

PHỔ CỦA HẠT NHÂN ^{67}Fe QUA PHẢN ỨNG (p,np)

B. D. LINH¹, A. CORSI², L.X. CHUNG², A. GILLIBERT,² N. T. KHAI¹, A. OBERTELLI², C. SATAMARIA²

1. Institute for Nuclear Science and Technology (INST), 179 Hoang Quoc Viet, Hanoi, Vietnam
2. Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe (IRFU), CEA Saclay, France

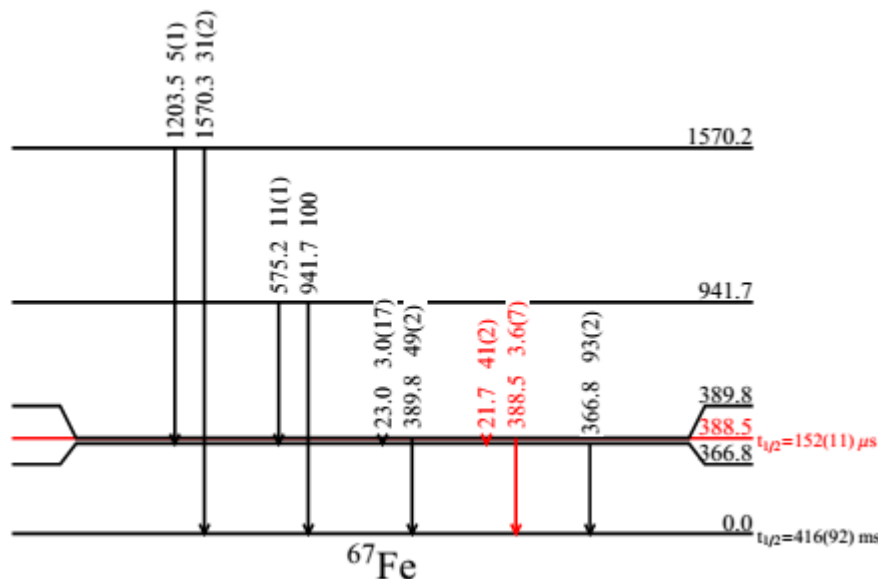
Email: buiduylinh97@gmail.com

Tóm tắt: Báo cáo trình bày kết quả ghi nhận và phân tích phổ gamma phát xạ trên đường bay của ^{67}Fe được tạo thành từ kênh phản ứng (p,pn). Thí nghiệm được thực hiện tại RIKEN trong khuôn khổ dự án quốc tế SEASTAR nghiên cứu hạt nhân giàu neutron. Các chuyển dịch gamma tức thời có năng lượng 575.2 keV, 941.7 keV, 1570 keV và trạng thái đồng phân có năng lượng 387 keV của ^{67}Fe đã được ghi nhận. Ngoài ra, báo cáo cũng sẽ trình bày chi tiết về cấu hình thí nghiệm và phương pháp nhận diện hạt.

Từ khóa: SEASTAR, ^{67}Fe , nhận diện hạt, phổ gamma

I. MỞ ĐẦU

Hạt nhân nguyên tử là một hệ tuân theo lực hạt nhân và cơ học lượng tử, bằng chứng chính là cấu trúc vỏ của các nucleon. Các hạt nhân có lớp vỏ được điền đầy bởi proton hoặc neutron được gọi là hạt nhân magic và có dạng hình cầu. Tuy nhiên, các số magic này không phải là luôn đúng cho các hạt nhân giàu nucleon nằm xa vùng bền, ví dụ như sự biến mất của số magic $N=28$ trong hạt nhân ^{42}Si [1] hoặc sự xuất hiện lớp vỏ đóng của hạt nhân hai lần magic ^{22}O [2]. Các hạt nhân không bền này có thời gian sống rất ngắn. Vì vậy, phương pháp đo phổ gamma tức thời phát ra của các hạt nhân trên đường bay ngay sau phản ứng là công cụ tốt nhất để nghiên cứu sự tiến hóa của lớp vỏ hạt nhân giàu nucleon. Dự án nghiên cứu SEASTAR được xây dựng với mục đích tìm kiếm hệ thống năng lượng kích thích $2^+_1(E(2^+_1))$ của các hạt nhân từ ^{52}Ar đến ^{110}Zr [3]. Thí nghiệm đầu tiên được thực hiện tại RIKEN tháng 5 năm 2014 để đo phổ các hạt nhân lân cận vùng $N=34$ và $N=40$.



Hình 1. Sơ đồ mức kích thích các trạng thái 366.8 keV, 388.5 keV, 389.8 keV, 941.7 keV và 1570.2 keV của hạt nhân ^{67}Fe [5]

Hạt nhân ^{67}Fe là hạt nhân chẵn-lẻ có 26 proton và 41 neutron, có chu kỳ bán rã là 416(92) ms [4][5]. Trước năm 2014, hạt nhân giàu neutron này được biết đến với hai trạng

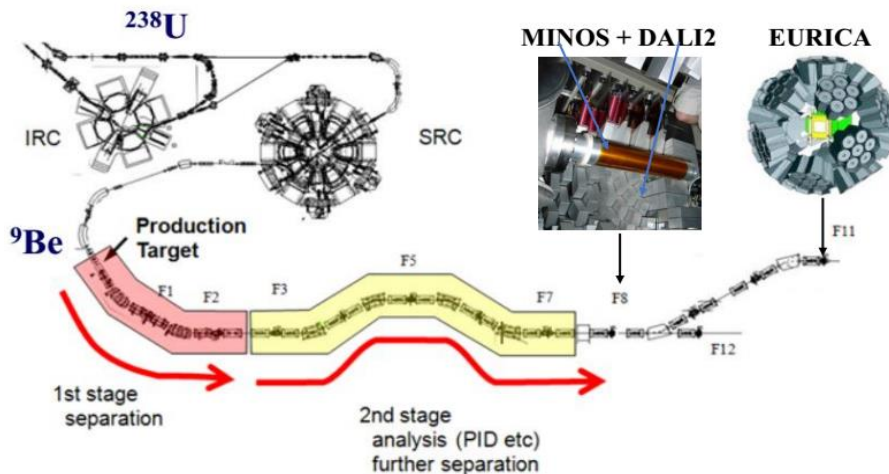
thái có mức năng lượng 367 keV và 387 keV[4]. Trong đó, trạng thái 387 keV là trạng thái đồng phân (trạng thái kích thích có thời gian sống dài), nó là bằng chứng cho sự biến dạng của hạt nhân ^{67}Fe , một hạt nhân giàu neutron trong vùng đảo ngược $N=40$ [4]. Năm 2014, Deyan RADULOV đưa ra sơ đồ mức kích thích của ^{67}Fe thông qua phân rã β^- của ^{67}Mn [5]. Ngoài hai trạng thái đã biết, tác giả này công bố 15 trạng thái kích thích mới và bằng chứng về cấu trúc doublet (2 mức năng lượng 366.8 keV và 389.8 keV – hình 1) của hạt nhân chẵn lẻ ^{67}Fe .

Trong báo cáo này, chúng tôi sẽ trình bày kết quả phân tích phổ của ^{67}Fe từ kênh phản ứng $^{68}\text{Fe}(p,pn)^{67}\text{Fe}$ trong bộ số liệu của chiến dịch thí nghiệm SEASTAR đầu tiên.

II. CẤU HÌNH THÍ NGHIỆM VÀ CÁC DETECTOR GHI NHẬN

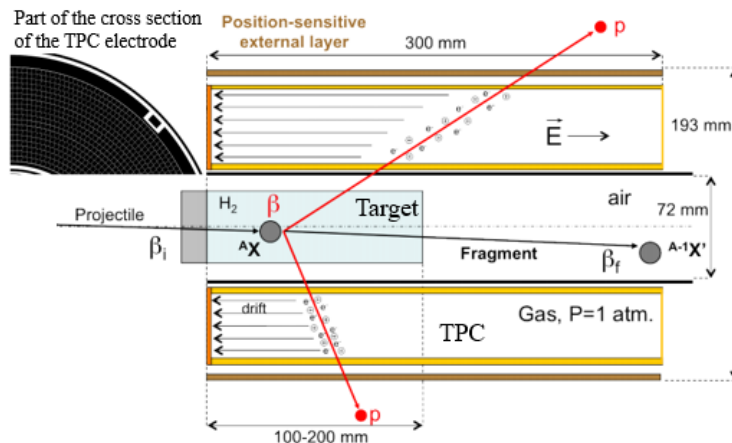
1. Cấu hình thí nghiệm

Chùm sơ cấp ^{238}U có năng lượng 345 MeV/u được tạo ra từ hệ thống máy gia tốc SRC (Superconducting Ring Cyclotron). Tại vị trí lối vào của BigRIPS[6][7], ^{238}U được bắn vào bia ^9Be tạo phản ứng phân mảnh. Chùm thứ cấp (ví dụ ^{68}Fe) thu được sẽ gây phản ứng “knockout” với bia LH_2 (liquid hydrogen) đặt tại vị trí F8 (lối vào của ZeroDegree) – hình 2. Xung quanh bia là hệ thống detector chính, chúng bao gồm MINOS[8][9] và DALI2[10][11]. Các hạt proton tạo ra trong phản ứng được đo bởi detector MINOS. Detector DALI2 dùng để đo gamma tức thời phát ra từ các hạt nhân nặng đang bay. Các hạt nhân này tiếp tục được dẫn tới detector EURICA[12][13] đặt trong hệ thống ZeroDegree. EURICA là hệ thống detector dùng để đo gamma trễ.



Hình 2. Cấu hình thí nghiệm nghiên cứu

2. Detector MINOS



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý và cấu tạo của MINOS

MINOS là cụm từ viết tắt của “nuclear Magic Number Off Stability”, đây là một thiết bị gồm một bia phản ứng hydro lỏng (LH₂) đặt trong một TPC (Time Projection Chamber) [8] – hình 3. Phần điện cực ghi nhận của TPC chia làm 18 hình vành khuyên đồng tâm. Mỗi vòng được chia nhỏ thành các “miếng” và cho phép ghi nhận được thông tin tọa độ X và Y. Hệ thống điện tử của TPC có 3604 kênh. Các ion được tạo ra khi proton đi chuyển trong buồng khí của TPC dài 300 mm. Thời gian trôi về các điện cực của các ion này cho phép xác định vị trí tương tác (Z_v) của proton. Vị trí X_v và Y_v được định nghĩa bằng tín hiệu xuất hiện 3604 miếng trên điện cực.

Việc xác định chính xác vị trí tương tác với proton cung cấp các thông tin quan trọng cho các hiệu chỉnh về năng lượng mất trong bia. Từ đó, chúng ta tính được vận tốc của sản phẩm phản ứng, đây là đại lượng quan trọng dùng cho hiệu chỉnh Doppler đối với các phép đo năng lượng gamma tức thời. Phía trước của bia thứ cấp LH₂ đặt 2 detector PPAC[14]. Chúng được sử dụng để xác định vị trí phản ứng trong trường hợp chỉ có 1 proton phát ra sau phản ứng (ví dụ phản ứng (p,p') hoặc (p,pn)). Điểm tương tác trong trường hợp này sẽ được xác định là giao điểm của đường thẳng của hạt tới và vết của proton được xác định bằng MINOS. Trong trường hợp có nhiều hơn 1 proton được phát ra sau phản ứng (ví dụ phản ứng (p,2p) hoặc (p,2pn)), vị trí tương tác được định nghĩa bằng vết của 2 proton đo bởi MINOS.

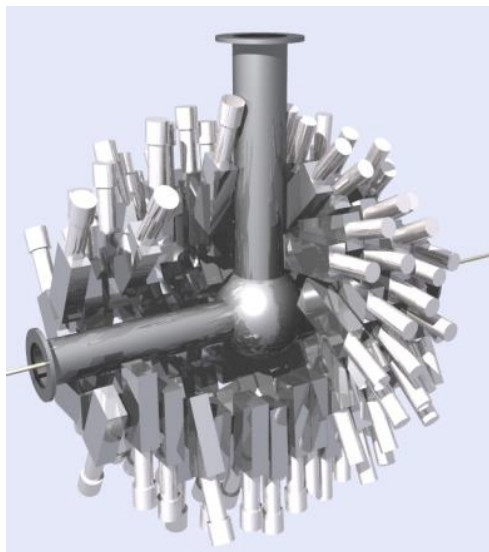
3. Detector DALI2

Detector DALI2 (Detector Array for Low Intensity radiation) bao gồm 186 tinh thể NaI(Tl) (hình 4) được bố trí xung quanh hệ thống bia và MINOS. Ngoài việc đo năng lượng gamma, DALI2 còn cho phép xác định vị trí và góc của tia gamma [11].

Trong thí nghiệm, DALI2 đo các tia gamma tức thời với góc khối xấp xỉ 4π . Các gamma tức thời này được phát ra từ hạt nhân ⁶⁷Fe đang bay với $\beta \sim 0.57$. Do đó, năng lượng gamma dùng để nghiên cứu trạng thái kích thích của hạt nhân cần được hiệu chỉnh hiệu ứng Doppler theo công thức (1):

$$E_{\gamma 0} = E_{\gamma} \frac{1 - \beta \cos \theta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1)$$

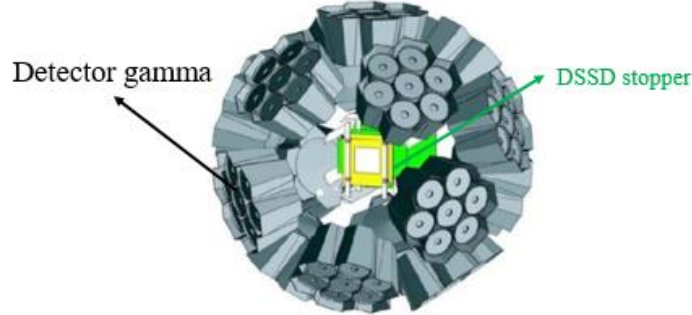
trong đó, $E_{\gamma 0}$ và E_{γ} là năng lượng ứng với trạng thái nghỉ của ⁶⁷Fe và năng lượng đo được trực tiếp của tia gamma, θ là góc phát của tia gamma, $\beta = v/c$, v là vận tốc của hạt nhân, c là vận tốc ánh sáng.



Hình 4. Detector DALI2 với 168 tinh thể NaI(Tl)

4. Detector EURICA

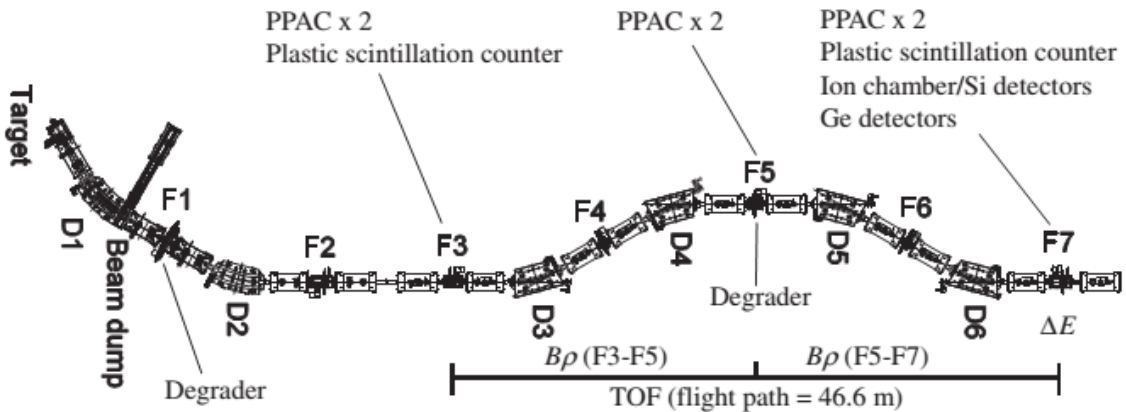
Detector EURICA (EUroball RIken Cluster Array) bao gồm hai phần: phần thứ nhất là detector gamma; phần thứ hai là DSSD (Double-side-stripped-silicon-detector) stopper (hình 5)[12][13]. Phần detector gamma bao gồm 84 tinh thể Ge tinh khiết được chia làm 12 bó với mục đích đo các tia gamma trẻ. DSSD stopper sử dụng để dừng chùm hạt tới bằng cách sử dụng 8 tấm DSSD với kích thước mỗi tấm 60 mm×40 mm×1 mm.



Hình 5. Detector EURICA

III. NHẬN DIỆN HẠT

Quá trình gia tốc hạt của BigRIPS được chia thành 2 giai đoạn (stage): giai đoạn thứ nhất từ F0 đến F3, giai đoạn thứ 2 từ F3 đến F7 (hình 6).



Hình 6. Sơ đồ bố trí của BigRIPS. Các ký hiệu D_n và F_n tương ứng với vị trí các nam châm lưỡng cực từ và tiêu điểm. Giai đoạn 1 bắt đầu từ F0 (chứa bia sơ cấp) đến F2, có thể gọi là giai đoạn sản xuất chùm. Giai đoạn 2 bắt đầu từ F3 đến F7, nơi đặt các detector sử dụng để nhận diện hạt.

Phương pháp TOF- $B\rho$ - ΔE được sử dụng để nhận diện và tách hạt trong giai đoạn từ F3 đến F7 [6][7]. Ở đây, TOF (Time Of Flight) là thời gian bay; $B\rho$ là cường độ từ trường tỉ lệ với A/Q của hạt (A là số khối, Q là điện tích); ΔE là độ mất năng lượng của hạt. Phép đo thời gian bay sử dụng hai detector nhấp nháy đặt tại F3 và F7, F9 và F11, đại lượng này dùng để tính vận tốc β theo phương trình (2):

$$TOF = \frac{L}{\beta c} \quad (2)$$

trong đó: $L = 46.6$ m là quãng đường bay của hạt (hình 6).

Tại mỗi tiêu điểm (F3, F5, F7, F9 và F11) đặt hai detector PPAC (position-sensitive Parallel Plate Avalanche Counter – một loại detector tọa độ)[14] dùng cho phép đo $B\rho$. Giá trị $B\rho$ này kết hợp với giá trị vận tốc β tính được trong phương trình (2) được sử dụng để xác định tỉ số A/Q theo phương trình (3):

$$\frac{A}{Q} = \frac{B\rho c}{\beta\gamma m_u} \quad (3)$$

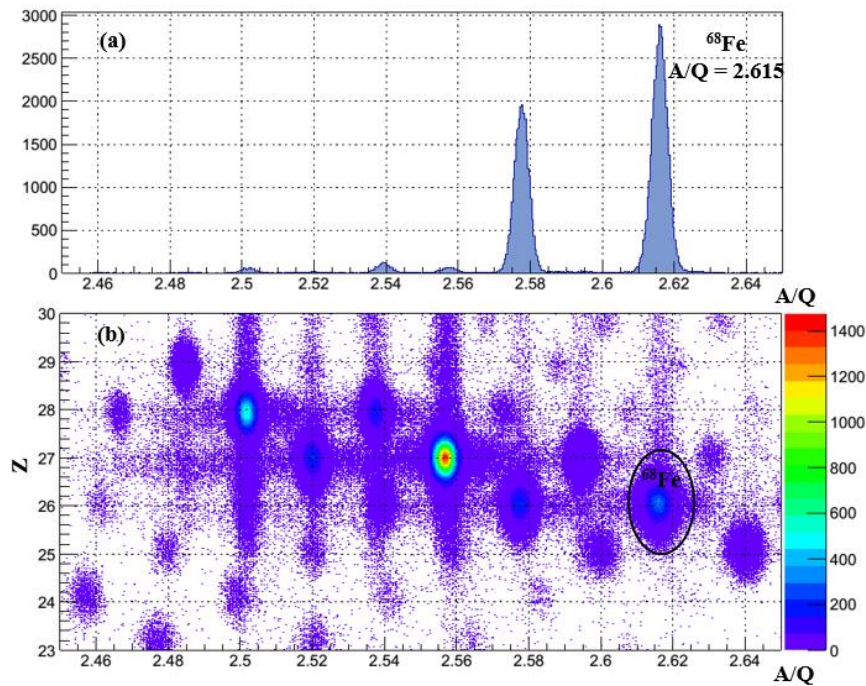
trong đó : A là số khối và điện tích $Q=Ze$ đối với các hạt nhân bị tước hoàn toàn lớp vỏ electron (Z là số hiệu nguyên tử, e là điện tích nguyên tố), $m_u=931.494$ MeV là đơn vị khối lượng nguyên tử, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$

Số hiệu nguyên tử Z của hạt nhân phân mảnh được tính bằng công thức (4) - công thức Bethe-Block. Độ mất năng lượng ΔE của các hạt nhân này được đo bằng detector MUSIC (MULTI-Sampling Ionization Chamber) [15] đặt ở tiêu điểm F7, F11.

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2 Z^2}{m_e v^2} N z \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad (4)$$

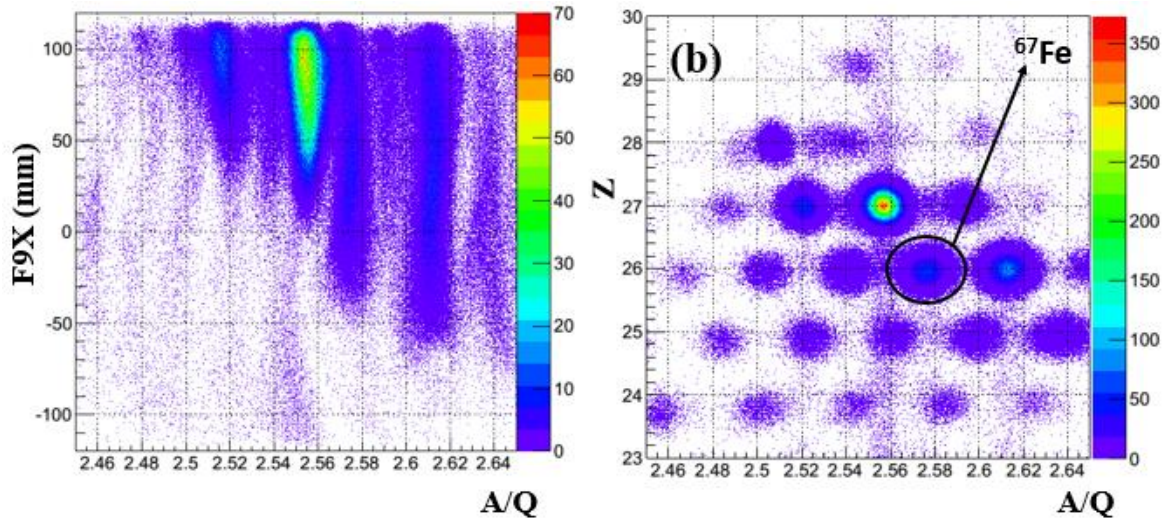
trong đó: m_e là khối lượng của electron, e là điện tích nguyên tố, z , N và I tương ứng với số hiệu nguyên tử, mật độ nguyên tử và thế năng kích thích trung bình của vật liệu, Z là số hiệu nguyên tử của hạt tới.

Xây dựng tương quan giữa Z và tỉ số A/Q như trên hình 7 cho phép xác lựa chọn chùm hạt tới của kênh phản ứng $^{68}\text{Fe}(p,pn)^{67}\text{Fe}$. Chùm hạt nhân ^{68}Fe là vùng được khoanh tròn màu đen nằm ở vị trí $Z=26$ và tỉ số $A/Q \approx 2.615$ (hình 7-(b)). Hình 7-(a) là hình chiếu của các đồng vị Fe trên trục A/Q .



Hình 7. Nhận diện hạt ^{68}Fe ở BigRIPS - (b), hình chiếu trên A/Q của đồng vị Fe có $Z=26$ - (a)

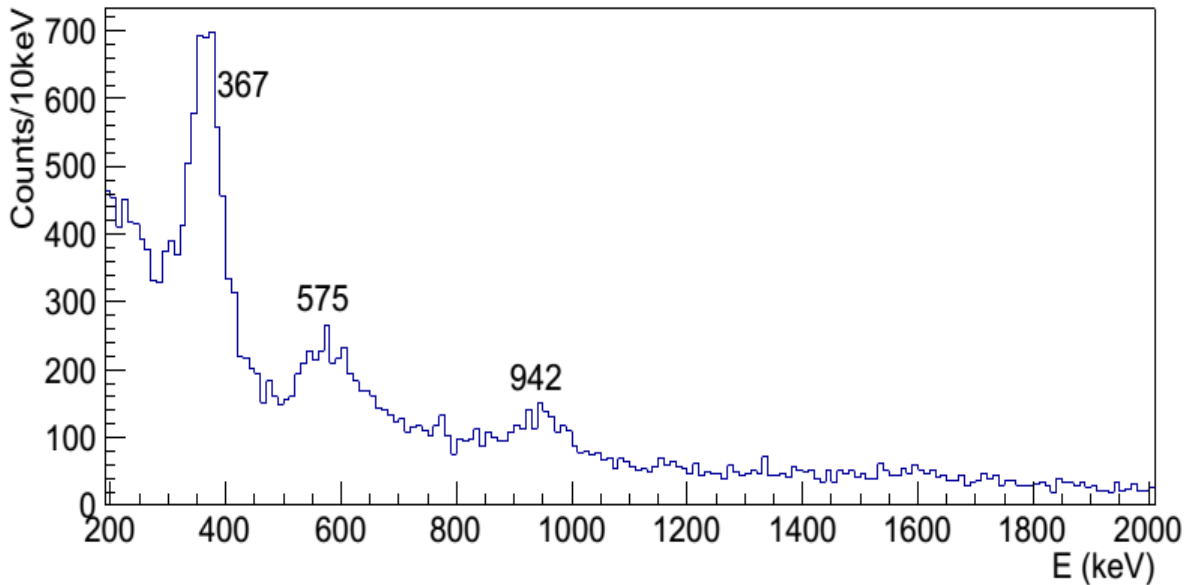
Nguyên lý nhận diện hạt nhân ^{67}Fe sau phản ứng trong ZeroDegree [7] từ F9 đến F11 tương tự như nguyên lý nhận diện ^{68}Fe trong giai đoạn 2 của BigRIPS. Do không có sự liên hệ chặt chẽ giữa tỉ số A/Q của hạt với ma trận tín hiệu về vị trí (X) và góc (A) đo được ở F9 và F11. Vì vậy, chúng ta cần có các hiệu chỉnh với các tín hiệu này để thu được kết quả tốt nhất. Phương pháp sử dụng để hiệu chỉnh cho đồng vị Fe được miêu tả trong trích dẫn [7]. Quá trình hiệu chỉnh là việc thay đổi các số hạng trong ma trận của phổ kế từ ZeroDegree sao cho tương quan tỉ số A/Q và các tín hiệu về vị trí và góc tại F9 và F11 là các đường thẳng. Hình 8-(a) là kết quả hiệu chỉnh A/Q với tín hiệu vị trí (X) ở F9. Hình 8-(b) là tương quan của Z và tỉ số A/Q ở ZeroDegree, hạt nhân ^{67}Fe là vùng được đánh dấu có $Z=26$ và $A/Q \approx 2.577$.



Hình 8. (a) - Tương quan giữa F9X và A/Q; (b) - Nhận diện hạt ^{67}Fe ở ZeroDegree.

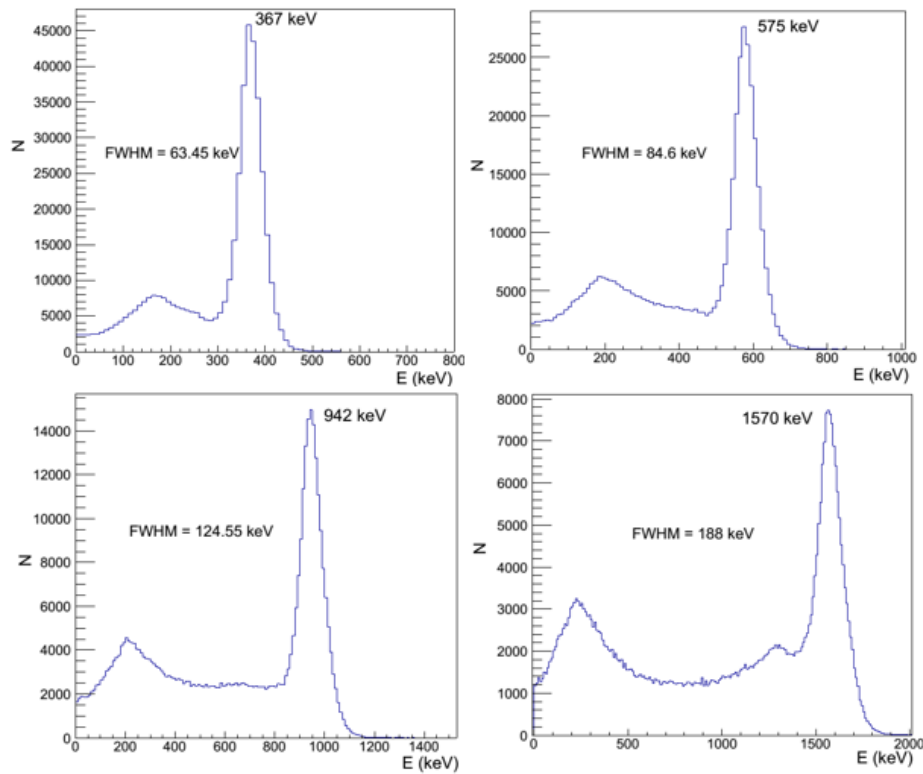
IV. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 9 là phổ gamma của ^{67}Fe đo được từ kênh (p,pn). Mỗi một detector NaI trong DALI2 được thiết lập một ngưỡng năng lượng và cửa sổ thời gian để định nghĩa tín hiệu đo. Tham số mult là số lượng detector NaI của DALI2 có tín hiệu. Sơ đồ mức trong trích dẫn[5] công bố 3 trạng thái có spin và độ chẵn lẻ là $3/2^-$, chúng có năng lượng kích thích lần lượt là 941.7 keV, 1359.4 keV và 1570.2 keV. Chúng tôi kì vọng các đỉnh ghi nhận được trong hình 9 là của các trạng thái này.

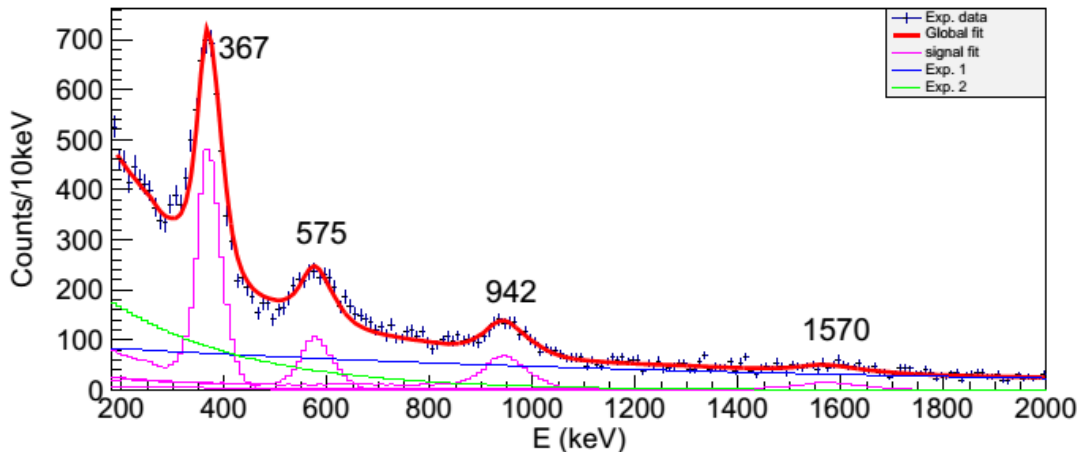


Hình 9. Phổ chuyển dịch trạng thái của ^{67}Fe tạo thành từ phản ứng ^{68}Fe (p,pn) với $mult \leq 2$ đo được ở DALI2

Kết quả mô phỏng hàm phản ứng của DALI2 đối với các gamma có năng lượng 367, 575, 942, 1570 keV được biểu diễn ở hình 10, độ phân giải (FWHM) của 4 đỉnh thu được bằng mô phỏng phù hợp với thí nghiệm. Hình 11 là kết quả làm khớp (fit) phổ thực nghiệm bằng tổng 4 phổ mô phỏng kết hợp với hai hàm mũ mô tả phông nền.



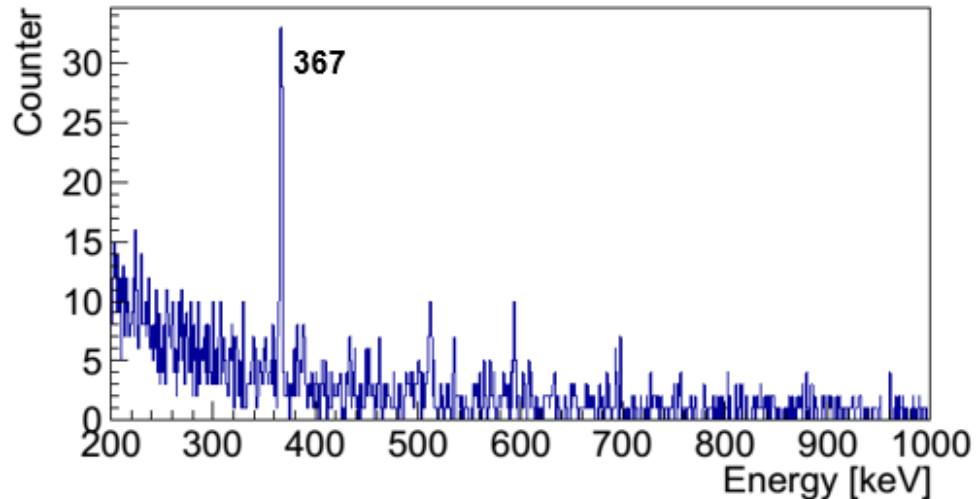
Hình 10. Kết quả mô phỏng các đỉnh năng lượng 367, 575, 942, 1570 keV trong DALI2



Hình 11. Fit phổ thực nghiệm bằng tổng 4 hàm phân ứng của DALI2 với năng lượng 367, 575, 942, 1570 keV và hai hàm mũ mô tả phổ nền.

Chúng ta có 4 đỉnh lớn ở các vị trí xấp xỉ 367 keV, 575 keV, 942 keV và 1570 keV. Đỉnh lớn đầu tiên (367) là kết quả phân rã từ cấu trúc “doublet” của hạt nhân ^{67}Fe . Nó có thể là dịch chuyển trực tiếp từ trạng thái 366.8 keV về trạng thái cơ bản, hoặc gián tiếp từ trạng thái 389.8 keV (chúng ta không đo được năng lượng dịch chuyển 23 keV) về trạng thái 366.8 keV rồi về trạng thái cơ bản hoặc cả hai (sơ đồ hình 1). Đỉnh lớn thứ hai ở vị trí 575 keV là đỉnh trùng phùng với dịch chuyển 367 keV. Với độ phân giải của phép đo DALI2, đỉnh thứ ba ở vị trí 942 keV là tổng của 367 keV và 575 keV. Đỉnh này có thể là phân rã từ trạng thái 941.7 keV hoặc 948.7 keV hoặc cả 2. Hai trạng thái gần nhau 941.7 keV và 948.7 keV có phân rã giống nhau, trạng thái 941.7 keV có cường độ lớn nhất trong các nhánh của phân rã β [5]. Hình dạng của đỉnh thứ ba trên hình 11 cho thấy nó chỉ là một dịch chuyển đơn. Mặc dù đỉnh dịch chuyển 1570 keV không nhìn rõ trong hình 9, nhưng kết quả fit ở hình 11 cho thấy sự đóng góp của nó vào phổ. Đỉnh ở vị trí 628 keV (đỉnh phân rã từ 1750 về 942 keV [5]), 980 keV và 1360 keV (một trạng thái khác có spin 3/2) không xuất hiện trong phổ.

Thời gian sống của trạng thái đồng phân là $152 \mu\text{s}$. Sau đó, nó sẽ phân rã theo hai nhánh về trạng thái cơ bản [5]: nhánh phân rã trực tiếp tạo nên đỉnh năng lượng 388.5 keV có cường độ nhánh là 3.6; nhánh phân rã gián tiếp qua đỉnh 367 keV có cường độ nhánh là 41. Hình 12 biểu diễn kết quả đo phổ gamma trễ của ^{67}Fe tại EURICA, đỉnh thu được là đỉnh 367 keV được tạo từ nhánh phân rã gián tiếp của trạng thái đồng phân.



Hình 12. Phổ gamma trễ của ^{67}Fe đo bằng EURICA

V. KẾT LUẬN

Báo cáo đã trình bày về cấu hình thí nghiệm, phương pháp nhận diện hạt, phân tích phổ trong chiến dịch thí nghiệm SEASTAR đầu tiên. Phép đo có độ phân giải cỡ vài chục keV, nhưng kết quả phân tích phổ ghi nhận ở DALI2 một lần nữa khẳng định về trạng thái dịch chuyển có spin $3/2^-$ của hạt nhân giàu neutron ^{67}Fe với các mức năng lượng 367 keV , 575 keV , 942 keV và 1570 keV . Sự dịch chuyển của trạng thái đồng phân 388.5 keV về trạng thái 367 keV của hạt nhân chẵn lẻ này cũng đã được xác nhận ở kết quả phân tích số liệu kết hợp giữa DALI2 và EURICA. Sau khi có các tính toán lý thuyết từ các đồng nghiệp, chúng tôi sẽ tiếp tục phân tích để đưa ra công bố về sơ đồ mức và tiết diện các trạng thái của hạt nhân ^{67}Fe .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bastin, B. et al., “Collapse of the $N = 28$ shell closure in ^{42}Si ”, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 022503, 2007.
- [2] E. Becheva et al., “The $N=14$ shell closure in ^{22}O viewed through a neutron sensitive probe”, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 012501, 2006.
- [3] P. Doornenbal and A. Obertelli, “Proposal for Nuclear Physics Experiment at RI Beam Factory”, *The 13th Program Advisory Committee (PAC) Meeting for Nuclear-Physics Experiments at RI Beam Factory, RIKEN*, 2013.
- [4] M. Sawicka, et al., “Isomeric decay of ^{67}Fe - Evidence for deformation”, *Eur. Phys. J. A16*, 51–54, 2003.
- [5] Deyan RADULOV, Phd Thesis: “Investigating the nuclear structure of the neutronrich odd-mass Fe isotopes, in the beta-decay of their parent – Mn”, *KU Leuven – Faculty of Science, Belgium*, 2014.
- [6] T. Kubo, “In-flight RI beam separator BigRIPS at RIKEN and elsewhere in Japan”, *Nucl. Instr. Meth. B*, Bd. 204, p. 97, 2003.

- [7] N. Fukuda et al., “Identification and separation of radioactive isotope beams by the BigRIPS separator at the RIKEN RI Beam Factory”, *Nucl. Instr. in Phys. Res. B*, Bd. 317, p. 323, 2013.
- [8] A. Obertelli et al., “A vertex tracker coupled to a thick liquid-hydrogen target for in-beam spectroscopy of exotic nuclei”, *Eur. Jour. Phys. A*, Bd. 50, p. 8, 2014.
- [9] A. Obertelli and T. Uesaka, “Hydrogen targets for exotic-nuclei studies developed over the past 10 years”, *Eur. Phys. J. A*, Bd. 47, p. 105, 2011.
- [10] P. Doornenbal, “In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, p. 03C004, 2012.
- [11] S. Takeuchi et al., “DALI2: A NaI(Tl) detector array for measurements of γ rays from fast nuclei”, *Nucl. Instr. Meth. A* 763, 596, 2014.
- [12] Par-Anders Soderstrom et al., “Status of the EURICA Project After One Year at RIKEN”, *EURICA_APPC12_proceedings*, Received July 4, 2013.
- [13] Shunji Nishimaru, “Beta-gamma spectroscopy at RIBF”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 03C006, 2012.
- [14] H. Kumagai et al., “Development of Parallel Plate Avalanche Counter (PPAC) for BigRIPS fragment separator”, *Nucl. Instr. in Phys. Res. B* 317, 717, 2013.
- [15] K. Kimura et al., “High-rate particle identification of high-energy heavy ions using a tilted electrode gas ionization chamber”, *Nucl. Instr. Meth. A* 538, 608–614, 2005.

GAMMA RAY SPECTRUM OF ^{67}Fe VIA THE (p,np) REACTION

Abstract: The in-beam gamma-ray spectrum of ^{67}Fe from (p,np) reaction is measured. The experiment was performed at RIKEN in the framework of the SEASTAR international project to study unstable neutron-rich nuclei. Prompt gamma transitions of 575.2 keV, 941.7 keV and 1570 keV and isomeric state with energy of 387 keV were observed. Besides, the experimental setup and the method for particle identification are discussed in details.

Keywords: SEASTAR, ^{67}Fe , particle identification, gamma ray spectrum.