



5.14 核異性体と光励起 Nuclear Isomers and Photo Nuclear Excitation

静岡 俊行、早川 岳人

日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター

〒310-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Toshiyuki SHIZUMA and Takehito HAYAKAWA

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,

Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan

In the $A=180$ region, isomers which are excited states in nuclei with comparatively long half-lives arise due to the symmetry of nuclear shapes around the principal axis. This symmetry is related to the K quantum number, and therefore the associated isomers are called K isomers. Here we report on recent results of nuclear structure studies for high- K isomers, and discuss the related physics particularly using high intensity photons such as laser Compton scattering gamma rays and laser induced gamma rays.

Keywords : Nuclear isomer, Nuclear structure, Photo nuclear reaction

1. はじめに

原子核の励起状態で1ナノ秒以上の半減期を有するものは、核異性体(nuclear isomer)と呼ばれている。核異性体は、その起因により[1]、スピギャップアイソマー、核分裂アイソマー、 K 核異性体の3つに分類することができる。 K 核異性体は、四重極変形をもつ原子核における対称性に起因する。このような原子核では、全角運動量の対称軸射影成分(K)が良い量子数となる。したがって、ガンマ遷移において、全角運動量の選択則に加えて、 K 量子数に関する選択則が適用される。 K 量子数の大きな変化を伴う遷移は抑制され、始状態は核異性体となりやすい。 K 核異性体は、質量数180領域において多数現れることが知られている。

ここでは、 K 核異性体に関して、崩壊のメカニズムや中性子過剰核における長寿命核異性体の存在の可能性、また、光励起による核異性体の励起、脱励起に関して議論する。

2. K 核異性体の崩壊メカニズム

質量数180領域原子核の中で、 ^{178}Hf 核異性体($K^\pi=16^+$ 、半減期31年)や、 ^{180}Ta 核異性体($K^\pi=9^-$ 、半減期 1.2×10^{15} 年以上)は、特に有名である。これらの核異性体は、非常に大きな K 量子数の変化($\Delta K=8$)を伴って崩壊するため、このように長い寿命を持つと考えられている。異なる K 量子数をもつ状態間の遷移では、通常のスピンとパリティに関する選択則に加えて、 K 量子数に関する選択則($\nu = |K_i - K_f| - \lambda < 0$)が適用される。ここで、 λ は遷移の多重極度、 ν は K 禁止の度合を表わし、 $\nu > 0$ となるような遷移は禁止される。 K 選択則では、異なる K 量子数をもつ状態間の遷移は、 K 量子数の差を最小にするよう起きる。また、上述の例のように、大きな量子数の差を伴う遷移は強く抑制される。異なる ν 値もつ遷移の抑制の度合を比較するために、 $f_\nu = F^{1/\nu} = (T_\nu/T_w)^{1/\nu}$ で定義される hindrance ファク

ター F , および reduced hindrance ファクター f_v という量を用いる。ここで, T_{γ} はガンマ線遷移の半減期, T_w は単一粒子遷移による半減期の Weisskopf 値である。経験値として, M1 および E2 遷移に対して $f_v = 10 \sim 100$ が得られている[2]。

しかしながら、上述の経験値と大きくずれるガンマ遷移が発見されてきた[3]。測定された遷移確率は、経験値に対して、 $10^3 \sim 10^{15}$ 倍程度大きく、非常に強い K 混合が起きていると思われる。われわれは、このような遷移に対して、ガンマ変形自由度を取り入れた量子トンネル効果(ガンマトンネリング模型)による遷移確率の考察を行ってきた。その結果、 ΔK が10以上の遷移に対して、実験値と計算値の良好一致を得ることができ[4,5,6]、非軸対称変形に対する動的な影響が重要であると結論した。

上記では、始状態、終状態ともに軸対称変形を仮定して議論を進めた。一方、軸対称性が破れた状態については、たとえば、 ^{184}Os 原子核において、その存在の可能性が示されている[7]。この場合、3 軸非対称状態は静的(static)な状態で、ガンマトンネリング模型での動的(dynamical)なガンマ変形不安定状態とは区別される。静的な3 軸非対称変形状態が、 K 混合や、 K 核異性体の崩壊に対して、どのように寄与するかは非常に興味深い問題である。また、通常のリターン軸に対して傾いた軸の周りの回転も定常状態(斜軸回転)として現れることが知られており、実験的には、 ^{182}W [8]や、 ^{184}Os [9]原子核で確認されている。斜軸回転モードは、拡張された大振幅コリオリ相互作用と考えることができ、 K 混合に与える影響を定量的に調べることも今後の課題である。

3. 中性子過剰核におけるガンマトンネリング確率

質量数180領域原子核において、これまで観測された核異性体は、ほとんどが安定核、もしくは、安定核よりも中性子不足側にある。これは、実験的に中性子過剰核を生成することが困難なためである。一方、近年、深部非弾性散乱反応や、不安定核ビームを用いた核反応により中性子過剰核の核構造研究が可能になってきた。そこで、中性子過剰核についても、ガンマトンネリングの確率を計算し、その同位体依存性を調べた。ガンマトンネリング模型では、hindrance ファクター F と作用 W は、 $\log F \propto 2W/\hbar$ の関係にあるため、作用、もしくは、トンネリング確率は、 K 混合に対して最も重要な要素となる[10]。図1に、Dy, Er, Yb, Hf, W, および、Os 原子核の $I^\pi = 10^+$ 状態のガンマトンネリングにおける作用の同位体依存性を示している。作用は、中性子数104近傍で最大値をとり、その後、中性子数の増加とともに減少する。大きな作用は、原子核形がガンマ変形に対して安定していることを意味する。したがって、この領域では、中性子数104、106をもつ ^{170}Dy , ^{172}Dy , ^{172}Er , ^{174}Er が、特に安定した変形をもつことが解る。

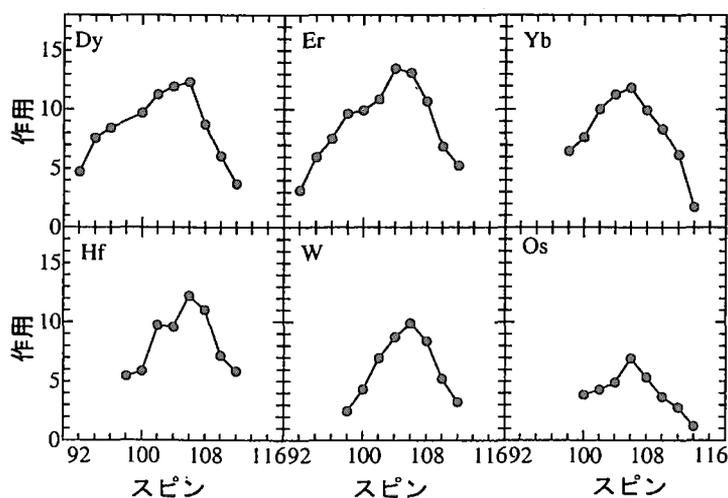


図1. Dy, Er, Yb, Hf, W, および、Os 原子核の $I^\pi = 10^+$ 状態のガンマトンネリングにおける最小作用の同位体依存性

また、図1から解るように、中性子数10

2以上をもつ Dy, Er, および, Yb 原子核において、作用が比較的小さくなる。したがって、もし、これらの原子核に核異性体が存在すれば、大きな K 量子数の差をもつ基底状態回転帯へ遷移が存在する可能性がある。そのような遷移が観測できれば、2節で紹介したガンマトンネリング模型のさらなる検証を行うことができる。

^{170}Dy 原子核は、陽子数66、中性子数104をもち、単一粒子エネルギー準位において、陽子、中性子ともに殻(陽子数:50と82、中性子数:82と126で、魔法数と呼ばれている)の中心にあるため、最も興味をもたれている核の一つである。一般に、魔法数から遠ざかるにしたがい原子核は変形する。したがって、この領域では、 ^{170}Dy 原子核の近傍で最も安定した変形状態が現れると期待できる。ガンマトンネリングの計算結果(図1)も、 ^{170}Dy 原子核は、 $W=12\sim 13$ の大きな値を示し、ガンマ変形に対して非常に安定した状態であることを示している。また、図2に、 ^{170}Dy 原子核における作用のスピンの依存性を描いている。作用は、スピンとともに増加し、スピン20で最大値 $W=13$ となり、それ以降はゆるやかに減少する。このような大きな作用をもつことは、 ^{170}Dy 原子核が高スピン状態でも非常に安定した変形をしていることを意味し、長寿命の高スピン核異性体が存在することを示唆している。

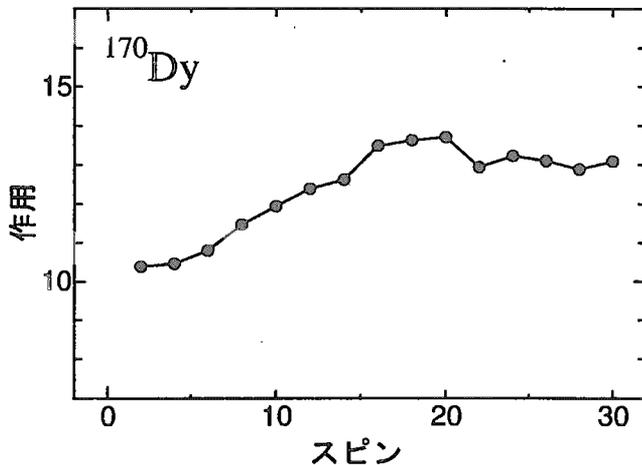


図2. ^{170}Dy 原子核の正パリティ状態のガンマトンネリングに対する作用のスピンの依存性

4. 光による核異性体の励起・脱励起の実験計画

光核反応による核異性体研究は、光照射による核異性体からの即発エネルギー放出や、核異性体の恒星内元素合成への影響の観点から注目されている[11]。ここでは、後者に関して、 ^{180}Ta 核異性体や、 ^{176}Lu 核異性体の例を上げて議論する。

^{180}Ta の基底状態は、半減期8.1時間でベータ崩壊する放射性核種である(図3)。この核には、励起エネルギー75keVに、半減期が 2×10^{15} 年以上をもつ核異性体が存在する。この核異性体は、天然に存在する唯一の核異性体で、存在量が最も少ない元素として有名である。さらに、恒星内元素合成において、どのような過程で生成されたのか明確でなく、関心をもたれている。s-process中の強いガンマ線輻射場では、 ^{180}Ta の基底状態と核異性体は熱平衡にあり、核異性体の実効的半減期が減少すると考えられている[12]。したがって、実験的に、光照射による核異性体の脱励起断面積を求める必要がある。

一方、 ^{176}Lu 原子核の場合は、基底状態が、 4×10^{10} 年の半減期をもつ準安定な原子核であり、励起エネルギー123keVに、3.6時間の半減期をもつ核異性体が存在する(図4)。強いガンマ線輻射の下では、基底状態から核異性体への励起が生じ、 ^{180}Ta 核異性体の場合と同様に、実効的な半減期が減少すると考えられている。したがって、光励起断面積を求めることにより、ガンマ線輻射強度と実効的半減期の

関係が得られ、 ^{176}Lu 原子核が合成された時点での恒星内温度を決定できる。

^{180}Ta 、 ^{176}Lu 原子核のいずれにおいても、1MeV 程度のガンマ線が重要な役割を果たし、大強度の逆コンプトンガンマ線や、高エネルギー放射光、レーザー誘起ガンマ線等を用いて、測定実験を行う予定である。

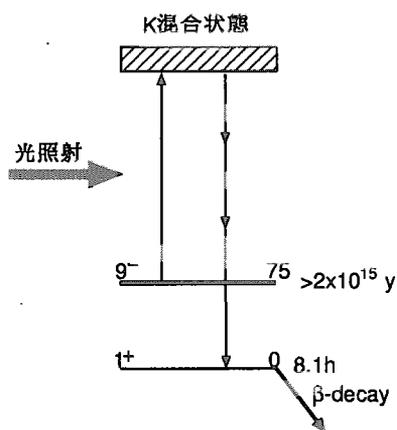


図3. ^{180}Ta の準位構造

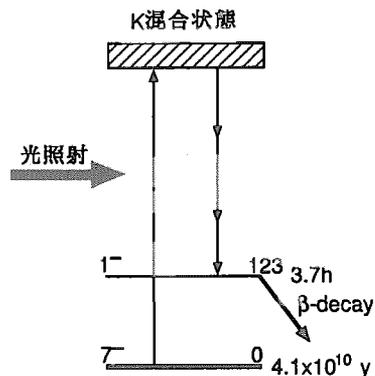


図4. ^{176}Lu の準位構造

5. まとめ

核異性体の崩壊メカニズムを明らかにするため、ガンマ変形方向の自由度を取り入れた量子トンネリング確率の計算を行った。その結果、大きな K 量子数の変化を伴う (ΔK が10以上) 遷移に対して、実験値と計算値の良い一致を得ることができ、このような遷移については、ガンマ変形不安定性が K 混合に対して重要であることが解った。また、中性子過剰核においても、ガンマトンネリング確率の計算を行い、 ^{170}Dy 核の近傍において、作用 W が最も大きくなり、長寿命の核異性体が存在する可能性があることが解った。一方、 ^{180}Ta や ^{176}Lu 原子核の既知の長寿命核異性体の光照射による核異性体の励起や、脱励起について議論した。これらの核については、1MeV 程度の大強度のガンマ線を用いて、核異性体の励起、脱励起断面積の測定実験を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shizuma *et al.*, JAERI-Conf 2002-008 (2002) 100
- [2] K.E.G. Lobner, Phys. Lett. 26B (1968) 369
- [3] B. Crowell *et al.*, Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 1164, and references therein
- [4] K. Narimatsu, Y.R. Shimizu, T. Shizuma, Nucl. Phys. A601 (1996) 69
- [5] T. Shizuma *et al.*, Nucl. Phys. A626 (1997) 760
- [6] T. Shizuma *et al.*, Nucl. Phys. A696 (2001) 337
- [7] T. Shizuma *et al.*, Phys. Rev. C65 (2002) 064310
- [8] T. Shizuma *et al.*, Nucl. Phys. A593 (1997) 247
- [9] T. Shizuma *et al.*, Phys. Lett. B442 (1998) 53
- [10] T. Shizuma *et al.*, J. of Nucl. Sci. and Tech., 39 (2002) 1137
- [11] T. Shizuma, JAERI-Conf 2002-7 (2002) 13
- [12] D. Belic *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 5242