

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Nguyễn Thế Vinh

**NGHIÊN CỨU MỘT SỐ PHẢN ỨNG QUANG HẠT NHÂN TẠO
CẤP ĐỒNG PHÂN TRÊN CÁC BIA ^{113}In , ^{107}Ag , ^{195}Pt , ^{138}Ce và
 $^{151,153}\text{Eu}$ SỬ DỤNG MÁY GIA TỐC ĐIỆN TỬ MT-25**

Chuyên ngành: Vật lý nguyên tử và hạt nhân
Mã số: 9440106

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

Hà Nội – Năm 2024

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Phạm Đức Khuê

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Phan Việt Cường

Phản biện 1: ...

Phản biện 2: ...

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ..', ngày ... tháng ... năm 2024

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Trạng thái đồng phân hạt nhân hay còn gọi là trạng thái giả bền (metastable states) được Otto Hahn phát hiện vào năm 1921. Vào thời điểm đó tất cả các trạng thái kích thích hạt nhân đều được xem là có thời gian sống nhỏ hơn 10^{-13} giây, vì thế đã có rất nhiều suy đoán về nguồn gốc của các trạng thái đồng phân. Hạt nhân ở trạng thái giả bền này có thể khử kích thích trở về trạng thái kích thích thấp hơn hoặc trạng thái cơ bản (ground state) bằng cách phát bức xạ gamma hay trải qua quá trình phân rã (ví dụ như phân rã β -) và biến đổi thành hạt nhân khác.

Tỷ số đồng phân có thể cho chúng ta những thông tin quan trọng về cấu trúc mức năng lượng của hạt nhân cũng như cơ chế phản ứng, về sự phụ thuộc vào spin của mật độ mức hạt nhân, thông tin về vai trò của moment góc của kênh lối vào, vai trò của hạt tới, hạt bay ra, hay nói cách khác là vai trò của hiệu ứng kênh phản ứng [15-21].

Trong nghiên cứu thực nghiệm tỉ số đồng phân, phản ứng quang hạt nhân đóng một vai trò quan trọng do các đặc trưng của trường điện từ trong tương tác với nucleon đã được biết rất rõ [22]. Vì thế, khảo sát tỉ số đồng phân hình thành trong phản ứng quang hạt nhân là một công cụ hữu hiệu để làm rõ cơ chế phản ứng đặc biệt là khi vai trò của moment góc trở nên quan trọng [23].

Về mặt thực nghiệm, nghiên cứu tỉ số suất lượng tạo cặp đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân thường sử dụng chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại nằm trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ (GDR) thay đổi trong khoảng từ 8-30 MeV. Ở vùng năng lượng này, tương ứng với sự chồng chập các mức của hạt nhân hợp

phần và tiết diện phản ứng quang hạt nhân đạt cực đại và có dạng hình Gauss được gọi là cộng hưởng khổng lồ.

Do các yêu cầu cấp thiết trên nên tôi đã thực hiện đề tài “ Nghiên cứu một số phản ứng quang hạt nhân tạo cặp đồng phân trên các bia ^{113}In , ^{107}Ag , ^{195}Pt , ^{138}Ce và $^{151,153}\text{Eu}$ sử dụng máy gia tốc điện tử MT-25”

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Nghiên cứu, phát triển phương pháp thực nghiệm và tính toán lý thuyết xác định tỷ số đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân trong vùng năng lượng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ (8-30 MeV).

- Cung cấp các số liệu hạt nhân mới về tỷ số suất lượng đồng phân tạo thành một số hạt nhân chẵn-lẻ, và các hạt nhân biến dạng trong một số phản ứng quang hạt nhân trên các bia ^{113}In , ^{107}Ag , ^{195}Pt , ^{138}Ce và $^{151,153}\text{Eu}$ gây bởi chùm photon hãm năng lượng cực đại nằm trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ.

- Góp phần làm rõ hơn sự hình thành các trạng thái đồng phân cũng như mối liên hệ giữa cấu trúc hạt nhân và trạng thái đồng phân.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

i) Tìm hiểu tổng quan về phản ứng quang hạt nhân, cấu trúc các trạng thái hạt nhân đồng phân; ii) Nghiên cứu, phát triển phương pháp thực nghiệm kích hoạt phóng xạ và đo phổ gamma sử dụng phổ kế bán dẫn gecmani siêu tinh khiết HPGe, và tính toán lý thuyết kết hợp các code Talys và Geant4 để xác định tỷ số đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân trong vùng năng lượng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ; iii) Xác định bằng thực nghiệm tỷ số đồng phân trong các phản ứng quang hạt nhân $^{113}\text{In}(\gamma,2n)^{111\text{m,g}}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma,n)^{112\text{m,g}}\text{In}$, $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106\text{m,g}}\text{Ag}$, $^{195}\text{Pt}(\gamma,p)^{194\text{m,g}}\text{Ir}$; $^{198}\text{Pt}(\gamma,n)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ và

$^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m.g}}\text{Ce}$ gây bởi chùm photon hãm năng lượng cực đại từ 14 đến 24 MeV; iv) Tính toán lý thuyết tiết diện vi phân và tỉ số đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m.g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$ trong vùng năng lượng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ.

4. Cấu trúc của luận án.

Luận án gồm 110 trang nội dung, 15 bảng, 42 hình, 05 công trình được công bố (4 bài ISI và 1 bài Scopus), 122 tài liệu tham khảo được phân bố như sau:

Phần mở đầu giới thiệu lý do chọn đề tài, mục đích, mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu cũng như ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài luận án; Chương 1: Tổng quan về phản ứng quang hạt nhân, cấu trúc hạt nhân và trạng thái đồng phân; Chương 2: Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và tính toán lý thuyết tỉ số đồng phân của phản ứng quang hạt nhân; Chương 3: Kết quả thực nghiệm và tính toán lý thuyết tỉ số đồng phân trong một số phản ứng quang hạt nhân. Phần kết luận và các kiến nghị về hướng nghiên cứu tiếp theo; Cuối cùng là danh mục các công trình đã công bố liên quan đến luận án, tài liệu tham khảo.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ PHẢN ỨNG QUANG HẠT NHÂN, CẤU TRÚC HẠT NHÂN VÀ TRẠNG THÁI ĐỒNG PHÂN

1.1. Phản ứng quang hạt nhân

1.1.1. Khái niệm về phản ứng quang hạt nhân

Phản ứng quang hạt nhân là phản ứng hạt nhân xảy ra khi có sự tương tác giữa lượng tử gamma hay còn gọi là photon với hạt nhân, sau tương tác hạt nhân có thể phát xạ neutron, proton hoặc các loại hạt/bức xạ khác. Phản ứng quang hạt nhân là phản ứng thu

năng lượng, do đó điều kiện để một phản ứng có thể xảy ra là năng lượng của photon (E_γ) phải lớn hơn năng lượng ngưỡng (E_{th}).

1.1.2. Các định luật bảo toàn trong phản ứng quang hạt nhân

Cũng như các phản ứng hạt nhân khác, phản ứng quang hạt nhân bị chi phối bởi các định luật bảo toàn, tham khảo [4,13]

1.1.3. Tiết diện và suất lượng của phản ứng quang hạt nhân

Tiết diện phản ứng hạt nhân (σ) là xác suất xảy ra phản ứng trên một hạt nhân bia trong một giây khi thông lượng của chùm bức xạ/hạt tới bằng 1 hạt/s.

Suất lượng của phản ứng là số phản ứng xảy ra trên bia trong một đơn vị thời gian. Trong trường hợp chùm hạt tới có phổ năng lượng liên tục, gọi $\varphi(E)$ là thông lượng chùm bức xạ trong vùng năng lượng E , còn $\sigma(E)$ là tiết diện phản ứng tại năng lượng E . Suất lượng phản ứng hạt nhân Y , được xác định theo công thức:

$$Y = N_0 \int_{E_{th}}^{E_{max}} \sigma(E) \cdot \varphi(E) dE \quad (1.12)$$

trong đó: E_{th} và E_{max} là năng lượng ngưỡng của phản ứng và năng lượng cực đại của bức xạ hãm.

1.1.4. Phản ứng quang hạt nhân trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ

Cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ (giant dipole resonance, GDR) là dạng kích thích cộng hưởng khổng lồ phổ biến nhất. Tiết diện hấp thụ photon kích thích hạt nhân lên trạng thái cộng hưởng khổng lồ được biểu diễn bởi hàm Lorentz:

$$\sigma_{GDR}(E_\gamma) = \sum_i \sigma_i \frac{(E_\gamma \Gamma_i)^2}{(E_\gamma^2 - E_i^2)^2 + (E_\gamma \Gamma_i)^2} \quad (1.13)$$

trong đó σ_i , E_i , Γ_i tương ứng là tiết diện đỉnh cộng hưởng GDR, năng lượng và độ rộng của đỉnh. Tổng sẽ giới hạn với $i = 1$ đối với

hạt nhân hình cầu, trong khi đó với hạt nhân biến dạng thì cộng hưởng bị tách ra và $i=1,2$.

1.2. Cấu trúc hạt nhân và trạng thái đồng phân

1.2.1. Dịch chuyển gamma

Dịch chuyển gamma là quá trình hạt nhân chuyển từ trạng thái kích thích có năng lượng cao xuống trạng thái kích thích có năng lượng thấp hoặc trạng thái cơ bản bằng cách phát bức xạ điện từ gọi là bức xạ gamma. Tùy theo quá trình xảy ra bên trong hạt nhân liên quan tới dịch chuyển gamma người ta chia dịch chuyển gamma thành dịch chuyển điện và dịch chuyển từ. Hay bức xạ phát ra được phân thành bức xạ điện và bức xạ từ. Xác suất dịch chuyển P từ trạng thái đầu được mô tả bởi hàm sóng ψ_f đến trạng thái cuối được mô tả bởi hàm sóng ψ_i được xác định theo công thức [95]:

$$P = \frac{2\pi}{\hbar} |M|^2 \frac{dn}{dE} \quad (1.25)$$

trong đó: $M = \int \psi_f^* H \psi_i dt$ là yếu tố ma trận dịch chuyển của toán tử Hamilton H , là toán tử tương tác của trường điện từ với các nucleon tham gia dịch chuyển; dn/dE là mật độ của trạng thái cuối; ψ_f và ψ_i tương ứng là hàm sóng của trạng thái cuối và đầu của hạt nhân.

Dịch chuyển gamma phải tuân theo quy tắc bảo toàn momen động lượng toàn phần và bảo toàn chẵn lẻ:

1.2.2. Trạng thái đồng phân

Việc kết hợp đồng thời giữa sự thay đổi lớn về spin và năng lượng dịch chuyển nhỏ giữa hai trạng thái trong hạt nhân có thể dẫn đến thời gian phân rã dài làm hình thành nên các trạng thái kích thích có thời gian sống tương đối dài ($\geq 10^{-9}$ giây) được gọi là các trạng thái giả bền hay là các trạng thái đồng phân.

Trong một số trường hợp, hạt nhân có thể có hai trạng thái giả bền. Trạng thái giả bền cũng có thể quan sát ở các hạt nhân bền β . Khi đó, trạng thái nửa bền giả kích thích bằng cách phát xạ lượng tử gamma và biến hoán electron.

1.2.3. Cấu trúc hạt nhân và trạng thái đồng phân

Theo các số liệu thực nghiệm, vùng thường tìm thấy các trạng thái đồng phân là vùng hạt nhân có số khối trung bình đến các hạt nhân nặng gần với lớp vỏ đóng theo lý thuyết mẫu vỏ, ở vùng này có sự hình thành các trạng thái nhiều hạt với spin cao ở năng lượng thấp.

Trạng thái đồng phân hạt nhân là các trạng thái có spin cao, các trạng thái này được tạo thành bằng nhiều cách khác nhau như từ sự kích thích điện từ, từ các phản ứng hạt nhân, ngoài ra sự va chạm không đàn hồi của các hạt e^- , p , α và d cũng có thể kích thích hạt nhân lên các trạng thái tương tự. Trong đa số trường hợp, quá trình hình thành trạng thái đồng phân hạt nhân xảy ra theo hai bước: thứ nhất là sự hình thành trạng thái hạt nhân kích thích cao và sau đó là sự phân rã từ các trạng thái này xuống các trạng thái giả bền bằng quá trình phân rã nổi tầng.

1.3. Tỷ số suất lượng đồng phân

Tỷ số đồng phân là tỷ số tiết diện tạo thành trạng thái đồng phân (σ_m) và trạng thái cơ bản không bền (σ_g). Trong trường hợp chùm hạt tới không đơn năng khi xác định tỷ số tiết diện đồng phân, thay vì đo các tiết diện có thể đo tỷ số suất lượng tạo thành trạng thái đồng phân (Y_m) và trạng thái cơ bản không bền (Y_g). Như vậy nó còn có thể được gọi là tỷ số suất lượng đồng phân.

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} \quad (1.35)$$

trong đó Y_i được xác định theo công thức (1.12).

Đối với trường hợp chùm bức xạ hãm, do sự liên tục của phổ năng lượng, tỷ số suất lượng đồng phân được biểu diễn như sau [4]:

$$IR(E_{max}) = \frac{Y_{hs}(E_{max})}{Y_{ls}(E_{max})} \quad (1.37)$$

Với Y_i được xác định theo công thức (1.12).

Tỷ số này có thể được xác định được bằng đo đạc thực nghiệm cũng như tính toán lý thuyết. Tính toán lý thuyết được dựa trên mô hình thống kê của Huizenga – Vandebosch trên cơ sở cơ chế hạt nhân hợp phân.

Chương 2: PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM VÀ TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT

2.1. Phương pháp kích hoạt trong nghiên cứu tỉ số đồng phân

Trong phương pháp kích hoạt, các bia mẫu nghiên cứu được chiếu bởi chùm hạt/bức xạ có năng lượng và cường độ thích hợp, thông qua các phản ứng hạt nhân tạo ra các đồng vị phóng xạ. Các đồng vị sản phẩm phản ứng được nhận diện căn cứ vào năng lượng của các vạch phổ gamma và thời gian bán rã của chúng. Hoạt độ của chúng cung cấp thông tin về tiết diện và suất lượng của phản ứng. Đối với phản ứng quang hạt nhân gây bởi chùm bức xạ hãm, tỉ số suất lượng đồng phân sẽ có thể được xác định thông qua việc giải các phương trình kích hoạt, phân rã tương ứng việc tạo thành và phân rã của hạt nhân con ở trạng thái đồng phân và cơ bản ở ba giai đoạn khác nhau: (1) kích hoạt, (2) phân rã và (3) đo phổ gamma.

2.2. Xác định tỉ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân

Đối với phản ứng quang hạt nhân tạo thành cặp đồng phân, việc tạo thành cặp đồng phân và phân rã của chúng có thể được mô tả bằng hệ phương trình kích hoạt, phân rã tương ứng.

Giải hệ phương trình nói trên cho 3 giai đoạn chiếu, rã và đo với các điều kiện ban đầu, chúng ta rút ra công thức tính tỉ số đồng phân như sau:

$$IR = \left[\frac{S_g C_m \varepsilon_m I_m}{S_m C_g \varepsilon_g I_g} - \frac{\Lambda_1 \Lambda_5 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_4 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_7}{\Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_9} \right] \cdot \frac{\Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_9}{\Lambda_2 \Lambda_5 \Lambda_8} \quad (2.3)$$

Ở đây, S_i là diện tích đỉnh phổ gamma của hạt nhân ở trạng thái cơ bản hay đồng phân (với $i = m, g$), hệ số C_i bao gồm hiệu chỉnh sự tự hấp thụ, hiệu ứng trùng phùng thực và các hiệu ứng khác, ε_i là hiệu suất ghi của hệ phổ kế gamma tương ứng với năng lượng của tia gamma đặc trưng, I_i là cường độ phát xạ tia gamma; các hệ số Λ_j , $j = 1 \div 9$ là các hàm phụ thuộc vào thời gian t_i , t_c , t_m tương ứng là thời gian chiếu, phân rã và thời gian đo [6, 7, 15]:

2.3. Máy gia tốc điện tử Microtron MT-25

Trong khuôn khổ luận án, các phản ứng quang hạt nhân trên các bia mẫu nghiên cứu được gây bởi chùm photon hãm tạo thành từ máy gia tốc electron Microtron MT-25 tại Viện JINR, Dubna, Nga, có các thông số chính như sau: Năng lượng electron cực đại: 25 MeV; Khoảng năng lượng chùm electron: 4 - 25 MeV; Dòng trung bình: 20 μ A; Thời gian dòng xung: $2,2 \times 10^{-6}$ giây; Đường kính chùm tia: 5 mm; Bia hãm: W; Tấm hấp thụ sau bia hãm: Al.

2.4. Phổ kế gamma sử dụng trong nghiên cứu thực nghiệm

Trong nghiên cứu chúng tôi sử dụng phổ kế gamma với detector bán dẫn gecmani siêu tinh khiết HPGe model 2002CSL (CANBERA), thể tích 100 cm³, phân giải năng lượng 1,80 keV tại đỉnh 1332,5 keV (⁶⁰Co) kết hợp với các bộ phận điện tử chức năng như trình bày trên hình 2.5 và được kết nối với máy tính. Việc ghi nhận và xử lý phổ gamma thông qua phần mềm Genie 2000.

2.5. Phân tích phổ gamma và hiệu chỉnh số liệu thực nghiệm

Phân tích phổ gamma là xác định năng lượng và diện tích các đỉnh phổ làm cơ sở cho việc nhận diện đồng vị phóng xạ và xác định hoạt độ phóng xạ của nó. Trong thực nghiệm, năng lượng của bức xạ gamma ứng với các đỉnh hấp thụ toàn phần có thể xác định bằng việc chuẩn năng lượng. Hoạt độ phóng xạ được xác định dựa trên diện tích của các đỉnh phổ. Một số phép hiệu chỉnh nhằm nâng cao độ chính xác của kết quả thực nghiệm cũng đã được thực hiện.

2.6. Tính toán lý thuyết sử dụng kết hợp các phần mềm Talys và Geant4

2.6.1. Talys code trong tính toán tiết diện phản ứng quang hạt nhân

Phần mềm Talys được bắt đầu phát triển vào năm 1998 với mục đích để phân tích và dự đoán tiết diện của các phản ứng hạt nhân gây bởi các hạt nhẹ (gamma, neutron, proton,... cho đến ^4He) với năng lượng nằm trong khoảng từ 1 keV đến 200 MeV. Trong quá trình tính toán đã nghiên cứu sự ảnh hưởng của tham số mật độ mức và hàm lực tia gamma và lựa chọn các mô hình tính toán phù hợp.

2.6.2. Giới thiệu Geant4

Geant4 là công cụ mô phỏng Monte-Carlo được phát triển bởi cơ quan nghiên cứu hạt nhân Châu Âu (CERN) sử dụng ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng C++ , trong lĩnh vực vật lý hạt nhân, việc sử dụng Geant4 cho phép chúng ta có thể mô phỏng các thí nghiệm vật lý hạt nhân khác nhau như: Geant4 có định nghĩa toàn bộ các hạt “tham gia” trong quá trình phản ứng,...Mô phỏng quỹ đạo và các tương tác của hạt với vật chất. Geant4 cho phép người lập trình có thể viết các code mô phỏng dựa vào các lớp có sẵn của Geant4, cho phép “tương tác” với các phần mềm khác,...

2.6.3. Kết hợp TALYS và mô phỏng Monte-Carlo sử dụng Geant4

Trong luận án này, chúng tôi đã tiến hành đưa tiết diện vi phân tính toán bằng TALYS 1.8 vào Geant4, hay nói cách khác là phát triển code mô phỏng dựa vào Geant4 sử dụng tiết diện vi phân là kết quả tính toán của TALYS 1.8 để mô phỏng toàn bộ quá trình từ việc mô phỏng phổ bức xạ hãm phát ra từ máy gia tốc MT-25 tương ứng với chùm electron có năng lượng khác nhau và quá trình phản ứng quang hạt nhân. Để mô phỏng phổ bức xạ hãm là hệ quả của quá trình tương tác của chùm electron với bia hãm W trong máy gia tốc MT-25, toàn bộ quá trình tương tác điện từ giữa chùm điện tử và các hạt thứ cấp có thể tạo thành với hạt nhân bia được xét đến trong code mô phỏng Geant4. Để mô phỏng quá trình phản ứng quang hạt nhân, chúng ta có thể sử dụng lớp G4PhotoNuclearProcess có sẵn trong Geant4 hay lớp khác dựa vào mô hình G4GammaNuclearReaction.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ TÍNH THỰC NGHIỆM VÀ TÍNH LÝ THUYẾT

3.1. Cấu trúc hạt nhân tương ứng với các hạt nhân nghiên cứu

Trong chương này chúng tôi sẽ trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định tỉ số đồng phân trong các phản ứng quang hạt nhân: $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{m,g}}\text{Ag}$, $^{113}\text{In}(\gamma, 2n)^{111\text{m,g}}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$, $^{195}\text{Pt}(\gamma, p)^{194\text{m,g}}\text{Ir}$, $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ và $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$. Ngoài ra kết quả tính toán lý thuyết tỉ số đồng phân trong các phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m,g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m,g}}\text{Eu}$ sử dụng phương pháp kết hợp Talys và mô phỏng Monte - Carlo sử dụng Geant4. Các kết quả tính toán lý thuyết và so sánh với thực nghiệm sẽ được trình bày trong phần 3 của chương này.

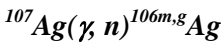
Bảng 3.1. Phản ứng quang hạt nhân tạo thành các cặp đồng phân

Phản ứng hạt nhân	Hạt nhân sản phẩm	Spin, chẵn lẻ	Thời gian bán rã
$^{107}\text{Ag}(\gamma, n)$	^{106m}Ag	6^+	8,28 ngày
	^{106g}Ag	1^+	24,0 phút
$^{113}\text{In}(\gamma, 2n)$	^{111m}In	$1/2^-$	7,6 phút
	^{111g}In	$9/2^+$	2,83 ngày
$^{113}\text{In}(\gamma, n)$	^{112m}In	4^+	20,56 phút
	^{112g}In	1^+	14,97 phút
$^{195}\text{Pt}(\gamma, p)$	^{194m}Ir	11^+	171,55 ngày
	^{194g}Ir	1^-	19,15 giờ
$^{198}\text{Pt}(\gamma, n)$	^{197m}Pt	$13/2^+$	95,4 phút
	^{197g}Pt	$1/2^-$	19,89 giờ
$^{138}\text{Ce}(\gamma, n)$	^{137m}Ce	$11/2^-$	34,4 giờ
	^{137g}Ce	$3/2^-$	9,0 giờ

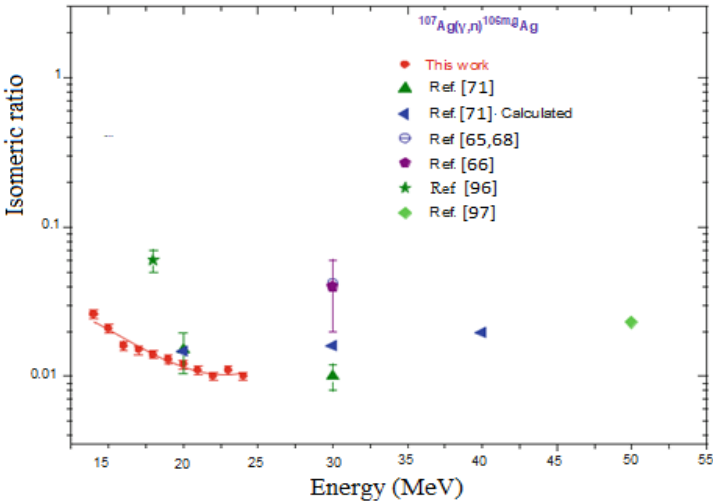
3.2. Thực nghiệm và kết quả xác định tỷ số đồng phân

Các mẫu nghiên cứu được kích hoạt trên chùm photon từ máy gia tốc MT-25 với thời gian chiếu khác nhau, được tính toán phù hợp với thời gian bán rã của các hạt nhân sản phẩm.

3.2.1. Thí nghiệm xác định tỷ số đồng phân trong quang phản ứng



Trong thí nghiệm này 11 mẫu bạc (Ag) tự nhiên có độ tinh khiết cao được sử dụng. Đặc trưng của các mẫu được trình bày chi tiết trong luận án. Các mẫu này được kích hoạt sử dụng chùm photon hãm của máy gia tốc electron Microtron MT 25 với năng lượng cực đại được thay đổi từ 14 MeV đến 24 MeV với thời gian chiếu là 60 phút, với cường độ dòng electron trung bình là 14 μA đối với $E_{\gamma\text{max}}$ từ: 14-19 MeV; 12 μA đối với $E_{\gamma\text{max}}$ từ 20 - 24 MeV. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm được trình bày trên hình 3.5.



Hình 3.5. Sự phụ thuộc của tỷ số đồng phân trong phản ứng $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106\text{m,g}}\text{Ag}$ với năng lượng cực đại chùm bức xạ hãm

Kết quả của chúng tôi cho thấy rằng tỷ số đồng phân trong phản ứng $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106\text{m,g}}\text{Ag}$ ở vùng GDR giảm khi năng lượng cực đại của chùm bức xạ hãm tăng, đạt giá trị tối thiểu ở cuối vùng này (21 MeV) và thay đổi một chút cho năng lượng cao hơn (23, 24 MeV). Điều này đúng với mong đợi từ công thức (1) như đã đề cập ở

trên. Mặt khác cũng có thể thấy rằng tỷ số đồng phân thay đổi không đáng kể trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ.

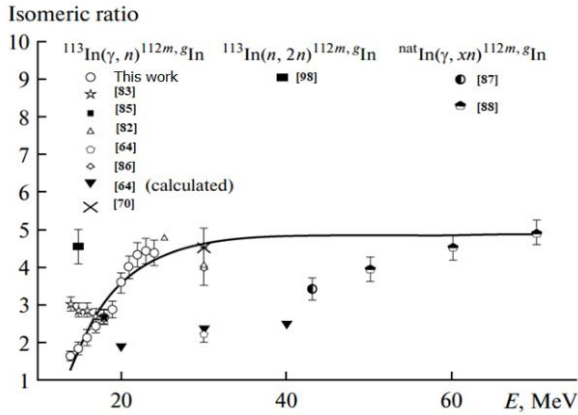
3.2.2. Thí nghiệm xác định tỷ số đồng phân trong quang phản ứng $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,g}\text{In}$ và $^{113}\text{In}(\gamma, 2n)^{111m,g}\text{In}$

Trong thí nghiệm này, 11 mẫu Indium tự nhiên có độ tinh khiết cao (99,99%) ở dạng đĩa với đường kính 1cm được chuẩn bị. Các mẫu được kích hoạt bằng chùm bức xạ hãm từ máy gia tốc Microtron MT-25 có năng lượng cực đại từ 14-25 MeV với dòng trung bình là 14-15 μA , thời gian kích hoạt cho toàn bộ các mẫu là 15 phút (chi tiết trình bày ở bảng 3.6 của luận án). Các kết quả tỷ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,g}\text{In}$ và $^{113}\text{In}(\gamma, 2n)^{111m,g}\text{In}$ được biểu diễn trên hình 3.9 và hình 3.10.

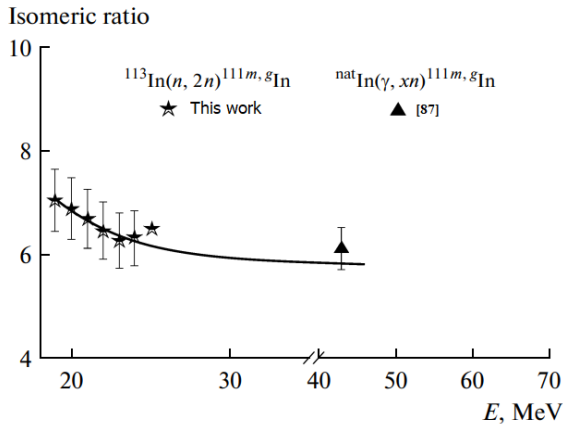
Từ các kết quả của thí nghiệm này, ta có thể thấy: cho đến nay, có rất ít số liệu về tỷ số đồng phân trong phản ứng hạt nhân của indium tự nhiên gây bởi chùm bức xạ hãm ở vùng năng lượng GDR cũng như dải năng lượng cao hơn. Đối với cặp đồng phân $^{112m,g}\text{In}$ hình thành qua phản ứng quang hạt nhân ở vùng GDR, tỷ số đồng phân tăng với sự gia tăng của năng lượng cực đại (điểm cuối), đạt giá trị tối đa ở cuối vùng này (20–21 MeV) và thay đổi không nhiều ở năng lượng cao hơn.

Đối với cặp đồng phân $^{111m,g}\text{In}$, cho đến nay chưa có số liệu thực nghiệm hay tính toán lý thuyết. Do đó, có thể khẳng định các kết quả thực nghiệm về tỷ số đồng phân $^{111m,g}\text{In}$ ở vùng GDR trong nghiên cứu của chúng tôi là các số liệu mới.

3.2.3. Thí nghiệm xác định tỷ số đồng phân trong quang phản ứng $^{195}\text{Pt}(\gamma, p)^{194m,g}\text{Ir}$ và $^{198m,g}\text{Pt}(\gamma, n)^{197}\text{Pt}$



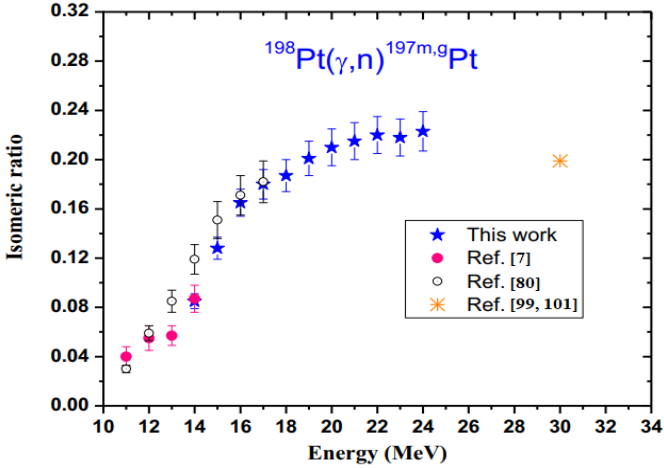
Hình 3.9. Tỷ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,g}\text{In}$



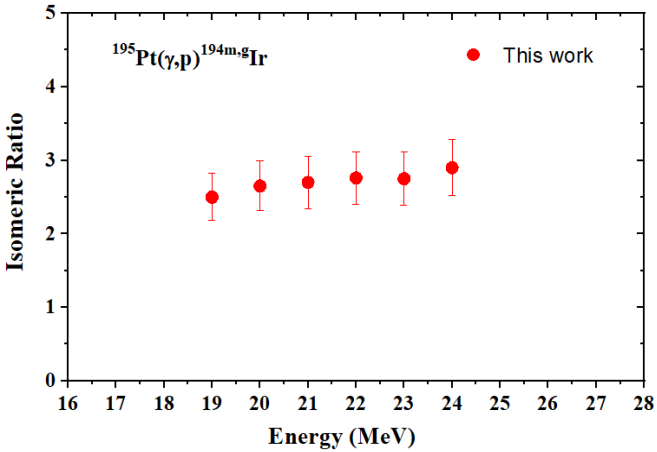
Hình 3.10. Tỷ số đồng phân quang phản ứng $^{113}\text{In}(\gamma, 2n)^{111m,g}\text{In}$

Số liệu thực nghiệm về tỷ số suất lượng tạo các cặp đồng phân $^{194m,g}\text{Ir}$ và $^{197m,g}\text{Pt}$ trong nghiên cứu này với chùm bức xạ hãm có năng lượng từ 19 đến 23 MeV cho $^{194m,g}\text{Ir}$ và từ 18 đến 24 MeV

cho $^{197m,g}\text{Pt}$ là số liệu thực nghiệm mới. Các kết quả được biểu diễn trên hình 3.12 và 3.14.



Hình 3.12. Tỷ số đồng phân của cặp đồng phân $^{197m,g}\text{Pt}$ trong phản ứng quang hạt nhân $^{198}\text{Pt}(\gamma,n)^{197m,g}\text{Pt}$



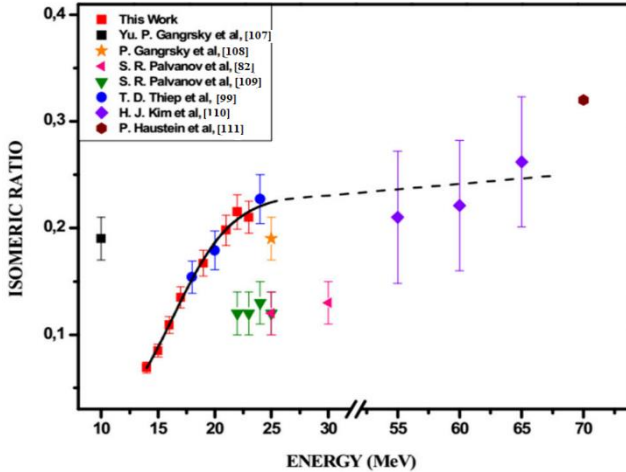
Hình 3.13. Tỷ số đồng phân trong phản ứng $^{195}\text{Pt}(\gamma,p)^{194m,g}\text{Ir}$

Từ các kết quả trên hình 3.12 và 3.13, ta có thể nhận thấy: có rất ít số liệu về tỷ số đồng phân của phản ứng $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197\text{m.g}}\text{Pt}$. Tỷ số đồng phân trong phản ứng $^{195}\text{Pt}(\gamma, p)^{194\text{m.g}}\text{Ir}$ tăng theo năng lượng bức xạ hãm tăng và hầu như không thay đổi ở cuối vùng GDR.

Điều đáng chú ý là trong phản ứng $^{195}\text{Pt}(\gamma, p)^{194\text{m.g}}\text{Ir}$, proton phải vượt qua rào cản Coulomb khoảng 14,07 MeV. Do đó, có thể thấy vai trò của các quá trình trực tiếp và quá trình tiền cân bằng trong phản ứng này là đáng kể khi tính đến hàng rào Coulomb đối với proton bật ra từ hạt nhân ^{195}Pt .

3.2.4. Thí nghiệm xác định tỷ số đồng phân trong quang phản ứng $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m.g}}\text{Ce}$

Trong thí nghiệm này, chúng tôi xác định tỷ số suất lượng tạo cặp đồng phân $^{137\text{m.g}}\text{Ce}$ bằng phản ứng quang hạt nhân $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m.g}}\text{Ce}$ với chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại từ 14 MeV đến 17 MeV với thời gian chiếu 90 phút; từ 21 đến 23 MeV và 19 MeV, thời gian chiếu 60 phút; cường độ chùm e- là $14\mu\text{A}$; đường kính mẫu 1cm, và khối lượng mẫu từ 0,8560 – 0,8586 g. Các kết quả được phân tích, thảo luận và so sánh với các số liệu đã được công bố để xem xét vai trò của năng lượng kích thích và sự khác biệt về spin của trạng thái đồng phân và trạng thái cơ bản. Hình 3.16 mô tả sự phụ thuộc IR của cặp đồng phân $^{137\text{m.g}}\text{Ce}$ vào các năng lượng cực đại trong và trên vùng GDR được lấy từ số liệu của chúng tôi và các tác giả khác. Ta có thể thấy rằng có sự không đầy đủ và khác biệt về số liệu thực nghiệm của các IR trong vùng GDR, các kết quả trong nghiên cứu này có thể xem là những số liệu mới.



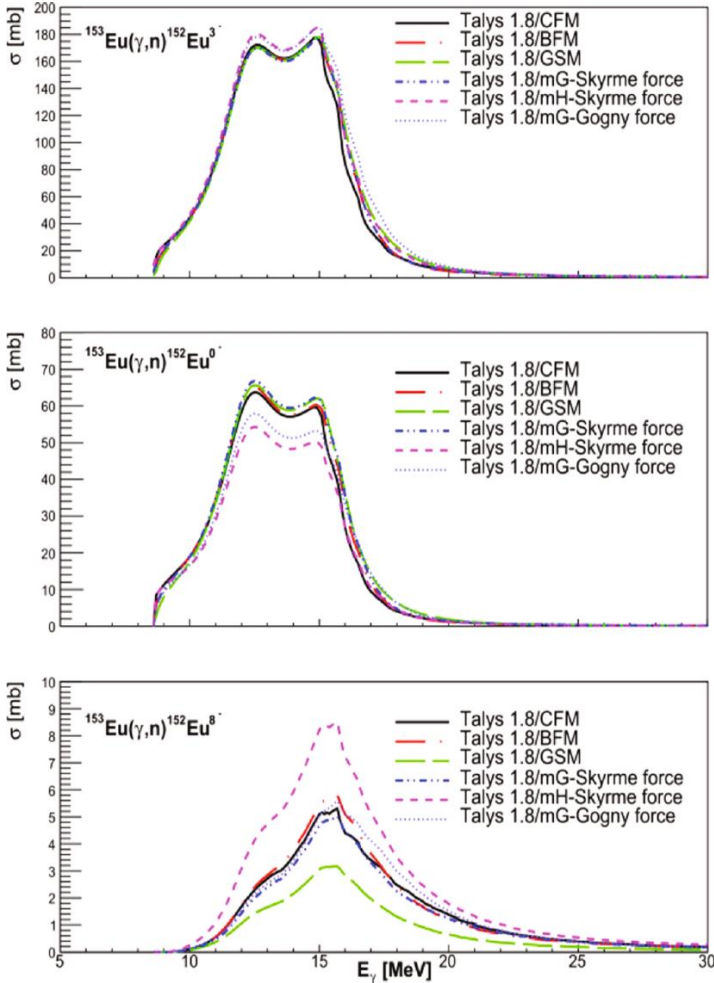
Hình 3.16. Tỷ số đồng phân trong phản ứng $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ gây bởi các chùm photon hãm có năng lượng cực đại khác nhau

Hạt nhân con ^{137}Ce của phản ứng $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ là hạt nhân chẵn - lẻ, trạng thái đồng phân và cơ bản được hình thành với các spin tương ứng là $11/2^-$ và $3/2^+$. Vùng GDR cho phản ứng hạt nhân $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ là từ khoảng 8,7 đến khoảng 23 MeV [119]. Trong thí nghiệm này, chúng tôi thu được các giá trị tỉ số đồng phân của phản ứng $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ tương ứng các mức năng lượng cực đại khác nhau của chùm bức xạ hãm từ 14-23 MeV. Các kết quả đã được so sánh với các số liệu đã công bố của các tác giả Gangrsky và cộng sự [107, 108], Palvanov cùng cộng sự [82,109] và kết quả trước đây của nhóm chúng tôi [21].

3. 3. Kết quả tính toán lý thuyết tiết diện vi phân và tỉ số đồng phân trong các phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m,g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m,g}}\text{Eu}$

Trong phần này, chúng tôi sẽ trình bày kết quả tính toán lý thuyết tiết diện vi phân sử dụng Talys và kết quả tính toán tỉ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m.g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$ sử dụng kết hợp mô phỏng phổ hãm bằng Geant4 và kết quả tính tiết diện vi phân bằng Talys. Phương pháp tính toán đã được trình bày trong chương 2. Kết quả tính toán được so sánh với số liệu thực nghiệm của chúng tôi cũng như của các tác giả khác. Trong đó, kết quả tính toán lý thuyết tiết diện vi phân sử dụng Talys 1.8 với 06 mô hình khác nhau, bao gồm: Mô hình nhiệt độ không đổi cùng với mô hình khí Fermi (CFM), Mô hình khí Fermi (BFM), Mô hình siêu chảy tổng quát (GSM), Mô hình lực Skyme-mG, Mô hình lực Skyme-mH và Mô hình lực Gogny-mH. Trên hình 3.17 là một ví dụ về hàm kích thích của phản ứng quang hạt nhân $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$ được tính toán sử dụng mô hình CFM, có thể nhận thấy rằng trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ, cơ chế phản ứng đóng góp chính là cơ chế hợp phân. Tiết diện hình thành trạng thái đồng phân và cơ bản của phản ứng $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$ được biểu diễn trên các hình 3.20.

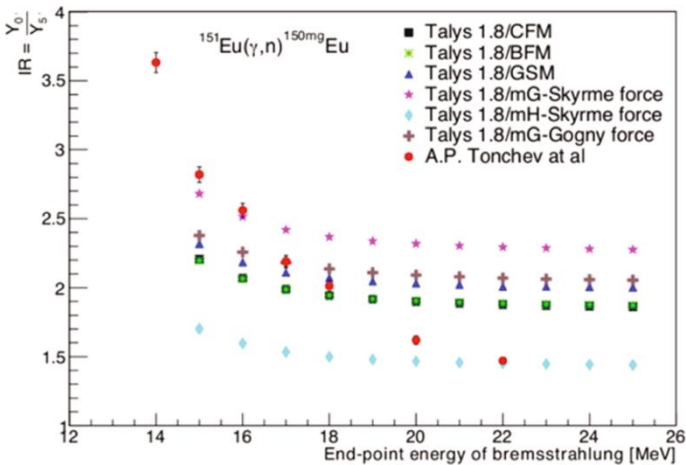
Đối với phản ứng $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$, kết quả tính toán tiết diện hình thành trạng thái $^{152\text{g}}\text{Eu}(0^-)$ sử dụng 6 mô hình khác nhau của Talys 1.8 là rất trùng hợp, trạng thái $^{152\text{m}2}\text{Eu}(3^-)$ cho kết quả khá tương đồng, tuy nhiên với trạng thái $^{152\text{m}1}\text{Eu}(8^-)$ thì có sự chênh lệch lớn giữa các kết quả khi sử dụng các mô hình khác nhau.



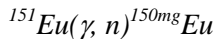
Hình 3.20. Tiết diện vi phân hình thành các trạng thái $^{152m1}\text{Eu}(8^-)$, $^{152m2}\text{Eu}(0^-)$ và $^{152g}\text{Eu}(3^-)$

Hình 3.22 biểu diễn kết quả tính tỉ số suất lượng đồng phân trong phản ứng $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150m,g}\text{Eu}$ và số liệu thực nghiệm của A. P. Tonchev và các cộng sự [4]. Chúng ta có thể thấy với phản ứng

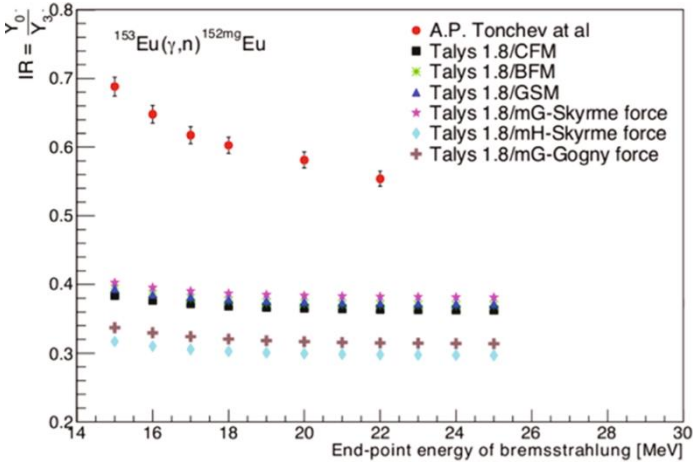
$^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m.g}}\text{Eu}$ trong vùng năng lượng thấp (<16 MeV), tính toán lý thuyết với Talys 1.8mG-Skyrme force có thể mô tả tốt số liệu thực nghiệm; với vùng năng lượng từ 17-19 MeV, Talys 1.8/CFM, Talys 1.8/BMF, Talys 1.8/GSM và Talys 1.8/mG-Gogny mô tả tốt số liệu thực nghiệm trong khi đó với vùng năng lượng từ 20 MeV đến cuối vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ, Talys 1.8/mH-Skyrme phù hợp để tính toán tỉ số đồng phân.



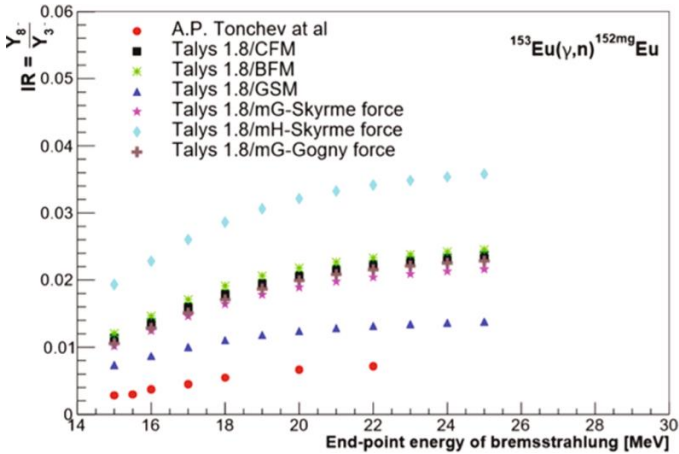
Hình 3.22. Tỉ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân



Đối với phản ứng $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m.g}}\text{Eu}$, tỉ số suất lượng đồng phân được tính toán bằng Talys 1.8 đồng thời so sánh với thực nghiệm cho các cặp $^{152\text{m}2}\text{Eu}(0^-)$ và $^{152\text{g}}\text{Eu}(3^-)$; $^{152\text{m}1}\text{Eu}(8^-)$ và $^{152\text{g}}\text{Eu}(3^-)$; $^{152\text{m}1}\text{Eu}(8^-)$ và $^{152\text{m}2}\text{Eu}(0^-)$ được trình bày trên các hình 3.23. Ở đây, các số liệu thực nghiệm được lấy trong công bố của A. P. Tonchev và các cộng sự [4] và từ kết quả thí nghiệm của chúng tôi.



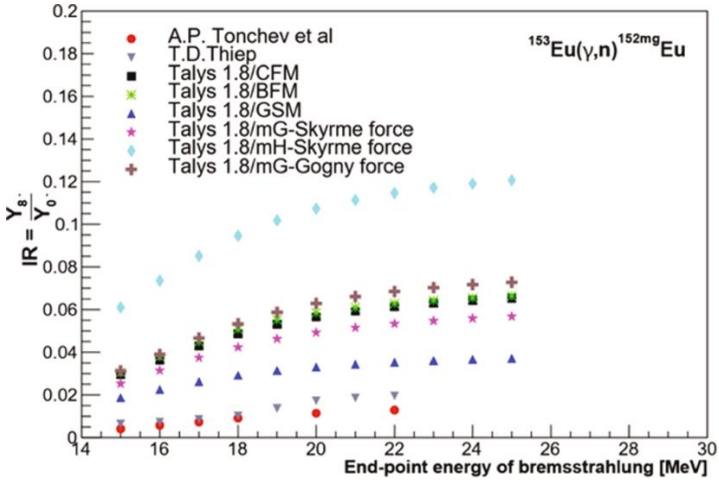
Hình 3.23. Tỷ số suất lượng tạo đồng phân $^{152m2}\text{Eu}(0^-)$ và $^{152g}\text{Eu}(3^-)$



Hình 3.24. Tỷ số suất lượng tạo cặp $^{152m1}\text{Eu}(8^-)$ và $^{152g}\text{Eu}(3^-)$

Hình 3.24 và 3.25 cho thấy Talys 1.8/GSM mô tả số liệu thực nghiệm tốt hơn các mô hình khác cho các cặp $^{152m1}\text{Eu}(8^-)$, $^{152g}\text{Eu}(3^-)$ và cặp $^{152m1}\text{Eu}(8^-)$, $^{152m2}\text{Eu}(0^-)$. Tuy nhiên, tính toán lý

thuyết mô tả tốt khuynh hướng thay đổi của tỉ số đồng phân trong các phản ứng $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150m,g}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152m,g}\text{Eu}$, có nghĩa là tỉ số suất lượng hình thành trạng thái spin cao/spin thấp tăng khi năng lượng cực đại của chùm bức xạ hãm tăng.



Hình 3.25. Tỉ số suất lượng tạo cặp $^{152m1}\text{Eu}(8^-)$ và $^{152m2}\text{Eu}(0^-)$

KẾT LUẬN

Luận án đã thực hiện được các mục tiêu và nội dung nghiên cứu đặt ra, các kết quả chính đã thu được bao gồm:

1. Tổng quan về phản ứng quang hạt nhân, cấu trúc hạt nhân và trạng thái hạt nhân đồng phân.

2. Nghiên cứu, phát triển phương pháp thực nghiệm và tính toán lý thuyết xác định tỷ số đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân trong vùng năng lượng GDR (8-30 MeV).

3. Xác định bằng thực nghiệm tỷ số đồng phân trong các phản ứng $^{113}\text{In}(\gamma, 2n)^{111\text{m,g}}\text{In}$, $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$, $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{m,g}}\text{Ag}$, $^{195}\text{Pt}(\gamma, p)^{194\text{m,g}}\text{Ir}$; $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ và $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ gây bởi chùm photon hãm năng lượng cực đại từ 14 đến 24 MeV. Thu được 11 số liệu tỷ số IR đối với $^{111\text{m,g}}\text{In}$; 6 số liệu đối với $^{112\text{m,g}}\text{In}$; 11 số liệu đối với $^{106\text{m,g}}\text{Ag}$; 6 số liệu đối với $^{194\text{m,g}}\text{Ir}$, 11 số liệu đối với $^{197\text{m,g}}\text{Pt}$ và 8 số liệu đối với $^{137\text{m,g}}\text{Ce}$.

4. Tính toán lý thuyết tiết diện vi phân và tỉ số đồng phân của các phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma, n)^{150\text{m,g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152\text{m,g}}\text{Eu}$ trong vùng năng lượng GDR.

Kết quả thu được nhiều số liệu mới về tỉ số suất lượng tạo thành các cặp hạt nhân đồng phân. Cung cấp một cách nhìn đầy đủ về khuynh hướng thay đổi của tỉ số đồng phân theo năng lượng trong vùng GDR. Các kết quả được so sánh và đánh giá với số liệu đã công bố cho thấy có sự phù hợp tốt. Đây là cơ sở khẳng định độ tin cậy của các kết quả thu được.

Bên cạnh các nghiên cứu thực nghiệm, luận án đã phát triển một cách tiếp cận mới kết hợp Talys và mô phỏng Monte-Carlo sử dụng Geant4 trong tính toán lý thuyết suất lượng hình thành trạng thái cơ bản và đồng phân, từ đó tính toán tỉ số đồng phân và so sánh

với số liệu thực nghiệm. Cách tiếp cận này cho phép mô phỏng toàn bộ quá trình phản ứng từ việc tạo phổ hãm, quá trình tương tác điện từ của bức xạ hãm với hạt nhân bia, và quá trình xảy ra phản ứng quang hạt nhân. Tiết diện vi phân của phản ứng quang hạt nhân được tính toán sử dụng Talys. Chương trình mô phỏng được phát triển bởi chúng tôi cho phép mô phỏng đồng thời phản ứng hình thành trạng thái đồng phân và cơ bản, vì vậy quá trình cạnh tranh được xem xét một cách đầy đủ trong từng sự kiện. Do đó, điều kiện tương đồng khi so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm được đảm bảo. Phương pháp của chúng tôi đã được áp dụng để tính toán tỉ số đồng phân trong các phản ứng quang hạt nhân $^{151}\text{Eu}(\gamma,n)^{150\text{m,g}}\text{Eu}$ và $^{153}\text{Eu}(\gamma,n)^{152\text{m,g}}\text{Eu}$. Có thể kết luận rằng tính toán lý thuyết sử dụng Talys kết hợp với Geant4 mô tả tốt khuynh hướng của tỉ số đồng phân thực nghiệm. Đối với phản ứng $^{151}\text{Eu}(\gamma,n)$ tạo ra hạt nhân hình cầu $^{150\text{m,g}}\text{Eu}$, kết quả tính toán lý thuyết với các mô hình khác nhau trong Talys mô tả tốt số liệu thực nghiệm về tỉ số đồng phân ở từng vùng năng lượng. Tuy nhiên trong phản ứng còn lại, hạt nhân tạo thành là hạt nhân biến dạng mạnh, số liệu tính toán lý thuyết là thấp hơn so với thực nghiệm. Như vậy, có thể nhận định rằng các mô hình lý thuyết về cấu trúc hạt nhân trong Talys cần phải được hoàn thiện thêm để có thể mô tả tốt cấu trúc của hạt nhân biến dạng ^{152}Eu .

Trong luận án này, việc phân tích cấu trúc hạt nhân tương ứng với các trạng thái đồng phân và trạng thái cơ bản đã được tiến hành. Tuy nhiên, việc phân tích, đánh giá mối tương quan giữa số liệu thực nghiệm về tỉ số đồng phân và cấu trúc hạt nhân cũng như spin hay hiệu spin giữa các trạng thái đồng phân và cơ bản chưa được tiến hành. Trong tương lai, việc phân tích, hệ thống hoá số liệu thực nghiệm về tỉ số đồng phân theo các tham số, yếu tố nói trên cần được

thực hiện. Ngoài ra, ra việc đánh giá, hệ thống hoá sự phụ thuộc của tỉ số đồng phân vào số khối của hạt nhân bia và hạt nhân tạo thành cũng cần được xem xét. Thêm vào đó, với việc phát triển thành công phương pháp tiếp cận tính toán lý thuyết nói trên, chúng tôi sẽ mở rộng tính toán suất lượng phản ứng và tỉ số đồng phân cho nhiều phản ứng quang hạt nhân khác nhau với chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ và trên vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ đồng thời so sánh với thực nghiệm từ các cơ sở dữ liệu đáng tin cậy trên thế giới để từ đó có thể có những khuyến cáo giúp cải tiến các mô hình lý thuyết trong Talys.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN CỦA NGHIÊN CỨU SINH

1. Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Nguyen The Vinh, A. G. Belov, O. D. Maslov, G. Ya. Starodub, and B. N. Markov. “*Study of the Isomeric Ratios in Photonuclear Reactions of Natural Indium Induced by Bremsstrahlungs with End-Point Energies in the Giant Dipole Resonance Region*”. Physics of Particles and Nuclei Letters, 10, 4 (2013) 340–348. DOI: 10.1134/S1547477113040134. Scopus.
2. T. D. Thiep, T.T.An, P.V.Cuong, N.T.Vinh, B. Hue, A. Belov, O. D. Maslov. “*Study of isomeric ratios in $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106m,g}\text{Ag}$ reaction of natural silver induced by bremsstrahlungs with endpoint energies in the giant dipole resonance region*”. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 299 (2014) 477-484. DOI: 10.1007/s10967-013-2727-0. ISI.
3. Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Nguyen The Vinh, A. G. Belov & O. D. Maslov. “*Study of the isomeric ratios in photonuclear reactions of natural Platinum induced by end-point bremsstrahlung energies in the giant dipole resonance region*”. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 303 (2015)1857-1864. DOI: 10.1007/ s10967-014-3701-1. ISI.
4. Tran duc Thiep, Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Nguyen The Vinh, Bui Minh Hue, A. G. Belov, O. D. Maslov, M. V. Gustova,, “*Isomeric Ratio of ^{137m}Ce to ^{137g}Ce Produced in $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137m,g}\text{Ce}$ Photonuclear Reaction Induced by End-point Bremsstrahlung Energies from 14 to 17; 21 to 23 and at 19 MeV*”. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 311 (2017) 887-892. DOI: 10.1007/s10967-016-5064-2. ISI.
5. P.V.Cuong, T.D.Thiep, L.T.Anh, T.T.An, B.M.Hue, K.T.Thanh, N.H.T and N.T.Vinh, T.T.Anh. “*Theoretical calculation by Talys code in combination with Geant4 simulation for consideration of (γ, n) reactions of Eu isotopes in the giant dipole resonance region*”. Nuclear Instr. and Methods in Physics Research B. 479 (2020) 68-73, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.06.011>. ISI.