BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

**BÙI MINH HUỆ** 

# NGHIÊN CỨU TỶ SỐ ĐỒNG PHÂN VÀ CÁC HIỆU ỨNG LIÊN QUAN TRONG PHẢN ỨNG QUANG HẠT NHÂN VÀ PHẢN ỨNG BẮT NEUTRON

Chuyên ngành: Vật lý Nguyên tử và Hạt nhân Mã số: 9440106

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

Hà Nội – 2022

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: GS. TS. Trần Đức Thiệp Người hướng dẫn khoa học 2: TS. Sergey Mikhailovich Lukyanov
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 202
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

Nghiên cứu cấu trúc hat nhân là một trong những lĩnh vực quan trong nhất của Vật lý Hạt nhận. Các thông tin về cấu trúc hạt nhận nhân được từ hai nguồn cơ bản là phân rã phóng xa của hat nhân và phản ứng hạt nhân. Nguồn thứ hai mang tính tổng hợp hơn, bao gồm một phạm vi lớn các hạt nhân và phổ các trạng thái kích thích của chúng. Những sản phẩm sau phản ứng, các loại bức xạ phát ra mang theo những thông tin quan trọng liên quan tới các đặc trưng của hạt nhân và các quá trình xảy ra phản ứng. Ghi, đo và phân tích những thông tin đó giúp chúng ta nhận biết về cấu trúc hạt nhân và các tính chất của hạt nhân, về nguồn gốc của năng lượng hạt nhân và các đồng vi phóng xa cũng như khả năng ứng dung của chúng. Trong phản ứng hat nhân có thể xảy ra các quá trình khác nhau như quá trình hợp phần, tiền cân bằng và trực tiếp phụ thuộc vào loại hat đan, bia và năng lương của hat tới. Sau phản ứng hat nhân, hat nhân dư có thể tồn tại ở trang thái đồng phân hoặc trang thái cơ bản. Trang thái đồng phân (đồng phân hat nhân) là trang thái kích thích giả bền của hat nhân có thời gian phân rã lớn hơn so với trang thái kích thích thông thường. Đồng phân có thời gian sống từ ns tới hàng triệu năm. Trong những thập kỷ gần đây, với sự phát triển nhanh của các cơ sở sản xuất chùm đồng vị phóng xạ cùng với những kỹ thuật và hệ thiết bị ghi nhận thực nghiệm hiện đại, tiên tiến dẫn tới những nghiên cứu đáng chú ý về đồng phân hạt nhân. Ngày nay, các nhóm nghiên cứu không ngừng phát hiện thêm nhiều đồng phân mới của các hạt nhân nằm trên những vùng hạt nhân khác nhau. Đồng phân hat nhân có thể được sử dụng trong nghiên cứu cơ bản và ứng dụng, đặc biệt là nghiên cứu các cấu trúc và tính chất của các hạt nhân la nằm xa đường bền hoặc sử dung trong nhiều ứng dung thiết yếu như y học hạt nhân, pin hạt nhân, đồng hồ hạt nhân, lazer gamma...

Ngoài hướng nghiên cứu về đồng phân thì tỷ số xác xuất hình thành trạng thái đồng phân và trạng thái cơ bản không bền hay còn gọi là tỷ số đồng phân cũng cung cấp những thông tin giá trị về cấu trúc và cơ chế hạt nhân liên quan. Trong thực nghiệm, tỷ số đồng phân (IR) có thể thu được với đô chính xác cao do cặp đồng phân được tạo thành đồng thời trong cùng một điều kiên phản ứng. Tuy nhiên, dữ liêu về tỷ số đồng phân còn chưa đầy đủ và có những sư sai lệch lớn giữa các kết quả thực nghiệm. Tỷ số đồng phân liên quan trực tiếp tới cấu trúc và mật độ mức của hạt nhân kích thích, cơ chế phản ứng và nhiều đặc tính khác. Do đó, tỷ số đồng phân có thể là những dữ liệu quý giá để kiểm định các mẫu phản ứng hạt nhân khác nhau. Gần đây, mã TALYS được sử dụng thường xuyên nhất để mô phỏng các phản ứng hat nhân và tính toán tiết diện cũng như tỷ số đồng phân. TALYS rất dễ sử dụng và có tính linh động cao, nó chứa các mẫu phản ứng hat nhân mới nhất hiện nay. Tuy nhiện, mã này chỉ có thể tính tiết diện vi phân với chùm hat đan đơn năng. Trong các thí nghiêm phản ứng quang hat nhân thì do thiếu nguồn cung các chùm photon đơn năng nên nguồn bức xa hãm thường xuyên được sử dụng. Do đó, để tính IR theo các mẫu lý thuyết trong trường hợp này, TALYS thường được kết hợp với mã mô phỏng bức xạ hãm. GEANT4 là một công cụ miễn phí, mã nguồn mở có thể mô phỏng phổ bức xa hãm dựa trên phương pháp Monte-Carlo.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Luận án này bao gồm những mục tiêu chính sau:

- Xác định tỷ số đồng phân thực nghiệm của một số hạt nhân trung bình và nặng hình dạng cầu hoặc biến dạng trong phản ứng  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  tương ứng gây bởi bức xạ hãm và nơtron nhiệt-trên nhiệt.
- Xem xét một vài hiệu ứng ảnh hưởng tới tỷ số đồng phân như năng lượng kích thích, sự sai khác về spin, sự truyền mô men xung lượng, cấu hình nucleon và hiệu ứng kênh.
- Tính toán tỷ số đồng phân theo lý thuyết trong phản ứng ( $\gamma$ , n) bằng việc sử dụng mã TALYS 1.95 và công cụ GEANT4 để so sánh với các kết quả thực nghiệm của chúng tôi và của các tác giả khác.

• Đóng góp các kết quả thực nghiệm với độ chính xác cao vào ngân hàng dữ liệu hạt nhân để sử dụng cho các nghiên cứu cơ bản và ứng dụng hạt nhân.

# 3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

- Nghiên cứu các phản ứng quang hạt nhân và phản ứng bắt nơtron bằng phương pháp kích hoạt hạt nhân và đo phổ gamma off-line. Nguồn photon hãm và nơtron được tạo ra từ việc sử dụng máy gia tốc điện tử MT-25 của phòng thí nghiệm phản ứng hạt nhân Flerov (FLNR), JINR, Dubna, Nga.
- Nghiên cứu IR và một số hiệu ứng liên quan trong phản ứng  $(\gamma, \mathbf{n})$  với bức xạ hãm có năng lượng cực đại trong vùng cộng hưởng khổng lồ trên các bia Eu, Hg, Cd, Ce, Se, và Pd. Và nghiên cứu IR trong phản ứng bắt nơtron nhiệt và trên nhiệt  $(\mathbf{n}, \gamma)$  trên bia Pd, Cd, Ce và Se.
- Sử dụng mã TALYS 1.95 với sự thay đổi của sáu mẫu mật độ mức và tám hàm lực gamma kết hợp với công cụ GEANT4 để tính toán tỷ số đồng phân trong phản ứng  $(\gamma,n)$  và so sánh với các kết quả thực nghiệm.

# 4. Cấu trúc của luận án

Bố cục của luận án như sau:

**Chương 1** sơ lược về đồng phân hạt nhân, tỷ số đồng phân và các hiệu ứng liên quan. Chương này cũng tóm tắt phản ứng quang hạt nhân và phản ứng bắt nơtron. Ngoài ra, chương trình tính toán, mô phỏng phản ứng hạt nhân TALYS và GEANT4 cũng được giới thiệu trong chương này.

**Chương 2** trình bày và giải thích phương pháp thực nghiệm và tính toán lý thuyết. Các hiệu chỉnh cần thiết để thu được các kết quả với độ chình xác cao hơn cũng được trình bày trong chương này.

**Chương 3** trình bày và thảo luận các kết quả thực nghiệm và lý thuyết. Các kết quả được so sánh với các kết quả khác.

Cuối cùng, các kết luận và kiến nghị được đưa ra.

# Chương 1: Tổng quan

### 1.1 Đồng phân hạt nhân và tỷ số đồng phân

#### 1.1.1 Đồng phân hạt nhân

Năm 1917, đồng phân hạt nhân đã được dự đoán bởi Soddy. Tới năm 1921, lần đầu tiên Otto Hahn đã quan sát hiện tượng đồng phân trong muối Uran bằng thực nghiệm. 15 năm sau, Weizsaker đã giải thích hiện tượng đồng phân do sự cản trở trong phân rã gamma liên quan tới sự thay đổi mô men góc lớn, đặc biệt khi kết hợp với năng lượng dịch chuyển nhỏ dẫn tới tốc độ dịch chuyển điện từ thấp hay thời gian sống dài của đồng phân. Phiên bản NUBASE 2020 đã liệt kê 1938 trạng thái đồng phân  $(T_{1/2} \ge 100ns)$ , trong khi đó phiên bản mới nhất "Atlas of Nuclear Isomers" đã liệt kê khoảng 2623 đồng phân  $(T_{1/2} \ge 10ns)$  [1].

Dựa trên cơ chế cản trở phân rã, đồng phân được chia thành 5 loại [2]: (1) đồng phân spin trong hạt nhân cầu, (2) đồng phân seniority trong hạt nhân bán magic, (3) K-đồng phân trong hạt nhân biến dạng đối xứng trục, (4) đồng phân phân hạch trong hạt nhân nặng và (5) đồng phân hình trong hạt nhân có sự đồng tồn tại hình dạng hạt nhân.

#### 1.1.2 Tỷ số đồng phân

Tỷ số đồng phân là tỷ số giữa xác suất hình thành trạng thái đồng phân và xác suất hình thành trạng thái cơ bản không bền. Trong tính toán tỷ số này được tính thông qua tỷ số tiết diện tạo thành trạng thái đồng phân ( $\sigma_m$ ) và trạng thái cơ bản không bền ( $\sigma_g$ ) trong trường hợp hạt tới có phổ đơn năng ( $IR = \sigma_m/\sigma_g$ ). Còn trong trường hợp hạt tới có phổ liên tục thì tỷ số này được xác định như tỷ số suất lượng ( $Y_m/Y_g$ ) [3]. Trạng thái đồng phân và trạng thái cơ bản khác nhau về spin, nên tỷ số đồng phân còn thường được biểu diễn như là tỷ số tiết diện hoặc suất lượng để tạo thành trạng thái có spin cao và trạng thái có spin thấp ( $IR = \sigma_h/\sigma_l$  or  $Y_h/Y_l$ ). Trong trường hợp của phản ứng quang hạt nhân gây bởi bức xạ hãm thì tỷ số đồng phân được tính theo công thức:

$$IR = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{N_0 \int_{E_{th}}^{E_{\gamma}^m} \sigma_m(E)\phi(E)dE}{N_0 \int_{E_{th}}^{E_{\gamma}^g} \sigma_g(E)\phi(E)dE}$$
(1)

với  $E_{\gamma}^m$  - năng lượng cực đại của bức xạ hãm,  $\phi(E)$  – thông lượng bức xạ hãm,  $N_0$  - số hạt nhân bia;  $\sigma_m(E)$  and  $\sigma_g(E)$  - tiết diện trạng thái đồng phân và cơ bản;  $E_{th}^m$  and  $E_{th}^g$  - năng lượng ngưỡng của trạng thái đồng phân và cơ bản.

Trong trường hợp của phản ứng bắt nơtron thì tỷ số đồng phân cũng được tính theo tỷ số suất lượng.

Một số hiệu ứng có thể ảnh hưởng tới tỷ số đồng phân như: loại hạt tới, năng lượng kích thích, xung lượng, spin của trạng thái isomer, hiệu spin, cấu hình nucleon và hiệu ứng kênh phản ứng.

Trong những năm 60 của thế kỷ trước, Huizenga và Vandebosch đã đưa ra những tính toán tỷ số đồng phân dựa trên các mẫu lý thuyết đầu tiên [4]. Hiện tại, một số mã đã được phát triển và sử dụng để tính toán tỷ số đồng phân dựa trên các mẫu hạt nhân. TALYS là một mã được sử dụng thường xuyên nhất để tính toán tiết diện và tỷ số đồng phân [5]. Mã bao gồm các mẫu phản ứng hạt nhân khác nhau, được mô tả trong hình. 1.

Bởi vì các phản ứng quang hạt nhân chủ yếu gây bởi bức xạ hãm nên để tính toán tỷ số đồng phân trong trường hợp này thì mã TALYS thường kết hợp với phổ bức xạ hãm thu được từ công cụ mô phỏng GEANT4 [6].

#### 1.2 Phản ứng quang hạt nhân

Phản ứng quang hạt nhân là quá trình tương tác điện từ của photon với hạt nhân [7]. Và loại phản ứng này phụ thuộc mạnh vào năng lượng của chùm photon tới và số khối của hạt nhân bia. Tùy theo năng lượng photon tới, phản ứng quang hạt nhân phát xạ nơtron, proton hoặc các loại hạt khác tương ứng với nhiều loại phản ứng khác nhau. Nếu năng lượng photon cao hơn ngưỡng phát hạt và lên tới 30 MeV đối với hầu hết các hạt nhân nặng và trung bình thì tiết diện phản ứng xuất hiện một đỉnh dạng Gauss có độ rộng nửa cực



Hình 1: Các mẫu hạt nhân trong TALYS

đại lớn hay còn gọi là đỉnh cộng hưởng lưỡng lực khổng lồ (GDR). Trong miền GDR, xác suất phát 1 nơtron là cao nhất so với phát nhiều hạt nơtron, proton hoặc hạt tích điện.

Luận án này nghiên cứu tỷ số đồng phân trong phản ứng  $(\gamma, n)$ đối với hạt nhân nặng dạng cầu hoặc biến dạng gây bởi bức xạ hãm với năng lượng cực đại trong vùng cộng hưởng khổng lồ. Lý do thứ nhất là trong vùng này tương tác điện từ đã biết rất rõ và việc hấp thụ photon lưỡng cực điện (E1) chiếm ưu thế. Cụ thể, hạt nhân bia có spin J<sub>0</sub> sau khi hấp thụ photon E1 sẽ bị kích thích lên trạng thái với spin J<sub>0</sub>, J<sub>0</sub> ± 1 vì vậy việc xem xét lý thuyết được đơn giản hơn. Lý do tiếp theo là dù tiết diện phản ứng quang hạt nhân rất thấp, nhưng bức xạ hãm tạo ra từ các máy gia tốc điện tử là một nguồn photon cường độ rất lớn, đồng thời tiết diện phản ứng có cực đại với độ rộng lớn dẫn đến suất lượng của phản ứng đủ lớn để các kết quả thực nghiệm thu được với độ chính xác cao. Lý do cuối cùng là nghiên cứu tỷ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân có sự khác biệt đáng kể so với các phản ứng gây bởi các hạt đạn khác.

# 1.3 Phản ứng bắt notron

Trong nghiên cứu phản ứng hạt nhân và ứng dụng thì nơtron là một trong những loại bức xạ được sử dụng phổ biến nhất. Các phản ứng hạt nhân xảy ra do tương tác của nơtron với hạt nhân nguyên tử với xác suất khác nhau ngay trên một đồng vị và phụ thuộc vào năng lượng của nơtron tới [8]. Đối với các hạt nhân không thể phân hạch thì phản ứng duy nhất có thể với nơtron năng lượng thấp là phản ứng hấp thụ hay phản ứng bắt nơtron.

Luận án này sẽ tập trung vào nghiên cứu tỷ số đồng phân trong phản ứng bắt nơtron nhiệt và trên nhiệt cụ thể là phản ứng  $(n,\gamma)$ . Cơ chế xảy ra phản ứng bắt nơtron  $(n,\gamma)$  gây bởi nơtron nhiệt và trên nhiệt là cơ chế phản ứng hợp phần. Các nơtron tới được giả sử hầu hết là nơtron sóng s với mômen động lượng là bằng không và spin bằng 1/2. Vì vậy hạt nhân bia với spin J<sub>0</sub> sau khi bắt nơtron sẽ được kích thích lên trạng thái J<sub>0</sub>, J<sub>0</sub> ± 1/2. Năng lượng kích thích của hạt nhân hợp phần gần bằng với năng lượng liên kết của nơtron trong hạt nhân. Đây cũng là một phản ứng đơn giản với cơ chế phản ứng là hợp phần thuần tuý nên việc xem xét lý thuyết cũng không phức tạp.

# Chương 2: Phương pháp thực nghiệm và tính toán lý thuyết

# 2.1 Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp kích hoạt và đo phổ gamma off-line được sử dụng trong luận án này.

## 2.1.1 Nguồn chiếu

Nguồn photon hãm và nơ<br/>tron nhiệt-trên nhiệt được tạo ra từ máy gia tốc điện tử MT-25 của FLNR, JINR, Dubna, Nga.

#### Nguồn bức xạ hãm

Hình. 2 trình bày sự sản xuất bức xạ hãm từ chùm điện tử của máy gia tốc và bia hãm thích hợp.



Hình 2: Sơ đồ tạo bức xạ hãm

# Nguồn nơtron nhiệt và trên nhiệt

Hình. 3 là sơ đồ tạo nơ<br/>tron nhiệt và trên nhiệt từ chùm điện tử của máy gia tốc MT-25.



Hình 3: Sơ đồ tạo nơtron nhiệt và trên nhiệt

## $2.1.2 \quad Chiếu \ m \tilde{a} u$

Các đặc trưng của mẫu chiếu, dòng electron  $(I_e)$ , năng lượng electron  $(E_e)$  và thời gian chiếu  $(t_{irr})$  trong phản ứng quang hạt nhân và phản ứng bắt notron được trình bày trong Bảng. 1.

Bảng 1: Các đặc trưng của mẫu chiếu, dòng electron, năng lượng electron và thời gian chiếu

Symbol	Sample	Purity	Weight [g]	Diameter [cm]	$I_e$	$E_e$	$t_{irr}(\gamma, n)$	$t_{irr}(n,\gamma)$
		[70]	[8]	[CIII]	$[\mu \Pi]$		[]	[]
Eu	$Eu_2O_3$	99.99	0.1	1	15	14 - 23	60 - 90	
Hg	$HgCl_2$	99.99	0.3	1	15	14 - 24	60	
Pd1	PdO	99.99	0.323	1	15	24 - 25	30	
Pd2	PdO	99.99	0.323	1	15	25		90
Cd1	Cd	99.99	0.719	1	15	24 - 25	60	
Cd2	Cd	99.99	0.719	1	15	25		120
Ce1	$Ce_2O_3$	99.99	0.8	1	12 - 14	25	60	
Ce2	$Ce_2O_3$	99.99	0.8	1	12 - 14	25		90
Se1	$SeO_2$	99.99	0.248	1	12	25	20	
Se2	$\mathrm{SeO}_2$	99.99	0.248	1	12	25		90

## 2.1.3 Phổ kế gamma

Sau khi làm mát thì hoạt độ của mẫu được xác định bởi hệ phổ kế bao gồm đầu dò siêu tinh khiết HPGe với đường kính 60.5 mm và chiều dài 31 mm được kết nối với một bộ phân tích 8192 kênh của (hãng CANBERRA). Độ phân giải năng lượng của đầu dò là 1.8 keV FWHM tại đỉnh  $\gamma$  1332.5 keV của nguồn <sup>60</sup>Co. Phổ  $\gamma$  được phân tích bởi phần mềm Gamma Vision.

Trước khi đo mẫu thì sử dụng bộ nguồn chuẩn hỗn hợp QCY và QCYK đã biết trước năng lượng và hoạt độ phóng xạ để chuẩn năng lượng và hiệu suất ghi của đầu dò.

#### 2.1.4 Phương trình tính toán tỷ số đồng phân

Dựa trên các phương trình kích hoạt, tỷ số đồng phân có thể tính theo công thức sau [3]:

$$\frac{1}{IR} = \frac{\frac{S_g I_m \varepsilon_m}{S_m I_g \varepsilon_g} \Lambda_3^m \Lambda_6^m \Lambda_9^m - \Lambda_1^g \Lambda_5^g \Lambda_8^g - \Lambda_3^g \Lambda_4^g \Lambda_8^g - \Lambda_3^g \Lambda_6^g \Lambda_7^g}{\Lambda_2^g \Lambda_5^g \Lambda_8^g}$$
(2)

với  $S, \varepsilon, I$  – diện tích đỉnh quang điện, hiệu suất ghi đỉnh quang điện, tỷ số phân nhánh, và  $\Lambda_i$  - số hạng phụ thuộc vào thời gian.

Để cải thiện độ chính xác của số đếm đỉnh quang điện, việc hiệu chỉnh liên quan tới can nhiễu phóng xạ, sự tự hấp thụ và cộng xung ngẫu nhiên được tính toán trong mỗi thí nghiệm.

# 2.2 Tính toán tỷ số đồng phân lý thuyết trong phản ứng $(\gamma, n)$

#### 2.2.1 Mô phỏng phổ hãm trong GEANT4

Công cụ GEANT4 [6] được sử dụng để mô phỏng thông lượng bức xạ hãm khi tới bia thứ cấp. Hình 4 trình bày sơ đồ xây dựng chương trình mô phỏng trong GEANT4.



Hình 4: Sơ đồ xây dựng chương trình mô phỏng trong GEANT4

## 2.2.2 Tính toán tiết diện trong TALYS

Có khoảng 340 từ khoá trong TALYS 1.95 [5] có thể sử dụng như những tham số đầu vào tuỳ thuộc vào mục đích của người sử dụng. Trong luận án này, ngoài các từ khoá mặc định thì các từ khoá liên quan đến mật độ mức và hàm lực gamma được sử dụng để tính tiết diện của phản ứng  $(\gamma, n)$  quan tâm trong miền GDR.

Sáu mẫu mật độ mức gồm 3 mẫu hiện tượng luận (Ld1-3) và 3 mẫu vi phân (Ld4-6) được sử dụng. Tương ứng mới mỗi mẫu mật độ mức thì 8 hàm lực gamma (s1-8) lần lượt được sử dụng để tính tiết diện vì phân của các đồng phân.

# Chương 3: Kết quả và thảo luận

Trong chương này, tỷ số đồng phân thực nghiệm thu được từ phản ứng  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  được trình bày trong bốn phần đầu. Còn trong phần cuối thì các kết quả tính toán lý thuyết bởi mã TALYS cho phản ứng  $(\gamma, n)$  được mô tả.

# 3.1 Tỷ số đồng phân trong phản ứng $(\gamma,n)$

## 3.1.1 $^{152m1,m2}Eu$

Tỷ số đồng phân của  ${}^{152m1}\text{Eu}(8^-)/{}^{152m2}\text{Eu}(0^-)$  trong phản ứng  ${}^{153}Eu(\gamma,n)$  gây bởi bức xạ hãm với năng lượng cực đại từ 14 đến 23 MeV đã được tính theo công thức 2. Kết quả được trình bày trong hình 5.

Tỷ số đồng phân tăng khi năng lượng kích thích tăng và nó tăng không đáng kể sau vùng cộng hưởng khổng lồ. Đây được gọi là hiệu ứng năng lượng kích thích trong tỷ số đồng phân.

Trạng thái đồng phân <sup>152m1</sup>Eu (8<sup>-</sup>) và <sup>152m2</sup>Eu (0<sup>-</sup>) có sự sai khác lớn về spin ( $\Delta s = 8$ ). Trong trường hợp này giá trị tỷ số đồng phân rất thấp và đây được coi là do hiệu ứng sai khác về spin. Tức là sự sai khác spin giữa 2 trạng thái càng lớn thì tỷ số đồng phân càng thấp.

Ngoài ra, với cùng một năng lượng kích thích thì tỷ số đồng phân của  ${}^{152\text{m}1}\text{Eu}(8^-)/{}^{152\text{m}2}\text{Eu}(0^-)$  được sản xuất từ các phản ứng khác nhau là không giống nhau. Đây dược gọi là hiệu ứng kênh phản ứng.

## $3.1.2 \quad {}^{195m,g;197m,g}Hg$

Hình 6 mô tả tỷ số đồng phân phụ thuộc vào năng lượng cực đại của bức xạ hãm.

Tỷ số đồng phân của  $^{195\rm m,g;197\rm m,g}\rm Hg$  tăng khi năng lượng của bức xạ hãm tăng trong miền GDR. Khi năng lượng lớn hơn miền này thì



Hình 5: Sự phụ thuộc tỷ số đồng phân của  $^{152\rm{m1}}\rm{Eu}(8^-)/^{152\rm{m2}}\rm{Eu}(0^-)$ vào năng lượng cực đại của bức xạ hãm



Hình 6: Sự phụ thuộc tỷ số đồng phân của  $^{195\rm m,g}\rm Hg$  và  $^{197\rm m,g}\rm Hg$  vào năng lượng cực đại của bức xạ hãm

tỷ số đồng phân không thay đổi hoặc tăng chậm do đóng góp của cơ chế tiền cân bằng và trực tiếp.

Tỷ số của  $^{195m,g}$ Hg cao hơn so với  $^{197m,g}$ Hg trong khi số khối của hạt nhâm mẹ  $^{196}$ Hg nhỏ hơn so với  $^{198}$ Hg. Trong trường hợp này, tỷ số đồng phân của các đồng vị của cùng một nguyên tố giảm khi số khối của đồng vị tăng là do hiệu ứng cấu hình nucleon.

Ngoài ra, cũng giống như trường hợp của Eu thì tỷ số đồng phân của <sup>195m,g;197m,g</sup>Hg thay đổi trong các phản ứng khác nhau do hiệu ứng kênh phản ứng. Giá trị tỷ số đồng phân thấp nhất trong phản ứng  $(\gamma, n)$  có thể được giải thích bởi momen thấp nhất đã truyền cho hạt nhân hợp phần so với các phản ứng khác.

# 3.2 Tỷ số đồng phân trong phản ứng bắt nơ<br/>tron $(n,\gamma)$

#### **3.2.1** $^{109m,g;111m,g}Pd$

Bảng 2 trình bày tỷ số đồng phân của  $^{109m,g;111m,g}Pd$  trong phản ứng  $(n, \gamma)$  gây bởi nơtron nhiệt, cộng hưởng và hỗn hợp nhiệt cộng hưởng và trong các phản ứng (n, 2n),  $(\gamma, n)$  and  $(n, \alpha)$ .

Bảng 2: Tỷ số đồng phân của  $^{109\rm m,g}\rm Pd$  và  $^{111\rm m,g}\rm Pd$  trong phản ứng bắt nơ<br/>tron nhiệt, cộng hưởng và hỗn hợp và trong các phản ứng khác

Nuclear reaction and product	Type of projectile	Product Ex. Energy (MeV)	Isomeric ratio IR
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Thermal neutron	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
			$0.028 \pm 0.003$ [9] $0.018 \pm 0.004$ [10]
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Resonant neutron	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
			$0.028 \pm 0.005$ [9]
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Mixed Ther. and Res.	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
$^{110}Pd(\gamma,n)^{109m,g}Pd$	25 MeV Bremstrahlung	6.93	$0.065 \pm 0.003$ [11]
$^{110}Pd(n,2n)^{109m,g}Pd$	14.1 MeV neutron	5.28	$0.410 \pm 0.039 \ [11]$
			$0.41 \pm 0.03 \ [12]$
$^{110}Pd(n,\gamma)^{111m,g}Pd$	Thermal neutron	5.75	$0.037 \pm 0.004$ [This work]
			$0.263 \pm 0.059 $ [10]
			$0.123 \pm 0.010 $ [13]
			$0.047 \pm 0.001 \ [14]$
$^{110}Pd(n,\gamma)^{111m,g}Pd$	Resonant neutron	5.75	$0.037 \pm 0.004$ [This work]
$^{110}Pd(n,\gamma)^{111m,g}Pd$	Mixed Ther. and Res.	5.75	$0.037 \pm 0.004$ [This work]
$^{114}Cd(n,\alpha)^{111m,g}Pd$	$14.1~{\rm MeV}$ neutron	0.96	$0.75 \pm 0.29$ [15]

Tỷ số đồng phân của  $^{109m,g}$ Pd đối với nơtron hỗn hợp nhiệt-cộng hưởng và của  $^{111m,g}$ Pd đối với nơtron cộng hưởng và hỗn hợp được chúng tôi công bố lần đầu tiên.

Hiệu ứng xung lượng trong tỷ số đồng phân có thể được quan sát trong trường hợp này, tức là, xung lượng hạt tới càng cao thì tỷ số đồng phân càng cao.

### $3.2.2 \quad {}^{115m,g;117m,g}Cd$

Những kết quả tỷ số đồng phân thu được của <sup>115m,g</sup>Cd và <sup>117m,g</sup>Cd cùng với kết quả của các giả khác được trình bày trong Bảng 3.

Kết quả tỷ số đồng phân của chúng tôi trong cả hai phản ứng  ${}^{114}Cd(n,\gamma){}^{115}Cd$  và  ${}^{116}Cd(n,\gamma){}^{117}Cd$ gây bởi trường nơ<br/>tron hỗn hợp được công bố lần đầu.

Các giá trị tỷ số đồng phân của  $^{115m,g;117m,g}Cd$  trong phản ứng bắt nơntron nhiệt, cộng hưởng và hỗn hợp nhiệt-cộng hưởng  $(n, \gamma)$  nhỏ hơn so với các phản ứng  $(\gamma, n)$ , (n, 2n), (n, p),  $(n, \alpha)$ . Điều này có thể được giải thích do xung lượng hạt đạn truyền cho bia trong các phản ứng  $(n, \gamma)$  là thấp hơn so với các phản ứng khác.

# **3.3** Ånh hưởng của các hiệu ứng kênh hạt nhân đối với tỷ số đồng phân trong các phản ứng $(\gamma, n)$ và $(n, \gamma)$

#### $3.3.1 \quad {}^{109m,g}Pd$

Các giá trị tỷ số đồng phân đo được cho  $^{109\text{m,g}}$ Pd trong phản ứng  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  và các giá trị đã được công bố trước đó cho các loại phản ứng  $(\gamma, n)$ ,  $(n, \gamma)$  và (n, 2n) được trình bày ở Bảng 4.

Những kết quả tỷ số đồng phân thu được trong phản ứng  $(\gamma, n)$  cao hơn trong  $(n, \gamma)$  dù năng lượng kích thích gần bằng nhau. Và chúng thấp hơn nhiều so với tỷ số đồng phân trong phản ứng (n, 2n). Xung lượng và sự truyền momen xung lượng như một phần của hiệu ứng kênh phản ứng được xem xét để giải thích độ lớn giá trị tỷ số đồng phân trong các trường hợp này tương tự như các phần trên. Tỷ số đồng phân trong các phản ứng khác nhau là khác nhau và phụ

Nuclear Reaction	Target	Type of	Product Ex.	Isomeric Ratio
and Product	Spin $[\hbar]$	Projectile	Energy, MeV	tỷ số đồng phân
$^{116}Cd(\gamma,n)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	24 MeV-	6	$0.158 \pm 0.016$ [16]
		Bremsstrahlung		
$^{114}Cd(n,\gamma)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	Thermal neutron	6.1	$0.116 \pm 0.012$ [This work]
				$0.120 \pm 0.083$ [17] (cal.)
				$0.094 \pm 0.036$ [18] (cal. TC)
				$0.085 \pm 0.038$ [18] (cal. GR)
				$0.088 \pm 0.034$ [18] (cal. IC)
114 0 1 115m a 0 1	0±	D ( )	0.1	$0.080 \pm 0.031$ [18] (cal. R)
$^{114}Cd(n,\gamma)^{110m,g}Cd$	0 '	Resonant neutron	6.1	$0.137 \pm 0.014$ [This work]
				$0.085 \pm 0.035$ [18] (cal. CL)
114 C J(m - 1) 115 m. g C J	0+	Minod Then and Dee	6.1	$0.1 \pm 0.051$ [18] (cal. R/Cd)
$Ca(n,\gamma)$	0	mixed Ther. and Res.	0.1	$0.112 \pm 0.011$ [This work]
$^{116}Cd(n,2n)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	14.1 MeV neutron	5.4	$0.921 \pm 0.130$ [19]
		14.4 MeV neutron	5.7	$0.694 \pm 0.074$ [20]
		14.8 MeV neutron	6.1	$0.710 \pm 0.131$ [21]
$^{115}In(n,p)^{115m,g}Cd$	$9/2^{+}$	$14.9 { m ~MeV}$ neutron	3.5	$0.616 \pm 0.118$ [15]
$^{118}Sn(n,\alpha)^{115m,g}Cd$	$0^+$	14.9 MeV neutron	1.4	$0.261 \pm 0.090 \; [15]$
$^{116}Cd(n,\gamma)^{117m,g}Cd$	$0^{+}$	Thermal neutron	5.8	$0.209 \pm 0.021$ [This work]
				$0.54 \pm 0.10$ [22]
				$0.24 \pm 0.03$ [23]
				$0.192 \pm 0.017$ [18] (cal. TC)
				$0.173 \pm 0.026$ [18] (cal. GR)
				$0.223 \pm 0.075$ [18] (cal. IC)
				$0.192 \pm 0.0177$ [18] (cal. R)
$^{116}Cd(n,\gamma)^{117m,g}Cd$	$0^{+}$	Resonant neutron	5.8	$0.324 \pm 0.032$ [This work]
				$0.282 \pm 0.044$ [18] (cal. CL)
				$0.288 \pm 0.027$ [18] (cal. R/Cd)
${}^{116}Cd(n,\gamma){}^{117m,g}Cd$	$0^{+}$	Mixed Ther. and Res.	5.8	$0.237 \pm 0.024$ [This work]
$^{120}Sn(n,\alpha)^{117m,g}Cd$	$0^{+}$	14.0 MeV neutron	0.8	$0.931 \pm 0.137$ [24]
				$1.015 \pm 0.141$ 25

Bảng 3: Tỷ số đồng phân của  $^{115{\rm m},{\rm g}}{\rm Cd}$  và  $^{117{\rm m},{\rm g}}{\rm Cd}$ tạo ra từ khác phản ứng khác nhau

Bảng 4: Tỷ số đồng phân của  $^{109\rm m,g}\rm Pd$ trong phản ứng quang hạt nhân và phản ứng bắt nơ<br/>tron

Nuclear Reaction and Product	Type of Projectile	Product Ex. Energy, MeV	Isomeric Ratio IR
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Thermal	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
	neutron		$0.028 \pm 0.005$ [9]
			$0.018 \pm 0.005$ [10]
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Resonant	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
	neutron		$0.028 \pm 0.005$ [9]
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Mixed Thermal-	6.15	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
	Resonant neutron		
$^{110}Pd(\gamma, n)^{109m,g}Pd$	24 MeV Bremstrahlung	6.5	$0.069 \pm 0.007$ [This work]
	25 MeV Bremsstrahlung	6.93	$0.065 \pm 0.003$ [11]
$^{110}Pd(n,2n)^{109m,g}Pd$	14.1 MeV	5.28	$0.410 \pm 0.039$ [11]
	neutron		$0.41 \pm 0.03$ [12]

thuộc vào loại hạt tới, xung lượng, năng lượng kích thích, spin của trạng thái đồng phân và cơ bản.

### 3.3.2 $^{115m,g}Cd$

Tỷ số đồng phân của <sup>115m,g</sup>Cd trong hai phản ứng  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$ , và so sánh với các tài liệu tham khảo khác được trình bày trong Bảng 5.

Nuclear Reaction	Target	Type of	Product Ex.	Isomeric Ratio
and Product	Spin $[\hbar]$	Projectile	Energy, $MeV$	IR
$^{116}Cd(\gamma,n)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	24 MeV-	6	$0.165 \pm 0.016$ [This work]
		Bremsstrahlung		$0.158 \pm 0.016$ [16]
$^{114}Cd(n,\gamma)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	Thermal neutron	6.1	$0.116 \pm 0.012$ [This work]
				$0.120 \pm 0.083 \ [17]$
$^{114}Cd(n,\gamma)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	Epithermal neutron	6.1	$0.137 \pm 0.014$ [This work]
				$0.085 \pm 0.035 \ [18]$
				$0.1 \pm 0.051$ [18]
$^{114}Cd(n,\gamma)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	Mixed Ther. and Epither.	6.1	$0.112 \pm 0.011$ [This work]
				$0.080 \pm 0.028$ [18]
$^{116}Cd(n,2n)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	14.1 MeV neutron	5.4	$0.921 \pm 0.130 \ [19]$
		14.4 MeV neutron	5.7	$0.694 \pm 0.074$ [20]
		14.8 MeV neutron	6.1	$0.710 \pm 0.131$ [21]
$^{115}In(n,p)^{115m,g}Cd$	$9/2^{+}$	14.9 MeV neutron	3.5	$0.616 \pm 0.118 \ [15]$
$^{118}Sn(n,\alpha)^{115m,g}Cd$	$0^{+}$	14.9 MeV neutron	1.4	$0.261 \pm 0.090 \ [15]$

Bảng 5: Tỷ số đồng phân của <sup>115m,g</sup>Cd từ các phản ứng khác nhau

Tương tự như đối với trường hợp của <sup>109m,g</sup>Pd, hiệu ứng kênh

phản ứng cũng được quan sát trong kết quả tỷ số đồng phân của  $^{115\rm m,g}\rm Cd$ trong các phản ứng khác nhau.

# 3.4 Tỷ số đồng phân của <sup>137m,g</sup>Ce, <sup>115m,g</sup>Cd, <sup>109m,g</sup>Pd, và <sup>81m,g</sup>Se trong phản ứng đối ngẫu $(\gamma, n)$ and $(n, \gamma)$

Bảng 6 trình bày các kết quả thực nghiệm thu được của các cặp đồng phân <sup>137m,g</sup>Ce, <sup>115m,g</sup>Cd, <sup>109m,g</sup>Pd, và <sup>81m,g</sup>Se trong hai phản ứng  $(\gamma, n)$  and  $(n, \gamma)$  và so sánh với các kết quả khác đã được công bố trước đó.

Nuclear Reaction	Type of	Product Ex.	Isomeric Ratio
and Product	Projectile	Energy $[MeV]$	IR
$^{138}Ce(\gamma,n)^{137m,g}Ce$	$25 { m MeV}$	5.5	$0.221 \pm 0.022$ [This work]
	Bremsstrahlung		$0.19 \pm 0.02$ [26]
$^{136}Ce(n,\gamma)^{137m,g}Ce$	Thermal neutron	7.4	$0.112 \pm 0.011$ [This work]
			$0.109 \pm 0.01$ [3]
			$0.15 \pm 0.01 \ [27]$
			$0.088 \pm 0.006 \ [28]$
$^{116}Cd(\gamma,n)^{115m,g}Cd$	25  MeV	5.8	$0.165 \pm 0.016$ [This work]
	Bremsstrahlung		$0.168 \pm 0.02$ [29]
$^{114}Cd(n,\gamma)^{115m,g}Cd$	Thermal neutron	6.1	$0.116 \pm 0.012$ [This work]
			$0.099 \pm 0.0033 \ [18]$
$^{110}Pd(\gamma,n)^{109m,g}Pd$	25  MeV	6.3	$0.069 \pm 0.007$ [This work]
	Bremsstrahlung		$0.065 \pm 0.003 \ [11]$
$^{108}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$	Thermal neutron	6.1	$0.023 \pm 0.002$ [This work]
			$0.018 \pm 0.005 \ [10]$
			$0.028 \pm 0.005 \ [9]$
$^{82}Se(\gamma,n)^{81m,g}Se$	25  MeV	6.9	$0.556 \pm 0.055$ [This work]
	Bremsstrahlung		$0.56 \pm 0.02$ [30]
$^{80}Se(n,\gamma)^{81m,g}Se$	Thermal neutron	6.7	$0.114 \pm 0.014$ [This work]
			$0.204 \pm 0.024$ [27]
			$0.136 \pm 0.011$ [9]
			$0.096 \pm 0.009$ [31]

Bảng 6: Tỷ số đồng phân trong phản ứng đối ngẫu  $(\gamma,n)$  and  $(n,\gamma)$ 

Những kết quả về tỷ số đồng phân trong phản ứng đối ngẫu  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  dẫn tới cùng một cặp đồng phân <sup>137m,g</sup>Ce, <sup>115m,g</sup>Cd,

 $^{109\mathrm{m,g}}\mathrm{Pd}$ , và  $^{81\mathrm{m,g}}\mathrm{Se}$ là khác nhau do hiệu ứng kênh. Tỷ số đồng phân trong phản ứng  $(\gamma,n)$  cao hơn đáng kể so với trong phản ứng  $(n,\gamma)$ .

# 3.5 Tỷ số đồng phân tính theo lý thuyết trong phản ứng $(\gamma, \mathbf{n})$

Tỷ số đồng phân của các cặp đồng phân tạo ra từ phản ứng  $(\gamma, n)$  trên bia Se, Pd, Ce, Eu và Hg gây bởi bức xạ hãm đã được tính toán theo các mô hình lý thuyết (sử dụng công thức Eq. 1).

### 3.5.1 Mô phỏng phổ bức xạ hãm

Phổ bức xạ hãm với năng lượng cực đại từ 10 - 25 MeV và khoảng cách mỗi bước năng lượng là 1 MeV đã được mô phỏng bởi công cụ GEANT4 như trong hình 7.



Hình 7: Phổ hãm với các năng lượng cực đại khác nhau được tính bởi Geant4.10.06 với 500 triệu hạt sơ cấp

#### 3.5.2 Tính toán tiết diện

Hình 8 và 9 mô tả tiết diện phản ứng  $(\gamma, n)$  của <sup>74,82</sup>Se và <sup>138,140</sup>Ce được tính bởi mã TALYS 1.95 với mẫu mật độ mức **ldmodel 1** (Ld1) và hàm lực **Strength 2** (s2). Các kết quả được so sánh với dữ liệu hiện có trong thư viện EXFOR. Các kết quả với các đồng vị khác được trình bày đầy đủ trong luận án.



Hình 8: Tiết diện phản ứng  $(\gamma, n)$  của  $^{74,82}Se$ 



Hình 9: Tiết diện phản ứng  $(\gamma, n)$  của  $^{138,140}Ce$ 

#### 3.5.3 Tỷ số đồng phân trong phản ứng $(\gamma, n)$

Tỷ số đồng phân của <sup>81m,g</sup>Se và <sup>195m,g</sup>Hg trong phản ứng ( $\gamma$ , n) như những kết quả điển hình được trình bày trong Hình 10 và 11. Những kết quả của các đồng vị khác được trình bày chi tiết trong luận án.



Hình 10: Tỷ số đồng phân tính theo lý thuyết của  $^{\rm 81m,g}Se,$ được so sánh với các kết quả thực nghiệm

Như vậy, sự kết hợp của mã TALYS và công cụ mô phỏng GEANT4 có thể tính toán được tỷ số đồng phân trong phản ứng



Hình 11: Tỷ số đồng phân tính theo lý thuyết của  $^{195\mathrm{m,g}}\mathrm{Hg}$ 

quang hat nhân gây bởi bức xa hãm. Dưa vào các kết quả tính toán trong luân án này, chúng tôi thấy rằng cả sáu mẫu mật đô mức của mã TALYS 1.95 đều mô tả tốt xu hướng của tỷ số đồng phân phu thuộc vào năng lượng tương tự như trong các kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên không phải tất cả sáu các mẫu mật độ mức cùng với tám hàm lực gamma đều biểu diễn chính xác các kết quả thực nghiêm. Ví dụ trong kết quả tính toán của <sup>81m,g</sup>Se thì các mẫu mật độ mức Ld1 (mẫu nhiệt độ là hằng số kết hợp với mẫu khí Fermi) mô tả tốt kết quả thực nghiêm đối với hầu hết các hàm lực nhưng mẫu Ld4 (mẫu vi phân sử dung lực Skyrme được trình bày dưới dang bảng của Goriely) thì chỉ có hàm lực s7 (hàm lực gamma trong trường thế trung bình tương đối phu thuộc vào nhiệt độ) mô tả chính xác nhất các kết quả thực nghiêm. Còn đối với trường hợp của <sup>195m,g</sup>Hg thì các mẫu mô tả tương đối tốt, đặc biệt là mẫu mật đô mức Ld5 (mẫu vi phân sử dung lực Skyrme được trình bày dưới dang bảng của Hilaire) với hàm lực s2 (hàm lực Lorent của Brink và Axel) biểu diễn rất tốt kết quả thực nghiêm của cả 2 tác giả T.D.Thiep và B.S.Ishkhanov.

Ngoài ra, dựa vào các kết quả được trình bày đầy đủ trong luận án thì hiệu ứng cấu hình nucleon được quan sát trong tỷ số đồng phân thực nghiệm nhưng trong các kết quả tính toán lý thuyết thì hiệu ứng này chỉ được xác nhận trong trường hợp của đồng vị  $^{195,197}$ Hg mà không thấy trong trường hợp của  $^{73,81}$ Se và  $^{137,139}$ Ce.

Chính vì những lý do trên mà đối với từng trường hợp cụ thể thì mẫu mật độ mức cũng như hàm lực gamma cần phải được xem xét và hiệu chỉnh các tham số đầu vào để có thể mô tả đúng nhất các kết quả thực nghiệm.

# Kết luận và kiến nghị

Trong luận án này, chúng tôi đã nghiên cứu tỷ số đồng phân trong phản ứng  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  bằng phương pháp kích hoạt và đo phổ gamma off-line. Hai phản ứng này sử dụng nguồn bức xạ hãm và nơtron nhiệt và trên nhiệt được tạo ra từ máy gia tốc điện tử MT-25 của phòng thí nghiệm phản ứng hạt nhân Flerov, JINR, Dubna, Nga. Những kết quả đã được so sánh và thảo luận với các kết quả khác và dẫn tới một số kết luận sau:

Đối với phản ứng  $(\gamma, n)$  trên các đồng vị Hg, Eu, Cd, Ce, Se và Pd, chúng tôi đã nhận diện được bảy cặp đồng phân và tính toán tỷ số đồng phân, bao gồm  $^{195m,g;197m,g}Hg$ ,  $^{152m1,m2}Eu$ ,  $^{115m,g}Cd$ ,  $^{137m,g}Ce,\ ^{81m,g}Se$  và  $^{109m,g}Pd.$  Tỷ số đồng phân thực nghiệm của  $^{195m,g}Hg$  từ 14 - 24 MeV,  $^{197m,g}Hg$  từ 18 - 24 Mev và  $^{152m1,m2}Eu$ tại 19, 21 và 23 Mev lần đầu được công bố. Đối với phản ứng  $(n,\gamma)$ trên các đồng vi của Pd, Cd, Ce và Se gây bởi neutron nhiệt và công hưởng, chúng tôi đã nhận diện được sáu cặp đồng phân và tính tỷ số đồng phân bao gồm  $^{109m,g;111m,g}Pd$ ,  $^{115m,g;117m,g}Cd$ ,  $^{137m,g}Ce$  và  $^{81m,g}Se$ . Tỷ số đồng phân của  $^{115m,g;117m,g}Cd$  và  $^{109m,g;111m,g}Pd$  gâv bởi nơtron hỗn hợp nhiệt và công hưởng và tỷ số đồng phân của  $^{111m,g}Pd$  gây bởi nơ<br/>tron cộng hưởng lần đầu được công bố. Kết quả nổi bật nhất của đề tài luận án này là sự đóng góp các dữ liệu thực nghiệm mới của  $^{nat}Eu(\gamma,n)^{152m1,m2}Eu,\ ^{nat}Hg(\gamma,n)^{195m,g;197m,g}Hg,$  $^{nat}Pd(n,\gamma)^{109m,g}Pd$ , and  $^{nat}Cd(n,\gamma)^{115m,g;117m,g}Cd$ . Các kết quả của  $^{195m,g;197m,g}Hg,\ ^{109m,g;111m,g}Pd,$  và  $^{115m,g;117m,g}Cd$ đã được đưa vào thư viện dữ liệu phản ứng hạt nhân thực nghiệm (EXFOR) của Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế (IAEA). Độc giả có thể truy câp đường dẫn (https://www-nds.iaea.org/exfor/) để truy câp dữ liêu. Những kết quả thực nghiêm thu được có thể sử dụng cho các tính toán lý thuyết hoặc cho các ứng dung khác.

Để tiếp tục các công việc nghiên cứu trước của nhóm chúng tôi, trong đề tài luận án này chúng tôi đã nghiên cứu một số hiệu ứng ảnh hưởng tới tỷ số đồng phân, bao gồm năng lượng kích thích, cấu hình nucleon, sự sai khác về spin và hiệu ứng kênh phản ứng. Như một sự nhân định sâu sắc hơn, chúng tôi đã nghiên cứu hiệu ứng kênh trong phản ứng đối ngẫu  $(\gamma, n)$  và  $(n, \gamma)$  tạo ra các cặp đồng phân với cùng năng lượng kích thích sản phẩm để thấy được ảnh hưởng của xung và mômen xung lượng đây như một phần của hiệu ứng kênh.

Đề tài cũng đã tính toán tỷ số IR trong phản ứng  $(\gamma, n)$  với năng lượng bức xạ hãm từ 10 - 25 MeV trên bia Se, Pd, Ce, Eu và Hg dựa trên các mô hình lý thuyết sử dụng mã TALYS 1.95 và công cụ mô phỏng GEANT4. Cu thể, công cu GEANT4 đã được sử dung để mô phỏng bức xạ hãm và code TALYS dùng để tính toán tiết diện phản ứng. Chúng tôi cũng đã khảo sát hàm kích thích với sáu mẫu mật độ mức và tám hàm lực gamma. Xu hướng phu thuộc vào năng lượng của các kết quả tính toán lý thuyết là tương tư đối với kết quả thực nghiêm. Ngoài ra, hiệu ứng cấu hình nucleon cũng được xác nhân trong trường hợp của Hg nhưng không thể hiện trong trường hợp của Ce và Se. Từ việc so sánh giữa kết quả thực nghiêm để biết mẫu mô tả phù hợp nhất và có thể truy xuất được các thông tin quang trong liên quan tới cấu trúc mức kích thích hat nhân, mật đô mức, phân bố spin, và rất nhiều các thông số khác. Những mẫu không phù hợp cần phải có các hiệu chỉnh chi tiết hơn liên quan tới mẫu mật độ mức, hàm lực gamma và nhiều các tham số liên quan khác.

Tiếp nối công việc hiện tại, chúng tôi dự định sẽ nghiên cứu tỷ số đồng phân trong phản ứng quang hạt nhân và phản ứng với nơtron trên nhiều các hạt nhân từ nhẹ cho tới nặng, đặc biệt đối với các hạt nhân biến dạng. Nghiên cứu và tính toán phổ hãm và phổ nơtron tạo ra từ máy gia tốc điện tử và từ các nguồn khác trên các loại vật liệu khác nhau với bề dày thay đổi. Và tính toán tỷ số đồng phân lý thuyết trong phản ứng  $(n, \gamma)$  gây bởi nơtron nhiệt và cộng hưởng dựa trên mã TALYS do mã này chưa giải quyết được chi tiết và chính xác đối với các nơtron nhiệt và cộng hưởng (năng | uợng < 300 eV).

# References

- Ashok Kumar Jain, Bhoomika Maheshwari and Alpana Goel. Nuclear Isomers: A Primer. Springer Nature, 2021.
- [2] Philip Walker and George Dracoulis. 'Energy traps in atomic nuclei'. Nature 399.6731 (1999), pp. 35–40.
- [3] Tran Duc Thiep et al. 'Channel effect in isomeric ratio of 137m, g Ce produced in different nuclear reactions'. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 314.3 (2017), pp. 1777–1784.
- [4] JR Huizenga and Rt Vandenbosch. 'Interpretation of isomeric cross-section ratios for  $(n, \gamma)$  and  $(\gamma, n)$  reactions'. *Physical Review* 120.4 (1960), p. 1305.
- [5] AJ Koning, Stephan Hilaire and M Duijvestijn. 'TALYS-1.95 A nuclear reaction program, User manual'. NRG, Netherlands (2009).
- [6] Sea Agostinelli et al. 'GEANT4—a simulation toolkit'. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 506.3 (2003), pp. 250–303.
- [7] A Zilges et al. 'Photonuclear reactions—From basic research to applications'. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 122 (2022), p. 103903.
- [8] Kenneth S Krane. Introductory nuclear physics. John Wiley & Sons, 1991.
- [9] CT Bishop, HK Vonach and JR Huizenga. 'Isomer ratios for some (n,  $\gamma$ ) reactions'. Nuclear Physics 60.2 (1964), pp. 241–249.
- [10] ML Sehgal, HS Hans and PS Gill. 'Thermal neutron cross-sections for producing some isomers'. Nuclear Physics 12.3 (1959), pp. 261–268.

- [11] SR Palvanov et al. 'Excitation of isomeric states in reactions  $(\gamma, n)$  and (n, 2n) on 110Pd nucleus'. World J Res Rev (WJRR) 5.5 (2017), pp. 28–31.
- [12] Dac Luc Hoang et al. 'Isomeric yield ratios in the productions of Sm 143m, g, Nd 141m, g, Zr 89m, g and Pd 109m, g by 14 MeV neutrons and 15-20.5 MeV bremsstrahlung'. *Bulgarian Journal of Physics* 14.2 (1987), pp. 152–156.
- [13] SK Mangal and PS Gill. 'Thermal neutron activation cross-sections for isomer production'. *Nuclear Physics* 36 (1962), pp. 542–548.
- [14] MN Namboodiri et al. 'Isomeric cross-section ratios in the (n,  $\gamma$ ) reactions on 130Te and 110Pd'. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry 28.1 (1966), pp. 1–4.
- [15] D Brune and JJ Schmidt. Handbook on Nuclear Activation Cross-sections: Neutron, Photon and Chargedparticle Nuclear Reaction Cross-section Data. Vol. 156. International Atomic Energy Agency, 1974.
- [16] TD Thiep et al. 'The isomeric ratios in some photonuclear reactions  $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, 2n)$  and  $(\gamma, np)$  induced by Bremsstrahlung with end-point energies in the giant dipole resonance region'. *Phys Part Nucl Lett* 6.2 (2009), pp. 209–218.
- [17] S Pearlstein and RF Milligan. 'Thermal cross section and resonance integrals of cadmium-114'. Nuclear Science and Engineering 26.2 (1966), pp. 281–282.
- [18] AM Gicking, K Takahashi and KS Krane. 'Neutron capture cross sections of stable Cd isotopes'. *The European Physical Journal A* 55.4 (2019), pp. 1–10.
- [19] R Jo Prestwood and BP Bayhurst. '(n, 2 n) Excitation Functions of Several Nuclei from 12.0 to 19.8 Mev'. *Physical Review* 121.5 (1961), p. 1438.

- [20] Wen-deh Lu, N Ranakumar and RW Fink. 'Activation Cross Sections for (n, 2 n) Reactions at 14.4 MeV in the Region Z= 40- 60: Precision Measurements and Systematics'. *Physical Review C* 1.1 (1970), p. 350.
- [21] CS Khurana and HS Hans. 'Cross-sections for (n, 2n) reactions at 14.8 MeV'. Nuclear Physics 28.4 (1961), pp. 560–569.
- [22] D Decat and P Del Marmol. 'Thermal Neutron Activation Cross Section of 116Cd for the Production of the 117Cd Isomers'. *Radiochimica Acta* 6.1 (1966), pp. 29– 31.
- [23] CW Tang, RL Eng and CD Coryell. Isomeric-yield ratios of sup117 Cd in the (n, gamma) and (d, p) reactions. Tech. rep. Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, 1973.
- [24] Emil Beták et al. 'Activation cross sections for reactions induced by 14 MeV neutrons on natural tin and enriched 112Sn targets with reference to 111In production via radioisotope generator 112Sn (n, 2n) 111Sn $\rightarrow$ 111In'. *Radiochimica Acta* 93.6 (2005), pp. 311–326.
- [25] Michael Fleming, Jiri Kopecky and Jean-Christophe Sublet. Integro-Differential Verification and Validation, FISPACT-II & TENDL-2014 nuclear data libraries. Culham Centre for Fusion Energy, 2015.
- [26] Yu P Gangrsky et al. 'Isomeric Ratios in Crossing (ngamma) and (gamman) Reactions'. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 65.1 (2001), pp. 121–127.
- Bernard Keisch. 'Yield ratios of isomers produced by neutron activation'. *Physical Review* 129.2 (1963), p. 769.

- [28] S Torrel and KS Krane. 'Neutron capture cross sections of 136, 138, 140, 142 Ce and the decays of 137 Ce'. *Physical Review C* 86.3 (2012), p. 034340.
- [29] A.V Kyryjenko et al. 'Investigation of the cadmium nuclei isomers state excitation in the photonuclear reactions'. Uzhgorod University Scientific Herald, Series Physics 19 (2006), pp. 85–89.
- [30] SR Palvanov. 'Cross Section of Excitation of Isomer States 81m,gSe in the Reaction (γ, n) and (n, 2n)'. Journal of Scientific and Engineering Research (2018), pp. 41-45.
- [31] Shoji Nakamura et al. 'Thermal-Neutron Capture Cross Sections and Resonance Integrals of the 80Se (n, γ) 81m, 81gSe Reactions'. Journal of nuclear science and technology 45.2 (2008), pp. 116–122.

# List of publications used for the Thesis

- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, S. M. Lukyanov, and S. Mitrofanov. Isomeric ratios in neutron capture reaction, induced by thermal, resonant and mixed thermal-resonant neutrons on <sup>114</sup>Cd and <sup>116</sup>Cd nuclei. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B 502, pp. 46-53 (2021).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, S. M. Lukyanov, A. G. Belov, and S. Mitrofanov. The isomeric ratios in (n, γ) neutron capture reactions on <sup>108</sup>Pd and <sup>110</sup>Pd nuclei, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 326, no. 1, 503-509 (2020).
- 3. Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, **Bui** Minh Hue, A. G. Belov, S. Mitrofanov. Isomeric yield ratios of  $^{195m,g}Hg$  and  $^{197m,g}Hg$  in the  $^{196}Hg(\gamma, n)$  and  $^{198}Hg(\gamma, n)$  reactions induced by bremsstrahlung energy within giant dipole resonance region, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. 457, 4-9 (2019).
- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Nguyen The vinh, **Bui Minh Hue**, Le Tuan Anh, A. G. Belov. Isomeric yield ratio of <sup>152m1</sup>Eu(8-) to <sup>152m2</sup>Eu(0-) produced from <sup>153</sup>Eu (γ, n) <sup>152</sup>Eu reaction in the giant dipole resonance region, J. Radioanal. Nucl. Chem., 317, 1263–1271 (2018).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep. Theoretical consideration of isomeric ratios in some photonuclear reactions induced by bremsstrahlung with endpoint energy in giant dipole resonance region using Talys 1.95 code, Nuclear Science and Technology, Vol.12, No.1, pp.21–31 (2022).
- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Bui Minh Hue, Phan Viet Cuong, Nguyen Hong Ha, A. G. Belov, S. Mitrofanov.

Investigation of the same isomeric pair, produced from different nuclear reactions, Nuclear Science and Technology, Vol.10, No. 1, pp. 01-10 (2020).

- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Bui Minh Hue, Phan Viet Cuong, A. G. Belov, S. Mitrofanov. *The nuclear channel effect in the isomeric ratio of the reaction products*, Nuclear Science and Technology, Vol.9, No. 1, pp. 09-20 (2019).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Isomeric Ratios in Several Inverse (γ, n) and (n, γ) Reactions, Proceedings of 28th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, http://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-28/pdf/HueBui.pdf, (2021).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Isomeric Ratios in Inverse (γ, n) and (n, γ) Reactions on Ce, Cd, Pd and Se targets, Proceedings of the 7th Academic Conference on Natural Science for Young Scientist, Master and PhD. Student from ASEAN Countries (CASEAN-7), p388-396 (2021).

# Other publication

1. P.V. Cuong, T.D. Thiep, L.T. Anh, T.T. An, **B.M. Hue**, K.T. Thanh, N.H. Tan, N.T. Vinh, T.T. Anh, *Theoretical* calculation by Talys code in combination with Geant4 simulation for consideration of  $(\gamma, n)$  reactions of Eu isotopes in the giant dipole resonance region, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B, 479 (2020) 68-73.

# Danh sách các công trình sử dụng cho luận án

- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, S. M. Lukyanov, and S. Mitrofanov. Isomeric ratios in neutron capture reaction, induced by thermal, resonant and mixed thermal-resonant neutrons on <sup>114</sup>Cd and <sup>116</sup>Cd nuclei. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B 502, pp. 46-53 (2021).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, S. M. Lukyanov, A. G. Belov, and S. Mitrofanov. The isomeric ratios in (n, γ) neutron capture reactions on <sup>108</sup>Pd and <sup>110</sup>Pd nuclei, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 326, no. 1, 503-509 (2020).
- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Bui Minh Hue, A. G. Belov, S. Mitrofanov. Isomeric yield ratios of <sup>195m,g</sup>Hg and <sup>197m,g</sup>Hg in the <sup>196</sup>Hg(γ, n) and <sup>198</sup>Hg(γ, n) reactions induced by bremsstrahlung energy within giant dipole resonance region, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. 457, 4-9 (2019).
- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Phan Viet Cuong, Nguyen The vinh, **Bui Minh Hue**, Le Tuan Anh, A. G. Belov. Isomeric yield ratio of <sup>152m1</sup>Eu(8-) to <sup>152m2</sup>Eu(0-) produced from <sup>153</sup>Eu (γ, n) <sup>152</sup>Eu reaction in the giant dipole resonance region, J. Radioanal. Nucl. Chem., 317, 1263–1271 (2018).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep. Theoretical consideration of isomeric ratios in some photonuclear reactions induced by bremsstrahlung with endpoint energy in giant dipole resonance region using Talys 1.95 code, Nuclear Science and Technology, Vol.12, No.1, pp. 21–31 (2022).
- 6. Tran Duc Thiep, Truong Thi An, **Bui Minh Hue**, Phan Viet Cuong, Nguyen Hong Ha, A. G. Belov, S. Mitrofanov. *Investigation of the same isomeric pair, produced from different nuclear*

*reactions*, Nuclear Science and Technology, Vol.10, No. 1, pp. 01-10 (2020).

- Tran Duc Thiep, Truong Thi An, Bui Minh Hue, Phan Viet Cuong, A. G. Belov, S. Mitrofanov. *The nuclear channel effect* in the isomeric ratio of the reaction products, Nuclear Science and Technology, Vol.9, No. 1, pp. 09-20 (2019).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Isomeric Ratios in Several Inverse (γ, n) and (n, γ) Reactions, Proceedings of 28th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Website: http://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-28/pdf/HueBui.pdf, (2021).
- Bui Minh Hue, Tran Duc Thiep, Isomeric Ratios in Inverse (γ, n) and (n, γ) Reactions on Ce, Cd, Pd and Se targets, Proceedings of the 7th Academic Conference on Natural Science for Young Scientist, Master and PhD. Student from ASEAN Countries (CASEAN-7), p388-396 (2021).

# Công trình đã công bố khác

 P.V. Cuong, T.D. Thiep, L.T. Anh, T.T. An, B.M. Hue, K.T. Thanh, N.H. Tan, 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 Inst. and Methods in Physics Research B, 479 (2020) 68-73.