

ỨNG DỤNG MẪU ĐƠN HẠT XÁC ĐỊNH THỜI GIAN SỐNG MỘT SỐ MỨC KÍCH THÍCH CỦA HẠT NHÂN ^{59}Ni

NGUYỄN AN SƠN*, ĐẶNG LÀNH*

TÓM TẮT

Thời gian sống của mức kích thích, năng lượng, cường độ, spin và độ chẵn lẻ là những thuộc tính quan trọng cần thiết để mô tả các mẫu cấu trúc hạt nhân. Mẫu cấu trúc đơn hạt được ứng dụng cho những hạt nhân trung bình, và được áp dụng cho việc tính toán trong bài báo này. Thực nghiệm được tiến hành trên kênh số 3 của Lò phản ứng Hạt nhân Đà Lạt, bằng cách kích hoạt bia mẫu kim loại niken, với phương pháp trùng phù hợp “sự kiện - sự kiện”, chúng tôi đã tiến hành đo đạc thực nghiệm, xác định năng lượng chuyển dời gamma nối tầng, hệ số rẽ nhánh. Đồng thời, ứng dụng mẫu đơn hạt để xác định thời gian sống, độ rộng của một số mức kích thích của ^{59}Ni .

Từ khóa: thời gian sống của mức, mẫu đơn hạt, trùng phù hợp “sự kiện – sự kiện”.

ABSTRACT

Applying single particle model to identify lifetime of excited nuclear levels of ^{59}Ni

The lifetime of an excited nuclear level, energy, intensity, spin and parity are important properties for nuclear model description. The single particle model was used for average mass and calculation in this paper. The experiment was set up on the 3rd channel of Dalat nuclear reactor by activating Nickel using the “event-event” coincidence method; we recorded experimental data, determined on gamma cascades energy, branch ratio, and applied the single particle model to identify lifetime of and width of excited energy levels of ^{59}Ni .

Keywords: lifetime of excited nuclear level, single particle model, “event – event” coincidence.

1. Tổng quan

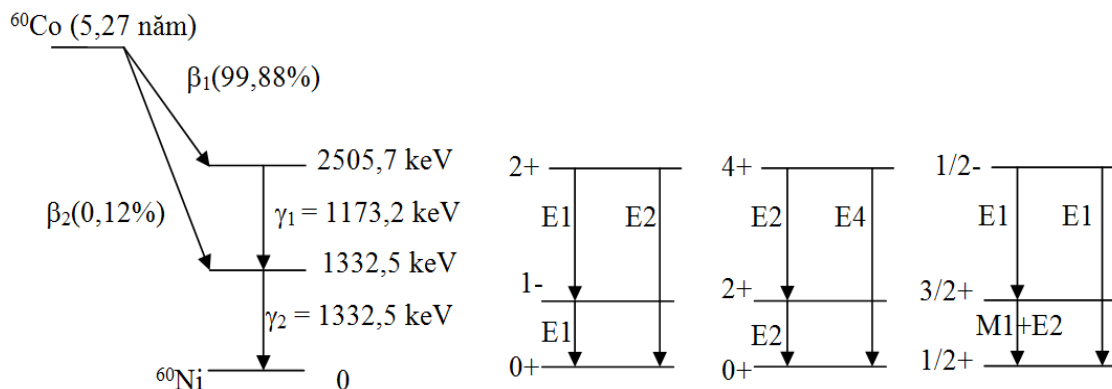
Thời gian sống của mức kích thích là đặc trưng quan trọng của hạt nhân, nó phụ thuộc vào loại dịch chuyển (điện, từ), bậc đa cực, năng lượng và cường độ chuyển dời... Thời gian sống của mức cũng cho ta biết được mức độ bền của hạt nhân.

Trên thế giới, các nghiên cứu thực nghiệm đo thời gian sống của mức thường sử dụng các hệ phổ kế hiện đại, có độ phân giải thời gian cực tốt ($< \text{ps}$). Với các hệ tiêu biểu để đo thời gian như phổ kế thời gian bay (Time-of-Flight Mass Spectrometry) [2] để đo thời gian dịch chuyển trên quãng đường của neutron cũng như thời gian hủy positron - electron, hệ trùng phù hợp [3], hệ đo tương quan góc... Tuy nhiên cho đến nay, với công nghệ hiện có, việc đo trực tiếp thời gian sống của mức kích thích ở những hạt

* TS, Trường Đại học Đà Lạt

nhân phát gamma tức thời không thể, mà chỉ có thể thu được những giá trị bán thực nghiệm.

Với hệ phổ kế thông thường sử dụng một detector, việc xác định thời gian sống của mức kích thích là không thể thực hiện. Ngay cả, việc xác định các chuyển dời sơ cấp và thứ cấp cũng gặp không ít khó khăn. Đơn cử, xét phân rã của nguồn ^{60}Co , với sơ đồ phân rã như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ phân rã của nguồn ^{60}Co

Hình 2. Mô tả dịch chuyển điện từ

Với phân rã như hình 1, khi sử dụng phổ kế một detector thì không thể xác định được chuyển dời nào là chuyển dời sơ cấp, chuyển dời nào là chuyển dời thứ cấp. Và như thế, khó xác định đơn trị mức trung gian. Kết quả này càng trở nên khó hơn với những hạt nhân phát nhiều bức xạ gamma với nhiều mức trung gian, do vậy không thể xác định được thời gian sống của mức.

Hình 2 trình bày các dạng dịch chuyển điện từ khả dĩ có thể xác định bằng thực nghiệm [8] theo giả định spin trạng thái đầu và cuối đã biết, các dịch chuyển trong hình là dịch chuyển trực tiếp và dịch chuyển nối tầng bậc hai.

Bằng thực nghiệm, phương pháp trùng phùng sử dụng hai detector xác định khá chính xác các chuyển dời sơ cấp và thứ cấp, nên xác định chính xác năng lượng mức trung gian. Từ việc xác định bằng thực nghiệm các cường độ chuyển dời nối tầng, mức trung gian, kết hợp với các điều kiện ban đầu về spin, độ chẵn lẻ của trạng thái kích thích và trạng thái cơ bản của hạt nhân, có thể xác định spin và độ chẵn lẻ của các mức trung gian. Kết quả này cho phép xác định loại dịch chuyển (điện, từ), tính được suất dịch chuyển, hàm lực chuyển dời gamma, độ rộng mức cũng như thời gian sống của mức.

Hạt nhân ^{59}Ni là hạt nhân trung bình, có cấu trúc không suy biến, gồm 28 proton và 31 neutron, phân bố các nucleon trong hạt nhân theo cấu trúc mẫu lớp như sau: proton: $1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6 2s_{1/2}^2 1d_{3/2}^4 1f_{7/2}^8$; neutron: $1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6 2s_{1/2}^2 1d_{3/2}^4 1f_{7/2}^8 2p_{3/2}^3$. Các nghiên cứu thực nghiệm trên hạt nhân này được thực hiện từ khá sớm. Có hai hướng nghiên cứu chính là nghiên cứu trên máy gia tốc và nghiên cứu trên lò phản ứng. Kết

qua cho thấy nghiên cứu trên lò phản ứng mang lại số mức nhiều hơn, trên dải năng lượng rộng hơn, kết quả phong phú hơn [4], [5], [6]. Các nghiên cứu trên tuy có khác nhau về số mức và cường độ chuyển dời gamma, nhưng đều cho thấy spin và độ chẵn lẻ của ^{59}Ni ở trạng thái cơ bản là $3/2^-$, spin và độ chẵn lẻ của ^{59}Ni ở trạng thái hợp phần là $1/2^+$.

Công trình nghiên cứu của D. C. S. White và các cộng sự [7] đã đo thời gian sống của các mức năng lượng thấp của một số hạt nhân. Trong công trình này, bằng phản ứng $^{59}\text{Co}(p, n)^{59}\text{Ni}$, nhóm tác giả đã xác định được thời gian sống của 9 mức năng lượng thấp (nhỏ hơn 2 MeV) của ^{59}Ni , với thời gian sống ngắn nhất của mức kích thích là 0,18ps và thời gian sống dài nhất của mức kích thích là 120 ps.

2. Cơ sở lý thuyết

Nếu hạt nhân ${}_Z X^A$ có spin và độ chẵn lẻ ở trạng thái cơ bản là J^π , khi bắt neutron nhiệt trở thành hạt nhân ${}_Z X^{A+1}$, có spin và độ chẵn lẻ khả dĩ $J^\pi \pm 1/2$ (bắt neutron sóng s). Ở trạng thái kích thích, thời gian sống rất ngắn, phát bức xạ gamma tức thời để chuyển về trạng thái cơ bản. Các bức xạ gamma tức thời phát ra có dạng và bậc đa cực được minh họa ở hình 2. [8]

Vì xác suất dịch chuyển cùng loại (điện hoặc từ) giữa hai bậc liên tiếp (ví dụ bậc đa cực L và bậc đa cực L + 1) là vô cùng lớn (xấp xỉ $\frac{R^2}{(2L+3)^3}$, R là bán kính hạt nhân), nên với hạt nhân có thời gian sống ngắn (nhỏ hơn ps), thực nghiệm chỉ đo được là loại bức xạ lưỡng cực điện E1, bức xạ lưỡng cực từ M1 và bức xạ tứ cực điện E2.

Bậc đa cực của dịch chuyển gamma phụ thuộc vào spin của trạng thái đầu và spin của trạng thái cuối như sau [9]:

$$|J_i - J_f| \leq L \leq J_i + J_f \quad (1)$$

trong đó, L là bậc đa cực, J_i là spin của trạng thái đầu (mức đầu) và J_f là spin của trạng thái cuối (mức kế tiếp).

Khi phát bức xạ gamma, hạt nhân không thay đổi số A và Z, mà là dịch chuyển điện từ, nên theo tính chất bảo toàn độ chẵn lẻ thì:

$$\pi_i \pi_\gamma \pi_f = 1 \quad (2)$$

π_i là độ chẵn lẻ ở mức đầu, π_f là độ chẵn lẻ mức cuối, và π_γ là độ chẵn lẻ của bức xạ gamma phát ra. Nếu:

- Bức xạ gamma phát ra là dịch chuyển điện thì:

$$\pi_\gamma = (-1)^L \quad (3)$$

- Bức xạ gamma phát ra là dịch chuyển từ thì:

$$\pi_\gamma = (-1)^{L+1} \quad (4)$$

Lí thuyết mẫu lớp rất phù hợp trong giải đoán kết quả thực nghiệm với hạt nhân trung bình. Khi các nucleon trong hạt nhân liên kết cặp thỏa mãn mẫu lớp, chỉ còn thừa 1 nucleon thì mẫu đơn hạt là khá phù hợp. Thời gian sống của mức kích thích được xác định theo mẫu đơn hạt như sau [9]:

$$t(EL) = \frac{\ln 2L[(2L+1)!!]^2 \hbar \left(\frac{3+L}{3}\right)^2 \left(\frac{\hbar c}{E_\gamma}\right)^{2L+1}}{2(L+1)e^2 R^{2L}} \quad (5)$$

$$t(ML) = \frac{\ln 2L[(2L+1)!!]^2 \hbar \left(\frac{3+L}{3}\right)^2 \left(\frac{\hbar c}{E_\gamma}\right)^{2L+1}}{80(L+1)\mu_N^2 R^{2L-2}} \quad (6)$$

trong đó, $t(EL)$ là thời gian sống của mức với bức xạ gamma loại điện với bậc đa cực L, $t(ML)$ là thời gian sống của mức với bức xạ gamma loại từ với bậc đa cực L. $e^2=1,440 \times 10^{-10}$ keV.cm, $\mu_N^2=1,5922 \times 10^{-23}$ keV.cm³. \hbar là hằng số Dirac, $\hbar = 0,658212 \times 10^{-15}$ eV.s, E_γ là năng lượng của bức xạ gamma (keV), R là bán kính hạt nhân $R = 1,2 \times 10^{-13} A^{1/3}$ cm.

Thời gian sống của mức tỉ lệ với độ rộng mức toàn phần theo hệ thức:

$$\tau \sim \frac{\hbar}{\Gamma_\gamma} \quad (7)$$

Nếu từ mức trung gian, có nhiều bức xạ gamma phát ra, độ rộng mức toàn phần được xác định theo độ rộng mức riêng phần:

$$\Gamma_\gamma = \sum_{i=1}^n \Gamma_{\gamma_i} \times B_{\gamma_i} \quad (8)$$

trong đó, B_{γ_i} là hệ số rẽ nhánh, được xác định bởi cường độ chuyển dời nối tầng I_{γ_i} của bức xạ gamma và tổng cường độ I_{tot} của mức đó:

$$B_{\gamma_i} = \frac{I_{\gamma_i}}{I_{tot}} \times 100\% \quad (9)$$

Mặt khác, độ rộng mức phụ thuộc vào cường độ chuyển dời gamma nối tầng theo hệ thức:

$$I_{\gamma} = \sum_{\lambda=1, f=\lambda}^{\lambda=i, f=n} \frac{\Gamma_{\lambda i} \times \Gamma_{if}}{\Gamma_i \times \Gamma_\lambda} \quad (10)$$

với $\Gamma_{\lambda i}$ và Γ_{if} là độ rộng mức riêng phần của chuyển dời từ mức $\lambda \rightarrow i \rightarrow f$; Γ_i và Γ_λ là độ rộng mức toàn phần tương ứng của mức i và λ .

3. Hệ thực nghiệm và phương pháp thu nhận kết quả

3.1. Bia mẫu và hệ thực nghiệm

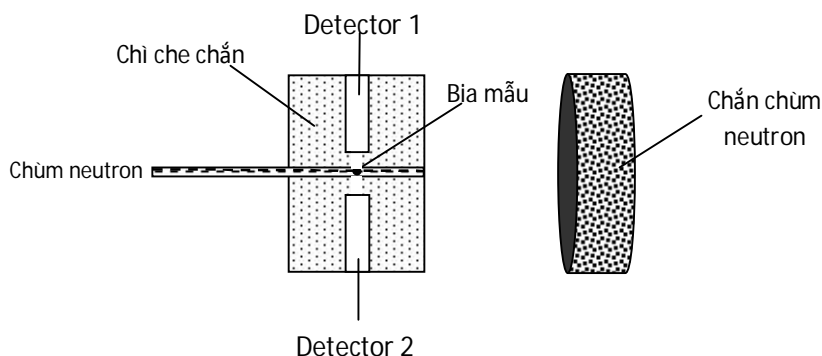
Bia mẫu thực nghiệm (hình 3) là kim loại niken, dạng đĩa, đường kính 2cm, dày

0,5cm, khối lượng 7,82gam; độ phổ biến đồng vị như sau [10]: ^{58}Ni : 68,08%, 4,6 barn; ^{60}Ni : 26,22%, 2,9 barn; ^{61}Ni : 1,14%, 2,5 barn; ^{62}Ni : 3,64%, 15,0 barn; ^{64}Ni : 0,93%, 1,6 barn.

Bia mẫu được kích hoạt bằng dòng neutron nhiệt tại kênh số 3 của Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Dòng neutron nhiệt được chuẩn trực với đường kính 1,5cm, thông lượng dòng neutron $\sim 10^6$ n/cm²/s, tỉ số cadmi/vàng của dòng neutron là 350.

Hệ đo thực nghiệm là hệ trùng phùng gamma – gamma, được trình bày chi tiết trong tài liệu [1,11]. Hai detector là loại HpGe siêu tinh khiết, hiệu suất ghi của hai detector là 15% và 20%, độ phân giải tương ứng là 1,6keV và 1,9keV tại năng lượng 1332,5keV. Số trùng phùng ngẫu nhiên khi Lò phản ứng hoạt động công suất 500kW nhỏ hơn 10^{-6} sự kiện/s. Thời gian phân giải của hệ là 14,3ns. Hai khối chì đúc dày 10cm đảm bảo che chắn tối đa phóng xạ gamma từ Lò phản ứng, đồng thời mặt trước các detector được lót tấm chì dày 2mm nhằm chắn tán xạ gamma và tia X.

Bia mẫu được bố trí theo góc 45^0 so với dòng neutron, khoảng cách từ bia mẫu đến mỗi detector là 5cm. Hai detector của hệ trùng phùng đặt đối xứng nhau để thu nhận xác suất chuyển dời gamma nổi tăng là lớn nhất. Hình 4 trình bày cách bố trí bia mẫu và detector.



Hình 3. Hình ảnh của bia mẫu niken

Hình 4. Bố trí bia mẫu và detector

3.2. Phương pháp thu nhận kết quả

Hệ ghi nhận dữ liệu theo phương pháp trùng phùng “sự kiện - sự kiện”, xử lý phổ theo phương pháp cộng biên độ các xung trùng phùng. Quá trình thu nhận dữ liệu dưới dạng mã biên độ đã loại bỏ được hiện tượng trôi kênh với thời gian đo dài, và có thể cộng được các số liệu ở các đợt đo khác nhau làm tăng số đếm thống kê của số liệu.

Để xây dựng được sơ đồ phân rã, cần xác định dịch chuyển là sơ cấp hay thứ cấp. Với phương pháp cộng biên độ các xung trùng phùng, sơ đồ phân rã được xây dựng theo quy tắc sau [1]:

1) Nếu một tia gamma xuất hiện trong hai phổ nổi tăng trở lên được xem là các chuyển dời gamma sơ cấp, các dịch chuyển nổi tăng tương ứng sẽ là dịch chuyển

gamma thứ cấp. Mức trung gian sẽ có năng lượng bằng $B_n - E_\gamma$, B_n là năng lượng kích thích của hạt nhân hợp phần khi phân rã gamma;

2) Trường hợp cả hai tia gamma của một dịch chuyển nối tầng chỉ xuất hiện duy nhất trong một phổ nối tầng, việc lựa chọn dịch chuyển sơ cấp hay thứ cấp có thể tham khảo từ kết quả phép đo (n, γ) theo các quy tắc sau:

i) Thứ tự dịch chuyển là khả dĩ nhất khi trong sơ đồ mức có thể đưa vào nhiều nhất các dịch chuyển, mà dịch chuyển đó không thể xếp được theo điều kiện trên;

ii) Sự sai lệch giữa tổng năng lượng của dịch chuyển thứ cấp và năng lượng mức cuối E_f là nhỏ nhất;

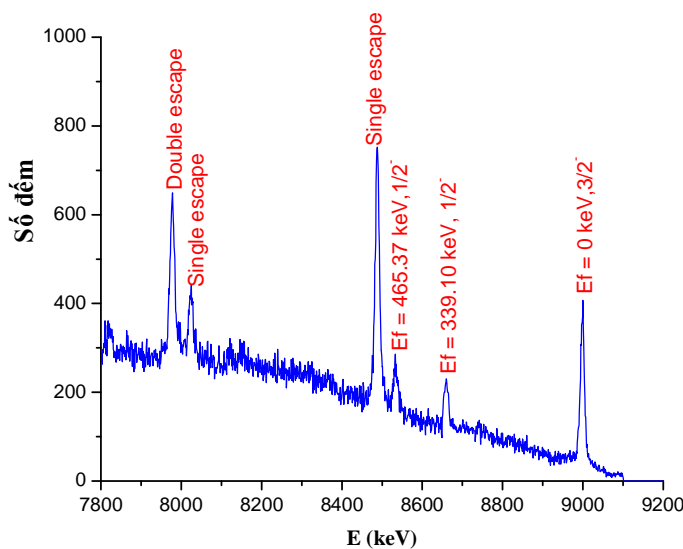
iii) Tổng cường độ các dịch chuyển thứ cấp về mức trung gian giả định không khác nhiều so với các mức bên cạnh đo bằng phương pháp $(n, 2\gamma)$.

Bên cạnh đó, xây dựng sơ đồ mức theo phương pháp $(n, 2\gamma)$ cần có một số điều kiện sau:

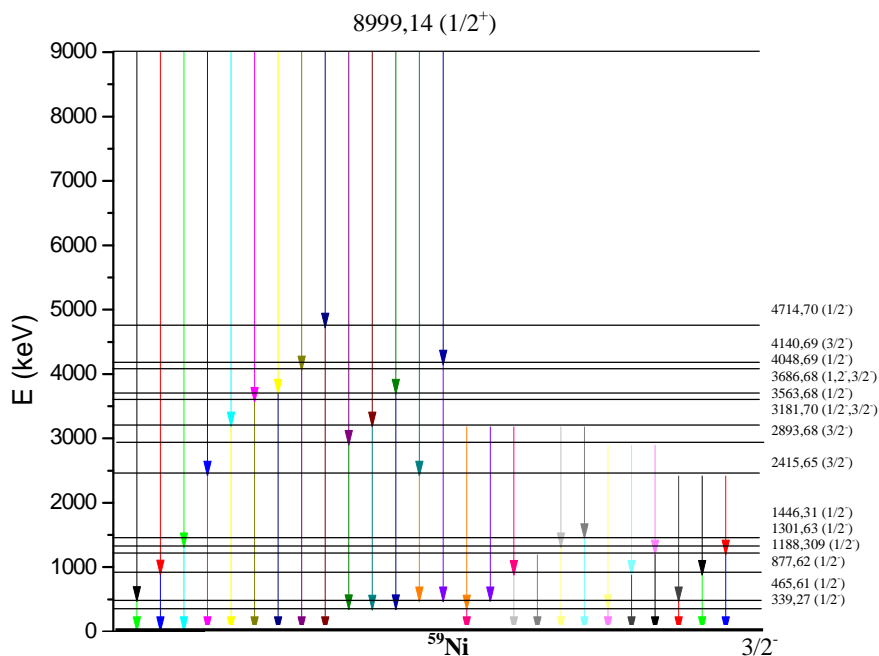
- Cường độ nối tầng phải lớn hơn 10^{-4} phân rã/s;
- Năng lượng mức cuối phải nhỏ hơn 2 MeV.

4. Kết quả thực nghiệm và biện luận

Thời gian tiến hành đo thực nghiệm là 400 giờ. Hình 5 là một phần phổ tổng của ^{59}Ni . Số sự kiện trùng phùng thu được của ^{59}Ni tại năng lượng liên kết của neutron với hạt nhân ($B_n = 8999,14 \text{ keV}$) khoảng 6200 số đếm, đảm bảo sai số thống kê bé. Hình 6 trình sơ đồ chuyển dời gamma nối tầng của ^{59}Ni đo được bằng thực nghiệm với các chuyển dời bậc hai và bậc ba (được suy ra từ năng lượng mức cuối E_f). Năng lượng các mức, spin và độ chẵn lẻ của mức được tính toán theo công thức (1), (2), (3) và (4).



Hình 5. Một phần phổ tổng của ^{59}Ni



Hình 6. Chuyển dời nội tầng của ^{59}Ni và spin, độ chẵn lẻ của các mức

Bảng 1 trình bày kết quả thực nghiệm với các giá trị năng lượng chuyển dời gamma nội tầng, các mức thực nghiệm, hệ số rẽ nhánh của từng mức năng lượng. Thời gian sống và độ rộng mức được tính từ công thức (5), (6), (7), (8) và (9). Sai số của năng lượng được tính xấp xỉ 1 keV, sai số hệ số rẽ nhánh được tính theo phương pháp truyền sai số với đóng góp gồm: sai số thống kê diện tích đỉnh, sai số do khớp hàm hiệu suất, sai số do độ phi tuyến của khuếch đại phổ kế.

Bảng 1. Mức, thời gian sống, độ rộng mức, năng lượng chuyển dời gamma nội tầng và hệ số rẽ nhánh các mức của ^{59}Ni thu được từ phản ứng $^{58}\text{Ni}(n, 2\gamma)^{59}\text{Ni}$

| Mức trên (keV) | Thời gian sống trung bình của mức (s) | Độ rộng mức (eV) | Năng lượng (keV) | Mức dưới (keV) | Hệ số rẽ nhánh $B\gamma_i \pm \Delta B\gamma_i$ (%) |
|----------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|----------------|---|
| 8999,14 | $2,36 \times 10^{-18}$ | $2,79 \times 10^{-2}$ | 6583,49 | 2415,65 | 5,157(074) |
| | | | 4858,45 | 4140,69 | 7,726(062) |
| | | | 8533,53 | 465,61 | 38,410(056) |
| | | | 8121,52 | 877,62 | 10,005(056) |
| | | | 7697,51 | 1301,63 | 3,554(077) |
| | | | 6583,49 | 2415,65 | 1,946(080) |
| | | | 5817,47 | 3181,67 | 2,688(072) |
| | | | 5435,47 | 3563,68 | 2,453(078) |
| 5312,46 | 3686,68 | 1,566(078) | | | |

| | | | | | |
|---------|------------------------|-----------------------|---------|---------|-------------|
| | | | 4950,46 | 4048,69 | 2,390(070) |
| | | | 4284,44 | 4714,70 | 1,933(080) |
| | | | 6105,48 | 2893,66 | 9,049(056) |
| | | | 5817,47 | 3181,67 | 10,455(078) |
| | | | 5312,46 | 3686,68 | 2,668(083) |
| 3686,68 | $7,68 \times 10^{-16}$ | $8,57 \times 10^{-4}$ | 3686,43 | 0,00 | 36,977(484) |
| | | | 3347,42 | 339,25 | 63,023(516) |
| 3181,70 | $2,84 \times 10^{-15}$ | $2,32 \times 10^{-4}$ | 2843,41 | 338,25 | 30,956(194) |
| | | | 2717,41 | 464,29 | 12,013(127) |
| | | | 2304,40 | 877,30 | 10,415(121) |
| | | | 1993,40 | 1188,30 | 22,728(109) |
| | | | 1880,39 | 1301,31 | 9,034(112) |
| | | | 1735,39 | 1446,31 | 9,644(162) |
| | | | 3181,42 | 0,00 | 5,209(136) |
| 2893,68 | $2,84 \times 10^{-15}$ | $2,38 \times 10^{-4}$ | 2554,41 | 339,25 | 45,509(337) |
| | | | 2016,40 | 877,28 | 47,227(331) |
| | | | 1703,39 | 1190,29 | 7,264(213) |
| 2415,65 | $7,81 \times 10^{-15}$ | $8,43 \times 10^{-6}$ | 1950,40 | 464,20 | 45,850(328) |
| | | | 2415,41 | 0,00 | 6,104(230) |
| | | | 1537,39 | 877,21 | 30,142(194) |
| | | | 1226,38 | 1188,22 | 17,903(248) |

Kết quả thực nghiệm cho thấy các mức trung gian của nghiên cứu này có sự trùng khớp với các mức của những nghiên cứu trước đây của các tác giả khác [4, 5, 6, 7]. Tuy nhiên, cường độ (hệ số rẽ nhánh) của các mức có sự khác biệt. Điều này có thể giải thích do các tác giả khác đã sử dụng phương pháp (n,γ) để thực hiện việc thu nhận kết quả, do vậy cường độ được tính theo tổng của các chuyển dời về mức trung gian, và không thể tách các cường độ chuyển dời một cách trực tiếp, do vậy sẽ dẫn đến sự sai lệch ở các cường độ nổi bật.

Về thời gian sống của mức, chỉ mới một công trình công bố [7] với thời gian sống ở các mức năng lượng thấp (nhỏ hơn 2MeV), do vậy với các mức năng lượng trung gian lớn hơn 2MeV ở thực nghiệm này thì không thể so sánh, đây cũng là phần chưa đầy đủ của số liệu thực nghiệm vùng năng lượng trung gian của các hạt nhân trung bình.

5. Kết luận

Kết quả đã xác định được hệ số rẽ nhánh của 05 mức kích thích của ^{59}Ni . Kết hợp với lý thuyết của mẫu đơn hạt, đã tính thời gian sống và độ rộng của các mức kích thích này. Độ rộng mức nằm trong dải từ 10^{-6} eV đến 10^{-2} eV, thời gian sống của các mức khá nhỏ, nằm khoảng từ 10^{-18} s đến 10^{-15} s. Kết quả này cho thấy hệ số tỉ lệ giữa thời gian sống của mức với độ rộng mức toàn phần theo hằng số Dirac \hbar khoảng 10^4 . Thời gian sống của mức phù hợp với dự đoán của mẫu đơn hạt, những mức năng lượng thấp có thời gian sống dài hơn, và những mức có độ lệch spin nhỏ có thời gian sống ngắn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vương Hữu Tấn và cộng sự (2010), *Nghiên cứu phát triển hệ thống phổ kế hạt nhân đo trên chùm neutron phục vụ nghiên cứu chuyển dời gamma nổi tầng, đo đặc số liệu hạt nhân và các ứng dụng liên quan*, Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam.
2. Kwang-Hoon Ko, Do-Young Jeong, et al (2006), “Time-of-Flight Mass Spectrometer Combined with a Magneto-Optical Trap for an Isotope Analysis of Strontium”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 49, No. 1, pp.444-448.
3. Schwarzschild, A., Warburton, E. (1968), “The Measurement of Short Nuclear Lifetimes”, *Annual Rev. Nuclear. Sci.* 18, pp. 265-290.
4. B. J. Allen, M. J. Kenny and R. J. Sparks (1968), “keV neutron capture in nickel”, *Nuclear Physics*, A122, pp.220-233.
5. J. D. Hutton and N. R. Roberson (1973), “A study of low-lying level in ^{59}Ni ”, *Nuclear Physics A206*, pp.403-416.
6. M. Pichevar, J. Delaunay and B. Delaunay (1976), “High-spin states in ^{59}Ni ”, *Nuclear Physics*, A264, pp.132-150.
7. D. C. S. White, W. J. Mc Donald, D. A. Hutcheon and G. C. Neilson (1976), “Pulsed beam lifetime measurements in ^{64}Cu , ^{59}Ni , ^{65}Zn , $^{45,47,49}\text{Ti}$ and $^{47,49, 50,51}\text{V}$ ”, *Nuclear Physics A260*, pp.189-212.
8. Gordon Gilmore (2008), *Practical gamma ray spectrometry*, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
9. J. M. Blatt and V. F. Weisskopf (1972), *Theoretical Nuclear Physics*, John Wiley and Sons, Newyork.
10. J. Magill, G. Pfennig, J. Galy (2006), *Chart of the nuclides*, the 7th edition, European Communities.
11. Pham Dinh Khang, V.H. Tan, N.X. Hai, N.N. Dien (2011), “Gamma-gamma coincidence spectrometer setup for neutron activation analysis and nuclear structure studies”, *Nucl. Instr. and Meth.*, A634, pp.47-51.
12. Nguyen An Son, Pham Dinh Khang, Nguyen Duc Hoa, Nguyen Xuan Hai, Dang Lanh, Truong Van Minh (2013), Study of Gamma Cascades of ^{59}Ni by Thermal Neutron Reaction, *Research Journal in Engineering and Applied Sciences (RJEAS)*, Vol 02, Number 06, pp.409-412.

(Ngày Tòa soạn nhận được bài: 21-5-2014; ngày phản biện đánh giá: 05-8-2014;
ngày chấp nhận đăng: 20-8-2014)