

GENERATION OF LASER COMPTON GAMMA-RAY AT SAGA-LS

Tatsuo Kaneyasu*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda

SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005

Abstract

We have started a laser Compton scattering (LCS) experiment using a CO₂ laser at the SAGA-LS storage ring. In the LCS experiment, a CO₂ laser photon is scattered by the 1.4 GeV electron beam in a head-on collision. A gamma-ray beam of 3.5 MeV maximum photon energy is generated and used to measure the stored electron beam energy. The LCS event rate is estimated to be $4 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$ with a beam current of 2 mA and a laser power of 1 W. We have determined the electron beam energy with a relative uncertainty of about 0.3% through a careful analysis of the LCS gamma-ray spectrum.

SAGA-LSにおけるレーザーコンプトンガンマ線の生成試験

1. はじめに

放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) では、ビームエネルギーモニターの開発と将来的なガンマ線利用研究への応用を目的として、CO₂ レーザーと 1.4 GeV 電子蓄積リングを用いたレーザーコンプトン散乱 (LCS) ガンマ線の生成実験を進めている。本研究では電子蓄積リングの入射用直線部を用いて、1.4 GeV 蓄積電子ビームと波長 10.6 μm のレーザー光の head-on collision により最大エネルギー 3.5 MeV のガンマ線を生成する。蓄積リングの運動量アクセプタンス (14 MeV) は LCS ガンマ線のエネルギーより十分に大きいため、LCS による反跳を受けた電子は RF バケットから蹴り出されない。よって CO₂ レーザーを用いた LCS は通常のユーザー運転と共存可能な利点がある。さらに CO₂ レーザーは大出力化が比較的容易であり、レーザー出力増強によるガンマ線の大強度化についても有利といえる。

昨年度前半までに蓄積リングへのレーザー光導入ビームラインの整備やレーザー光学系の設計^[1]を完了し、2009年12月のビーム試験にて LCS ガンマ線の初観測に成功した。本稿では LCS ビーム試験の結果として、ガンマ線ビームの特性評価と電子ビームのエネルギー測定を報告する。

2. 実験セットアップと試験手順

2.1 セットアップ

図1に LCS 実験セットアップ^[1]の概略を示す。レーザー光と電子ビームの相互作用領域は蓄積リングの入射用直線部 LS8 であり、相互作用区間の長さは 5.5 m である。LCS 実験のコンポーネント (レーザー、集光光学系、ガンマ線検出器等) は全てリング室内に設置されている。レーザー光は蓄積リングへの導入用ビームライン BL01 を用いて、偏向電磁石 BM01 の 0° ポートよりリング直線部へ導入する。直線部 LS8 の上流側偏向電磁石 BM16 にはビューポートが取り付けられており、透過レーザー光の強度をモニターするためパワーメータを設置している。レーザー光は LS8 中央より 1 m 程度下流にビームウェストが位置するよう集光光学系を調

整しており、ビーム試験中の BM16 ビューポートへのレーザー光透過率はおよそ 60% であった。

ガンマ線の検出器は結晶サイズ 2 インチの BGO シンチレータを採用した。エネルギー校正用線源としては Cs-137, Co-60 を使用している。今回のビーム試験では LCS ガンマ線のエネルギースペクトル測定は、ビーム電流 2 mA, レーザー出力 1 W の条件で行った。なおアラインメントを容易にするため、LCS ガンマ線の検出見込み角を制限するコリメータ等は使用していない。

2.2 ガンマ線計数率

ビーム試験に先立ち BGO シンチレータによる LCS ガンマ線の実効的な計数率を見積もった。LCS イベントレートはレーザー光と電子ビームの光学関数を用いてルミノシティ計算により評価可能である^[1]。ビーム電流 2 mA, レーザーパワー 1 W の条件では LCS イベントレートは $1.2 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$ 、そのうちビームエネルギー評価に必要な最大エネルギー近傍 (エネルギー幅 10%) の光子生成レートは $1.8 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$ と見積もられた。

一方、BGO シンチレータの検出効率をモンテカルロ計算コード EGS5^[2]を用いて評価した結果、3 MeV 以上のガンマ線に対して検出器単体の検出効率は 40% 程度、フランジやミラーによる減衰も含んだ実効的な検出効率はおよそ 14% と求まった。以上より、最大エネルギー近傍 (エネルギー幅 10%) のガンマ線に対する BGO シンチレータの計数率は $2.5 \times 10^3 \text{ cps}$ と評価された。この LCS ガンマ線計数率は制動放射に比べ 2-3 桁は高強度であり、ガンマ線のスペクトル形状を解析することは容易と考えられる。

2.3 ビーム試験手順

ビーム試験は以下の手順で行った。まずビームエネルギー 1.4 GeV にて LCS ガンマ線の特性評価を行った。ガンマ線のエネルギースペクトルをレーザー ON/OFF の条件で測定し、実効的な LCS ガンマ線強度をデザイン値と比較した。また LCS ガンマ線のビームプロファイルを確認するため、イメージングプレートを用いてビームライン終端部でガンマ線ビームを観測した。

次に電子ビームのエネルギー測定試験を実施した。LCS ガンマ線スペクトルの最大エネルギー付近のエッ

* kaneyasu@saga-ls.jp

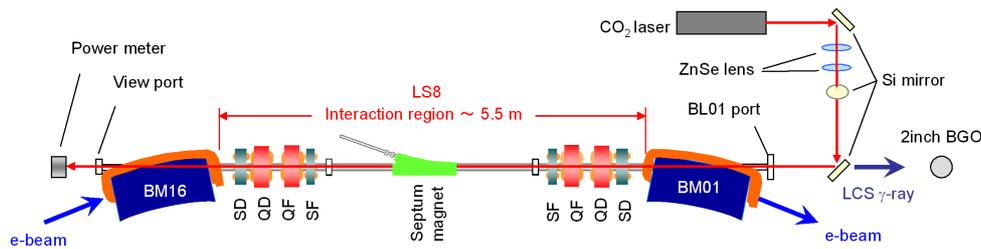


図 1: LCS 実験のレイアウト.

ジ構造を解析し、電子ビームのエネルギーを評価した。なおビームエネルギー評価を目的としたガンマ線スペクトル測定では、BGO 検出器のドリフトによる系統誤差を低減するため、エネルギー校正用ガンマ線を LCS ガンマ線と同時に測定した。

3. ビーム試験結果

3.1 ガンマ線ビーム特性

図 1 にビームエネルギー 1.4 GeV におけるガンマ線スペクトルの測定結果を示す。レーザー ON の条件では LCS によるガンマ線イールドの増大が明瞭に観測されている。LCS ガンマ線スペクトルは 3.5 MeV 付近を端部とする連続的な分布となっているが、これはコリメータ等でガンマ線の取り込み角度を制限していないためである。レーザー ON と OFF のスペクトルの差分が実効的な LCS ガンマ線強度となるが、最大エネルギー近傍(エネルギー幅 10%) の LCS ガンマ線計数率は 8.4×10^2 cps となった。この計数率はデザイン値のおよそ 30% であり、LCS イベントレートは $4 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$ と推定される。今回のビーム試験では BGO シンチレータの LCS ガンマ線計数率は概ねデザイン値の 20-40% であった。LCS ガンマ線強度を増強するためには、レーザー光の集光微調整や光軸アラインメントの精密化が必要と考えられる。

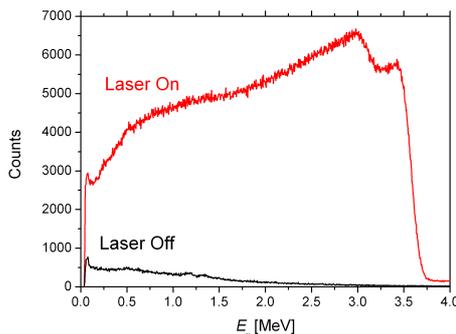


図 2: ビームエネルギー 1.4 GeV における LCS ガンマ線スペクトル。ビーム電流は 2 mA, レーザー出力は 1 W.

ガンマ線ビームプロファイルを確認するため、イメージングプレート(富士フィルム社製: BAS-SR)を BL01 終端の水冷フランジ背後に設置した。イメージングプレートは数 MeV 領域のガンマ線に対しても感度を有し、簡便なガンマ線ビームプロファイル測定方法^[3, 4]としても有効である。図 3 にイメージングプレートを用いて観測したビームエネルギー 1.4 GeV におけるガンマ線

ビームプロファイルを示す。測定はビーム電流 5.7 mA, レーザー出力 10 W, レーザー ON/OFF の条件で行い、露光時間は 20 分とした。LCS ガンマ線のビームスポットは水平方向に扁平な形状であるが、これはレーザーの偏光方向(垂直直線偏光)に対するコンプトン散乱の異方性^[5]を反映している。水平方向のガンマ線ビームサイズ(rms)は、イメージングプレート読み出し時の蛍光収量分布から 2.1 mm と求めた。これはリング直線部のビームサイズ、LCS ガンマ線の角度拡がりやイメージングプレート設置距離から推定されたビームサイズ 2.3 mm とほぼ一致している。

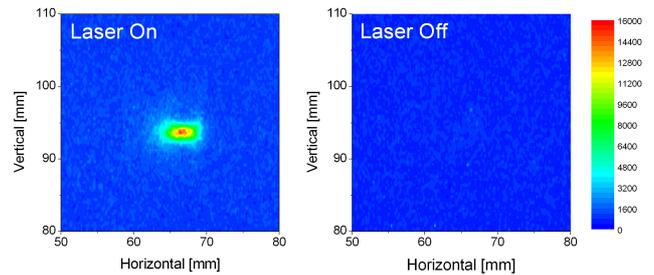


図 3: イメージングプレートによる LCS ガンマ線の観測。

3.2 ビームエネルギー測定

LCS ガンマ線の最大エネルギーは、head-on collision の条件では近似的に以下の式で表わされる。

$$E_{\gamma\text{max}} = \frac{4\gamma^2}{1 + 4\gamma E_L / (mc^2)} \quad (1)$$

ここで γ はローレンツ因子、 E_L はレーザー光子エネルギー、 mc^2 は電子の静止エネルギーである。LCS ガンマ線の最大エネルギーを実験的に求めれば、(1) 式を用いて電子ビームのエネルギーが求まる。ただし理想的な LCS ガンマ線スペクトルの最大エネルギー付近はエッジ構造であるが、実際の測定では検出器の分解能等により最大エネルギー付近は滑らかなスロープ形状となる。そこで LCS ガンマ線の最大エネルギーを決定するため、理想的なスペクトル形状にガウス関数を畳み込み、曲線フィットによるスペクトル評価^[6, 7]を行った。図 4 にビームエネルギー 1.4 GeV における LCS ガンマ線スペクトルの曲線フィットを示す。ここで理想的な LCS ガンマ線スペクトルはフィットモデルを単純化するためステップ関数で近似している。曲線フィットの結果、最大のガンマ線エネルギーは 3.588 MeV と求めた。

電子ビームエネルギーの測定精度は主に検出器の校正精度，レーザー発振波長の精度，アラインメント，統計誤差によって決まる．系統誤差は近似的に，

$$\frac{\Delta E_e}{E_e} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\Delta E_D}{E_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_L}{E_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi^2}{4}\right)^2} \quad (2)$$

と表わされる．ここで $\Delta E_D/E_\gamma$ は検出器のエネルギー校正精度， $\Delta E_L/E_L$ はレーザーの発振波長の精度， $\Delta\phi$ は交差角度のズレである．ビームエネルギー 1.4 GeV における測定精度を要因ごとに表 1 にまとめた．現状では検出器の校正精度とレーザー発振波長の寄与が主要である．LCS ガンマ線の最大エネルギーと誤差評価の結果，偏向電磁石の磁場測定データから求めたビームエネルギー 1.4 GeV に対して，LCS ガンマ線の最大エネルギーから決定したビームエネルギーは 1417 ± 4 MeV となった．

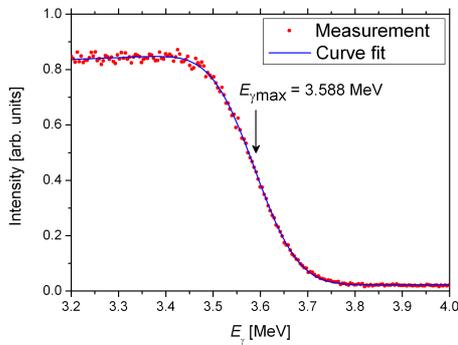


図 4: ビームエネルギー 1.4 GeV における LCS ガンマ線スペクトルの解析．最大エネルギー近傍の曲線フィット．

表 1: LCS による 1.4 GeV 電子ビームのエネルギー測定精度

要因	相対精度	ΔE_e [MeV]
検出器校正	$\Delta E_D/E_\gamma = 4.8 \times 10^{-3}$	3.4
レーザー発振波長	$\Delta E_L/E_L = 2.8 \times 10^{-3}$	2.0
アラインメント	< 4 mrad	3×10^{-3}
統計	$\Delta E_e/E_e = 9.0 \times 10^{-5}$	0.13
Total	$\Delta E_e/E_e = 2.8 \times 10^{-3}$	4.0

ビームエネルギーを 1.4 GeV から 1.32 GeV まで 0.01 GeV ステップで変更しながら，LCS によるビームエネルギー測定を行った．図 5 に設定エネルギー毎の LCS ガンマ線スペクトルを比較する．ビームエネルギー変更に応じて，LCS ガンマ線の最大エネルギーが低エネルギー側にシフトする様子がわかる．図 5 の LCS ガンマ線スペクトルを解析し，ビームエネルギーを評価した結果を図 6 に示す．測定値は設定値に対して 1% 程度高い値であるが，関係性は概ねニアである．また 0.01 GeV 程度のビームエネルギー変化に対して，現状の測定系は十分な精度を有することがわかる．

4. まとめ

SAGA-LS では CO₂ レーザーと 1.4 GeV 電子ビームを用いた LCS 実験の準備を進めてきたが，昨年度後半

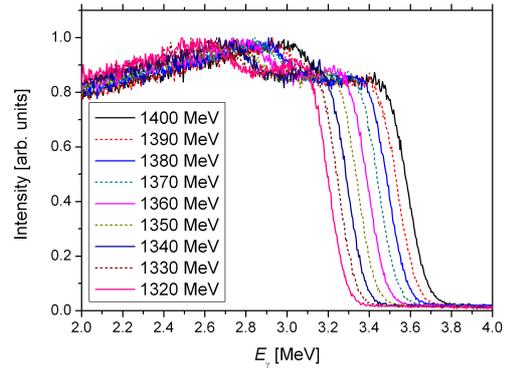


図 5: LCS ガンマ線スペクトルのビームエネルギー依存．

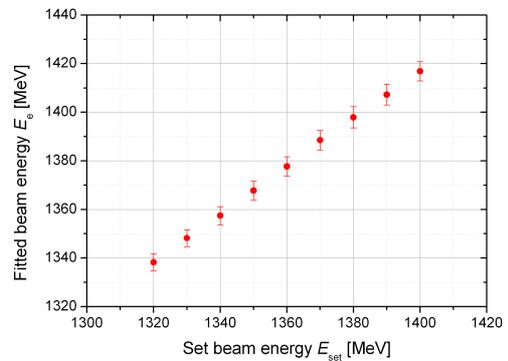


図 6: ビームエネルギー設定値と LCS による測定値の比較．

のビーム試験において LCS ガンマ線の生成を確認した．ビーム試験では LCS ガンマ線強度評価とイメージングプレートによるビームプロファイルの観測，及びビームエネルギー測定を実施した．ビーム試験の結果，ビームエネルギー 1.4 GeV において LCS ガンマ線強度はデザイン値の 20–40% と評価された．また，イメージングプレートで測定したビームサイズは予測値とほぼ一致することがわかった．LCS によるビームエネルギー評価では，小型の BGO シンチレータを用いた現状のセットアップでも 0.3% 程度の精度でビームエネルギーは測定可能であった．今後は 300 mA 蓄積時の LCS の実現や光軸アラインメントの精密化を目的として実験セットアップの改良を行いつつ，LCS ガンマ線による透過像撮影等も実施していく予定である．

参考文献

- [1] T. Kaneyasu, et al., “Status of Gamma-ray Generation Experiment by Laser Compton Scattering at SAGA-LS”, Proc. of 6th Particle Acc. Soc. Japan (2009) pp. 237.
- [2] H. Hirayama et al., “The EGS5 Code System”, SLAC-R730 (2005).
- [3] S. Miyamoto et al., Radiation Measurements 41 (2007) S179.
- [4] S. Amano et al., Nucl. Instrum. Meth. A 602 (2009) 337.
- [5] S.H. Park et al., Nucl. Instrum. Meth. A 475 (2001) 425.
- [6] R. Klein et al., Nucl. Instrum. Meth. A 384 (1997) 293.
- [7] R. Klein et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11 (2008) 110701.