

レーザー逆コンプトン光子の光中性子生成二重微分断面積測定への応用

APPLICATION OF LASER INVERSE COMPTON PHOTON ON MEASUREMENT OF PHOTONEUTRON PRODUCTION DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTION

佐波俊哉^{#,A,B)}, Tran Tuyet^{C)}, Nguyen Thuong^{B)}, 山崎寛仁^{A,B)}, 糸賀俊朗^{D)}, 桐原陽一^{E)}, 波戸芳仁^{A,B)}, 中島宏^{F)},
宮本修治^{G)}, 橋本智^{H)}, 浅野芳裕^{A)}

Toshiya Sanami^{#,A,B)}, Tuyet Tran^{C)}, Thuong Nguyen^{B)}, Hirohito Yamazaki^{A,B)}, Toshiro Itoga^{D)}, Yoichi Kirihara^{E)},
Yoshihito Namito^{A,B)}, Hiroshi Nakashima^{F)}, Syuji Miyamoto^{G)}, Satoshi Hashimoto^{H)}, Yoshihiro Asano^{A)}

^{A)} High energy accelerator research organization, Applied Research Laboratory (KEK-ARL)

^{B)} Graduate University for Advanced Science (SOKENDAI), Department of high energy accelerator science

^{C)} CEA Saclay

^{D)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{E)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{F)} Hokkaido University

^{G)} Osaka University

^{H)} University of Hyogo / LASTI

Abstract

Neutron production by photonuclear reactions is important in the shielding design of electron accelerators with energies of several tens of MeV. We measured the photoneutron-production double-differential cross sections of lead, gold, tin copper, iron and titanium for linearly polarized photons with energies centered around 16.6 MeV at NewSUBARU BL-01, University of Hyogo. The overview of this experiment is described for apparatus and data analysis. The obtained data consist of two components, the low-energy component which shows no angular dependence, and the high-energy component which shows an angular dependence on the direction of polarization, for all the measured target nuclei. The data are compared with results of Monte-Carlo code and evaluated nuclear data. Based on findings from above mentioned experimental data and the comparison, the future experimental plan is presented.

1. はじめに

光子のエネルギーが数MeVを超えると、光子と原子核の相互作用による核反応、いわゆる光核反応が起こる。光核反応の断面積はその相互作用の対象となる原子核の質量数や殻構造に依存し、数10MeVで最大値をとる単一または複数のピーク形状を有する。この振る舞いは原子核の集団励起として説明されている。

この核反応による励起状態からは数MeVの中性子が放出される。中性子は電荷を持たないことから核反応を起こしやすく、物質を透過する力が強いことから、物質を放射化し、また、遮蔽体を透過して外部被ばくに寄与する線量を与える。この中性子を適切に評価することは、数10MeV以上の加速エネルギーを有する電子加速器の遮蔽設計において、一次粒子である電子とこれに付随する光子を止めることの次に重要となる。

光核反応は1950年代にはすでに実験的研究が実施されていたが、光子源として連続エネルギー分布を有する制動放射光子を用いていたことから、種々の核種に対する反応の特徴を表す入射光子エネルギー

依存性を取得するのは困難であった。その後、1960年代に加速器で加速した電子から陽電子を生成し、その陽電子をエネルギー分析して、消滅光子を生成し、そのエネルギーを定める、飛行中陽電子消滅法が開発され、これを用いた光核反応の入射光子エネルギー依存性測定が集中的に行われた[1]。

この飛行中陽電子消滅による光子のエネルギー分布はピーク形状を示すが、同時に制動放射光子も存在することから、これを差し引く測定が必要であった。この方法を用いた実験は主にフランスのサクレ研究所と、アメリカのローレンスリバモア研究所で行われ、その結果はIAEAのハンドブックにまとめられているが、不一致が見られる核種が多く、問題となっていた[1]。

1990年代に入り、加速器技術とレーザー技術の発展に伴い、レーザー光子を電子に衝突させ、高エネルギー光子を生成する、レーザー逆コンプトン散乱手法が実用化された。この手法による光子は、飛行中陽電子消滅によるものと比較し、格段にエネルギー幅が狭く、制動放射光子も存在しない上、偏光がそろっているという大きな利点を有している。このレーザー逆コンプトン光子を用いた断面積測定がIAEAのCRPとして実施され、前述の不一致は解決を見た[1]。

[#]toshiya.sanami@kek.jp

我々は、この光核反応から放出される中性子のエネルギーと角度分布に着目し、レーザー逆コンプトン光子を用いた実験データの取得を行っている。核反応により放出される中性子のエネルギーと角度分布ごとの断面積、二重微分断面積、は核反応断面積と同様に、核反応過程を特徴付ける量であるとともに、中性子の反応と透過を特徴付けるために応用上も重要である。

本稿ではこのレーザー逆コンプトン光子を用いた二重微分断面積の測定実験についてその手法と結果、展開の概略を紹介する。

2. 実験の概要

実験の詳細については参考文献[2, 3]に詳しい。本稿では参考文献に書かれていない内容を補いつつ、その概要を述べる。

実験は、現状では日本で唯一レーザー逆コンプトン光子を数 MeV から数 10 MeV のエネルギー領域でパルスビームとして供給可能な施設である、兵庫県立大学ニュースバル加速器の BL-01 で実施している[4, 5]。

ニュースバル加速器の BL-01 の平面図を Fig. 1 に示す。ニュースバル加速器の蓄積リングは 0.5 から 1.5 GeV までの電子を蓄積することが出来るが、2021 年までは入射器を SPring-8 加速器と共用しているために、入射エネルギーは 974 MeV の固定であった。この 974 MeV の電子と 1064 nm の波長のレーザーを組み合わせることで、平均エネルギーで 16.6 MeV の単色光子が利用可能であった。このエネルギーであれば、トップアップ入射が可能であるために、安定した強度での実験が可能である。光子のエネルギーを変える場合は、レーザーの波長を変えるか、蓄積リングのエネルギーを加速または減速により変える必要がある。

測定に必要とされる光子のエネルギー範囲は概ね 13 MeV から 30 MeV なので、レーザーの波長を変えるよりは蓄積リングのエネルギーを変える方が容易であるが、トップアップ入射が出来なくなるので、時間あたりの光子の強度が落ちてしまう。

Figure 1 に示すとおり、レーザー源(Nd laser)は加速器収納部外におかれ、レーザー光はミラーにより収納部内に導かれて、ビームライン内に導入され、ニュースバル加速器の直線部で電子と衝突させられる。ここで、逆コンプトン散乱された光子(LCS γ -ray)は、収納部内と光学ハッチ 1(Hatch 1)内の 2 つのコリメータ(C1 と C2)により、180 度方向成分のみが取り出され、光学ハッチ 2 (Hatch 2)での実験に用いられる。

光子の強度は 6 インチ径、5 インチ長の NaI(Tl)検出器をもちいて相対的に検出効率を確認したプラスチックシンチレータにより、ハッチ 2 の入り口でモニターされる。ハッチ 2 の中央部には光核反応を調べるためのターゲット物質がおかれる。入射光子とターゲット物質との核反応で発生した中性子は、ターゲットの周りを取り囲むように設置した中性子検出器により測定される。

中性子のエネルギー測定には飛行時間法を用いる。この方法は、ターゲットから発生した光子と中性子の時間差を測定し、エネルギーを決定する。ターゲットと検出器の間隔、飛行距離、はハッチ 2 の大きさの制約とレーザーと蓄積電流の関係による光子束の強度とビームタイムの制限から、80 cm 程度とする必要があり、十分なエネルギー分解能を達成するためには、ns 以下の時間分解能が必要である。このために、蓄積リングはシングルバンチモードとして、レーザーの時間幅の影響を受けずに、光子を発生させるとともに[6]、中性子検出器に時間応答の良い有機液体シンチレータを用いた[2, 3]。

Figure 2 にビームモニター用のプラスチックシンチレータ、ターゲットと中性子検出器の位置関係の模式図を示す。中性子検出器はターゲット横方向、水平面上に 5 式とターゲット上方に 1 式を設置した。水平面の検出器は光子ビーム入射方向に対して 30 度、60 度、90 度、120 度、150 度、の方向に設置した。これらを H30、H60、H90、H120、H150 と呼ぶ。ターゲット上部の検出器は光子ビーム入射方向に対して 90 度の方向に設置した。これを V90 と呼ぶ。

ターゲットは鉛、金、錫、銅、鉄、チタンの 1 cm

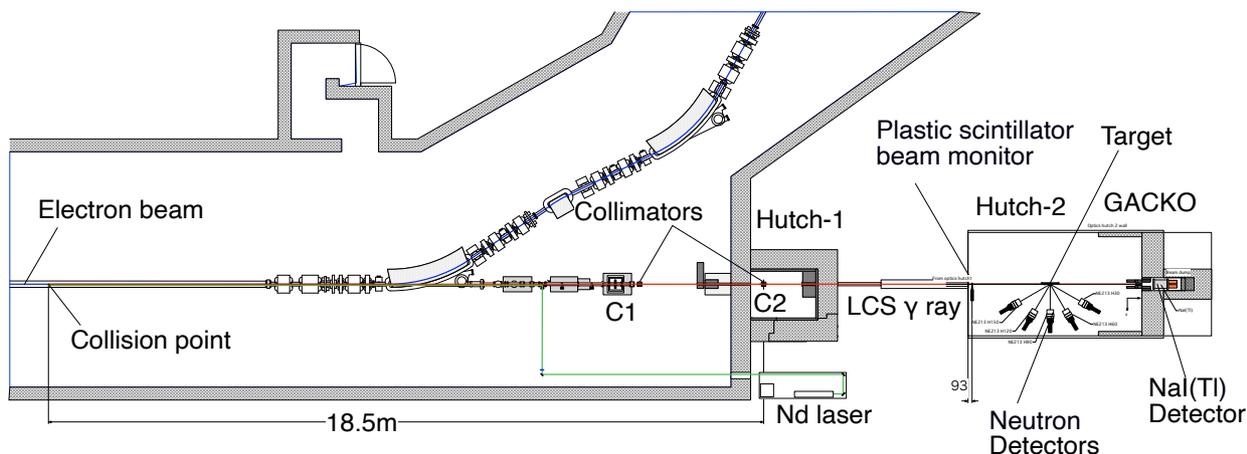


Figure 1: Schematic drawing of NewSUBARU BL01 layout.

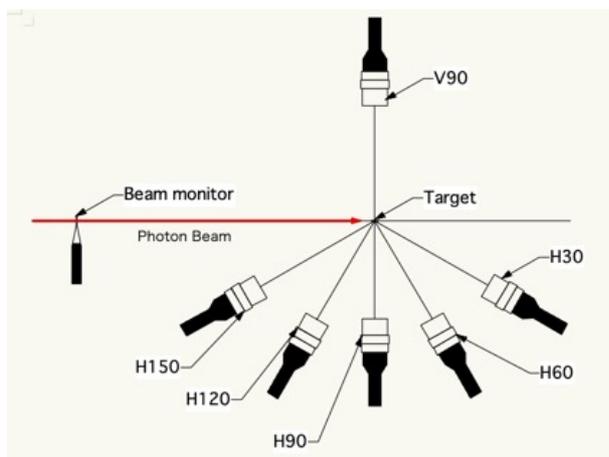


Figure 2: Schematic drawing of Neutron detector setup.

径の円柱を用いた。円柱の長さは光子の減衰が 30% 以下程度になるように選定した。コリメータ C1 と C2 の内径は 3 mm と 2 mm として、光子ビームの計数が最大になるように、位置と角度を合わせた。その後、ターゲット位置でのビームスポットの位置をシリコンイメージセンサーで確認し、光子ビームが全量ターゲットに入射していることを確認してから中性子測定を行った。

測定中は蓄積リングをシングルバンチ、トップアップモードで運転し、20 mA の蓄積電流に対して、20 W の 1064 nm のレーザーを入射して、光子ビーム強度、 1.4×10^5 photons/sec を得た。この条件で 1 ターゲットあたりの測定時間は 2 時間としたが、トップアップモードでの運転が出来ない条件では、蓄積電流の低下と再入射を必要とするために、平均光子強度は 1/3 以下に低下し、3 倍の測定時間を要した。

中性子検出器からの信号は 3 系統に分岐し、1 系統をタイミング信号を生成するために、2 系統を全発光量と発光量の遅発成分の積分値を得るために用いた。積分値は電荷積分型アナログ・デジタル変換 VME モジュール(QDC:A3200, Nikiglass)を用いて得た。タイミング信号はこの積分のためのゲートを生成するためと、ビーム信号との時間差を取るために用いた。ビーム信号は加速器の周回周波数を間引いて、レーザーのトリガーと同期したものをを用いた。中性子の飛行時間は、シングルバンチビームが周回する時間よりも早い、レーザーの繰り返しが周回周波数より大きく劣るので、間引きが必要であった。この時間差は、時間・デジタル変化 VME モジュール(QDC:A3300, Nikiglass)を用いて得た。これらの VME モジュールからのデジタルデータは、LinuxPC に Gigabit Ethernet で転送され、イベント毎にタイムスタンプを付してディスクに書き込まれ、オフライン解析に供される[2, 3]。

3. データ解析と計算コード・データ

3.1 データ解析

測定したデータはオフライン解析に供され、二重

微分断面積が導出される。二重微分断面積を導出する式を以下に示す[2]。

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \frac{Y(E)/\eta(E)}{N \cdot (\tau \cdot \phi) \cdot \Omega \cdot \varepsilon(E) \cdot \Delta E} \quad (1)$$

ここで、 $d^2\sigma/dE d\Omega$ は二重微分断面積、 $Y(E)$ は中性子エネルギースペクトル、 $\eta(E)$ はターゲット内中性子散乱の補正係数、 N はターゲット原子数、 τ は光子のターゲットによる減衰の補正、 ϕ は入射光子数、 Ω は検出器の張る立体角、 $\varepsilon(E)$ は検出器の検出効率、 ΔE はエネルギー幅である。

$Y(E)$ は中性子検出器の出力の全発光成分に対する遅発発光成分の比から γ 線によるイベントを除去した時間分布を、飛行距離を用いてエネルギー分布にして求める。 N は各ターゲットの重さ測定と密度のデータから、 Ω はターゲットから検出器までの距離と検出器のターゲット側への投影面積から求めた。 ϕ は光子束であり前述の通りプラスチックシンチレータの計数から導出する。 $\eta(E)$ 、 τ 、は補正係数であり、PHITS コード[7]の計算結果から導出した。 $\varepsilon(E)$ は ScifulQMD コード[8]の計算値と Cf 中性子源を用いたエネルギー依存性から導出した。

3.2 計算コード・データ

実験結果と現状で遮蔽設計に使われている計算コード、核反応データベースから二重微分断面積を導出した。

計算コードの結果の導出には PHITS コードを用いた。PHITS コードは RIST、JAEA、KEK 等で開発されている多粒子輸送モンテカルロコードで、このエネルギーでの光核反応は、反応断面積として集団励起過程についてパラメータ化した巨大共鳴断面積の値が、陽子中性子ペアの励起過程について重陽子の光核反応断面積を元に補正をくわえた値が組み込まれており、前者を General Evaporation Model、後者を Quantum Dynamics Model で時間発展を追うことにより放出粒子の種類とエネルギーを求めている[7, 9]。

一方、核反応データベースは JAEA の核データセンターで提供されている、JENDL/PD2016.1 を用いた。これは評価済み核データファイルであり、実験データに基づく断面積値と JAEA で開発した前平衡モデルを含む CCONE コードを用いた二重微分断面積が得られている[10, 11]。

これらの計算コードと、評価済み核データファイルの結果は実験データを得るための測定系が有するエネルギー分解能の影響を受けていない。そこで、実験データのエネルギー分解能をもちいて、計算コードと、評価済み核データファイルの結果をガウス関数でなまして、次節で比較を行う。

4. 測定結果と考察

Figure 3 に実験で得られた結果を、計算コード・データとともに比較したものを示す。実験データは全部で 6 角度のものが得られたが、煩雑さを避けるために、最大値を示した H90 の結果と最小値を示した V90 の結果を示す。この図に示した結果を含めて、これまでの実験から明らかになったことを以下に簡

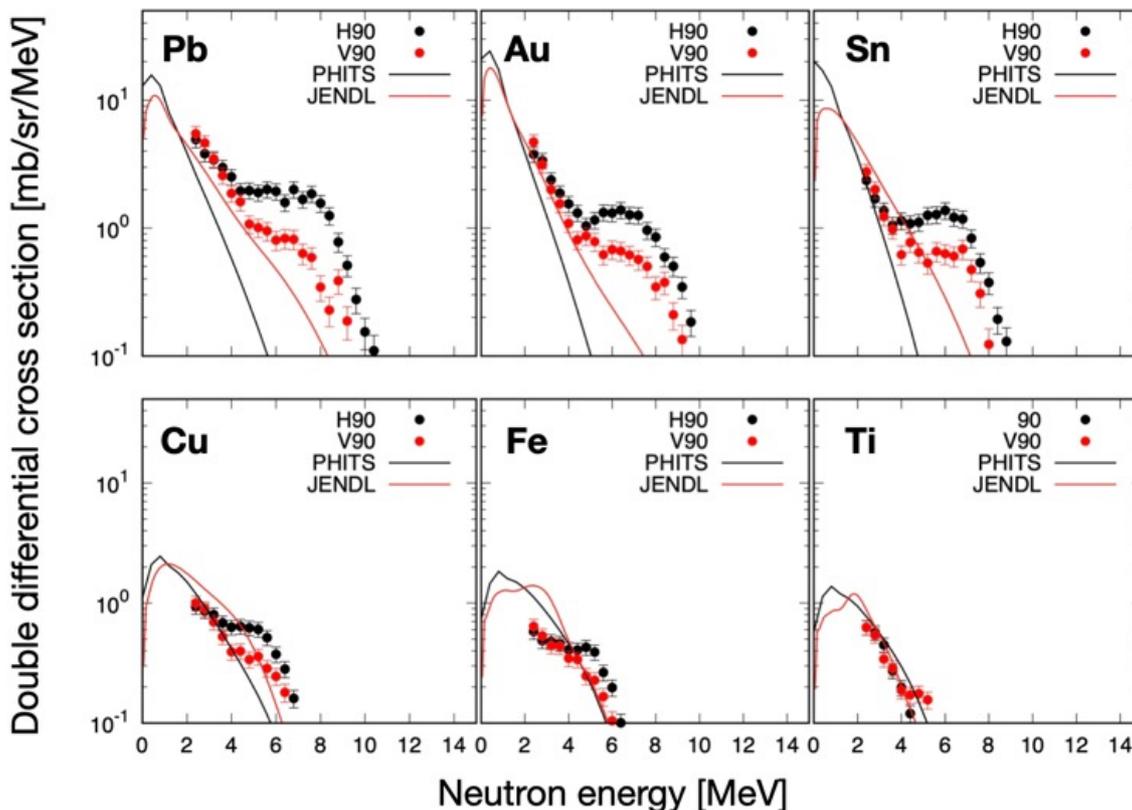


Figure 3: Experimental double differential cross section results at horizontal and vertical 90 degrees in comparison with that of calculation and data library.

条書きで示す[2, 3]。

- 実験データは放出角度によらない成分（主に 4 MeV 以下のエネルギーを持つ）と放出角度に依存する成分（主に 4 MeV 以上のエネルギーを持つ）成分の 2 つが見られた。
- この 2 つの成分は今回測定したすべてのターゲットに対して得られた。
- この 2 つの成分のうち、角度依存をもつ成分の強度は、入射光子の偏光方向と、放出方向のなす角を Θ としたとき $a+b\cos(2\Theta)$ で表すことが出来る。ここで a, b はフィッティングパラメータである。よって、この成分の量は光子の偏光の影響を受けているといえる。
- 入射光子のエネルギーを変えた試験測定から、エネルギーを下げても 2 つの成分が得られる。
- 実験結果から無偏光の場合の角度依存を導出したところ、1960 年代に測定された中性子の角度分布である $\cos(\theta)$ 分布の係数に近い値を示した。
- Fig. 3 に示した PHITS を含め既存のモンテカルロコードと、JENDL を含む評価済み核データは特に重いターゲットについて実験データの高エネルギー部分を再現しない。これは偏光の影響を受ける成分について核反応モデルに取り入れられていないためである。
- 測定した 6 つのターゲットのうちチタンは、わずかながら他のターゲットと反対の角度分布を示した。

- タングステン、タンタルについて同様の測定を行ったところ、質量数や反応の Q 値が金や鉛と大きく変わらないにもかかわらず、偏光に依存する成分が金や鉛の約 1/3 と少なかった。
- 偏光に依存する成分の有無が、単純なコンクリート遮蔽透過後の中性子線量に与える影響をシミュレーションで調べたところ、2 倍以上の差異が見られた。偏光に依存する成分のエネルギーが比較的高いことからくる影響とみられる。

5. 今後の展開

これまでの実験で光核反応から放出されたエネルギー分布に対して興味深い性質が明らかになった。この性質を統一的に記述し、電子加速器の遮蔽設計に用いられる計算コードや評価済み核データに反映するためには、より多くの入射エネルギーに対して、軽い核までのターゲットに対する実験データの取得が望まれる。

ニュースバル加速器は 2022 年に専用入射器を得たので、今後は 974 MeV 以下のエネルギーでトップアップ入射が可能になることから、532 nm のレーザーと組み合わせれば、この研究で必要とされるエネルギー範囲の単色光子を得ることが出来るので、単色光子場の整備による応用と合わせて、広い範囲のデータ取得が可能になると期待出来る。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 基盤(C) 20K12487 の助成を受けて実施された。

参考文献

- [1] T. Kawano, Y. S. Cho, P. Dimitriou, D. Filipescu, N. Iwamoto, V. Plujko, X. Tao, H. Utsunomiya, V. Varlamov, R. Xu, R. Capote, I. Gheorghe, O. Gorbachenko, Y.L. Jin, T. Renstrøm, K. Stopani, Y. Tian, G. M. Tveten, J.M. Wang, T. Belgia, R. Firestone, S. Goriely, J. Kopecky, M. Krtićka, R. Schwengner, S. Siem, and M. Wiedeking, arXiv:1908.00471v1.
- [2] T. K. Tuyet, T. Sanami, H. Yamazaki, T. Itoga, A. Takeuchi, Y. Namito, S. Miyamoto, Y. Asano, Nucl. Inst. Meth., A989 (2021) 164965.
- [3] Y. Kirihara, H. Nakashima, T. Sanami, Y. Namito, T. Itoga, S. Miyamoto, A. Takemoto, M. Yamaguchi, and Y. Asano, Journal of Nuclear Science and Technology, 57, 444 (2020).
- [4] S. Miyamoto, Y. Asano, S. Amano, D. Li, K. Imasaki, H. Kinugasa, Y. Shoji, T. Takagi, and T. Mochizuki, Radiat. Meas., 41, S179 (2007).
- [5] Y. Asano, S. Miyamoto, and LEPS-II collaboration, Prog. Nucl. Sci. Tech., 4, 252 (2014).
- [6] K. Horikawa, S. Miyamoto, T. Mochizuki, S. Amano, D. Li, K. Imasaki, Y. Izawa, K. Ogata, S. Chiba, and T. Hayakawa, Phys. Lett. B, 737, 109 (2014).
- [7] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta, L. Sihver, Journal of Nuclear Science and Technology, 50, 913 (2013).
- [8] D. Satoh, S. Kunieda, Y. Iwamoto, N. Shigyo, and K. Ishibashi, Journal of Nuclear Science and Technology, 39:sup2, 657 (2002).
- [9] S. Noda, S. Hashimoto, T. Sato, T. Fukahori, S. Chiba, and K. Niita, Journal of Nuclear Science and Technology 52, 57 (2015).
- [10] N. Iwamoto, K. Kosako, and T. Murata, Proc. Symp. Nucl. Data, 2015, pp. 53(2016).
- [11] O. Iwamoto, N. Iwamoto, S. Kunieda, F. Minato, and K. Shibata, Nuclear Data Sheets, 131, pp. 259 (2016).