

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Nguyễn Thị Xuân

**NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG CỦA MỘT SỐ PHẢN
ỨNG HẠT NHÂN VỚI BỨC XẠ HẮM NĂNG LƯỢNG
CỰC ĐẠI SAU CỘNG HƯỞNG LƯỠNG CỰC KHỔNG
LỒ VÀ PROTON NĂNG LƯỢNG TỚI 45 MeV**

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

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
VẬT LÝ NGUYÊN TỬ VÀ HẠT NHÂN**

Hà nội - 2023

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: GS. TS. Nguyễn Văn Đỗ

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 ..phút, ngày ... tháng ... năm 2023

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 của luận án

Phản ứng hạt nhân làm biến đổi sâu sắc hạt nhân nguyên tử và phát ra các nuclon, các loại bức xạ khác nhau mang theo những thông tin quan trọng liên quan tới hạt nhân và quá trình xảy ra phản ứng. Đo và phân tích thông tin từ các nucleon, các bức xạ đó có thể giúp mở rộng hiểu biết về các đặc trưng quan trọng của phản ứng hạt nhân và cơ chế phản ứng. Hầu hết các sản phẩm phản ứng là những đồng vị phóng xạ, có khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau bao gồm lĩnh vực năng lượng và phi năng lượng trong đó có y học phóng xạ. Hiện nay phản ứng hạt nhân đã trở thành tâm điểm nghiên cứu trong lĩnh vực khoa học công nghệ hạt nhân. Vì vậy, việc tiến hành nghiên cứu về phản ứng hạt nhân ở nước ta là rất cần thiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- Xác định một số tham số đặc trưng của phản ứng hạt nhân gây bởi bức xạ hãm có năng lượng cực đại từ 50 đến 70 MeV và bởi proton có năng lượng từ ngưỡng phản ứng tới khoảng 45 MeV. Các tham số được xác định bao gồm tiết diện, tiết diện tích phân, suất lượng phản ứng và tỷ số suất lượng các cặp đồng phân.
- So sánh kết quả thực nghiệm thu được với các kết quả thực nghiệm khác và dự đoán lý thuyết sử dụng mã TALYS để đánh giá mức độ tin cậy của kết quả thí nghiệm hiện tại cũng như ảnh hưởng của năng lượng kích thích và hiệu ứng kênh phản ứng đến các tham số đặc trưng của phản ứng tại vùng năng lượng sau cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ.
- Đóng góp các số liệu hạt nhân mới, có độ chính xác cao vào thư viện số liệu hạt nhân quốc tế.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Phương pháp kích hoạt kết hợp đo phổ gamma trễ của các đồng vị phóng xạ là sản phẩm của phản ứng hạt nhân đã được sử dụng cho các nghiên cứu của luận án này. Nội dung nghiên cứu chính của luận án:

1. Nghiên cứu xác định suất lượng của các phản ứng hạt nhân $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)^{82}\text{Sr}$, $^{83(m+g)}\text{Sr}$, ^{85m}Sr , ^{85g}Sr , ^{87m}Sr , $^{81(g+0.976m)}\text{Rb}$, ^{82m}Rb , ^{83g}Rb , $^{84(m+g)}\text{Rb}$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 55, 60 và 65 MeV.
2. Nghiên cứu xác định tỷ số suất lượng của các cặp hạt nhân đồng phân: (1) $^{137m,g}\text{Ce}$ tạo thành trong các phản ứng $^{141}\text{Pr}(\gamma, X)^{137m,g}\text{Ce}$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 50, 60 và 70 MeV; (2) $^{179m,g}\text{W}$ tạo thành trong các phản ứng $^{nat}\text{W}(\gamma, xn)^{179m,g}\text{W}$ gây bởi chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại 50, 55, 60 và 65 MeV.
3. Nghiên cứu xác định tiết diện tích phân của phản ứng quang hạt nhân: (1) $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109m,g}\text{Pd}$ và $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108m}\text{Rh}$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 70 MeV và (2) $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)^{197-x}\text{Au}$ gây bởi bức xạ hãm năng lượng cực đại 60 MeV.
4. Nghiên cứu xác định tiết diện theo năng lượng (hàm kích thích) của phản ứng hạt nhân: (1) $^{nat}\text{Pd}(p, X)^{100m,g}\text{Rh}$ trong dải năng lượng từ 21,09 tới 42,61 MeV; (2) $^{nat}\text{Zr}(p, X)^{95}\text{Zr}$, ^{95m}Nb , ^{95g}Nb trong dải năng lượng từ 10,6 tới 43,6 MeV và suất lượng đối với bia dày của các đồng vị sản phẩm ^{95}Zr , ^{95m}Nb , ^{95g}Nb .

4. Cấu trúc của luận án.

Luận án gồm phần mở đầu, phần kết luận và 04 chương nội dung. Chương 1 giới thiệu tổng quan về các đặc trưng của phản ứng hạt nhân. Chương 2 mô tả phương pháp nghiên cứu. Chương 3 trình bày các kết quả nghiên cứu với phản ứng quang hạt nhân. Chương 4 trình bày các kết quả nghiên cứu phản ứng hạt nhân gây bởi chùm proton.

CHƯƠNG I. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

1.1. Một số đặc trưng cơ bản của phản ứng hạt nhân

Phản ứng hạt nhân là quá trình tương tác giữa hạt tới và hạt nhân bia, xảy ra ở khoảng cách trong vòng bán kính hạt nhân (cỡ 10^{-15}m) mà kết quả làm biến đổi sâu sắc hạt nhân tham gia phản ứng. Xét phản ứng hạt nhân: $A(a,b)B$ (1.1)

Năng lượng trong phản ứng hạt nhân.

$$Q = E_{01} - E_{02} = [(m_a + M_A) - (m_b + M_B)].c^2 = T_2 - T_1 \quad (1.2)$$

Nếu $Q > 0$: phản ứng tỏa năng lượng; $Q < 0$: Phản ứng thu năng lượng; $Q = 0$: tán xạ đàn hồi.

Với phản ứng thu năng lượng, hạt tới cần một có một động lượng tối thiểu để phản ứng có thể xảy ra gọi là năng lượng ngưỡng:

$$(T_a)_{\min} = E_{ng} = \frac{m_a + M_A}{M_A} |Q| \quad (1.3)$$

Cơ chế của phản ứng thay đổi theo năng lượng của hạt tới. Ba cơ chế chủ yếu được sử dụng để giải thích các phản ứng hạt nhân bao gồm cơ chế hợp phần, trực tiếp và tiền cân bằng.

1.2. Tiết diện và suất lượng phản ứng hạt nhân

Tiết diện phản ứng (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/giây [3,6].

$$\sigma = \frac{N_b}{\Phi.N} \quad (1.4)$$

Tiết diện tích phân của phản ứng được định nghĩa:

$$\sigma_{\text{int}} = \int_{E_{th}}^{E_{Max}} \sigma(E) dE \quad (1.5)$$

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

Suất lượng của phản ứng là số phản ứng xảy ra trên bia trong một đơn vị thời gian. Khi thông lượng và năng lượng hạt tới không đổi, suất lượng phản ứng được xác định theo công thức:

$$Y = \eta \cdot N \cdot \sigma \cdot \Phi \quad (1.6)$$

Đối với phản ứng quang hạt nhân, suất lượng phản ứng được tính theo công thức sau [3,6, 30-41]:

$$Y = \eta N \int_{E_{th}}^{E_{max}} \sigma(E) \Phi(E) dE \quad (1.7)$$

1.3. Hạt nhân đồng phân và tỷ số suất lượng đồng phân.

Hạt nhân đồng phân là hạt nhân phóng xạ tồn tại ở trạng thái kích thích, có thời gian sống khá dài và có các đặc điểm phóng xạ khác với hạt nhân tồn tại ở trạng thái cơ bản.

Khi chùm hạt tới có năng lượng xác định, tỷ số đồng phân của cặp hạt nhân đồng phân được xác định bằng:

$$IR = \sigma_m / \sigma_g \quad (1.8)$$

Trong trường hợp phản ứng hạt nhân gây bởi bức xạ hãm [3,6]:

$$IR = Y_{spin\ cao} / Y_{spin\ thap} \quad (1.9)$$

CHƯƠNG 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu thực nghiệm đã áp dụng phương pháp kích hoạt kết hợp với đo phổ gamma trễ của các đồng vị phóng xạ tạo thành sau phản ứng. Các kết quả sẽ được so sánh với kết quả của các tác giả khác và kết quả tính lý thuyết sử dụng mã TALYS.

2.1. Nghiên cứu thực nghiệm sử dụng phương pháp kích hoạt.

2.1.1. Phương pháp kích hoạt

Nguyên lý của phương pháp kích hoạt phóng xạ là: thông qua các phản ứng hạt nhân biến các đồng vị bền thành những đồng vị phóng xạ. Đo hoạt độ của các sản phẩm phản ứng có thể xác định các thông số của hạt nhân ban đầu cũng như các đặc trưng của

phản ứng. Hoạt độ phóng xạ của sản phẩm phản ứng ghi nhận được và diện tích đỉnh quang điện của tia gamma, tương ứng với thời gian chiếu, thời gian chờ và thời gian đo lần lượt là t_i , t_w và t_m có mối liên hệ như sau [1]:

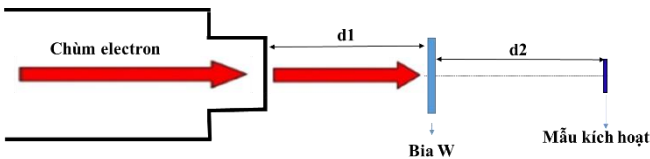
$$C_{\text{pulse}} = \frac{N_0 \Phi \sigma \epsilon I_\gamma f (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_m})}{\lambda} \quad (2.1)$$

Nếu chùm hạt/bức xạ tới có dạng xung với chu kỳ và độ rộng xung là T và τ , f là hệ số hiệu chỉnh mất số đếm.

$$C_{\text{pulse}} = \frac{N_0 \Phi \sigma \epsilon I_\gamma f (1 - e^{-\lambda \tau}) e^{-\lambda(T-\tau)} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_w} (1 - e^{-\lambda t_m})}{\lambda(1 - e^{-\lambda T})} \quad (2.2)$$

2.1.2. Kích hoạt mẫu với bức xạ hãm

Nguồn bức xạ hãm từ máy gia tốc tuyến tính electron 100 MeV tại Trung tâm Gia tốc Pohang, Hàn Quốc được sử dụng cho chiếu xạ mẫu. Chùm bức xạ hãm được phát ra bằng việc bắn chùm electron được gia tốc lên bia W có kích thước 100×100 mm, dày 0,1mm. Các mẫu tự nhiên ^{nat}Sr , ^{nat}Pr , ^{nat}W , ^{nat}Pd và ^{nat}Au có độ tinh khiết cao, có kích thước nhỏ hơn 15×15 mm và độ dày nhỏ hơn 0,1 mm được chiếu bởi các chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại trong dải 50 đến 70 MeV. Sơ đồ bố trí thí nghiệm chiếu mẫu được mô tả trên Hình 2.5.



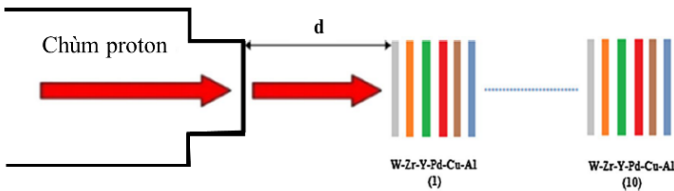
Hình 2.5. Sơ đồ bố trí thí nghiệm chiếu mẫu với chùm bức xạ hãm trên máy gia tốc electron linac 100 MeV.

Trong hầu hết các thí nghiệm thường đặt bia W cách cửa sổ thoát electron từ máy gia tốc khoảng cách $d_1 = 15$ cm và khoảng

cách từ bia W tới mẫu kích hoạt $d_2 = 12$ cm. Tùy thuộc vào mỗi thí nghiệm, dòng electron được chọn trong khoảng 25 - 35 mA, độ rộng xung của chùm tia là 1,2 μ s và tần số là 30 Hz.

2.1.3. Kích hoạt mẫu với chùm proton

Chiếu xạ với chùm proton trên mẫu Pd và Zr được tiến hành trên máy gia tốc cyclotron MC-50 tại Viện Khoa học Y học và Phóng xạ Hàn Quốc (KIRAMS). Một chồng mẫu gồm 60 lá kim loại được phân thành 10 nhóm mẫu, mỗi nhóm mẫu gồm 6 lá kim loại được sắp xếp theo thứ tự W-Zr-Y-Pd-Cu-Al và được chiếu bởi chùm proton có năng lượng ban đầu 45 MeV. Các mẫu chiếu còn có chức năng làm suy giảm năng lượng chùm proton. Các mẫu kim loại có cùng kích thước 10 \times 10 mm, được cắt từ lá kim loại do nhà sản xuất Alfa Aesar cung cấp. Sơ đồ bố trí thí nghiệm chiếu mẫu được mô tả trên Hình 2.7.



Hình 2.7. Sơ đồ bố trí thí nghiệm chiếu mẫu với chùm proton trên máy gia tốc Cyclotron MC-50 [102]

Năng lượng của chùm proton khi đến mẫu được xác định bằng SRIM-2003 [99]. Năng lượng của chùm proton khi đến các mẫu Zr đầu tiên và cuối cùng lần lượt là $43,6 \pm 0,4$ MeV; $10,6 \pm 1,3$ MeV và mẫu Pd là: $42,61 \pm 0,49$ MeV; $8,37 \pm 1,57$ MeV. Thông lượng của chùm proton khi đến mỗi mẫu được xác định qua phản ứng tham chiếu $^{nat}\text{Cu}(p,X)^{62}\text{Zn}$ và $^{nat}\text{Cu}(p,X)^{65}\text{Zn}$.

2.1.4. Đo và phân tích phổ gamma.

Phổ gamma của các mẫu sau khi chiếu xạ được đo bằng hệ phổ kế gamma với detector HPGe (model ORTEC-GEM-2018-p) đã được chuẩn năng lượng và hiệu suất ghi kết hợp với máy phân tích đa kênh PC 4K. Độ phân giải năng lượng (FWHM - Full Width Half Maximum) của hệ phổ kế là 1,8 keV tại đỉnh 1332,5 keV của ^{60}Co và hiệu suất ghi tương đối 20% so với detector nhấp nháy Na(Tl) kích thước 76 x 76 mm. Hiệu suất ghi đỉnh và hiệu suất ghi toàn phần của detector được chuẩn hóa bằng bộ nguồn chuẩn ^{241}Am (59,541 keV), ^{137}Cs (661,657 keV), ^{60}Co (1173,237 keV và 1332,501 keV), ^{152}Eu (121,8–1408 keV), ^{133}Ba (53,16 – 388,85 keV). Phổ gamma được phân tích bằng các phần mềm Gamma Vision, Fitzpeaks và Origin. Các đồng vị phóng xạ được tạo thành trong các phản ứng hạt nhân được nhận diện dựa trên chu kỳ bán rã và năng lượng bức xạ gamma đặc trưng. Tiết diện hoặc suất lượng của các phản ứng được xác định qua hoạt độ của các sản phẩm phản ứng.

2.1.5. Một số hiệu chỉnh đối với phép đo hoạt độ phóng xạ

Để nâng cao độ chính xác của các kết quả đo, một số phép hiệu chỉnh cần thiết đã được tiến hành như: hiệu chỉnh thời gian chết của hệ đo, hiệu chỉnh tự hấp thụ của tia gamma trong mẫu, hiệu chỉnh tăng giảm số đếm do trùng phùng tổng, hiệu chỉnh thăng dăng thông lượng bức xạ kích hoạt, hiệu chỉnh can nhiễu phóng xạ và một số hiệu ứng vật lý khác.

2.2. So sánh kết quả thực nghiệm với lý thuyết sử dụng mã TALYS.

Trong các nghiên cứu thuộc luận án, tiết diện của các phản ứng đều được tính lý thuyết, sử dụng mã TALYS [46-48]. Các tham số đầu vào được lấy từ thư viện RIPL-3 [45]. Trong quá trình tính toán đã xét đến ảnh hưởng của tham số mật độ mức và

hàm lực tia gamma. Để phục vụ cho tính toán, phổ bức xạ hãm được mô phỏng bằng MCNPX [49]. Đối với năng lượng chùm proton tại vị trí của từng lá kim loại trong mỗi chồng mẫu được tính bằng SRIM-2003.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỚI PHẢN ỨNG QUANG HẠT NHÂN

Chương 3 tổng hợp các kết quả nghiên cứu xác định các đặc trưng của các phản ứng quang hạt nhân với chùm bức xạ hãm năng lượng cực đại trong dải từ 50 đến 70 MeV.

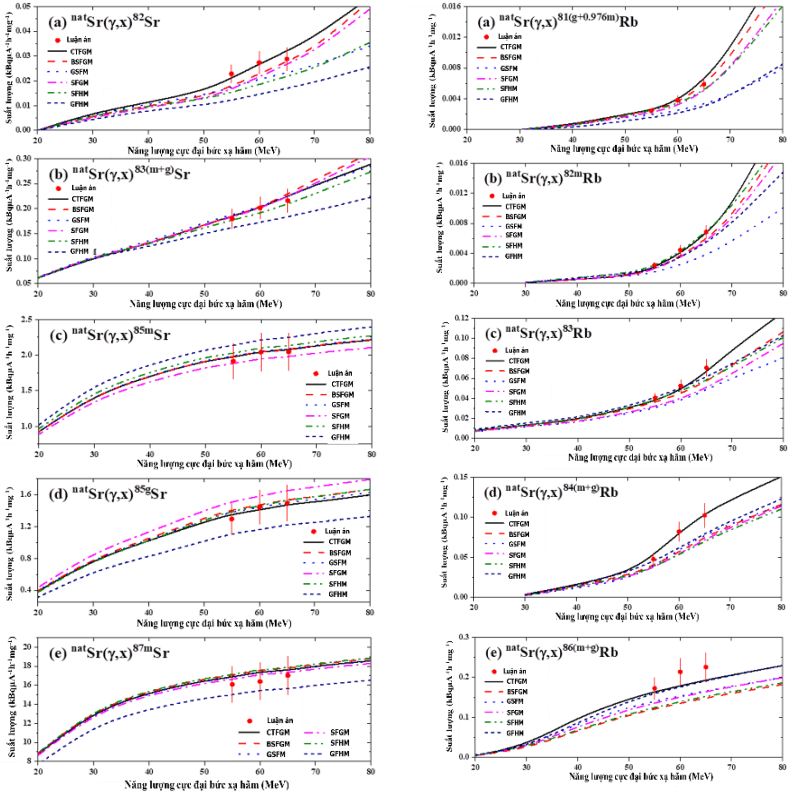
3.1. Suất lượng của các phản ứng hạt nhân $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$

Luận án đã xác định được suất lượng tạo thành các sản phẩm ^{82}Sr , $^{83(m+g)}\text{Sr}$, ^{85m}Sr , ^{85g}Sr , ^{87m}Sr , $^{81(g+0,976m)}\text{Rb}$, ^{82m}Rb , ^{83g}Rb , $^{84(m+g)}\text{Rb}$ và $^{86(m+g)}\text{Rb}$ trong các phản ứng $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$ gây bởi chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại 55, 60 và 65 MeV. Các kết quả của nghiên cứu này là những kết quả đo lần đầu tiên [51].

Bảng 3.2. Suất lượng của các sản phẩm phản ứng $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$.

Sản phẩm phản ứng	Suất lượng ($\text{kBq} \cdot \mu\text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$)		
	55 MeV	60 MeV	65 MeV
^{87m}Sr	$16,09 \pm 1,93$	$16,39 \pm 1,97$	$17,03 \pm 2,04$
^{85m}Sr	$1,92 \pm 0,25$	$2,04 \pm 0,27$	$2,05 \pm 0,27$
^{85g}Sr	$1,29 \pm 0,19$	$1,44 \pm 0,22$	$1,49 \pm 0,22$
$^{83(m+g)}\text{Sr}$	$0,18 \pm 0,02$	$0,202 \pm 0,022$	$0,22 \pm 0,02$
^{82}Sr	$0,023 \pm 0,004$	$0,027 \pm 0,005$	$0,029 \pm 0,005$
$^{86(m+g)}\text{Rb}$	$0,17 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,03$	$0,23 \pm 0,04$
$^{84(m+g)}\text{Rb}$	$0,048 \pm 0,007$	$0,082 \pm 0,012$	$0,102 \pm 0,018$
^{83g}Rb	$(40 \pm 5) \cdot 10^{-3}$	$(52 \pm 6) \cdot 10^{-3}$	$(71 \pm 8) \cdot 10^{-3}$
^{82m}Rb	$(243 \pm 35) \cdot 10^{-5}$	$(44 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	$(68 \pm 9) \cdot 10^{-4}$
$^{81(g+0,976m)}\text{Rb}$	$(241 \pm 35) \cdot 10^{-5}$	$(38 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	$(59 \pm 9) \cdot 10^{-4}$

Suất lượng của các sản phẩm phản ứng $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$ cũng được tính toán bằng TALYS-1.95 theo 06 mẫu mật độ mức khác nhau. Các kết quả tính toán được biểu diễn trên Hình 3.5 và Hình 3.6 cùng với kết quả thực nghiệm để so sánh.



Hình 3.5 - 3.6. Suất lượng đo được và tính toán sử dụng TALYS 1.95 kết hợp với mẫu mật độ mức CTFGM tạo thành các đồng vị sản phẩm trong các phản ứng $^{nat}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$ với chùm bức xạ hầm năng lượng cực đại 55, 60, 65 MeV [51].

Có thể nhận thấy sự phù hợp giữa kết quả tính toán và kết quả đo được đối với tất cả các đồng vị (ngoại trừ kết quả tính toán với mẫu mật độ mức GFHM). Các kết quả tính toán theo mẫu mật độ

mức CTFGM là phù hợp nhất với hầu hết các kết quả đo được. Trong vùng năng lượng nghiên cứu, các giá trị tính toán và đo đều thể hiện xu hướng tăng theo năng lượng cực đại của chùm bức xạ hãm. Nguyên nhân có thể là do sự xuất hiện những kênh phản ứng mới với năng lượng ngưỡng tăng dần. Với cùng một mức năng lượng cực đại của bức xạ hãm, suất lượng của các phản ứng sinh nhiều hạt giảm khi số nucleon phát ra tăng. Các đồng vị phóng xạ ^{87m}Sr , ^{85m}Sr , ^{83}Sr , $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$, ^{81}Rb là những đồng vị y tế có nhiều hứa hẹn. Do đó, ngoài việc cung cấp dữ liệu mới, nghiên cứu này còn cung cấp một phương pháp sản xuất các đồng vị y tế hữu ích từ stronti tự nhiên thông qua phản ứng quang hạt nhân.

3.2. Kết quả tỷ số suất lượng của các cặp hạt nhân đồng phân

3.2.1. Tỷ số suất lượng của cặp hạt nhân đồng phân $^{137m,g}\text{Ce}$.

Luận án đã đo tỷ số suất lượng của cặp đồng phân $^{137m,g}\text{Ce}$ được tạo thành từ các phản ứng $^{141}\text{Pr}(\gamma, X)$ gây bởi chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại 50, 60 và 70 MeV. Hoạt độ ^{137m}Ce và ^{137g}Ce được đo thông qua các tia gamma tương ứng 254,29 keV (11,1%) và 447,15 keV (1,68%). Luận án đã sử dụng phương pháp tỷ số diện tích đỉnh (PTPRR) và mối liên hệ giữa chu kỳ bán rã (DHLR) để hiệu chỉnh sự chồng chập giữa đỉnh 254,29 keV của ^{137m}Ce và 255,11 keV của ^{139}Pr [52].

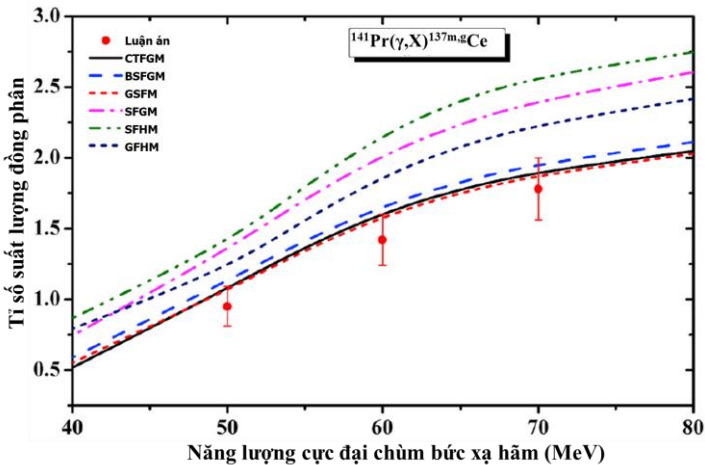
Để so sánh, luận án đã tính tiết diện tạo thành hai trạng thái ^{137m}Ce và ^{137g}Ce bằng TALYS theo 06 mẫu mật độ mức khác nhau. **Bảng 3.4** tổng hợp kết quả tỷ số suất lượng thực nghiệm và tỷ số suất lượng tính toán theo TALYS kết hợp mẫu mật độ mức mẫu khí Fermi có nhiệt độ không đổi (CTFGM). Các kết quả đo (PTPRR) và tính toán lý thuyết về tỷ số suất lượng của $^{137m,g}\text{Ce}$ được biểu diễn trên **Hình 3.11**.

Kết quả nghiên cứu cho thấy trong vùng năng lượng từ 50 đến 70 MeV, tỷ số suất lượng của cặp đồng phân $^{137m,g}\text{Ce}$ vẫn tiếp tục

xu hướng tăng theo năng lượng cực đại của chùm bức xạ hãm. Các kết quả thu được trong nghiên cứu này là những kết quả đầu tiên trong vùng năng lượng nghiên cứu.

Bảng 3.4. Tỷ số suất lượng của cặp đồng phân $^{137m,g}\text{Ce}$ được tạo ra trong phản ứng quang hạt nhân $^{141}\text{Pr}(\gamma, X)^{137m,g}\text{Ce}$ [52].

$^{141}\text{Pr}(\gamma, p3n)^{137m,g}\text{Ce}$	Năng lượng cực đại $E_{\gamma\text{max}}$ (MeV)	Tỷ số suất lượng thực nghiệm IR		Tỷ số suất lượng tính theo TALYS (CTFGM)
		(PTPRR)	(DHLR)	
	50	$0,95 \pm 0,14$	$0,96 \pm 0,15$	1,07
	60	$1,42 \pm 0,18$	$1,39 \pm 0,17$	1,61
	70	$1,78 \pm 0,22$	$1,79 \pm 0,20$	1,90



Hình 3.11. Tỷ số suất lượng đồng phân của cặp đồng phân $^{137m,g}\text{Ce}$ được tạo ra trong phản ứng quang hạt nhân $^{141}\text{Pr}(\gamma, X)^{137m,g}\text{Ce}$.

3.2.2. Tỷ số suất lượng của cặp hạt nhân đồng phân $^{179m,g}\text{W}$.

Tỷ số suất lượng của cặp đồng phân $^{179m,g}\text{W}$ được tạo thành trong các phản ứng $\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$ gây bởi bức xạ hãm năng lượng cực đại 50, 55, 60 và 65 MeV. Hoạt độ của hai đồng vị ^{179m}W và ^{179g}W lần lượt được xác định thông qua các tia gamma 221,5 keV (8,8%) và 133,9 keV (0,106%). Để thu được hoạt độ chính xác các phép hiệu chỉnh cần thiết đã được thực hiện. [Bảng 3.6](#) tổng hợp các kết quả thực nghiệm luận án thu được và các kết quả thực nghiệm tham khảo [53].

Bảng 3.6. Tỷ số suất lượng đồng phân của cặp đồng phân $^{179m,g}\text{W}$

Phản ứng	$E_{\gamma\text{max}}$ (MeV)	$IR = Y_{\text{high-spin}}/Y_{\text{low-spin}}$	
		Nghiên cứu	Tham khảo
$^{180}\text{W}(\text{n}, 2\text{n})^{179m,g}\text{W}$	13,5		2,498 [54,55]
	14,1		2,400 [54,55]
$^{180}\text{W}(\gamma, \text{n})^{179m,g}\text{W}$	20		1,45 [56]
$^{180}\text{W}(\gamma, \text{n})^{179m,g}\text{W}$	30		1,72 [56]
			$1,93 \pm 0,02$ [57]
$^{180}\text{W}(\gamma, \text{n})^{179m,g}\text{W}$	40		1,82 [56]
$\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$	50	$1,90 \pm 0,21$	
$\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$	55	$1,89 \pm 0,20$	
$\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$	60	$1,96 \pm 0,19$	
$\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$	65	$2,03 \pm 0,19$	

[Bảng 3.6](#) cho thấy trong dải năng lượng 50 đến 65 MeV tỷ số suất lượng đồng phân của $^{179m,g}\text{W}$ tạo ra trong các phản ứng $\text{natW}(\gamma, \text{xn})^{179m,g}\text{W}$ xu hướng bão hòa. Các kết quả thuộc luận án là những số liệu đầu tiên được đo trong dải năng lượng 50-65 MeV. Kết quả nghiên cứu giúp chúng ta mở rộng hiểu biết về sự phụ thuộc của tỷ số tiết diện vào năng lượng cực đại của chùm bức xạ hãm trong vùng năng lượng trên vùng GDR.

3.3. Tiết diện tích phân của các phản ứng quang hạt nhân

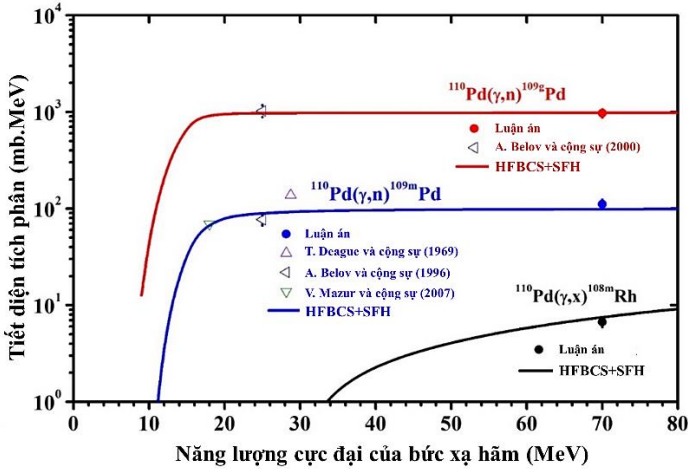
3.3.1. Tiết diện tích phân của các phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$ và $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108\text{m}}\text{Rh}$.

Tiết diện tích phân của các phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$, $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{g}}\text{Pd}$ và $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108\text{m}}\text{Rh}$ gây bởi bức xạ hãm có năng lượng cực đại 70 MeV được xác định tương đối đối với tiết diện tích phân của phản ứng tham chiếu $^{27}\text{Al}(\gamma, 2p)^{24}\text{Na}$. Hoạt độ của các đồng vị $^{109\text{m}}\text{Pd}$, $^{109\text{g}}\text{Pd}$, $^{108\text{m}}\text{Rh}$ xác định qua các tia gamma đặc trưng tương ứng 188,9 keV; 88,03 keV và 581 keV. Đây là những kết quả đo lần đầu tiên với chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại 70 MeV.

Bảng 3.8. Tiết diện thực nghiệm và tính toán của các phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$, $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{g}}\text{Pd}$ và $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108\text{m}}\text{Rh}$ [58].

Phản ứng	$E_{\gamma\text{max}}$ (MeV)	Tiết diện tích phân (mb.MeV)	
		Luận án	Tham khảo
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{m}}\text{Pd}$	70	$110,80 \pm 12,99$	-
	28,75	-	137,64 [62]
	25	-	77 ± 8 [63]
	18	-	69,36 [64]
$^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109\text{g}}\text{Pd}$	70	$970,21 \pm 96,47$	-
	25	-	1100 ± 100 [65]
$^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108\text{m}}\text{Rh}$	70	$6,70 \pm 0,79$	-

Để có kết quả so sánh, luận án sử dụng mã TALYS áp dụng 06 mẫu mật độ mức kết hợp với 08 hàm lực tia gamma để tính toán và thu được bộ 48 giá trị tiết diện tích phân cho mỗi phản ứng. So sánh chỉ ra rằng, kết quả tính theo mẫu mật độ mức SFHM kết hợp hàm lực gamma HFBCS phù hợp tốt với các kết quả đo được. Các kết quả tính toán và thực nghiệm được mô tả trên [Hình 3.19](#) [58].



Hình 3.19. Tiết diện tích phân đo được và tính toán lý thuyết của các phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109m,g}\text{Pd}$ và $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108m}\text{Rh}$ theo năng lượng cực đại của chùm bức xạ nêutron.

Hình 3.19 cho thấy hai đường cong tiết diện tích phân của các phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, n)^{109m,g}\text{Pd}$ tăng nhanh theo năng lượng từ ngưỡng phản ứng đến khoảng 20 MeV và sau đó có sự bão hòa. Xu hướng bão hòa có thể xác nhận rằng trong vùng năng lượng nghiên cứu không có đỉnh cộng hưởng khác sau đỉnh cộng hưởng thứ nhất trong vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ. Điều này cũng cho thấy, để đạt được suất lượng cực đại của đồng vị phóng xạ y tế ^{109}Pd , năng lượng cực đại thích hợp của chùm bức xạ nêutron vào khoảng 20 MeV. Đối với phản ứng $^{110}\text{Pd}(\gamma, X)^{108m}\text{Rh}$ đường cong tính toán lý thuyết chỉ ra xu hướng đang còn tiếp tục tăng khi năng lượng cực đại của bức xạ nêutron vượt qua 70 MeV. Các kết quả đo được trong nghiên cứu này là những phép đo được thực hiện lần đầu.

3.3.2. Tiết diện tích phân của các phản ứng quang neutron $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)$.

Tiết diện tích phân tạo thành các đồng vị ^{196}Au , ^{195}Au , ^{194}Au , ^{193}Au , ^{192}Au , ^{191}Au , ^{190}Au trong các phản ứng $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)$ ($x = 1-7$) được xác định bằng phương pháp kích hoạt kết hợp kỹ thuật phổ kế gamma off-line [70]. Thí nghiệm được thực hiện với chùm bức xạ hãm năng lượng cực đại 60 MeV. Tiết diện tích phân được xác định tương đối với phản ứng tham chiếu $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)^{196}\text{Au}$. Nghiên cứu các phản ứng sinh nhiều hạt $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)^{197-x}\text{Au}$ có thể cung cấp các thông tin về vai trò của năng lượng kích thích và hiệu ứng kênh phản ứng. Số liệu hạt nhân có thể được sử dụng cho cả mục đích nghiên cứu và ứng dụng, trong đó có phân tích kích hoạt.

Bảng 3.10. Tiết diện tích phân của phản ứng $^{197}\text{Au}(\gamma, xn)^{197-x}\text{Au}$ gây bởi chùm bức xạ hãm có năng lượng cực đại 60 MeV [70].

Phản ứng	Tiết diện tích phân (mb.MeV)		Số liệu tham khảo với $E_{\gamma\text{max}} =$ 67,7 MeV
	Thực nghiệm	TALYS	
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$	$2399,98 \pm 264,50$	2375,74	2280 ± 200 [75] 2213 ± 210 [74]
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	$952,65 \pm 123,84$	944,88	730 ± 180 [75] 567 ± 100 [74] $902,39 \pm 108,28^{**}$
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$232,85 \pm 25,61$	226,89	240 ± 30 [75] 181 ± 30 [74]
$^{197}\text{Au}(\gamma, 4n)^{193}\text{Au}$	$144,23 \pm 20,82$	169,81	160 ± 20 [75] 162 ± 20 [74]
$^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$	$100,16 \pm 13,01$	96,18	123 ± 10 [75] 123 ± 10 [74]
$^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$	$54,91 \pm 6,21$	62,08	63 ± 15 [75] 67 ± 15 [74]
$^{197}\text{Au}(\gamma, 7n)^{190}\text{Au}$	$5,41 \pm 0,85$	4,63	

Luận án đã thực hiện tính toán tiết diện tích phân của các phản ứng sử dụng mã TALYS 1.9 với 06 mẫu mật độ mức khác nhau. **Bảng 3.10** tổng hợp kết quả tiết diện tích phân thực nghiệm, kết quả tính toán bằng TALYS theo mẫu mật độ mức CTFGM và một số kết quả tham khảo. Giá trị (***) là tiết diện tích phân thu được bằng cách lấy tích phân các giá trị tiết diện trong thư viện tham khảo. Ta thấy kết quả tính toán lý thuyết và thực nghiệm khá phù hợp với nhau đồng thời cũng phù hợp với kết quả tham khảo. Tuy nhiên kết quả tính toán theo mẫu khí Fermi có nhiệt độ không đổi (CTFGM) là phù hợp nhất với các kết quả thực nghiệm. Các kết quả thực nghiệm và tính toán còn cho thấy các phản ứng có số lượng neutron phát ra càng nhiều thì tiết diện tích phân của phản ứng càng nhỏ.

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VỚI CHÙM PROTON

Chương 4 trình bày các kết quả nghiên cứu xác định hàm kích thích và suất lượng bia dày của một số phản ứng hạt nhân gây bởi proton có năng lượng từ ngưỡng phản ứng tới khoảng 45 MeV.

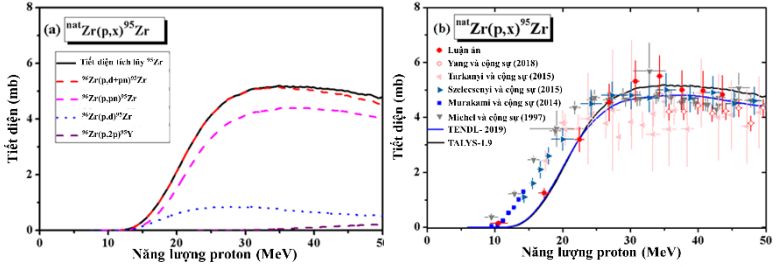
4.1. Hàm kích thích của các phản ứng $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95}\text{Zr}$, ^{95m}Nb , ^{95g}Nb .

Mục đích của nghiên cứu này là khảo sát hàm kích thích của các phản ứng các phản ứng $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95}\text{Zr}$, $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95m}\text{Nb}$ và $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95g}\text{Nb}$ [89] gây bởi chùm proton có năng lượng từ 10,6 MeV đến 43,6 MeV. Thông lượng theo năng lượng của chùm proton được xác định qua phản ứng tham chiếu $^{nat}\text{Cu}(p,X)^{62}\text{Zn}$ và $^{nat}\text{Cu}(p,X)^{65}\text{Zn}$. Sự suy giảm năng lượng của chùm proton trong chồng mẫu được xác định bằng SRIM-2003. Các kết quả thực nghiệm đo tiết diện các phản ứng được tổng hợp trong **Bảng 4.2**.

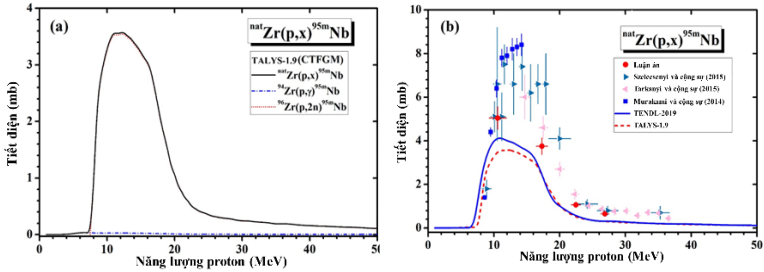
Bảng 4.2. Tiết diện đo được của các sản phẩm phóng xạ được tạo thành trong phản ứng $^{nat}\text{Zr}(p,X)$ [89].

Năng lượng proton (MeV)	Tiết diện (mb)		
	^{95}Zr	^{95m}Nb	^{95g}Nb
$43,6 \pm 0,4$	$4,83 \pm 0,70$	-	$1,63 \pm 0,23$
$40,7 \pm 0,4$	$4,96 \pm 0,72$	-	$2,05 \pm 0,28$
$37,6 \pm 0,4$	$4,99 \pm 0,72$	-	$2,19 \pm 0,32$
$34,3 \pm 0,5$	$5,50 \pm 0,76$	-	$2,45 \pm 0,34$
$30,8 \pm 0,5$	$5,31 \pm 0,76$	-	$3,06 \pm 0,40$
$26,9 \pm 0,6$	$4,54 \pm 0,68$	$0,65 \pm 0,06$	$4,41 \pm 0,63$
$22,5 \pm 0,7$	$3,19 \pm 0,44$	$1,06 \pm 0,12$	$7,97 \pm 1,10$
$17,3 \pm 0,9$	$1,24 \pm 0,18$	$3,75 \pm 0,38$	$22,39 \pm 3,15$
$10,6 \pm 1,3$	$0,15 \pm 0,02$	$5,04 \pm 0,52$	$14,48 \pm 2,05$

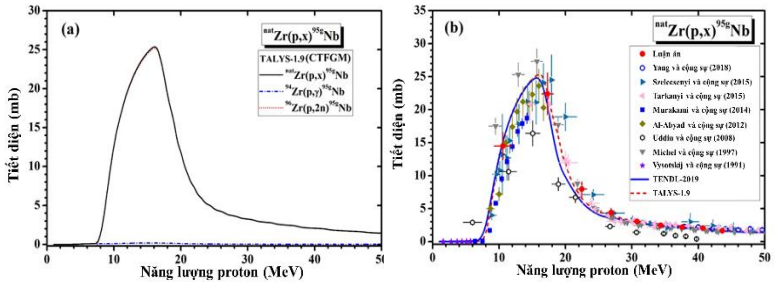
Tiết diện của các phản ứng hạt nhân $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95}\text{Zr}$, $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95m}\text{Nb}$ và $^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95g}\text{Nb}$ cũng được tính sử dụng TALYS-1.9. Trong tính toán đã thực hiện với sáu mô hình mật độ mức hạt nhân. So sánh cho thấy kết quả tính với mô hình mật độ mức CTFGM cho giá trị phù hợp tốt với hầu hết các kết quả đo. Các kết quả thực nghiệm đo được, tham khảo cũng như các kết quả tính toán theo TALYS và thư viện dữ liệu TENDL-2019 được biểu diễn trên các Hình 4.3, 4.4 và 4.5. Các dữ liệu được trình bày trong luận án này rất hữu ích trong việc thử nghiệm mô hình hạt nhân và chế tạo các đồng vị phóng xạ [89].



Hình 4.3 Tiết diện lý thuyết (a) theo TALYS 1.9 và tiết diện thực nghiệm (b) của ^{95}Zr trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,X)$.



Hình 4.4. Tiết diện lý thuyết (a) theo TALYS 1.9 và tiết diện thực nghiệm (b) của $^{95\text{m}}\text{Nb}$ trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,X)$.



Hình 4.5. Tiết diện lý thuyết (a) theo TALYS 1.9 và tiết diện thực nghiệm (b) của $^{95\text{g}}\text{Nb}$ trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,X)$

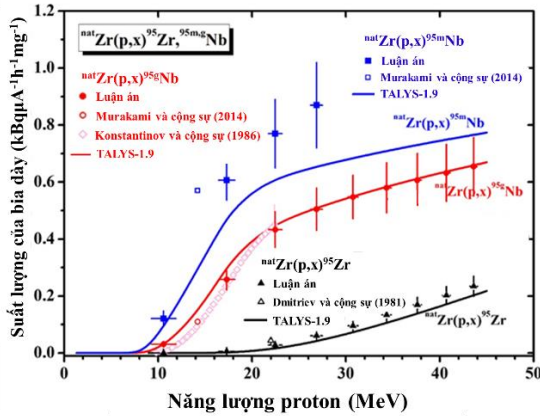
4.2. Suất lượng bia dày của ^{95}Zr , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ và $^{95\text{g}}\text{Nb}$.

Suất lượng của phản ứng trên bia dày được xác định bằng hoạt độ của sản phẩm phản ứng ở thời điểm kết thúc chiếu xạ bằng chùm hạt tới có dòng $1\mu\text{A}$ trong một giờ với giả thiết năng lượng của chùm hạt tới được hấp thụ hoàn toàn trong bia. Suất lượng của ^{95}Zr , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ và $^{95\text{g}}\text{Nb}$ từ các phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,X)$ được đo và tính toán được tổng hợp trên [Bảng 4.3](#) và biểu diễn trên [Hình 4.6](#).

Bảng 4.3. Suất lượng tạo thành các đồng vị ^{95}Zr , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ và $^{95\text{g}}\text{Nb}$ trên bia dày trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(p,X)$ [89].

Năng lượng proton (MeV)	Suất lượng ($\text{MBq} \cdot \mu\text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)		
	^{95}Zr	$^{95\text{m}}\text{Nb}$	$^{95\text{g}}\text{Nb}$
$43,6 \pm 0,4$	$0,23 \pm 0,04$	-	$0,65 \pm 0,10$
$40,7 \pm 0,4$	$0,20 \pm 0,03$	-	$0,63 \pm 0,10$
$37,6 \pm 0,4$	$0,16 \pm 0,03$	-	$0,61 \pm 0,09$
$34,3 \pm 0,5$	$0,13 \pm 0,02$	-	$0,58 \pm 0,09$
$30,8 \pm 0,5$	$0,09 \pm 0,02$	-	$0,55 \pm 0,08$
$26,9 \pm 0,6$	$0,06 \pm 0,01$	$0,87 \pm 0,15$	$0,51 \pm 0,07$
$22,5 \pm 0,7$	$0,03 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,12$	$0,43 \pm 0,06$
$17,3 \pm 0,9$	$0,006 \pm 0,001$	$0,61 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,04$
$10,6 \pm 1,3$	$(1 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	$0,12 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,01$

[Hình 4.6](#) cho thấy suất lượng thu được của các đồng vị ^{95}Zr và $^{95\text{g}}\text{Nb}$ trên bia dày tương đối phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết trong khi kết quả suất lượng trên bia dày của đồng vị $^{95\text{m}}\text{Nb}$ cao hơn các kết quả tính toán theo dự đoán lý thuyết.



Hình 4.6. Suất lượng tạo thành các đồng vị ^{95}Zr , $^{95\text{m}}\text{Nb}$ và ^{95}Nb trên bia dày trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Zr}(\text{p},\text{X})$ [89]

4.3. Hàm kích thích của các phản ứng hạt nhân $^{\text{nat}}\text{Pd}(\text{p},\text{X})^{100\text{g}}\text{Rh}$.

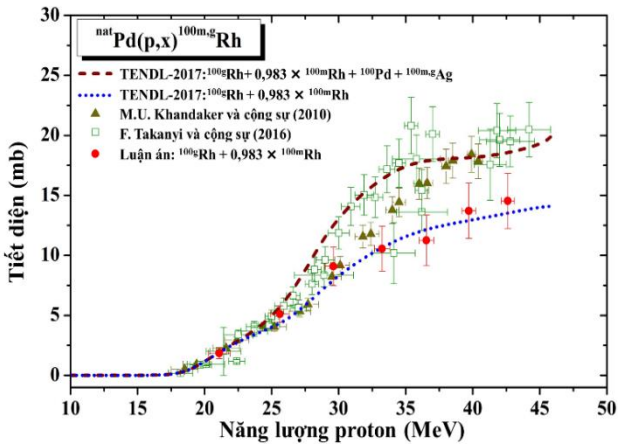
Luận án đã xác định hàm kích của hạt nhân ở trạng thái cơ bản không bền $^{100\text{g}}\text{Rh}$ tạo thành trong phản ứng $^{\text{nat}}\text{Pd}(\text{p},\text{X})^{100\text{m,g}}\text{Rh}$ gây bởi chùm proton có năng lượng từ 21,09 MeV đến 42,61 MeV [102]. Tiết diện được xác định dựa trên hoạt độ đo được của các đồng vị phóng xạ sản phẩm. Hoạt độ của đồng vị $^{100\text{g}}\text{Rh}$ được xác định qua tia gamma 539,51 keV (80,6%). Các kết quả nghiên cứu được tổng hợp trên Bảng 4.5 và biểu diễn trên Hình 4.8 để so sánh với kết quả thực nghiệm tham khảo, kết quả tính toán theo TALYS và theo thư viện dữ liệu TENDL 2017.

Để nâng cao độ chính xác, luận án đã xác định và hiệu chỉnh phần đóng góp do phần rã của các đồng vị $^{100\text{m}}\text{Ag}$, $^{100\text{g}}\text{Ag}$ và ^{100}Pd xuống $^{100\text{g}}\text{Rh}$. Hoạt độ đóng góp của $^{100\text{m}}\text{Rh}$ xuống $^{100\text{g}}\text{Rh}$ với hệ số chuyển dịch 98,3% không thể phân tách được nên hoạt độ đo được dựa trên tia gamma 539,51 keV là hoạt độ tổng cộng của $^{100\text{g}}\text{Rh}$ và 98,3% của $^{100\text{m}}\text{Rh}$ và được ký hiệu là $^{100(\text{g}+0.983\text{m})}\text{Rh}$. Từ hoạt độ đo được trên chúng ta có thể xác định tiết diện tổng cộng

tạo thành $^{100(g+0.983m)}\text{Rh}$ là $\sigma_{\text{sum}}(^{100(g+0.983m)}\text{Rh})$. Tiết diện tích lũy tạo thành ^{100}Pd là $\sigma_{\text{cum}}(^{100}\text{Pd})$.

Bảng 4.5. Tiết diện tích phân tạo thành đồng vị phóng xạ ^{100g}Rh trong các phản ứng $^{\text{nat}}\text{Pd}(p,X)$ [102].

Năng lượng proton (MeV) ⁽¹⁾	Tiết diện phản ứng (mb)			
	Thực nghiệm $\sigma_{\text{sum}}(\text{Rh})$ ⁽²⁾	TENDL-2017 $\sigma_{\text{sum}}(\text{Rh})$ ⁽³⁾	Thực nghiệm $\sigma_{\text{cum}}(\text{Pd})$ ⁽⁴⁾	TENDL-2017 $\sigma_{\text{cum}}(\text{Pd})$ ⁽⁵⁾
15,72±1,00	-	-	-	-
21,09±0,81	1,85 ± 0,46	1,95	-	0,004
25,61±0,69	5,11±0,68	4,24	0,44 ± 0,11	1,23
29,60±0,65	9,59±1,51	8,08	1,92 ± 0,38	4,77
33,23±0,57	10,56±2,16	11,23	4,09 ± 0,61	6,28
36,54±0,54	11,25±2,53	12,31	5,22 ± 0,73	5,94
39,70±0,51	13,71±2,62	12,87	4,66 ± 0,65	5,03
42,61±0,49	14,54±2,53	13,64	3,96±10,55	4,31



Hình 4.8. Hàm kích thích tích lũy của các phản ứng hạt nhân $^{\text{nat}}\text{Pd}(p,X)^{100m,g}\text{Rh}$

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bản luận án trình bày các kết quả nghiên cứu về phản ứng hạt nhân gây bởi bức xạ hãm có năng lượng cực đại trong vùng sau cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ (50-70 MeV) và proton năng lượng trong dải từ ngưỡng phản ứng tới khoảng 45 MeV nhằm xác định các tham số đặc trưng như tiết diện và suất lượng của phản ứng. Các kết quả chính của luận án bao gồm:

- 1.1. Đã xác định được suất lượng của 10 sản phẩm tạo thành trong các phản ứng ${}^{\text{nat}}\text{Sr}(\gamma, xnyp)$ với chùm bức xạ hãm năng lượng cực đại 55, 60 và 65 MeV [51]. Đây là những kết quả đo lần đầu tiên.
- 1.2. Lần đầu tiên xác định và công bố tỷ số suất lượng của trạng thái spin cao đối với trạng thái spin thấp của các cặp đồng phân: (1) ${}^{137\text{m,g}}\text{Ce}$ tạo thành từ phản ứng hạt nhân ${}^{141}\text{Pr}(\gamma, X)$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 50, 60 và 70 MeV [52]; (2) cặp hạt nhân đồng phân ${}^{179\text{m,g}}\text{W}$ tạo thành từ phản ứng hạt nhân ${}^{\text{nat}}\text{W}(\gamma, xn)$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 50, 55, 60 và 65 MeV [53]. Đây là những kết quả đầu tiên được công bố.
- 1.3. Đã thu được kết quả nghiên cứu về tiết diện tích phân của các phản ứng: (1) ${}^{110}\text{Pd}(\gamma, n){}^{109\text{m}}\text{Pd}$, ${}^{110}\text{Pd}(\gamma, n){}^{109\text{g}}\text{Pd}$ và ${}^{110}\text{Pd}(\gamma, X){}^{108\text{m}}\text{Rh}$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 70 MeV [58], (2) ${}^{197}\text{Au}(\gamma, xn){}^{197-x}\text{Au}$ với bức xạ hãm năng lượng cực đại 60 MeV [70].
- 1.4. Đã xác định bằng thực nghiệm, tính lý thuyết hàm kích thích của các phản ứng hạt nhân ${}^{\text{nat}}\text{Zr}(p, X){}^{95}\text{Zr}$, ${}^{95\text{m}}\text{Nb}$, ${}^{95\text{g}}\text{Nb}$ với proton trong dải năng lượng từ 10,6 tới 43,6 MeV [89] và ${}^{\text{nat}}\text{Pd}(p, X){}^{100\text{m,g}}\text{Rh}$ với proton trong dải năng lượng từ 21,09 tới 42,61 MeV [102].
- 1.5. Đã xác định thực nghiệm và tính toán lý thuyết suất lượng của ${}^{95}\text{Zr}$, ${}^{95\text{m}}\text{Nb}$ và ${}^{95\text{g}}\text{Nb}$ tạo thành từ các phản ứng hạt nhân

$^{nat}\text{Zr}(p,X)^{95}\text{Zr}$, ^{95m}Nb , ^{95g}Nb trong dải năng lượng từ 10,6 đến 43,6 MeV đối với bia dày ^{nat}Zr [89].

Các kết quả thực nghiệm được so sánh với tính toán lý thuyết theo mã TALYS, có tính đến sáu mô hình mật độ mức hạt nhân và tám hàm cường lực gamma. Luận án đã thu được và đóng góp cho thư viện số liệu hạt nhân Quốc tế trên 100 số liệu hạt nhân, trong đó hầu hết là số liệu mới, có độ chính xác cao, có thể sử dụng làm cơ sở để kiểm định độ tin cậy của các mô hình lý thuyết. Một số đồng vị phóng xạ còn có tiềm năng sử dụng trong lĩnh vực y học phóng xạ. Các kết quả nghiên cứu đã được công bố trên 07 bài báo khoa học.

Dựa trên phân tích các dữ liệu phản ứng quang hạt nhân giúp hiểu biết về vai trò của năng lượng kích thích đối với cơ chế phản ứng. Trong dải năng lượng sau vùng cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ, vai trò của các cơ chế trực tiếp và tiền cân bằng tăng lên bên cạnh cơ chế phản ứng hợp phần.

Có thể thấy, trong dải năng lượng sau cộng hưởng lưỡng cực khổng lồ, các cơ chế phản ứng phức tạp hơn, nhưng dữ liệu hạt nhân cần thiết cho phân tích là không nhiều nên cần có thêm nhiều dữ liệu mới. Tác giả mong muốn được tiếp tục nghiên cứu phản ứng hạt nhân sử dụng các hạt/bức xạ năng lượng trung bình và năng lượng cao, kết hợp với tính toán lý thuyết để khảo sát các phản ứng hạt nhân, đặc biệt là phản ứng sinh nhiều hạt ($\gamma, xnyp$) và $(p, xnyp)$, đồng thời cung cấp những dữ liệu mới cho nghiên cứu và ứng dụng.

CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC LIÊN QUAN ĐẾN NỘI DUNG LUẬN ÁN

1. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Xuan, K.T. Thanh, N.T. Hien, G. Kim. *Multiparticle $^{nat}Sr(\gamma, xnyp)$ reactions induced with bremsstrahlung end-point energies of 55, 60, and 65 MeV.* Chinese Physics C, 2022, 46(9), 094003.
2. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Xuan, P.D. Khue, N.T. Hien, G. Kim, M.H. Cho. *Measurement of yield ratios for the isomeric pair $^{137m,g}Ce$ in the $^{141}Pr(\gamma, X)^{137m,g}Ce$ reaction induced with 50-, 60-, and 70 MeV bremsstrahlung end-point energies.* Radiat. Phys. Chem, 2020, 176, 109016
3. N.V. Do, P.D. Khue, N.T. Xuan, B.V. Loat, N.T. Hien, G. Kim. *Yield ratios of the isomeric pair $^{179m,g}W$ produced in the $^{nat}W(\gamma, xn)^{179m,g}W$ reactions with 50-65 MeV Bremsstrahlung.* Commun. Phys, 2017, 27(3), 181-191.
4. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Xuan, K.T. Thanh, B.V. Loat, N.T. Hien, G. Kim. *Measurement of the integrated cross section of $^{110}Pd(\gamma, n)^{109m}Pd$, $^{110}Pd(\gamma, n)^{109g}Pd$, and $^{110}Pd(\gamma, X)^{108m}Rh$ reactions with 70 MeV bremsstrahlung.* Radiat. Phys. Chem, 2023, 203A, 110598.
5. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Xuan, P.D. Khue, K.T. Thanh, B.V. Loat, N.T. Hien, G. Kim. *Integrated cross sections of the photo-neutron reactions induced on ^{197}Au with 60 MeV bremsstrahlung.* Communi. Phys, 2020, 30, 49-60.
6. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Hien, G. Kim, N.T. Xuan, K.T. Thanh. *Excitation functions and thick target yields of the $^{nat}Zr(p, X)^{95}Zr$, ^{95m}Nb , ^{95g}Nb reactions.* Eur. Phys. J. A, 2020, 56, 194.
7. N.V. Do, N.T. Luan, N.T. Xuan, N.T. Hien, G. Kim, K. Kim. *Measurement of cross sections for the formation of ^{100g}Rh in $^{nat}Pd(p, X)^{100m,g}Rh$ reactions up to 42,61 MeV.* J. Radioanal. Nucl. Chem, 2019, 321, 117-123.