

## GENERATION OF ULTRA-SHORT PULSE GAMMA-RAYS BY LASER COMPTON SCATTERING IN UVSOR-II

Yoshitaka Taira<sup>1A,B)</sup>, Masahiro Adachi<sup>B,C)</sup>, Heishun Zen<sup>B,C)</sup>, Takanori Tanikawa<sup>C)</sup>,  
Masahito Hosaka<sup>A)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>A)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Kazuo Soda<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B,C,A)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 JAPAN

<sup>B)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki  
444-8585 JAPAN

<sup>C)</sup> School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Myodaiji-cho, Okazaki  
444-8585 JAPAN

### Abstract

We are developing ultra-short pulse gamma-ray source based on Laser Compton Scattering technology. Femto-second laser pulses are injected from the vertical direction onto the electron beam circulating in the storage ring, which has very small diameter in the vertical direction, typically a few tens of microns. It is expected that gamma-rays with sub-picosecond pulse width can be produced. We have calculated the photon energy, flux and pulse width of the gamma-rays produced through the Laser Compton Scattering. A preliminary head-on collision experiment was carried out and the result was compared with the simulation.

## UVSOR-IIにおけるレーザーコンプトン散乱による 超短パルスガンマ線発生

### 1. はじめに

レーザーコンプトン散乱<sup>[1,2]</sup>(以下LCS)を用いて生成されるガンマ線は、強度が $10^5 \sim 10^7$  photons  $s^{-1}$ と大きく、エネルギー可変で準単色であり、発散角が小さく、偏極度が高いという特徴をもつ。これらの特徴を活かし、原子核物理学<sup>[3]</sup>、偏極陽電子生成<sup>[4]</sup>、非破壊検査<sup>[5]</sup>、電子ビーム診断<sup>[6]</sup>等に活発に利用されている。

本研究の目的は、LCSを用いて、これまでに例のないパルス幅100 fsの超短パルスガンマ線を発生させ、そのパルス幅を測定することである。

電子蓄積リングを周回する電子ビームの形状は、進行方向には数cmと長いが垂直方向の厚さが数10  $\mu\text{m}$ と非常に薄いという特徴を持つ。したがって、フェムト秒レーザーを真上から照射することで、電子とレーザーの相互作用時間が短くなり、パルス幅100 fsのガンマ線が生成できる。同様なテクニックは、低エネルギーの直線加速器において短パルスX線を発生<sup>[7]</sup>するために用いられた例はあるが、著者らの知りうる限りでは、短パルスガンマ線発生に用いられた例はない。

本論文では、電子蓄積リングでLCSによって発生するガンマ線の最大エネルギー、発生量、パルス幅の見積もりとUVSOR-IIで行った予備実験(正面衝突)の結果について述べる。

### 2. ガンマ線の発生

本章では、LCSガンマ線のエネルギー、発生量、パルス幅について述べる。

ガンマ線のエネルギー $E_\gamma$ は、電子と光子の運動学から導くことができ、以下の式で記述される<sup>[2]</sup>。

$$E_\gamma = \frac{E_L(\beta \cos \alpha + 1)}{1 - \beta \cos \theta + \frac{E_L}{\gamma m_e c^2}(1 + \cos(\alpha + \theta))} \quad (1)$$

ここで、 $E_L$ はレーザーの光子エネルギー、 $\alpha$ ,  $\theta$ はそれぞれ電子軌道軸に対するレーザーの入射角( $\alpha=0$ は正面衝突、 $\alpha=\pi/2$ が垂直衝突)およびガンマ線の散乱角、 $\gamma$ はローレンツ因子、 $m_e$ は電子の静止質量(0.511 MeV)、 $\beta=v/c$ ( $v$ は電子の速度、 $c$ は光速)である。

また、単位時間あたりに発生するガンマ線発生量 $N_\gamma$ は、散乱角 $\theta_c$ までの散乱断面積 $\sigma(\theta_c)$ とルミノシティ $L$ の積で記述できる<sup>[8]</sup>。

$$N_\gamma(\text{photons } s^{-1}) = \sigma(\theta_c) \times L \quad (2)$$

LCSの微分散乱断面積は、電子静止系では散乱過程がコンプトン散乱であることを用いて計算でき、電子静止系でのクライン仁科の式<sup>[9]</sup>をローレンツ変換して実験室系での微分散乱断面積を得る。電子のエネルギーが高い場合には、電子からみればレー

<sup>1</sup> E-mail: tairayo@ims.ac.jp

ザーは入射角  $\alpha$  に関係なく、正面から入射するように見えるので、微分散乱断面積はレーザーの入射角に依存しない。正面衝突時  $\alpha=0$  の微分散乱断面積は、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\gamma^2(1-\beta\cos\theta)^2} \frac{r_0^2}{2} R^2 \left( R + \frac{1}{R} - 1 + \cos^2\theta^{ER} \right) \quad (3)$$

となる<sup>[2]</sup>。ただし、

$$\frac{1}{R} = 1 + \frac{\gamma(1+\beta)E_L}{m_e c^2} (1 + \cos\theta^{ER})$$

$$\cos\theta^{ER} = \frac{\cos\theta - \beta}{1 - \beta\cos\theta}$$

であり、 $r_0$ は古典電子半径 $2.82 \times 10^{-15}$  mである。したがって、散乱断面積  $\sigma(\theta_c)$ は、式(3)を積分することで次式のように得られる。

$$\sigma(\theta_c) = \int_0^\alpha d\theta \frac{d\sigma}{d\theta} = 2\pi \int_0^\alpha d\theta \sin\theta \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (4)$$

一方、ルミノシティ  $L$ は、 $\phi = \alpha/2$ として以下の式で記述される<sup>[8]</sup>。

$$L = \frac{f N_e N_p \cos\phi}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{We}^2 + \sigma_{Wp}^2} \sqrt{(\sigma_{He}^2 + \sigma_{Hp}^2) \cos^2\phi + (\sigma_{Le}^2 + \sigma_{Lp}^2) \sin^2\phi}} \quad (5)$$

ここで、 $N_e, N_p$ は電子数と光子数、 $f$ は単位時間あたりの衝突回数、 $\sigma_L, \sigma_w, \sigma_H$ は、ビームの長さ、幅、高さ(RMS)であり、添え字eとpは電子と光子を表す。垂直衝突の場合、正面衝突と比べてルミノシティが小さくなるため、ガンマ線の発生量が低下する。

次に、ガンマ線のパルス幅  $\sigma_t$ は、以下のように記述される<sup>[7]</sup>。

$$\alpha = 0 \quad \sigma_t = \frac{\sigma_{Le}}{c}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad \sigma_t = \frac{\sqrt{\sigma_{He}^2 + \sigma_{Hp}^2 + \sigma_{Lp}^2}}{c} \quad (6)$$

フェムト秒ガンマ線を生成するためには、レーザーの大きさ ( $\sigma_{Hp}$ ) を電子ビームの大きさ程度 (0.1 mm 以下) まで絞らなければならない。

表1に、使用する電子ビームとレーザーの各種パ

ラメータとともに、式(1)~(6)を用いて見積もった垂直衝突 ( $\alpha = \pi/2$ ) と正面衝突 ( $\alpha = 0$ ) のそれぞれの場合のガンマ線の最大エネルギー、単位時間あたりのガンマ線の発生量、パルス幅をまとめた。

表1:ガンマ線の最大エネルギー、発生量、パルス幅  
電子ビームとレーザーの各種パラメータも示す。

電子ビーム	
エネルギー	750 MeV
電流値	100mA
周波数(シングルバンチ)	5.64 MHz
$\sigma_{We}, \sigma_{He}, \sigma_{Le}$ (RMS)	0.60, 0.06, 32 mm
レーザー	
波長	800 nm
パワー	10 W *
周波数 (衝突周波数)	1 kHz
$\sigma_{Wp}, \sigma_{Hp}, \sigma_{Lp}$ (RMS)	0.06, 0.06, 0.017 mm
ガンマ線 ( $\alpha = \pi/2$ )	
最大エネルギー	6.6 MeV
発生量	$3.1 \times 10^6$ photons $s^{-1}$
パルス幅 (RMS)	288 fs
ガンマ線 ( $\alpha = 0$ )	
最大エネルギー	13.1 MeV
発生量	$9.0 \times 10^8$ photons $s^{-1}$
パルス幅 (RMS)	108 ps

\*今年度調達予定(COHERENT社製 LEGEND-HE-CRYO-PA-10 相当システム)

### 3. 正面衝突実験

90度衝突実験に先立って、UVSOR-II電子蓄積リングに既設の自由電子レーザー(FEL)用の光学路を流用し、正面衝突のLCSを行い、検出器系のテスト、理論計算との比較を行った。電子蓄積リングは、エネルギー750 MeVのシングルバンチ運転で行い、蓄積電流値は約1mAに低く抑えた。使用したレーザーは、蓄積リングのRF加速に同期したTi:Saレーザー(COHERENT, LEGEND-HE)で、パルスエネルギーが2.0mJ、繰り返し周波数は1 kHzである。

実験のセットアップを、図1に示す。蓄積リング直線部の上流側のビューポートからレーザーを入射し、下流側のアルミミラーで反射して折り返し、直

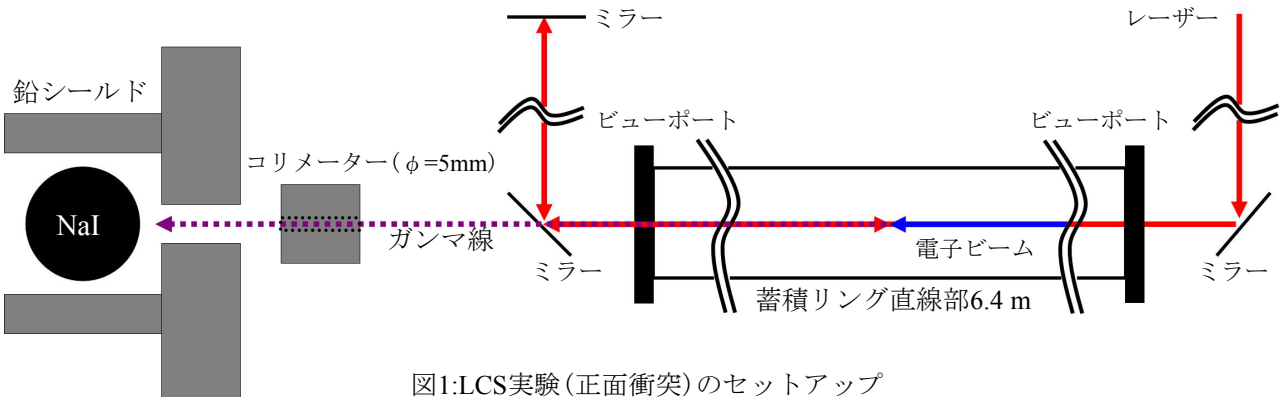


図1:LCS実験(正面衝突)のセットアップ

線部で電子ビームと衝突させた。レーザーの集光系は設置しておらず直径約10 mmの大きさであった。ミラーの反射率の影響のためレーザーパワーは減衰し、衝突時のレーザーパワーは0.25 Wであった。レーザーのタイミングを調整することで、直線部の任意の場所で衝突させることが可能である。衝突場所は、検出器から7.6 mとした。

検出器は、NaIシンチレーター(直径127 mm)を使用し、出力波形をShaper Ampで整形し、MCAでエネルギースペクトルを測定した。MCAにレーザーと同期したGATE信号をかけ、ノイズ(制動放射ガンマ線)を1/20に低減させた。測定器系のブロック図を図2に示す。検出器のエネルギー較正は、<sup>137</sup>Csと<sup>60</sup>Coの線源を用いた。検出器の周りは鉛でシールドし、φ=5 mmの鉛コリメーター(厚さ100 mm)も設置した。式(1)~(5)を用いた計算では、ガンマ線の最大エネルギーは13.1MeV、発生量は460 photons s<sup>-1</sup> mA<sup>-1</sup>であった。

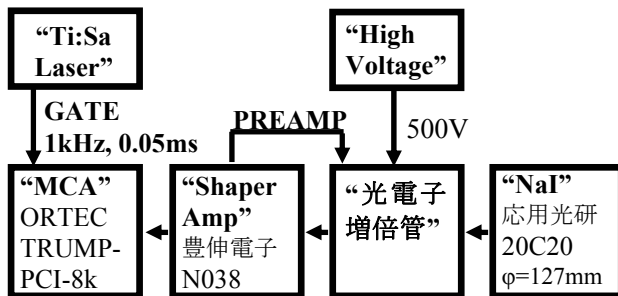


図2:測定器系のブロック図

#### 4. 結果と考察

図3に実験で得られたエネルギースペクトルを示す。図中の点が測定データを表し、赤がコリメーターの無い場合であり、青がコリメーターのある場合である。測定データからは、レーザーを入射しない時のバックグラウンドを差し引いてある。

測定データを、電子とガンマ線のシミュレーションコードであるEGS5<sup>[10]</sup>で計算したエネルギースペクトルと比較した。図3の曲線がその結果である。EGS5では、実験時の物質の配置を定義し、ガンマ線のエネルギー、角度分布、発生量は式(1)~(5)で定義した。電子ビームのエミッタンス、エネルギー広がり効果は無視した。測定結果と形状を比較するため、計算結果の強度を0.73倍した。

コリメーターが無い場合のスペクトルの形状は、測定データと良く一致し、コリメーターがある場合のスペクトルの形状は、EGS5でコリメーターの位置を水平方向に1.7 mmずらして定義した結果と良く一致した。図3には、コリメーターの位置をずらさずに定義した計算結果も示した。スペクトルの形状が良く一致することから、レーザーと電子ビームの衝突でガンマ線が発生していることを示している。また、測定時のコリメーターの位置が、ガンマ線中心軸よりも1.7 mmずれていたと考えられる。

測定データとEGS5の強度の絶対値が一致しない原因は、レーザーサイズの計測精度によるものと考えられる。また、コリメーターの無い場合の測定データにおいて、最大エネルギーよりも高いエネルギーのガンマ線がカウントされている。この原因は、レーザーのパルスエネルギーが高いために、複数のガンマ線が検出器の分解時間以下で同時に入射したためと考えられる。

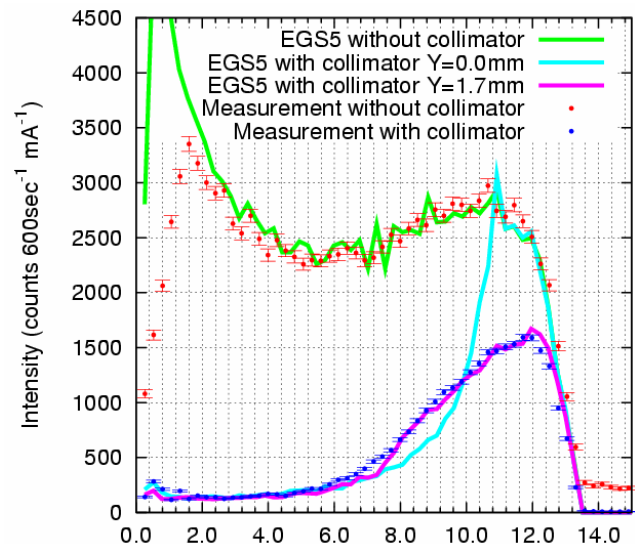


図3:ガンマ線のエネルギースペクトル。誤差は、統計誤差の1σとしている。

#### 5. まとめ

パルス幅100 fsの超短パルスガンマ線発生について検討し、LCSガンマ線のエネルギー、発生量、パルス幅を計算した。また、正面衝突による予備実験を行い、ガンマ線が発生することを確認した。そして、シミュレーションとの比較を行った。

今後、電子軌道に対して90度方向からレーザーを照射し、ガンマ線の発生を確認する。ガンマ線のパルス幅の測定が大きな課題となる。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた分子研の林憲志さんと山崎潤一郎さんに深く感謝します。

#### 参考文献

- [1] A. M. Sandorfi et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-30**,3083,(1983).
- [2] J. Stepanek, Nucl. Instr. Meth. A, **412**, 174, (1998).
- [3] S. Miyamoto et al., Radiation Measur. **41**, S179, (2007).
- [4] T. Hirose et al., Nucl. Instr. Meth. A, **455**, 15, (2000).
- [5] H. Toyokawa et al., Nucl. Instr. Meth. A, **545**, 469, (2005)
- [6] R. Klein et al., Nucl. Instr. Meth. A, **486**, 545, (2002).
- [7] M. Yorozu et al., Jpn. J. Appl. Phys., **40**, 4228, (2001).
- [8] T. Suzuki, KEK Rep. KEK-76-3, (1976).
- [9] O. Klein, Y. Nishina, Z. Physik, **52**, 853, (1929).
- [10] H. Hirayama et al., SLAC-R-730, (2005).