



展 TENBO 望

レーザーコンプトン散乱 γ 線を用いた 光核反応理論の実証



早川 岳人
Hayakawa Takehito
(日本原子力研究開発機構)



宮本 修治
Miyamoto Shuji
(兵庫県立大学工学研究科)

1 はじめに

原子核が γ 線を吸収し、中性子を放出して中性子数の少ない同位体に核変換される反応がある。このような核反応は (γ, n) 反応と呼ばれる (以後、本稿では光核反応と呼ぶ)。この核反応が発生する中性子離別エネルギー (図1参照) は核種によって異なるが、だいたい数 MeV ~ 十数 MeV の領域にある。このような光核反応は高エネルギー粒子を生成する加速器施設などで意図しない放射性同位体の生成を評価する際に重要な核反応である。また、医療用の放射性同位体を生成する手段の1つとして研究されている。

一方、光は電場と磁場の波で構成されており、光は一般に進行するにつれて電場と磁場の向きが変わっていく。この電場と磁場の向きが一定の光を直線偏光した光と呼ぶ。 γ 線は光の一種なので直線偏光した γ 線が存在する。最初に述べた光核反応において、直線偏光した γ 線を原子核に照射した場合、直線偏光面 (光の磁

場ベクトルの振動する面で定義する) に対する角度に応じて、中性子の放出確率 (強度) が異なると予想される (なお、角度に対する中性子の放出確率を中性子の角度分布と呼ぶ)。そのため、直線偏光した γ 線を入射プローブとして用いて、中性子の角度分布を計測すれば原子核

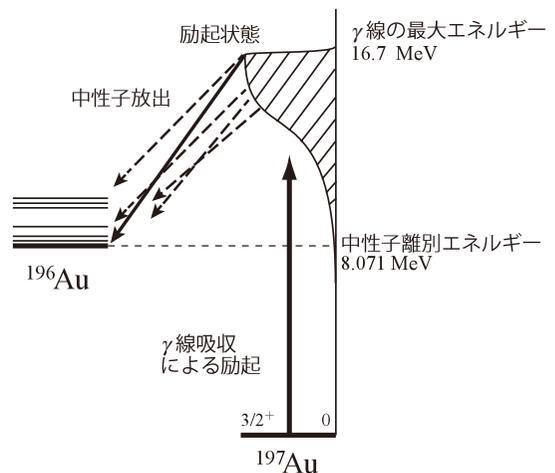


図1 ^{197}Au の光核反応の模式図

の構造を知る重要なツールになることは、原子核物理学の専門家であればすぐに気が付く。事実、最初の理論的な予言は1957年にイタリア人の原子核物理学者 A. Agodi によってなされた¹⁾。しかし、このような研究はほとんどされていなかったのである。なぜなら、最近まではほぼ100%直線偏光した γ 線が実用化されていなかったためである。そのため、Agodi の先駆的な論文は1970年代以降ほぼ忘れ去られてしまった。一方で、レーザーと加速器科学の進歩によって、レーザーコンプトン散乱 (LCS) γ 線と呼ばれる新しい γ 線源が実用化・発展してきた。このLCS γ 線の特徴の1つがほぼ100%の直線偏光が可能であるという点である。そこで、筆者らはニュースパル放射光施設に設置されたLCS γ 線を用いて、Agodi の理論的予言を半世紀以上経過してから初めて実証した²⁾。この成果は、約50年ぶりに光核反応の理論的予言を実証しただけでなく、原子核の構造の理解、超新星爆発におけるニュートリノの役割の理解、核セキュリティ分野における隠ぺいされた核物質・放射性同位体の探知など、広い領域に寄与すると期待される。

2 Agodi の予言

まず Agodi の予言の内容を説明する。図2に

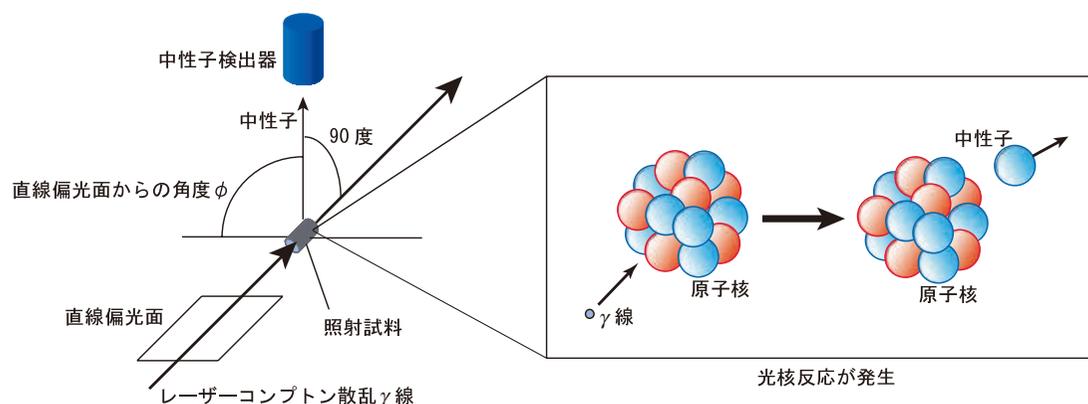


図2 γ 線を吸収して中性子を放出する模式図と実験の配置図

示すように、ある試料に直線偏光した γ 線を照射する場合を考える。 γ 線の進行方向を軸にとり、この軸からの角度 θ を考える。進行方向の軸を $\theta=0^\circ$ として、軸から 90° の角度を考える($\theta=90^\circ$)。次に、この 90° の角度において、直線偏光面からの角度 ϕ を考える。直線偏光面の角度を 0° とする($\phi=0^\circ$)。Agodi の理論によれば、直線偏光した γ 線を吸収した原子核から放出される中性子は、 γ 線の進行方向に対して $\theta=90^\circ$ の角度では、中性子の角度ごとの強度 I が、原子核の種類に関係なく、 $I=a+b \cdot \sin(2\phi)$ という非常に簡単な式になる。 a と b のパラメーターは原子核の励起状態ごとに異なる。この式は角運動量の保存則から導かれたので、原理的に正しいと考えられる。しかし、これまでエネルギー可変かつ直線偏光した高輝度 γ 線を生成する装置が実用化されていなかったため、この理論的予言は実証されず、Agodi の予言も現在ではほとんど忘れ去られてしまっていた。

3 レーザーコンプトン散乱 γ 線の発達

近年、高エネルギーの電子にレーザーを散乱させて生成するレーザーコンプトン散乱 (LCS) γ 線が開発された(図3参照)。加速器で加速した数十 MeV~数 GeV のエネルギーを有する電子と、レーザー光をコンプトン散乱させるこ

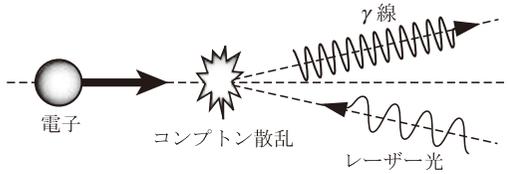


図3 レーザーコンプトン散乱 γ 線の生成方法

とで γ 線を発生する。レーザー光子と電子の散乱により光子は電子からエネルギーを得て、数十 MeV～数 GeV のエネルギーを持つ光子、すなわち γ 線に変換される。レーザー光はそもそもエネルギーが揃っているため、コンプトン散乱で生成された γ 線も比較的狭いエネルギー幅を有する。また、空間的指向性も高い。このような LCS γ 線は最初、高エネルギー物理の研究に使われ、後から MeV 領域でも使われるようになった。1990 年代初頭にアメリカのデューク大学³⁾と、電子技術総合研究所（現在の産業技術総合研究所）⁴⁾でユーザー利用が可能な施設が開発された。これらの施設では、原子核共鳴蛍光散乱を用いた原子核物理学研究や、 γ 線 CT のための基礎研究などが行われた。さらに 2005 年頃に、兵庫県立大学が管理するニュースバル放射光施設において、世界で 3 番目の MeV エネルギー領域のユーザー利用可能な装置が稼働し始めた⁵⁾。残念なことに、東日本大震災の影響で産総研の施設は閉鎖されてしまい、現在はデューク大学とニュースバルの 2 か所のみで稼働している。ニュースバルの LCS 施設では、物性研究のための磁気コンプトン散乱、長寿命放射性同位体の核変換、宇宙核物理学の基礎研究等が行われている。

4 実験方法と結果

Agodi の理論的予言を実験的に検証することが、LCS γ 線の実用化によって可能になったので、ニュースバル放射光施設で本実験を行った。ニュースバル電子蓄積リングに 1 GeV の電子が蓄積された状態で、波長約 1 μm の

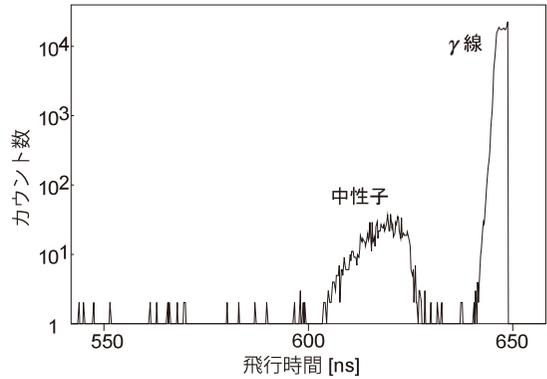


図4 飛行時間スペクトル

γ 線は光速なのに対して、中性子は光速の約 1/10 の速度なので、飛行時間でシグナルを分離することができる

Nd:YVO₄ レーザーの光を導入して、最大エネルギー 16.7 MeV の LCS γ 線を生成した。レーザー光はもともとほとんど 100% の直線偏光なので、生成された γ 線もほぼ 100% の直線偏光である。

3 種類（金、ヨウ化ナトリウム、銅）の物質に対して、直線偏光した γ 線を照射した。ヨウ化ナトリウムはヨウ素とナトリウムから構成されているが、ヨウ素の中性子離別エネルギーがナトリウムより低いので、ヨウ素の光核反応を計測するための試料である。銅は安定同位体の ⁶³Cu と ⁶⁵Cu から構成されるが、原子核の構造は比較的似ている。光核反応で放出された中性子を、 γ 線ビーム軸に対して 90° の角度に設置したプラスチックシンチレーション検出器で測定した。中性子のほかに γ 線が生成されるので、中性子と γ 線の信号を分離するために、飛行時間測定法を用いた。 γ 線をパルス化しておき、 γ 線が試料に放射された時刻と、検出器に放射線が入射した時刻の差を計測する手法である。 γ 線は光速で飛行するが、MeV 領域の中性子はだいたい高速の 1/10 の速度しかない。そのため、到着までの時間を計測することで、 γ 線と中性子を識別することができる。図 4 に示すように中性子と γ 線を綺麗に分離できた。また、環境放射線や宇宙線などのバックグラウ

ンドも十分に低い。レーザーの直線偏光の面の角度を30°刻みで変更しながら、中性子数を計測した。この方法で、3種類の物質に対する中性子の角度分布を測定した(図5参照)。図5を見ると3種類の物質に対する中性子の角度分布が理論的に予言された式で再現できることが分かる。この実験によって、初めてAgodiによる予言が実証されたのである。

5 研究成果の意義と将来への展望

本研究成果は、原子核のより詳細な理解につながると期待されている。一般に、10~30 MeVのエネルギーのγ線を原子核に照射すると、強い電気双極子遷移と呼ばれる現象が発生するこ

とが知られている。その一方、10~30 MeVのγ線を吸収した場合に発生する磁気双極子の強度(確率)を実験的に計測する手法は確立していない。本手法を応用すると、磁気双極子遷移の強度を計測できると期待されている。

磁気双極子遷移は、原子核物理学だけでなく宇宙物理でも重要なのである。例えば、重力崩壊型超新星の爆発メカニズムの解明や、ニュートリノによる希少同位体の生成の理解にも寄与する^{6,7)}。太陽より質量が8倍以上重い恒星は、最後に超新星爆発を引き起こす。最初に中心部の鉄が重力崩壊し原始中性子星を形成する。原始中性子星から多量のニュートリノが放出され、約1%が外層にエネルギーを落として超新星爆発を引き起こすと考えられている(図6)。

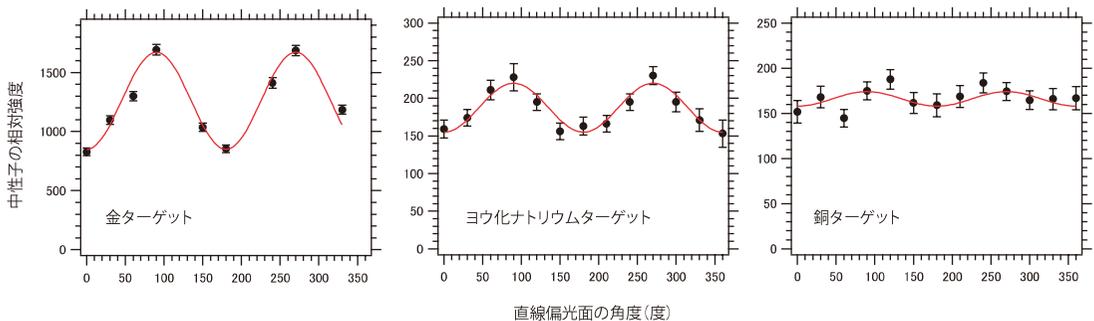


図5 金、ヨウ化ナトリウム、銅ターゲットに直線偏光したγ線を照射したときに放出される中性子の強度と、直線偏光の面の角度の相関
黒丸が実験値。実線は、最小二乗法で求めた $I = a + b \cdot \sin(2\phi)$ 関数式

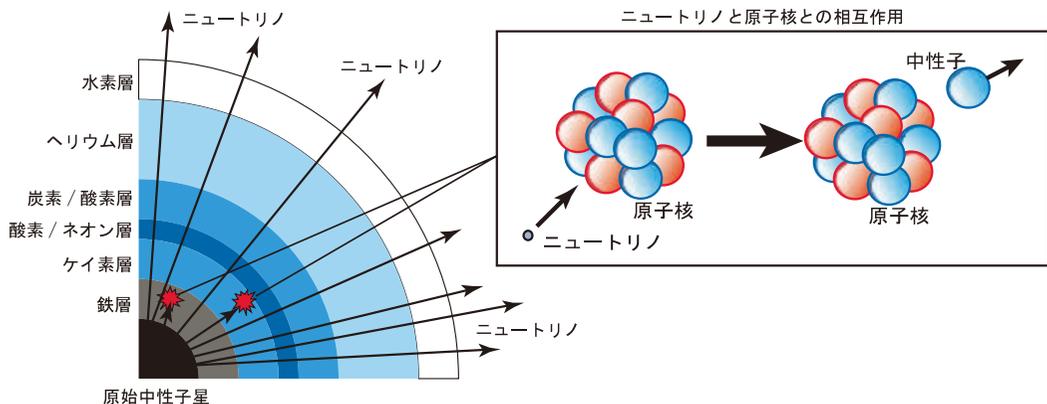


図6 超新星爆発とニュートリノの模式図

また、超新星爆発の外層では、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ 、 ${}^{138}\text{La}$ 、 ${}^{180}\text{Ta}$ などの同位体が生成される⁷⁾。ニュートリノと様々な原子核との相互作用の強さは、実質的には計測できないため、殻模型や準粒子乱雑位相近似模型などで計算されている。磁気的双極子遷移の強度は、これらの計算に寄与するので、ニュートリノ・原子核の相互作用を評価する上で役に立つ。

その他の応用例として、テロリストが核テロを起こすために隠ぺいした核物質の探知技術が挙げられる⁸⁾。レーザーコンプトン散乱 γ 線をプローブとして、光核反応による中性子検出によって非破壊で隠ぺいされた核種を測定する手法が提案されている⁹⁾。この検知方式において、中性子の角度による強度の違いが有益な情報をもたらす可能性がある。

参考文献

- 1) Agodi, A., *Nuovo Cimento*, **5**(1), 21 (1957)
- 2) Horikawa, K., *et al.*, *Phys. Lett. B*, **737**, 109–113 (2014)
- 3) Litvinenko, V.N., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 4569–4572 (1997)
- 4) Ohgaki, H., *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **38**, 386 (1991)
- 5) Miyamoto, S., *et al.*, *Radiat. Meas.*, **41**, S179–S185 (2007)
- 6) Woosley, S.E., *Astrophys. J.*, **356**, 272 (1990)
- 7) Kajino, T., Mathews, G.J., and Hayakawa, T., *J. Phys. G*, **41**, 044007 (2014)
- 8) 早川岳人, 藤原守, 核セキュリティにおける核物質の非破壊測定技術, 日本原子力学会誌, **56**(7), 448 (2014)
- 9) 特許 5414033, 「原子核分析方法及び原子核分析装置」, 早川岳人, 羽島良一, 静間俊行 (平成 26 年)