新博士紹介

氏名	堀川 賢*(兵庫県立大学)
論文提出大学	兵庫県立大学
学位種類	博士(工学)
取得年月日	2011年9月29日
題目	Generation of laser Compton scattering
	gamma-ray and its application to nuclear
	transmutation (レーザーコンプトン散乱
	ガンマ線の発生と核変換処理への応用)

1. 背 景

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所の NewSUBARU電子蓄積リングには、レーザーコンプトン 散乱 (laser Compton scattering,以下LCS) ガンマ線 ビームライン¹⁾ が設置され、核廃棄物の核変換処理に 関する基礎研究などが行われている.

LCSは逆コンプトン散乱と呼ばれる場合もあり,レー ザー光子が相対論的電子により後方散乱され,ガンマ 線ビームとなって電子進行方向に集中して放出される 現象である.このガンマ線ビームを光源として考える と,エネルギー可変,エネルギー幅制限可能,偏光を 制御可能,等の特長がある.

2. 核廃棄物の核変換処理

LCS ガンマ線利用の一つとして、レーザー技術総合 研究所の今崎ら²⁾ は核廃棄物の核変換処理を提案した. 核廃棄物とは原子力発電所から発生する放射性廃棄物 のことで、現在は地層処分によって処理されている. 核変換の対象とするのは、放射核の一つの¹²⁹I である. ¹²⁹I は半減期が 1.57 × 10⁷ year と長く、ヨウ化物には 潮解性があるため、長期間地層内で保持することが難 しい.そこで光核反応の巨大共鳴を利用し、¹²⁹I (γ , n) ¹²⁸I によって短寿命な¹²⁸I に変えてしまうというアイ ディアである.¹²⁸I は半減期 25 min で β ⁻⁻崩壊し、安定 な¹²⁸Xe となる. 核変換処理に LCS ガンマ線を適用す る場合の特長としては、反応断面積最大となるエネル ギーにガンマ線エネルギーを制御できるからと考えら れる.

一方,この反応断面積に関する実験データは貧弱で, J. Magill ら³⁾の高強度レーザーによる制動放射ガン マ線を使った測定のみであり,エネルギー依存性は R. L. Bramblett ら⁴⁾ による¹²⁷I のエネルギー依存性と 同一であると仮定するしかなかった. これに対して我々 は, LCS ガンマ線を用いて反応断面積のエネルギー依 存性を測定し, LCS ガンマ線による¹²⁹I の核変換処理 量が最大となる条件を導出した.

¹²⁹Iの(γ, n)反応断面積のエネルギー依 存性測定

3.1 測定方法

ターゲットの¹²⁹Iとしては、検出器のエネルギー較 正用に市販されているカプセル型密封線源⁵⁾を用いた. ¹²⁹Iはヨウ化パラジウムの粉末として、カプセルの内 部の直径 4.75 mm、長さ 1.43 mm の空洞に封入されて いる. 放射線量と半減期から計算した¹²⁹I 原子核数は、 2.61 × 10¹⁷ である.

レーザー光源には Nd:YVO₄ レーザー ($\lambda = 1.064 \mu m$) を使用した. 電子ビームのエネルギーを, 0.89 GeV か ら 1.06 GeV まで変化させることで、LCS ガンマ線の最 大エネルギーを約1 MeV ずつ、13.9 MeV から 19.7 MeV まで変化させた. このエネルギー領域は¹²⁷Iのエネル ギー依存性から予測される範囲である.発生した LCS ガンマ線のエネルギーは空間分布を持ち. ビーム軸か ら外れるほど低くなるので、光源から20mの位置に 直径3mm, 厚さ100mmの鉛コリメータを設置した. 電子ビームとレーザー光のエミッタンスを無視した計 算上のエネルギー幅は3%で、これが測定のエネルギー 分解能とした、ターゲットの前には、厚さ1mmの鉛 板を貼り付けた厚さ 10 mm のプラスチックシンチレー タを配置し、照射ガンマ線量をモニターした。ガンマ 線フラックスは 5×10^5 photons sec^{-1 (1)} で, 1回の照 射時間は¹²⁸Iの半減期である 25 min に設定した.

照射後に核変換によって生成された¹²⁸Iの原子核数 を測定した.¹²⁸Iのベータ崩壊の際に発生する443 keV (12.6% /decay)のガンマ線を Ge 半導体検出器(検出 効率 5%)で測定し,原子核数を決定した.

¹²⁸Iの生成量と¹²⁹Iへのガンマ線照射量から反応断面積 を導出できる.

3.2 測定結果

図1に測定結果を示す⁶. 〇印が測定した断面積の データの加重平均値である. 実際には直線偏光ガンマ 線と円偏光ガンマ線を区別して測定したが, この測定

^{*} 兵庫県立大学 University of Hyogo (E-mail: horiken@lasti.u-hyogo.ac.jp)



図1¹²⁹Iの(γ, n)反応断面積のエネルギー依存性⁶⁾

には無関係なので纏めてプロットしてある.縦のエラー バーは実験データのばらつきの標準偏差であり,各エ ネルギー条件それぞれで±4~±20%であった.横の エラーバーはLCSガンマ線のエネルギー拡がりを示す. 断面積が小さい13.9 MeV や19.7 MeV では,443 keV ガンマ線量が小さくなるため,統計誤差が大きくなった.

(γ , n) 反応がすべて巨大共鳴による反応と仮定し, ローレンツ分布でフィッティングした結果が**図1**の実 線である.反応断面積は, 15.9 MeV ± 4%で最大値 220 mbarn ± 50%をとり,半値半幅 2.55 MeV ± 20% であった.断面積の絶対値の最大の誤差原因は,ター ゲット内の¹²⁹Iの分布が不明であった為の系統誤差で あった.その他は,¹²⁹Iの個数誤差(< ± 1%),ガン マ線量の誤差(± 2%),¹²⁸Iの個数誤差(± 12%)等 であった.

図1の破線が R. L. Bramblett らの¹²⁷Iのエネルギー 依存性⁴⁾ である.¹²⁹Iの依存性は¹²⁷Iと似た結果であっ た. 断面積の絶対値は, J. Magill ら³⁾の220⁺²⁰⁰₋₁₀₀ mbarn と矛盾せず, 誤差は小さくなった.

3.3 考 察

¹²⁹Iの光核反応断面積の実測エネルギー依存とLCS ガンマ線のスペクトル分布を用いると,¹²⁹Iの核変換量 を最大にするLCS ガンマ線エネルギー値を最適化でき る.結果を図2に示す.横軸が¹²⁹Iに照射するLCS ガ ンマ線の最大エネルギー,縦軸が照射によって変換さ れる¹²⁹Iの量である.核変換を目的とする場合はコリ メータを付けないので,平均エネルギーは最大エネル ギーの78%である.LCS ガンマ線の最大エネルギーが 18.2 MeV のとき,¹²⁹Iの核変換量が最大となる.この 最適条件に合う電子ビームエネルギーは,Nd レーザー (1.064 µm)を使う場合 1.02 GeV で,ほぼ NewSUBARU のトップアップ運転条件である.また CO₂ レーザー



図2¹²⁹Iの核変換量のLCS ガンマ線最大エネルギー への依存性

(10.6 µm)を使う場合は 3.2 GeV であり, KEK の ERL 計画のエネルギーに近い.

4. 結 論

NewSUBARUのLCS ガンマ線源を用いて, ¹²⁹Iの (γ , n) 反応断面積のエネルギー依存性を実測した. エネルギー 依存性は 15.9 MeV ± 4%で,最大値 220 mbarn ± 50%, 半値半幅 2.55 MeV ± 20%であった. ¹²⁹I の核変換量 が最大となる,LCS ガンマ線の最大エネルギー値は 18.2 MeV であることがわかった.

5. 新博士になって

昨年9月末に工学博士を所得した後,兵庫県立大学の非常勤研究員として NewSUBARU の共用促進に携わる傍ら,この研究を通じて得たレーザー工学,放射線物理の知識を活かす道を模索している.

参考文献

- 1) K. Horikawa, S. Miyamoto, S. Amano, and T. Mochizuki: Nucl. Instr. and Meth. A, 618 (2010) 209.
- K. Imasaki and A. Moon : Proc. SPIE Advanced High Power Lasers and Applications '99, Osaka Japan, 1999 (SPIE, 2000) p.721.
- 3) J. Magill, H. Schwoerer, F. Ewald, J. Galy, R. Schenkel, and R. Sauerbrey : Appl. Phys. B, 77 (2003) 387.
- 4) R.L. Bramblett, J.T. Caldwell, B.L. Berman, R.R. Harvey, and S.C. Fultz : Phys. Rev, 148 (1966) 1198.
- 5) Isotope Products Laboratories. Eckert & Ziegler Isotope Products (Main Office) 24937 Avenue Tibbitts Valencia, CA 91355.
- K. Horikawa, T. Mochizuki, S. Miyamoto, S. Amano, T. Watanabe, D. Li, K. Imasaki, and Y. Izawa : The Review of Laser Engineering, 39, 6, (2011) 445.