

光と原子核の反応を超高分解能で調べる

核燃料サイクル開発機構東海事業所

原田 秀郎

harada@tokai.jnc.go.jp

1. はじめに

光を原子核に当てると、ある特別な光のエネルギーに対して、原子核は強く励起される。ここでいう光のエネルギーとは、光の粒である光子1ヶのエネルギーのことである。光のエネルギーが十分大きくなると、高いエネルギーに励起された原子核から、中性子や陽子や α 粒子やらが放出されるようになる。つまり、原子核の変換が起こる。例えば（図1参照）ば、水銀¹⁹⁸Hg同位体に高いエネルギーの光を当てると金¹⁹⁷Au同位体に変化したりする。

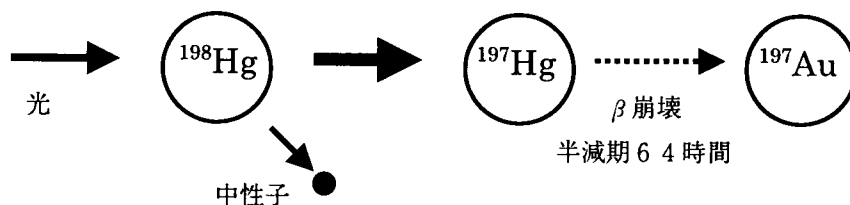


図1 水銀が光で励起されて中性子を放出し、金が生成される様子

どのエネルギーの光に対して原子核が強く励起されるかを知ることは、光による原子核の変換量や光核反応による発生中性子線量の評価などで大切である。このような検討を行うために、光と原子核の反応が、どの光のエネルギーに対してどのくらいの強さで起こるかを知る必要がある。ところが、エネルギーの大きい光と原子核の反応は、それほどよくわかっているとは言い難い状況にある。

光のエネルギーを変化させて原子核との反応の強さを調べるために、これまでいろいろな工夫がなされた。有力な探査方法として、飛行する陽電子がターゲット中で消滅す

る際に放出する単色光子を用いる方法がある。米国バーマン博士らの研究グループは、この測定手法により多くの原子核に対し系統的な光中性子発生断面積の測定データを得ている[1]。光と原子核の反応によりどのくらい中性子が発生するかを評価する上で貴重なデータとなっている。しかしながらこの方法は、ターゲット中での陽電子のエネルギー拡がりのために、実際には理想的な単色光子を発生することができず、光子のエネルギーを精度よく決めることができない。バーマン博士らの達成したエネルギー分解能は、15 MeV の光子に対し 240 keV である。つまり、光のエネルギーに対する原子核の反応を 240 keV のエネルギー幅でばかした姿を観測していることになる。

光と原子核の反応をより高いエネルギー分解能で調べることができるならば、これまでばかされていた姿から、より鮮明な姿の現れることが期待できるのである。こうした情報は、原子核の基礎的な性質を解明するために役立つばかりでなく、原子力技術や放射化分析、医学応用などの基盤データとしても重要な意味を持つのである。

2. 新しい透過光子分光法

我々のグループでは、透過光子分光法による実験により、格段にエネルギー分解能を向上できる可能性を 1995 年に提案した[2]。透過光子分光法とは、制動放射等で発生する光子束を厚いターゲットに当て、透過する光子束の減衰の度合いをエネルギー分解能の高いスペクトロメータにより測定するという原理である。我々の測定方法を説明する前に、透過光子分光法について最近の研究例を振り返ってみよう。

透過光子分光法による測定は、1975–1980 年頃、マインツ（独）、モスクワ（露）、オタワ（加）の研究期間でそれぞれ独立に行われている。マインツのアーレンズ博士らは、透過光子によるコンプトン電子を磁気スペクトロメータにより分析した。、彼らの行ったモンテカルロシミュレーションによれば、透過光子のエネルギーを 1.0~1.8%の精度で測定可能とした[3]。オタワのシャーマン博士らは、透過光子と重水ターゲットの反応で発生する中性子を飛行時間測定法で測定することにより、26MeV の透過光子を 1.9%のエネルギー分解能で測定することに成功している[4]。これらのデータは、シンチレーション検出器を用いたモスクワのグレビッチ博士らのエネルギー分解能[5]よりも、エネルギー分解能に関して良好な結果を得ている。東工大井頭先生らの研究によれば、NaI シンチレーション検出器のエネルギー分解能は、最新のエレクトロニクスを使用しても 10 MeV の光子に対し 2.5%程度とのことである。透過光子分光法は、光子スペクトロメータのエネルギー分解能が測定のエネルギ分解能を決める。即ち、高エネルギーの光子を高いエネルギー分解能で測定可能なスペクトロメータが開発できれば、その性能に応じて高いエネルギー分解能で光と原子核の反応を観測することができる。

2.1 高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータ(HHS)の開発

このような要求を満足するスペクトロメータとして、我々は、高エネルギー光子に対するエネルギー分解能が0.1%と優れるゲルマニウム半導体検出器を複数個複合化するものを考えた。ゲルマニウム半導体検出器を複数個組み合わせる技術は、光子エネルギー1~2MeV 程度までの離散ガンマ線を大きな検出効率で観測することを目的としたガンマ線分光学の分野で最近急速に進展した[6]。われわれは、この技術を光と原子核の反応で特に重要なエネルギー領域である 10~30MeV 程度の高エネルギー光子検出に適するよう応用した。さらに、複合化されたゲルマニウム検出器を厚い BGO シンチレーション検出器で取り囲むことにより検出器の SN 比を向上させた。ゲルマニウム検出器からの信号と BGO 検出器からの信号の非同時計測により SN 比が向上できることは、ガンマ線分光学の分野ではよく知られた方法であるが、10~30MeV の高エネルギー光子に対し本格的に適用された例はこれまでにないであろう。

この高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータ (High-resolution high-energy photon spectrometer)を以後略して HHS と呼ぶ。図2に HHS の断面図を示す。ガンマ線分光学の分野で開発されたものは、光子の入射軸に対し垂直な面にゲルマニウム結晶を並べているのに対し、HHS では透過光子線束の軸に沿ってゲルマニウム結晶を並べているのが大きな違いであるが、この結果、少ないゲルマニウム結晶の数で効率よく高エネルギー光子を検出できる。結晶の数が少ないことは、コストの面だけでなく、故障確率が少ないという面でも、結晶全ての信号を合計して使用する光子透過法においては格段に有利である。使用したゲルマニウム結晶は開発当時最も大きな N 型半導体結晶であ

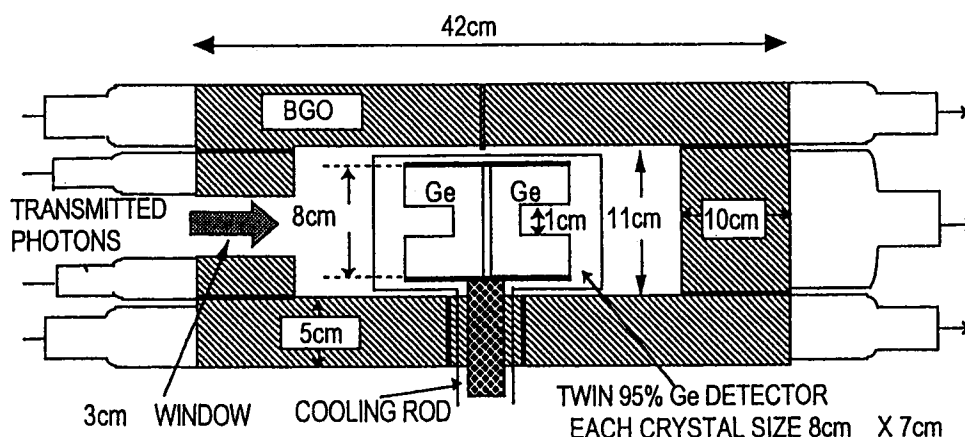


図2 高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータ(HHS)の断面図

り、1つの結晶の大きさが 334 cm^3 であった。スペクトロメータの設計に当たっては、EGS4 と呼ばれる電子・光子モンテカルロ輸送コードが大変役に立った。かくして、高エネルギー光子に対して高い SN 比の測定を可能とし、しかも 0.1% という超高分解能スペクトロメータが開発された[7]。

2.2 レーザ逆コンプトン光を用いた透過光子分光法実験

透過光子分光法に適する照射用光子線は、単色ガンマ線でもなく制動放射線でもない、平坦な分布を持つ白色光である。更に、関心のあるエネルギー範囲だけを切り出すことのできる白色光であれば都合がよい。このような光源としてレーザ逆コンプトン光がある。我々が光と原子核の反応に関する研究を始めた 1994 年頃、電総研の山崎博士（現京大）らは、レーザ逆コンプトン光の発生にすでに成功し[8]、レーザ逆コンプトン光の完全偏極性を利用して、大垣博士らが原子核の励起準位のパリティを測定する実験[9]を進めていた。お話を伺うと白色光に近いエネルギー分布を持ち、関心のあるエネルギー幅も鉛コリメータで選べるとのことであり、光子透過法実験に適していることがわかった。電総研の電子蓄積リングは 775MeV までの範囲でエネルギー可変であり、この中を周回する電子線に正面からレーザを衝突させることによりレーザ逆コンプトン光は得られる。レーザには、CW の Nd:YVO₄ (波長 532nm, 出力 1-5W 可変)を用いた。電子線のエネルギーが 663MeV の場合を例にとると、レーザ逆コンプトン光の最大エネルギーは 15.34MeV となる。図 3 に実験配置図を示す。

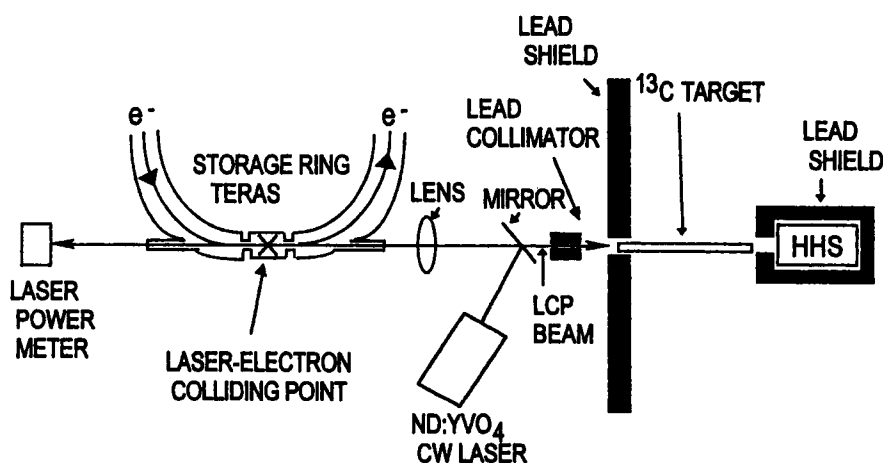


図3 レーザ逆コンプトン光を用いた透過光子分光実験の概要図

2.3 エネルギー分解能 0.1%の実証

光子透過法による光と原子核の反応を観る解像度（エネルギー分解能）を実験の実験条件のもとで調べるために、 ^{13}C ターゲットを用いた実験を実施した。実験のセットアップは、図3に示したものと同様である。 ^{13}C の 15.11MeV 励起準位は、全崩壊幅が 5.5keV とシャープである上に、光による励起強度を示す指標である基底状態へのガンマ線崩壊幅が 23eV と大きいため、透過ガンマ線束分布における凹ピークを観測するのに適している。この全崩壊幅は、 ^9Be ターゲットに α 粒子のエネルギーを精密に変化させながら測定したものである。このような高い励起状態に全幅の狭い準位が存在するのは、15.11MeV 準位のアイソスピンが基底準位の 1/2 よりも大きな 3/2 であり、アイソスピン禁止則により中性子放出が非常に制限されるためである。

図4に実験で得られた透過光子線束を示す。黒丸で示したのは、厚さ 71.6 g/cm²（同位体濃縮度 99%）の ^{13}C ターゲットを透過した光子線束を HHS で観測したスペクトルであり、図の横軸は光子線のエネルギーに比例する。励起エネルギー 15.11 MeV に、幅が 15keV とシャープな凹ピークが観測された。白丸で示したのは、ターゲットを取り除いた場合のスペクトルであり、凹ピークは見られない。これらのことから観測されたシャープな凹ピークは ^{13}C 起源のものであることがわかる。ピーク固有の全崩壊幅 5.5 keV を補正すると、本実験のエネルギー分解能は 12 keV(0.8%)となる。これは、ジュライ博士らの達成したエネルギー分解能 240 keV[10]を 20 倍更新するものであり、本実験手法によりエネルギー分解能 0.1%を達成できることが実証された[11]。図5には、解析で得られた光核反応断面積の値を示す。分解能が向上した結果、断面積のピーク値も従来の測定値に比べ20倍大きな値である。

3. まとめ

ゲルマニウム半導体検出器の大型化及び複合化技術とレーザ逆コンプトン光(LCP)発生技術の進展により、光と原子核の反応をこれまでになく高いエネルギー分解能で観測することが可能となった。前者の技術により高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータ(HHS)が開発された。これは、高エネルギーの光子に対し 0.1%と高いエネルギー分解能を有しており、NaI シンチレーション検出器などの高エネルギー光子測定において従来使用されてきた検出器に比べエネルギー分解能は数十倍高い。また、SN 比に関しても BGO 検出器による非同時計測により高い値が得られている。後者の技術は、透過光子分光法を適用するのに有意な光子束を提供している。レーザ技術の急速な進展は続いており今後ますます強力な LCP が得られるであろう。この光子束は、従来用いられてきた制動放射線に比べ硬いスペクトルである上、必要とする光子エネルギーを切り出すこと

もできるので、透過光子分光法にとって非常に有力な光源である。

原子核の高い励起エネルギーには、アイソスピン禁止則などの法則により、シャープでピーク値が大きな光共鳴状態の存在することが定性的に予測されているが、ここで開発された HHS と LCP を用いた透過光子分光法を適用することにより、この光共鳴状態を定量的に調べることができる。このようなシャープな光共鳴状態の現れる励起エネルギーの値は、 ^{13}C の例のように核種に固有なものであり、核種毎に異なる。またその大きさは、光と原子の反応断面積値に匹敵するほど大きな場合がある。よって、21 世紀に単色高エネルギー光発生技術の大きな進展を期待できるならば、光と原子核の反応は、選択的核種変換、選択的同位体生成、非破壊同位体分析技術等幅広い分野に応用できる可能性があるといえよう。今後、HHS と LCP を用いた透過光子分光法は、これら応用技術の基盤データを整備するための有力な測定技術の一つとなるであろう。

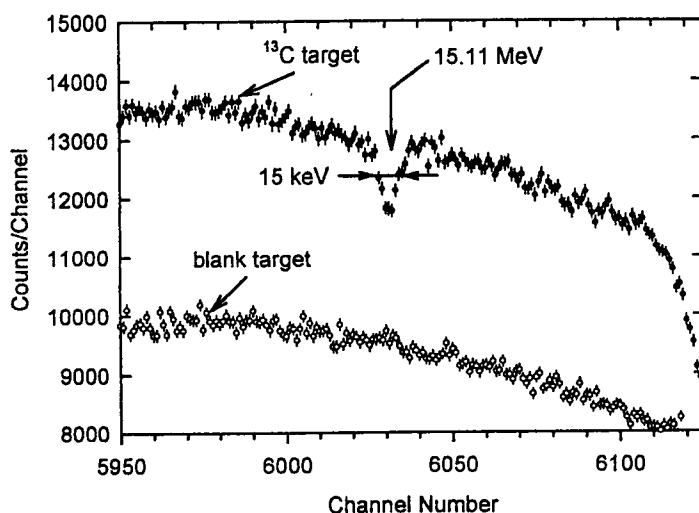


図4 HHS で観測した透過光子線束分布。黒丸は、 ^{13}C ターゲットを透過した光子線束であり、白丸で示したのは、ターゲットを取り除いた場合のスペクトルである。誤差棒は、統計誤差を示す。

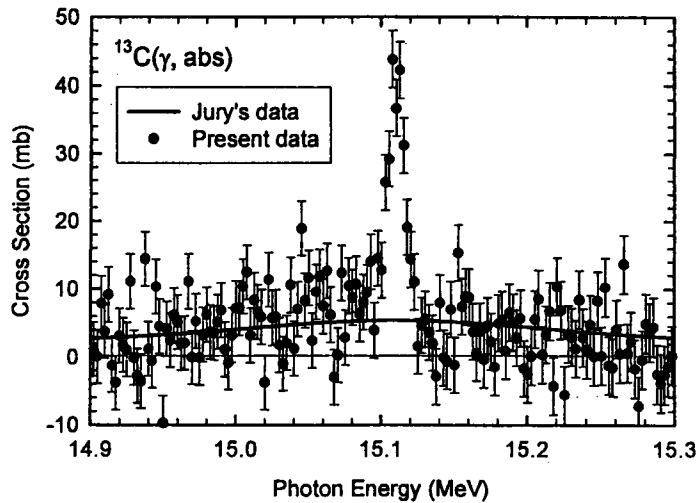


図5 ^{13}C の光核反応断面積値。Jury (実線) らのデータに比べピーク値は20倍大きい。

参考文献

- [1] S.S. Dietrich and B.L. Berman, Atom. Data and Nucl. Data Tab. **38**, 199 (1988).
- [2] H. Harada and Y. Shigetome, J. Nucl. Sci. Technol., **32**, 1189 (1995).
- [3] J. Ahrens et al., Nucl. Phys., **A251**, 479 (1975).
- [4] N.K. Sherman et al., Phys. Rev., **C21**, 2328 (1980).
- [5] G.M. Gurevich et al., Nucl. Phys., **A338**, 97 (1980).
- [6] J. Eberth et al., Progress in Part. Nucl. Phys., vol.28, 495 (1993).
- [7] H. Harada et al., Phys. Rev. Lett., **80**, 33 (1998).
- [8] T. Yamazaki et al, IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-32**, 3406 (1985).
- [9] H. Ohgaki et al., Nucl. Instrum. Methods, **A353**, 384 (1994).
- [10] J.W. Jury et al., Phys. Rev., **C19**, 1684 (1979).
- [11] H. Harada et al., J. Nucl. Sci. Technol., **35**, 733 (1998).