ガンマ線の最大強度310keV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。

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0.7J、集光点でのエネルギーは伝送効率35%を考慮して0.245J、パルス幅43fs(FWHM)、入射ビーム直径50mm、集光ビームサイズ水平7.0 μm 、垂直5.7 μm (FWHM)、 $a_0 = 1.7$ 、繰返し2Hzの条件で運転した。電子ビームは、エネルギー150MeV、

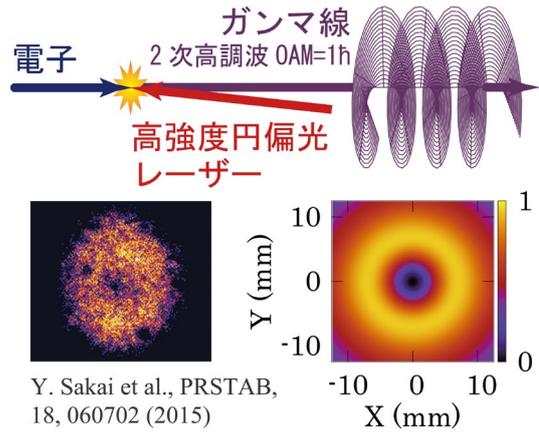


図2: (上)非線形逆コンプトン散乱によるOAMを運ぶガンマ線発生概要。(左下)2次高調波空間分布の測定結果。(右下)計算した空間分布。測定と良い一致を示す。

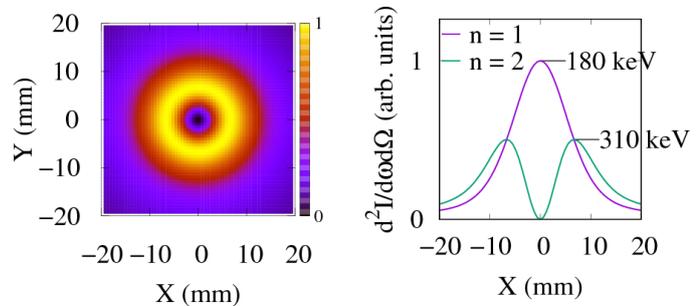


図3: (左)発生点から距離3m位置での2次高調波ガンマ線の空間分布。電子エネルギー150MeV、 $a_0 = 2$ で計算した。(右)1次($n = 1$)と2次($n = 2$)高調波ガンマ線の1次元強度分布。

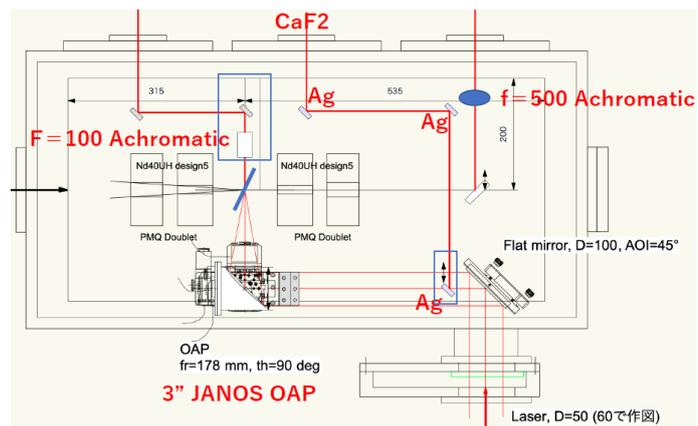


図4: コンプトンチャンバー内のレーザー集光の概要。

電荷量 8 pC/pulse、ビームサイズ水平 470 μm 、垂直 990 μm (FWHM)、パルス幅 24 ps (FWHM)、繰返し 10 Hz の条件で運転した。これらの条件から計算されるガンマ線のエネルギーは基本波が 110 keV、2 次高調波が 220 keV である。

円偏光レーザーの発生は、コンプトンチャンパー隣のペリクルチャンパー内に $\lambda/4$ 板を設置して行った。 $\lambda/4$ 板の角度が 37.5 度から 47.5 度の範囲で直線偏光度の測定を行い、37.5 度の時に直線偏光度が 0.27 まで低下した。直線偏光度が 0 に近い値にならないことは去年の結果と共通しているが、 $\lambda/4$ 板の角度に対する直線偏光度の変化は去年の実験と大きく異なる。 $\lambda/4$ 板が 0 次オーダーであることや集光特性、 $\lambda/4$ 板の設置角度などが原因と考えられるが、今後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、計 4 個の磁石の組立は完成したがコンプトンチャンパーへの設置は間に合わなかったため、本実験には使用していない。

電子ビームとレーザーの衝突点から 3 m 下流のガンマ線の軸上にイメージングプレートを設置して測定した結果を図 5 に示す。前回 (2020 年 3 月) の実験ではガンマ線の発生を確認するまでに至らなかったが、今回の実験ではレーザー起因のガンマ線は検出することができた。しかし、その空間分布は円環形状にならなかった。今後は、レイリー長に沿って a_0 が異なる事や電子ビームエミッタンスの影響などをシミュレーションに入れて計算し空間分布が円環にならなかった原因を調べる。

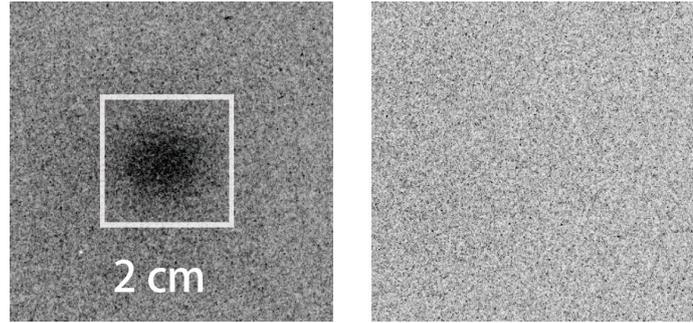


図 5: イメージングプレートの測定結果 (前面に厚さ 2mm の鉛板を設置)。 (左) レーザー on、(右) レーザー off。測定時間 69 分。

ガンマ線の軸上にアルミ板を設置し、90 度方向にコンプトン散乱されるガンマ線のエネルギースペクトルを測定した。結果を図 6 に示す。コンプトン散乱の理論式より、基本波ガンマ線のエネルギーは 90 keV、2 次高調波ガンマ線のエネルギーは 154 keV と計算される。図 6 (左) は、レーザーの繰返しが 2 Hz、電子ビームの繰返しが 10 Hz であるためにレーザー on:off を 1:4 の比で測定したエネルギースペクトルの結果である。図 6 (右) にレーザー on/off による差分スペクトルを示す。90 keV 付近には有意な差が見えているが、150 keV 付近には有意な差は観測されなかった。

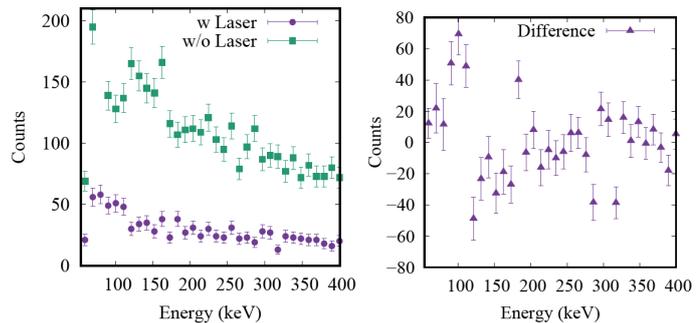


図 6: 厚さ 5 mm からのアルミ板から発生するコンプトン散乱ガンマ線を CeBr3 シンチレータで測定したエネルギースペクトル。 (左) レーザー on/off の結果、(右) 差分。

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).