レーザーコンプトン散乱ガンマ線ビーム技術開発と応用

宮本 修治

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 (〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都1-1-2)

Development of Technology and Application of Laser Compton Scattering Gamma-Ray Beam

Shuji MIYAMOTO

*Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigouri, Ako-gun, Hyogo 678-1205*

(Received August 21, 2013)

A laser Compton gamma-ray beam is unique photon source that can supply polarized, tunable, quasi-monochromatic high energy photon beam. This gamma-ray source has possibilities to apply to the maintenances, the conservation, the decommissioning and the security of atomic power plants. Present status of gamma-ray beamline on a synchrotron light facility NewSUBARU are reported. Quasi-monochromatic gamma-ray beams from 1 MeV to 73 MeV photon energy are achieved. Photo-nuclear reactions using 17 MeV photon energy were tested. Fast neutrons were measured by a time-of-flight technique. A dependence of neutron emission distribution on the polarization of gamma-ray was demonstrated. Nuclear transmutation for a disposal of radioactive nuclear waste and a generation of useful radioactive nuclei are tested.

Key Words: Compton scattering, Gamma-ray, Polarization, Photo-nuclear reaction, Neutron

1. はじめに

従来高エネルギーガンマ線の利用には、放射性同位体からの崩壊ガンマ線や、電子加速器などを用いた制動輻射ガンマ線が用いられてきた。レーザー・コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering: LCS) ガンマ線源は、これら従来のガンマ線源に無い特徴を持ち、準単色性、エネルギー可変性、ビーム状放射に加えて、優れた偏光特性により、これを用いたガンマ線応用研究領域の拡大が期待されている。このようなガンマ線ビーム源の新しい利用施設が、大型放射光施設SPring-8サイト内のニュースバル放射光施設に整備された。原子核との相互作用実験等に有用な、1 MeVから73 MeVまでのエネルギー領域でサブmWクラス ($10^7 \gamma/s$) のガンマ線ビームが利用可能である¹⁾。更に高輝度・高フラックスのガンマ線ビームの利用を目的として、エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac: ERL) を用いた試験システムの建設が、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構の協力で進められている^{2,3)}。この施設では、 $10^{13} \gamma/s$ のフラックスのガンマ線発生と利用を目標としている。これらの新しいガンマ線源は、今後の原子力施設の保守保全、あるいは廃止措置に有用なツールとなりうると考えられる。ここでは、LCSガンマ線ビーム源の特徴と現状および応用研究の例を紹介する。

歴史的には、まずコンプトン散乱による高エネルギー光子の発生が、宇宙の星間光による高エネルギー電子の減速機構の実証として理論的に検討された⁴⁾。LCSガンマ線源の実験的研究はレーザー発明直後から、世界各地の電子蓄積リングを持つ加速器研究所で試験された^{5,6)}。レーザー装置の性能向上とともに、ガンマ線源として他の光源には無い特徴が認識され、さらに放射光施設などで電子蓄積リングの高性能化と利用施設の充実により、高エネルギー光子の発生と利用が積極的に図られるようになった。大型放射光施設 SPring-8の電子蓄積リング (電子エネルギー8 GeV) では、レーザー電子光 (LEP) と呼ばれるLCSガンマ線ビームライン (BL33LEP) が建設され、紫外レーザーを用いて、エネルギーを高精度で同定した2 GeVを超える偏極光子を発生して、ハドロン核物理研究に利用している⁷⁾。さらにSPring-8では遠赤外レーザー光 (波長約100 μm) を用いて、ガンマ線発生による電子損失が生じない、10 MeV付近のガンマ線を発生する試験も行われた⁸⁾。

定常的にMeVエネルギーのガンマ線を発生できる光源は世界的にみても少なく、本稿で紹介するニュースバルガンマ線源以外では、米国Duke大学のHlySガンマ線源と、産業技術総合研究所の電子蓄積リングTERASガンマ線源のみであった。TERASは1980年代後半から外部レーザーを用いたレーザーコンプトン散乱ガンマ線源

の研究を進め、核物理研究やガンマ線非破壊検査などガンマ線応用研究を積極的に推進して成果を上げてきたが⁹⁻¹¹⁾、装置の老朽化に加え、東日本大震災の被災により閉鎖となった。Duke大学の、HIGS施設¹²⁾は、電子エネルギー0.2-1.2 GeVの蓄積リングにより発生した自由電子レーザーの波長可変性と、レーザー共振器内の高い光子密度を利用して、ガンマ線エネルギー可変(1-100 MeV)で、高フラックス(10^6 - 10^7 γ /s)ガンマ線源を実現している。

なお、一般には「ガンマ線」は、電磁相互作用により原子核から放出される電磁波をさすが、ここでは、高エネルギー電磁波、特にエネルギーが100 keV程度以上の光子の意味で用いている。

2. レーザーコンプトン散乱ガンマ線

2.1 発生原理と特徴

コンプトン散乱光源の特徴を明確にするために、電子エネルギーとレーザー光子エネルギー、および散乱動力学から決まるガンマ線スペクトルの角度分布をもとに、加速器パラメータの違いによる、光源特性の比較を行う。

Fig. 1のように、高エネルギー電子ビームに対して、正面からレーザー光ビームを入射して、レーザー光子が電子進行方向にコンプトン散乱する配置を考える。この場合、散乱光子エネルギーと散乱角度の関係は、次式で表される。

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

ここで、 $\gamma = E_e/mc^2$ はローレンツ係数、 E_e は電子エネルギー、 mc^2 は電子の静止エネルギー、 E_L はレーザー光子エネルギー、 θ は電子ビーム進行方向に対する散乱光子の出射角度、 $4E_L\gamma^2/mc^2$ は散乱光子の電子に対する反跳効果である。Fig. 2にこの関係を図示する。散乱角度で、 $1/\gamma$ 程度の範囲に高いエネルギーの散乱光子が集中することがわかる。数値例としては、エネルギー1 GeVの電子ビームに対して、Nd:YVO₄レーザ(波長1064 nm)を入射した場合、軸上(散乱角度 $\theta = 0$)には、 $E_\gamma = 17.5$ MeVのガンマ線が散乱する。エネルギー分布の角度広がり、 $\theta_{1/2} = 1/\gamma = 0.5$ mradとなる。一方、ガンマ線フラックスの幅も $1/\gamma$ となり、半数の散乱光子が、半値半角0.5 mradに含まれることになる。この放射分布は、散乱粒子である電子の座標系から、実験室系へのローレンツ変換で決まるため、シンクロトロン放射光が電子軌道前方に集中して高輝度な放射となる原理と同様に、ビーム状のガンマ線源となることを示す。散乱中心軸にガンマ線コリメーターを設置することで、エネルギー広がり小さい

Fig. 1 Schematic of laser Compton scattering gamma-ray generation at head-on collision.

Fig. 2 Dependence of gamma-ray photon energy on the scattering angle θ .

Fig. 3 Absorption cross section of photon in (a) Pb and in (b) carbon target. Data used are from NIST-XCOM photon cross sections database and RIST-JENDL nuclear database.

準単色ガンマ線源として利用できる。数値例では、散乱点から20 mの位置に直径3 mmのコリメーター設置すると、散乱光子ビームを0.15 mradの角度で切り出すことに対応し、理想的にはエネルギー広がり3%のガンマ線ビームが得られる。

また、上記パラメータ領域では、散乱の全断面積は、ほぼThomson散乱の断面積となり、

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2 \approx 0.665 - \text{barn} \quad (2)$$

程度である。ここで、 $r_0 = e^2/mc^2$ は電子の古典半径。コンプトン散乱断面積の量子力学的取り扱い、Klein-仁科の式で計算される。

散乱ガンマ線の偏光特性は、入射レーザー光子の偏光を保存するが、電子から見てレーザー入射方向以外へ散乱された光子は、ローレンツ変換により偏光を回転させながら電子進行方向に集中するため、ガンマ線ビームの軸の周囲は異なる偏光を含む。ガンマ線ビームを、電子ビーム軸を中心とした 1γ より十分小さい開口角度のコリメーターで切り出すことにより、90%以上の高い偏光度のガンマ線ビームを利用することが出来る。入射レーザーの偏光を切り替えることで、直線偏光あるいは右回り・左回り円偏光ガンマ線を高速に切り替えることが可能で、他のガンマ線源にはないユニークな特徴である。磁気コンプトン散乱等、電子のスピンの依存した散乱計測の応用に用いられている¹³⁾。

2.2 ニュースバル・ガンマ線ビームライン

Fig. 4にガンマ線ビームラインの概略を示す。ニュースバル放射光施設¹⁴⁾は、電子エネルギー0.5 GeVから1.5 GeV可変の軟X線放射光施設で、現在9本の放射光ビームラインが利用されている。BL01がLCSガンマ線ビームラインである。このビームラインは直線部下流にあり、電子とレーザー光子の衝突点は、直線部中央部(衝突点1:短波長レーザー用)と、下流の偏光電磁石直前の部分(衝突点2:長波長レーザー用)を設定している。この2箇所で、電子ビームは0.5 mm程度に収束している。レーザー装置は加速器収納トンネル外に設置し、ミラー、レンズ、窓を介して、真空ダクト内に導き、真空槽内の最終ミラーで折り曲げて、衝突点へ導いている。発生するガンマ線は、最終ミラーおよび真空窓を透過して大気中に取り出し、そのままガンマ線ハッチ1および2へ導入される。ガンマ線コリメーターは、加速器収納トンネル内およびガンマ線ハッチ1に設置した自動ステージに載せた、厚さ100 mmの鉛にコリメータ孔を開けたものを用いている。Table 1に代表的な3つの波長のレーザーを用いた場合の、ガンマ線エネルギーおよび

Table 1 Energy and normalized yield of gamma-ray beam at BL01. Usable flux of gamma-ray is 3000 times of the normalized yield, when electron current of 300 mA and 10 W laser was used.

Lasers	Nd (ω)	Nd (2ω)	CO ₂
Laser wavelength (nm)	1064	532	10590
Electron energy (collimator)	Collimated γ -ray energy (MeV)		
$E_e = 974 \text{ MeV}$ (25 mm ϕ)	6.0-16.7	12-33	0.6-1.7
(3 mm ϕ)	15.8-16.7	31-33	1.6-1.7
$E_e = 1470 \text{ MeV}$ (25 mm ϕ)	7.6-37.6	15-73	0.7-3.9
Electron energy (collimator)	Normalized γ -ray yield (γ /s/mA/W)		
$E_e = 974 \text{ MeV}$ (25 mm ϕ)	6000	3000	7200
(3 mm ϕ)	260	130	480

計測したガンマ線規格化フラックスを示す¹⁵⁻¹⁸⁾。

Fig. 5には、高分解のGe検出器で測定した、準単色ガンマ線スペクトルの例を示す。この計測では、制御システムでの電子エネルギーを800 MeV、CO₂レーザーを用い、直径1 mmのコリメーターをハッチ1に設置して測定した。計測されたガンマ線の最大エネルギー(1.177 MeV)から電子ビームのエネルギーは約810 MeVと計算され、蓄積リング内の電子エネルギーを計測することが出来た。計測精度は、0.07%程度と評価されている。

3. LCSガンマ線ビームの応用研究

LCSガンマ線ビームの応用研究は、核物理¹⁹⁾、宇宙核物理²⁰⁾、陽電子生成²¹⁾とその利用、遮蔽体試験、同位体の非破壊検出²²⁾、特に核燃料物質の高精度検出²³⁾、磁気コンプトン散乱計測¹³⁾などが実施されている。ここでは、光核反応のガンマ線偏光依存計測と、核変換試験に関して紹介する。

高速中性子の計測には、プラスチックシンチレーターを用いて、飛行時間法で散乱ガンマ線と分離して計測した¹⁶⁾。電子蓄積リングを単バンチ運転することにより、電子周回時間386 ns毎に、ガンマ線パルスを発生し、ターゲットに照射する。ターゲットからは、光核反応中性子と散乱ガンマ線が発生するが、飛行時間差により分離して、中性子のフラックスとエネルギーが測定でき

Fig. 4 Layout of laser Compton scattering gamma-ray beam source on NewSUBARU BL01. Two collision points and two gamma-ray irradiation hutchs are shown. Two collimators located in the accelerator tunnel and in the hutch-1.

Fig. 5 Example of LCS gamma-ray spectrum. Data was taken by pure-Ge detector at electron energy of 800 MeV, with CO₂ laser and 1 mmΦ collimator. Calculated full-spectrum is shown as gray line.

る。この計測法を用いて、ガンマ線ビーム軸に対して、垂直方向に放出される(γ, n)光核反応中性子のガンマ線偏光依存性を測定した。Fig. 6 (a)に、偏光方向($\Phi = 0^\circ$)および偏光に垂直方向($\Phi = 90^\circ$)で計測された197-Auターゲットからの中性子スペクトル例を示す。光核反応の中性子放出分布がガンマ線偏光に依存することは、50年以上前に、A. Agodi²⁴⁾が理論計算しており、ガンマ線偏光方向に対する角度 Φ について、 $Y(\Phi) = a + b \cdot \sin^2 \Phi$ の発生分布をすると予測をされているが、明確な実験的計測の報告がなかった。この分布をAuターゲットについて計測した結果をFig. 6 (b)に示す。実線は、偏光角度に対する分布を $Y(\Phi)$ にフィッティングした関数である。この観測結果は、偏光に垂直方向に約2倍の中性子発生がある分布を示しており、電気双極子共鳴で偏光方向に引き伸ばされる様に変形した原子核からの中性子放出を示唆している。Fig. 6 (c)に質量数の異なる原子核からの中性子発生分布の偏光依存の異方性(b/a)を質量数に対してプロットしたものを示す。原子核の共鳴状態(変形状態)に依存して、中性子発生分布は変わると考えられるため、LCS偏極ガンマ線を用いるこの計測手法は原子核の構造を調べる手法として応用可能と思われる。

上述の光核反応による中性子放出は、ガンマ線による核変換と考えることも出来る。娘核が短寿命放射性同位体であれば、壊変により別の元素に変換できる。Fig. 7に、ニュースバル・ガンマ線源で試験した、2種の核変換のポンチ絵を示す。Fig. 7 (a)の129-Iは、運転中の原子炉で年間5 kg程度生成される、長寿命放射性核種で、寿命が1570万年あり、放射能は比較的弱い、長期の管理が困難である。これをガンマ線照射で、安定核種に変換することが出来る。129-I(γ, n)128-Iの光核反応断面積をニュースバルLCSガンマ線源で測定した²⁵⁾。LCSガンマ線の特徴である、準単色でビーム状の特性を活かして、1 mg程度のサンプルで、断面積の測定は可能である。測定結果は、別の手法で測定されていた結果とはほぼ同じであり、ガンマ線による変換効率は3%程度であった。放射性廃棄物の処理としての実用には、光核反応中性子の利用など、効率を改善する手法が必要である。

Fig. 6 (a) Measured neutron spectrum of 197-Au (γ, n) 196-Au reaction. Two spectrum shows parallel ($\Phi = 0^\circ$) and perpendicular ($\Phi = 90^\circ$) to the polarization of gamma-ray. (b) Angular distributions of neutrons. The solid line shows a function in form of $a + b \cdot \sin^2 \Phi$. (c) Dependence of anisotropy on the atomic mass number of three different target, gold, iodine and copper.

Fig. 7 (b)は、核医学検査に最も多く使われている、99-Tc^mの製造を、ガンマ線照射で行うための核反応を示している。共鳴光核反応による同位体核変換手法である。核医学検査(Single Photo Emission Computed Tomography: SPECT)では、99-Tc^m薬剤を静注し、半減期6時間ほどで放出される143 keVのガンマ線をCT検出に用いる。ガンマ線を100-Moに照射して、光核反応で99-Moを製造する。100-Moは、自然のMoにも9.6%程度含まれて

Fig. 7 Tested examples of transmutation. (a) Radioactive waist ^{129}I was irradiated by 16.7 MeV gamma-ray beam. Generated ^{128}I change rapidly to the stable ^{128}Xe . (b) Medical radioactive nuclei ^{99}Tcm was generated by irradiating enriched Mo.

いる。実験では ^{100}Mo 試料を用い、12–16.7 MeVガンマ線を照射した²⁶⁾。同時に光核反応断面積がよく調べられている ^{197}Au を照射し、リファレンスとした。計測で得られた $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応の断面積は0.109 barnであり、他の計測と一致していた。この値は、ニュースバルで1週間程度ガンマ線照射すれば、小動物用核医学検査の $^{99}\text{Tc-m}$ が製造できる程度の値である。短半減期同位体であり、保存がきかないため、実際の応用では高いガンマ線フラックスが必要となる。ニュースバル・ガンマ線の100万倍高いガンマ線フラックスを想定する次世代ERLガンマ線源の稼働により、ガンマ線核変換による有用同位体製造は現実のものとなると考えられる。

4. まとめ

ニュースバル放射光施設のレーザー・コンプトン散乱ガンマ線ビーム源に照射ハッチを追加して、1–73 MeVのガンマ線ビームを0.33 mWの強度で利用できるようになった。このガンマ線源を用いて、核物理、宇宙核物理、陽電子生成、遮蔽体試験、非破壊検査、磁気コンプトン散乱計測などが実施されている。これに加えて、光核反応を利用した核変換試験、遮蔽体検査などへの応用も実施している。

謝 辞

ニュースバル放射光施設ガンマ線源の開発に協力いただいた、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の研究者、学生およびSPRING-8・高輝度光科学研究センター、理化学研究所の研究者に謝意を表します。また、ガンマ線ビームラインの設置と利用研究に協力いただいた、レーザー技術総合研究所・今崎一夫博士、李大治博士、

井澤靖和所長、甲南大学・宇都宮弘章先生、山県民穂先生、日本原子力研究開発機構・早川岳人博士、静岡俊行博士、大阪大学核物理研究センター・嶋達志先生、江尻宏泰先生に謝意を表します。

参考文献

- 1) Y. Asano, S. Miyamoto, and LEPS-II collaboration: *Proc. 12th Int. Conf. Radiation Shielding, Nara, 2012* (Atomic Energy Society of Japan, Tokyo, 2013) to be published.
- 2) R. Hajima: ICFA Panel on Advanced and Novel Accelerators Newsletter, Dec. (2009) 29.
- 3) 羽島 良一: エネルギー回収型リニアックによる次世代レーザーコンプトン散乱γ線源(次世代レーザーコンプトン散乱ガンマ線源とその利用, 大垣 英明, 早川 岳人編, 京都大学, 京都, 2013) ISSN 1342-3185, p.142.
- 4) E. Feenberg and H. Primakoff: *Phys. Rev.* **73** (1948) 449.
- 5) R. H. Milburn: *Phys. Rev. Lett.* **10** (1963) 75.
- 6) C. Bempor, R. H. Milburn, and N. Tanaka: *Phys. Rev.* **138 B** (1965) 1546.
- 7) T. Nakano, D. S. Ahn, J. K. Ahn, H. Akimune, Y. Asano, W. C. Chang, S. Daté, H. Ejiri, H. Fujiwara, M. Fujiwara, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 012002.
- 8) K. Kawase, Y. Arimoto, M. Fujiwara, S. Okajima, M. Shoji, S. Suzuki, K. Tamura, T. Yorita, and H. Ohkuma: *Nucl. Instrum. Meth. A* **592** (2008) 154.
- 9) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, T. Noguchi, and T. Tomimasu: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** (1991) 386.
- 10) H. Toyokawa, H. Ohgaki, and T. Shima: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** (2002) 182.
- 11) 宇都宮 弘章: 日本物理学会誌 **62** (2007) 34.
- 12) V. N. Litvinenko, B. Burnham, M. Emamian, N. Hower, J. M. J. Madey, P. Morcombe, P. G. O'Shea, S. H. Park, R. Sachschaale, K. D. Straub, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 4569.
- 13) 坂井 信彦, 早川 岳人, 宮本 修治: 磁気コンプトン散乱による磁性材料の研究(次世代レーザーコンプトン散乱ガンマ線源とその利用, 大垣 英明, 早川 岳人編, 京都大学, 京都, 2013) ISSN 1342-3185, p.37.
- 14) A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa, T. Watanabe, *et al.*: *J. Synchrotron Radiation* **5** (1998) 342.
- 15) S. Miyamoto, Y. Asano, S. Amano, D. Li, K. Imasaki, H. Kinugasa, Y. Shoji, T. Takagi, and T. Mochizuki: *Radiation Measurements* **41** (2007) S179.
- 16) 宮本 修治, 堀川 賢: レーザー研究 **36** (2008) 798.
- 17) S. Amano, K. Horikawa, K. Ishihara, S. Miyamoto, T. Hayakawa, T. Shizuma, and T. Mochizuki: *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **602** (2009) 337.
- 18) K. Horikawa, S. Miyamoto, S. Amano, and T. Mochizuki: *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **618** (2010) 209.
- 19) T. Hayakawa, T. Shizuma, S. Miyamoto, S. Amano, K. Horikawa, K. Ishihara, M. Mori, K. Kawase, M. Kando, N. Kikuzawa, *et al.*: *Phys. Rev. C* **77** (2008) 068801.
- 20) T. Shima, Y. Nagai, S. Miyamoto, S. Amano, K. Horikawa, T. Mochizuki, H. Utsunomiya, and H. Akimune: *AIP Conf. Proc.* **1235** (2010) 315.
- 21) D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, K. Horikawa, S. Amano, and T. Mochizuki: *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 091112.
- 22) T. Shizuma, T. Hayamawa, R. Hajima, N. Kikuzawa, H. Ohgaki, and H. Toyokawa: *Rev. Sci. Instrum.* **83** (2012) 015103.
- 23) H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Hayakawa, T. Kii, T. Shizuma, R. Hajima, N. Kikuzawa, K. Masuda, F. Kitatani, and H. Harada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** (2011) 100209.
- 24) A. Agodi: *Il Nuovo Cimento* **1** (1957) 21.
- 25) K. Horikawa, T. Mochizuki, S. Miyamoto, S. Amano, T. Watanabe, D. Li, K. Imasaki, and Y. Izawa: *Rev. Laser Eng.* **39** (2011) 445.
- 26) H. Ejiri, T. Shima, S. Miyamoto, K. Horikawa, Y. Kitagawa, Y. Asano, S. Date, and Y. Ohashi: *J. Phys. Soc. Japan* **80** (2011) 094202-1.