

レーザーコンプトンラボ (Laser-Compton Lab.)

研究項目及び研究期間

小型高輝度放射源の開発とその利用に関する研究(平成9年度～14年度)

エネルギー可変 γ 線発生技術の高度化とその利用に関する研究(平成10年度～14年度)

1. はじめに

エネルギーを自由に変えられる単色 γ 線源は、放射性同位元素が固定したエネルギーの γ 線しか得られない欠点を克服し、低雑音で高選択性の測定が可能であるため、 γ 線の利用技術の発展には不可欠なものである。このような特性を持つ γ 線源として、レーザー逆コンプトン散乱を利用した物が、近年注目を集め始めている。レーザー逆コンプトン散乱を利用した γ 線源は、1963年にMilburnやArutynianとTumanian¹⁾が提案し、1964年にLebedevの600MeVシンクロトロンとルビーレーザーを用いて γ 線の発生をみている²⁾。以降、各所でレーザー逆コンプトン散乱を用いた γ 線の発生技術の開発とそれを用いた応用研究が行われるようになった³⁾。電総研では蓄積リングTERASの稼動開始より、レーザー逆コンプトン散乱を利用した γ 線源の開発、及びこれを用いた電子ビーム診断や γ 線検出器の校正、基礎物理実験等への応用を進めてきた⁴⁾。平成5年度より開始された原子力特別研究「新量子放射源の高度化と利用に関する研究」においては、 γ 線のエネルギー範囲を1MeVから40MeVまでに拡大するとともに、実用的な γ 線収量が確保されるようになり、利用研究にも格段の進歩が見られた。これを平成10年度より発展的に引き継いだ「エネルギー可変 γ 線の高度化とその利用に関する研究」では、更なる γ 線量の増大と、そのシステム化を図ると共に、利用研究の高度化を行っている。現在、当ラボの成果を基にSPring-8を初めとして、各地にレーザー逆コンプトン散乱を利用した γ 線発生施設の建設計画が出されている⁵⁾。

2. レーザー逆コンプトン散乱線のビーム特性

レーザー逆コンプトン散乱による γ 線のエネルギーは、通常のコンプトン散乱をローレンツ変換した結果

得られ、図1のような体系では近似的に

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

のように書ける。ここで $\gamma = E_e/mc^2$ (E_e は電子の運動エネルギー、 m は電子の静止質量、 c は光の速度)、 θ は光子の散乱角であり、また ϵ_L は入射光子のエネルギーである。(1)式より散乱光子の最大エネルギーは $\theta = 0^\circ$ で得られることが分かる。実際にレーザー逆コンプトン散乱 γ 線の最大エネルギーを、電子エネルギー及びレーザーの波長を変化させて測定を行った。電子ビームには、電総研共用電子蓄積リングTERASを周回する電子ビームを、レーザーにはQuantronix社製Nd:YLFレーザーを用いた。レーザーは第2高調波(527nm)と第4高調波(263nm)の発生が可能である。測定には相対効率120%の大型高純度Ge検出器を用いて、 γ 線のエネルギー測定を行った。図2にレーザー逆コンプトン散乱 γ 線の発生部、及びエネルギー測定装置の配置図を示す。レーザー光学系は誘電体多層膜ミラーでレーザーを蓄積リングに導入し、電子とレーザーの衝突点で焦点を結ぶようにレンズを配置している。図3に測定の結果を示す。(1)式から得られる計算値も図中に示しているが、実験値と計算値の一致は非常に良いことが分かる。

更に(1)式から分かるように、レーザー逆コンプトン散乱 γ 線は散乱角に対するエネルギー依存性がある。

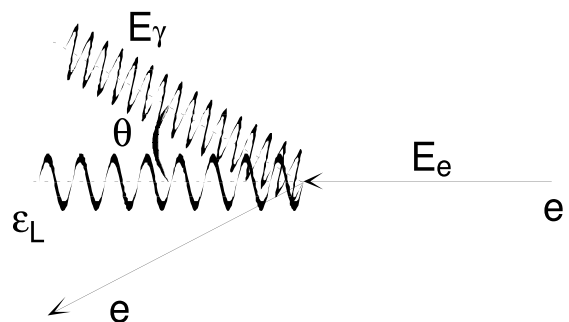


図1 レーザー逆コンプトン散乱 γ 線発生の様式図

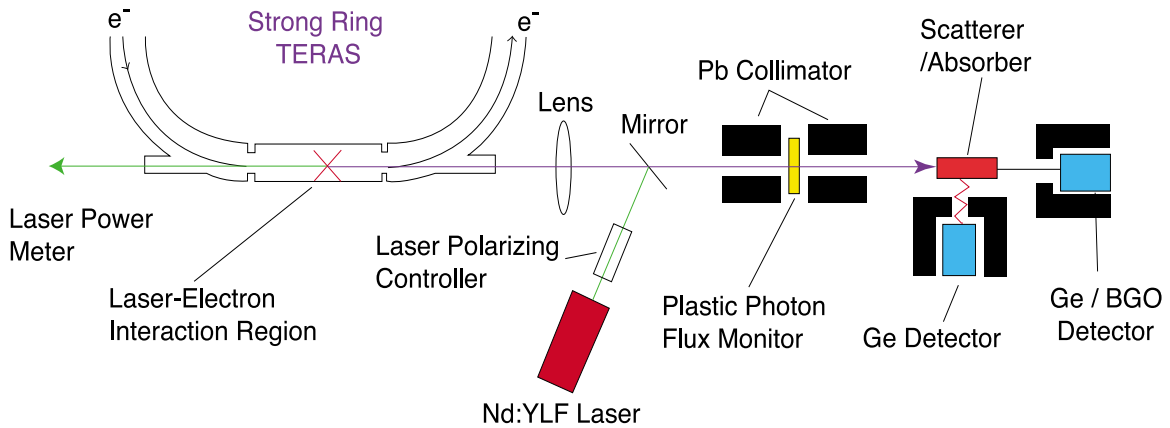


図2 電総研レーザー逆コンプトン散乱γ線発生施設の概略図

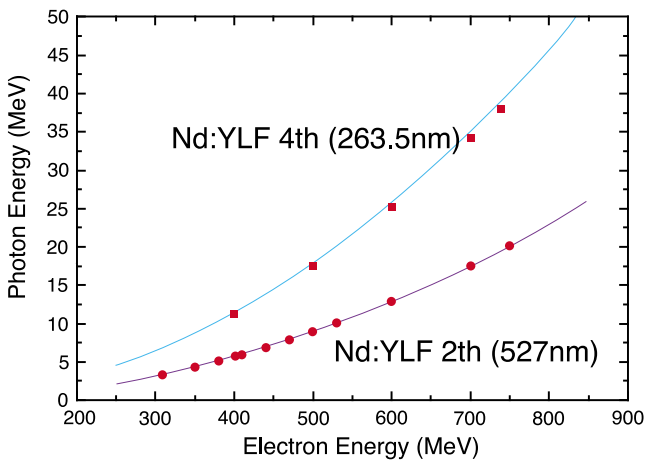


図3 大型Ge 検出器で測定したレーザー逆コンプトン散乱γ線の最大エネルギー

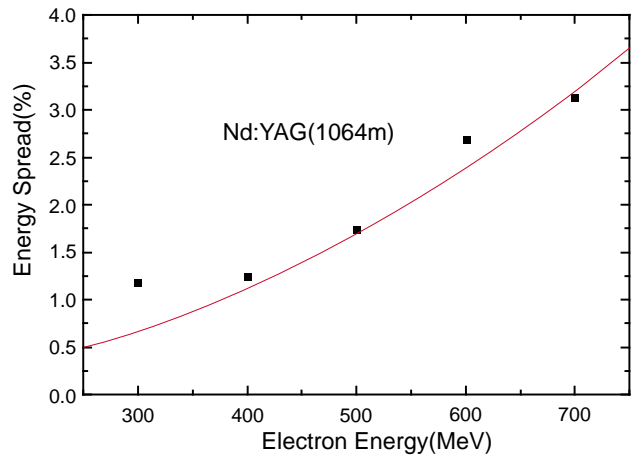


図4 アンチコンプトンシールド付きGe 検出器で測定したレーザー逆コンプトン散乱γ線のエネルギー広がり。散乱角は0.056mradに制限されている。図中の実線は(2)式を用いて計算を行った結果で、電子ビームの角度広がりをパラメータとして実験結果にフィットしたものである。

γ線の単色化には、この散乱角に対するエネルギー依存性を利用する。即ち、散乱角をコリメータ等で制限することにより、散乱γ線の低エネルギー部分を落として、単色性の高いγ線ビームを得ることができる。ここで散乱角0度を中心にコリメータで半角をθ_cに切った時のγ線のエネルギー広がり

$$\Delta E / E \cong \left\{ \left(\frac{2\Delta E_e}{E_e} \right)^2 + (\gamma\Delta\theta)^4 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\Delta\theta = (\theta_e^2 + \theta_c^2)^{1/2}$$

と書ける。ここで E_e/E_e は電子ビームのエネルギー広がり、θ_eは電子ビームの発散角である。コリメータを一定にした時(0.056 mrad)の電子エネルギーに対するγ線のエネルギー広がりの測定を行った⁶⁾。図4に結果を示す。実験装置の配置図は図2と同様であるが、レ-

ザーにはNd:YAGレーザーの基本波(1064nm)を用いており、相対効率30%の高純度Ge検出器をNaI(Tl)検出器のアンチコンプトンシールドを付けて測定を行っている。図4の実線は(2)式を用いて計算を行った結果で、電子ビームの角度広がりをパラメータとして実験結果にフィットしたものである。この結果、蓄積リング中の電子ビームの角度広がりは0.115 mradという値が得られた。この値は蓄積リングの性能から計算される0.1 mradという値と良い一致を示しており、レーザー逆コンプトン散乱γ線のエネルギー広がりの測定により、電子ビームの角度広がりの測定も可能であることが示された。

コンプトン散乱の散乱断面積はKlein-Nishinaの式をもとに計算することができるが、逆コンプトン散乱の場合もまったく同じ式を用いて、散乱光子のエネルギーに対する断面積を知ることができる。これより γ 線の収量は、電子ビームもレーザービームもパルス状でガウス分布を仮定した場合、近似式

$$Y = 2N_e N_L \sigma_L / (A \tau c) \quad (3)$$

によって表すことができる。ここで N_e 、 N_L はそれぞれパルス当たりの電子、レーザー光子の個数であり、 σ_L はコリメータの角度で積分された断面積、 L は衝突領域の有効長、 A はビーム断面積の大きな方、 τ はビームパルスの長い方である。 $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$ の全吸収型CsI(Tl)検出器を用いて、逆コンプトン散乱線の収量の測定を行った⁷⁾。実験装置の配置図は、図2と同様である。測定結果を図5に示す。なお図5で、 γ 線の収量が電子エネルギーとともに増加しているのは、コリメータを一定にして測定を行ったために、検出器で取り込むレーザー逆コンプトン散乱 γ 線のエネルギー広がり、電子エネルギーの増加に従い大きくなり、結果として γ 線の収量が増加したように観測されている。測定条件を(3)式に当てはめた計算値も図5に示す。計算値と実験値の一致は良く、レーザー逆コンプトン散乱 γ 線の収量に関して、電子ビームやレーザービームのパラメータが決まれば、収量の計算も可能であることが示された。

3. むすび

レーザー逆コンプトン散乱を用いたエネルギー可変 γ 線ビームの発生原理と、その特性について簡単に述べた。この γ 線源はエネルギー可変で単色性も良く、完全偏極 γ 線が得られるという優れた性格を有するものの、 γ 線強度が制動放射を利用した γ 線に比べて低いという問題がある。この問題に関しては、Fabry-Perotキャビティ等のレーザーの反復利用⁸⁾や、自由電子レーザーをレーザー光源として用いる方法⁹⁾などの研究を現在進めている。レーザー逆コンプトン散乱を用いたエネルギー可変 γ 線ビームは基礎科学実験はもとより医療診断技術等への利用、 γ 線CTのような工業利用など今後の発展が十分期待されている。また、高エネルギー γ 線の標準場としての使用も検討している。現在、電総

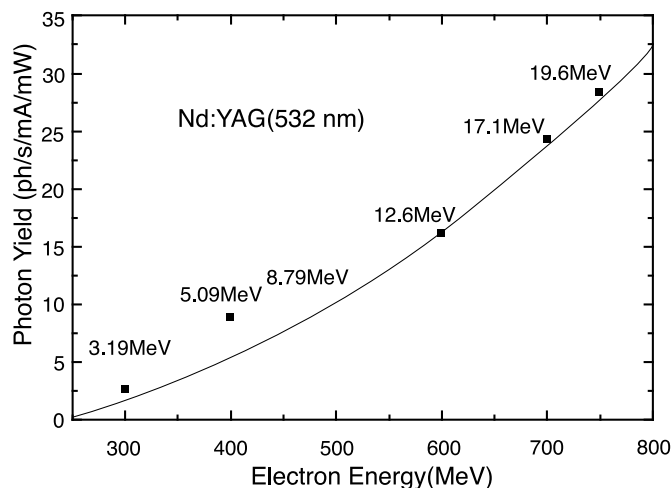


図5 $15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$ の全吸収型CsI(Tl)検出器を用いた、逆コンプトン散乱 γ 線の収量の測定結果

研レーザー逆コンプトン散乱 γ 線利用施設は、電総研内外のグループに解放され、様々な利用研究が行われている。これまで原子核のM1強度分布測定¹⁰⁾や光核反応の微細構造の高分解能測定¹¹⁾、軽核における光核反応の測定¹²⁾、Ge検出器の応答関数の研究¹³⁾等で成果をあげて来ている。

参考文献

- 1) R.H. Milburn: Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 75, F.R. Arutyunian and V.A. Tumanian : Phys. Lett. **4** (1963) 176.
- 2) O.F. Kulikov, Y.Y. Telnov, E.I. Filippov and M.N. Yakimenko: Phys. Lett. **13** (1964) 344.
- 3) C. Bemporad, R.H. Milburn, N. Tanaka, and M. Fotino: Phys. Rev. **138**, 6B (1965) 1546, J.J. Murray and P.R. Klein: SLAC TN-67-19(1967), L. Federici, G. Giordano, G. Matone, G. Pasquariello, P.G. Picozza, R. Caloi, L. Casano, M.P. de Pascale, M. Mattioli, E. Poldi, C. Scaerf, M. Vanni, P. Pelfer, D. Prospero, S. Fraullani, and B. Girolami : Nuovo Cimento **59B**, 2 (1980) 247, A.M. Sandorfi, M.J. LeVine, C.E. Thorn, G. Giordano, G. Matone, and C. Schaerf: IEEE Trans. on Nucl. Sci., **NS-30**, 4 (1983) 3083.
- 4) T. Yamazaki, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Mikado, M. Chiwaki, and T. Tomimasu : IEEE Trans. on Nucl. Sci., **NS-32**, 5 (1985) 3406.
- 5) M. Anghinoll et al., GRAAL collaboration report(1991), T. Nakano et al., Nucl. Phys. A, **A629**(1998)559c, T. Mochizuki

- et al., Report on Topical Meeting of the Laser Society of Japan, **No.RTM-97-24**(1997)13.
- 6) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, T. Noguchi, and T. Tomimasu: IEEE Trans. on Nucl. Sci., **NS-38**, 2 (1991) 386.
- 7) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Noguchi, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, and R. Suzuki: IEEE Trans. on Nucl. Sci., **NS-40**, 4 (1993) 400.
- 8) J. Chen et al., Nucl. Instrum. Methods, **A341**(1994)346, J. Chen et al., Nucl. Instrum. Methods, **A358**(1995)14, M. Fujita et al., Nucl. Instrum. Methods, **A358**(199)524.
- 9) V.N. Litvinenko et al., Phys. Rev. Lett. **78**(1997)4569, H. Ohgaki et al. Free Electron Lasers 1996, **p-II-14**, M. Hosaka et al., Nucl. Instrum. Methods, **A393**(1997)525.
- 10) H. Ohgaki, T. Noguchi, H. Toyokawa, S. Sugiyama, T. Mikado, K. Yamada, R. Suzuki, T. Ohdaira, N. Sei, and T. Yamazaki : Proc. of the Int. Conf. On "Nuclear Structure and Related Topics", (1997)74.
- 11) H. Harada, Y. Shigetome, H. Ohgaki, T. Noguchi, T. Yamazaki, Phys. Rev. Lett., 80(1998)33 : H. Harada, Y. Shigetome, H. Ohgaki, T. Noguchi, T. Yamazaki, Proc. of the First International Workshop on EGS4, (1998)266.
- 12) T. Shima, Y. Nagai, T. Kii, T. Baba, T. Takahashi, H. Ohgaki, Nucl. Phys. A, **A629**(1998)475c.
- 13) K. Kudo, N. Takeda, A. Fukuda, T. Noguchi, H. Ohgaki, T. Yamazaki, T. Sugita, KEK Proc. **96-10** R/D,(1997)47.

当該研究担当者等

1) ラボ構成員(総数24名)

職員(9名) 大垣英明* ,豊川弘之 ,三角智久 ,山田家和
勝 鈴木良一 ,大平俊行 ,清 紀弘 ,工藤勝久 ,武田直
人(量子放射部)

職員以外(15名)永井泰樹(大阪大) 嶋 達志(大阪大) ,
内藤 晋(大阪大) ,田村浩一(大阪大) ,原田秀郎(核
燃料サイクル機構) ,古高和禎(核燃料サイクル機
構) ,宇都宮弘章(甲南大) ,米澤依子(甲南大) ,三島
賢二(大阪大) ,中村詔司(核燃料サイクル機構) ,山
県民穂(甲南大) ,秋宗秀俊(甲南大) ,山崎かおる(甲
南大) ,後神進史(甲南大) ,藤田幹生(甲南大)

2) その他の研究協力者

千脇光國 ,野口 勉

* ラボリーダー