

# Những hiệu chỉnh cho detector SBT và HODF của phổ kế từ SAMURAI

B. D. LINH<sup>1</sup>, L. X. CHUNG<sup>1</sup>, N. T. KHAI<sup>2</sup>, N. D. TON<sup>1</sup>, SEASTAR3 collaborator

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Science and Technology, 179 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Ha Noi

<sup>2</sup> VARANS, 14<sup>th</sup> floor, 113 Tran Duy Hung, Cau Giay, Ha Noi

buiduylinh@vinatom.gov.vn

**Tóm tắt:** SAMURAI là hệ phổ kế từ tại Viện nghiên cứu Hóa Lý RIKEN dùng cho các thí nghiệm cần xác định đầy đủ các tham số động học của hạt nhân sản phẩm như phổ bất biến khối lượng. Ưu điểm của hệ phổ kế từ này là khả năng thu nhận góc và xung lượng lớn, ghi đo trùng phùng nhiều hạt. Chiến dịch thí nghiệm lần thứ 3 của dự án (SEASTAR) “Nghiên cứu sự tiến hóa lớp vỏ và tìm kiếm hệ thống các trạng thái năng lượng  $2^+_1$ ” đã thực hiện trên phổ kế từ này. SBT (Plastic scintillator for Beam Trigger) cho phép đo thời gian bay và cắt ngưỡng, HODF (Hodoscope for fragments) đo thời gian bay và độ mất năng lượng của các mảnh được sử dụng trong hệ phổ kế từ SAMURAI. Do sự phụ thuộc của thời gian vào quá trình cắt ngưỡng đỉnh và sự phụ thuộc của vị trí vào sự đáp ứng của ánh sáng ra, việc hiệu chỉnh độ nghiêng và hiệu chỉnh đồng bộ tín hiệu của hệ detector là cần thiết để nhận diện hạt tốt nhất ở SAMURAI. Báo cáo trình bày hai hiệu chỉnh quan trọng này từ số liệu của thí nghiệm SEASTAR lần thứ 3.

Từ khóa: SEASTAR, nhận diện hạt, BigRIPS, SAMURAI, SBT, HODF

## I. MỞ ĐẦU

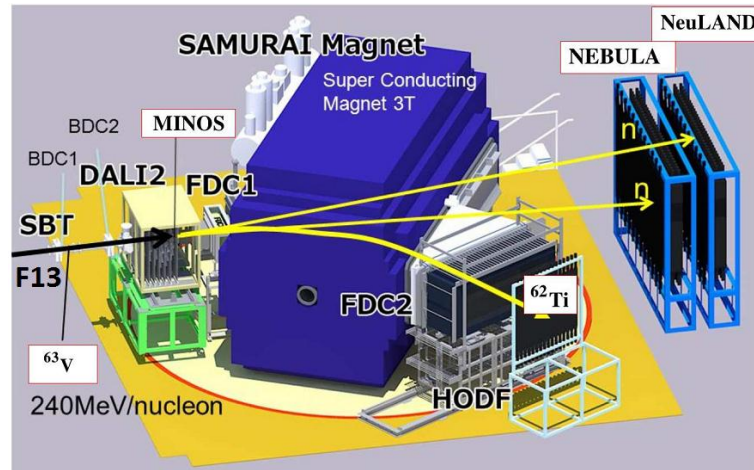
Cấu trúc của các hạt nhân gần vùng bền được đặc trưng bởi các lớp vỏ năng lượng giống trong nguyên tử với các số “magic” trong hạt nhân. Khi hạt nhân có số hạt proton hoặc neutron bằng 2, 8, 20, 28, 50, ... thì chúng rất bền vững. Các hạt nhân giàu proton hoặc neutron nằm xa vùng bền được gọi là các hạt nhân lạ, chúng đã giành được sự quan tâm rất nhiều từ các nhà khoa học, khi các máy gia tốc hiện đại đã tạo ra chùm đồng vị phóng xạ có cường độ lớn ở năng lượng cao. Trong các hạt nhân lạ, các nhà vật lý đã “quan sát” thấy các hiện tượng mới như hạt nhân halo hay hạt nhân có lớp da neutron [1, 2], hạt nhân có “sự xâm nhập trạng thái” (intruder states) [3, 4] và các số “magic” mới. Đặc biệt với các hạt nhân xa vùng bền và gần đường giới hạn proton hoặc neutron (tại đó năng lượng liên kết với nucleon ngoài cùng xấp xỉ 0), các nghiên cứu gần đây đã chứng minh về sự biến mất của số “magic”. Bên cạnh đó, các phát hiện về số “magic” mới trong vùng này cũng được công bố. Các bằng chứng thuyết phục như: sự biến mất của số “magic”  $N=28$  trong hạt nhân  $^{42}\text{Si}$  [6], sự xuất hiện số “magic” mới  $N=14$  trong  $^{22}\text{O}$  [7],  $N=32, 34$  trong đồng vị  $^{52,54}\text{Ca}$  [8, 9] và sự xuất hiện rõ ràng của một lớp vỏ đóng tại  $N=32$  của các đồng vị bên dưới hạt nhân “magic”  $Z=20$  [10, 11].

Dự án “Shell Evolution and Systematic Search for Energies at RIBF” (viết tắt là SEASTAR) có mục đích nghiên cứu các trạng thái kích thích thông qua việc đo đặc năng lượng gamma phát xạ của các hạt nhân giàu neutron từ  $^{47}\text{Cl}$  đến  $^{110}\text{Zr}$  [12]. Kết quả từ việc phân tích động học, phổ năng lượng kích thích của các hạt nhân sản phẩm cung cấp các thông tin về cấu trúc vỏ của các hạt nhân nằm xa vùng bền [13-16]. Chiến dịch thí nghiệm SEASTAR lần thứ 3 (SEASTAR 3) nghiên cứu lớp vỏ p-f trong các nhân xung quanh  $^{54}\text{Ca}$  nhằm nghiên cứu các vấn đề như sự định xứ của neutron trong lớp vỏ  $N=34$  của các hạt nhân nhỏ hơn  $^{54}\text{Ca}$ ; tương quan của các đồng vị Ca nặng hơn  $^{54}\text{Ca}$ ; biên giới hạn của vùng đảo ngược  $N=40$  trong các hạt nhân có  $Z$  thấp; hiện tượng đảo ngược trong  $^{47,49}\text{Cl}$  và  $^{53}\text{K}$ . Thí nghiệm sử dụng hệ phổ kế từ SAMURAI để đo đặc nhận diện các hạt nhân sau phản ứng thứ cấp. SAMURAI [17] (Superconducting Analyzer for Multi particles from Radio Isotope beams) là một phổ kế từ linh hoạt được đánh giá cao trong các thí nghiệm sử dụng chùm hạt

phóng xạ với ưu điểm về khả năng thu nhận góc và xung lượng lớn, ghi đo trùng phùng nhiều hạt. Nó được thiết kế cho các thí nghiệm sử dụng phương pháp bất biến khối lượng và chính thức đưa vào hạt động từ tháng 3 năm 2012. Hệ phổ kế từ này bao gồm một nam châm siêu dẫn ở trong có một khoang chân không lớn, xung quanh nam châm siêu dẫn này là các hệ detector đo hạt mang điện và neutron. Hệ phổ kế từ SAMURAI sử dụng phương pháp nhận diện TOF-B $\rho$ - $\Delta E$  như trong hệ phổ kế từ BigRIPS [18]. Các kết quả nhận diện hạt là cơ sở cho phép lựa chọn đúng kênh phản ứng cần quan tâm và giảm thiểu nhiễu nền trong phổ gamma. Trong báo cáo này, nhóm tác giả sẽ trình bày về sơ đồ bố trí thí nghiệm và hai hiệu chỉnh cần thiết để tối ưu nhận diện hạt bao gồm hiệu chỉnh độ nghiêng và hiệu chỉnh đồng bộ tín hiệu của hệ detector ở SAMURAI để thu được kết quả nhận diện tốt nhất trong chiến dịch thí nghiệm SEASTAR 3.

## II. SƠ ĐỒ THÍ NGHIỆM VÀ CÁC HIỆU CHỈNH

### 1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm SEASTAR 3

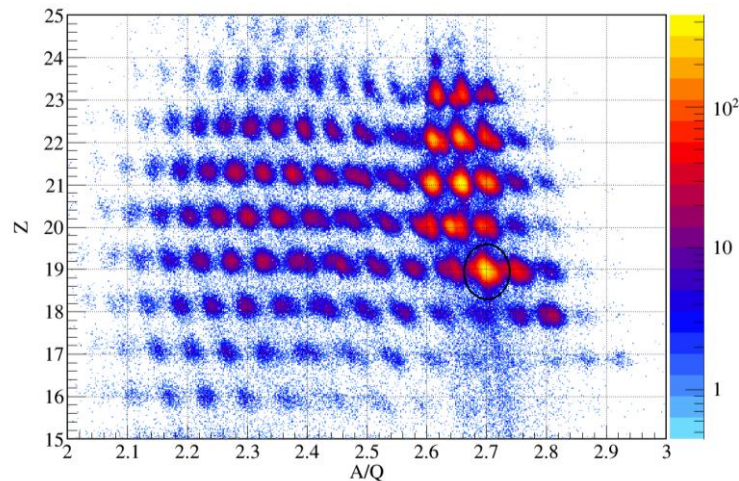


Hình 1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm SEASTAR 3 ở phổ kế từ SAMURAI, chi tiết được trình bày trong bài viết.

SEASTAR 3 là chiến dịch thí nghiệm tập trung đo các hạt nhân  $^{47,49}\text{Cl}$ ,  $^{50,52}\text{Ar}$ ,  $^{51,53}\text{K}$ ,  $^{55,56}\text{Ca}$  và  $^{60,62}\text{Ti}$ . Do đó, các thiết lập tham số trong BigRIPS dựa theo “setting  $^{53}\text{K}$ ” để có thể hội tụ đồng vị  $^{53}\text{K}$  vào trung tâm. Hệ thống gia tốc của RIBF [18] gia tốc chùm sơ cấp  $^{70}\text{Zn}$  đến năng lượng 345 MeV/u với cường độ 250 pA và bắn vào bia sơ cấp  $^9\text{Be}$  đặt tại vị trí lõi vào của hệ thống phân tách chùm hạt BigRIPS. Phản ứng phân mảnh của chùm hạt tới trên bia  $^9\text{Be}$  tạo ra sản phẩm là hỗn hợp các đồng vị giàu neutron. Hệ phổ kế BigRIPS nhận diện các mảnh vỡ trong hỗn hợp này bằng phương pháp TOF-B $\rho$ - $\Delta E$  [18] và dẫn chúng tới bia phản ứng thứ cấp đặt sau vị trí F13 (hình 1) của hệ phổ kế từ SAMURAI. Vị trí F13 có đặt 2 detector nhấp nháy SBT [17] để cắt ngưỡng cho phép đo thời gian của các hạt trong SAMURAI. Tại vị trí này, các hạt nhân tới từ BigRIPS có năng lượng cỡ 200 – 270 MeV/nucleon sẽ được theo dõi vị trí bằng 2 detector BDC1 & BDC2 [17], trước khi xảy ra phản ứng loại bỏ (knock-out) một hoặc vài nucleon với bia proton dày 150 mm được chế tạo ở dạng hydro lỏng trong thiết bị MINOS [19] tạo ra hỗn hợp gồm rất nhiều hạt nhân sản phẩm. Thiết bị MINOS có khả năng theo dõi vị trí hạt proton từ các phản ứng xảy ra trong bia H $_2$  lỏng để xác định vị trí phản ứng. Các tia gamma tức thời phát ra từ các hạt nhân sản phẩm sau phản ứng sẽ được đo bằng hệ detector nhấp nháy DALI2 [20, 21] bố trí xung quanh

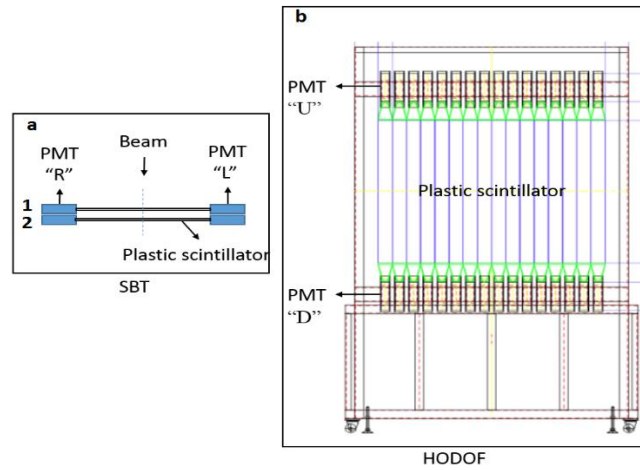
MINOS. Hệ detector đo tia gamma này bao gồm 226 tinh thể NaI có hiệu suất ghi > 20% với tia gamma có năng lượng 1 MeV và góc ghi đo xấp xỉ  $4\pi$ . Các hạt nhân sản phẩm sau phản ứng knock-out được phân tách khi di chuyển trong buồng chân không của nam châm siêu dẫn (SAMURAI Magnet). Các hạt neutron không tích điện có đường bay thẳng và được đo bởi hệ NEBULA [17] và NeuLAND [22]. Các hạt có điện tích sẽ bị bẻ cong (hình 1), quỹ đạo của chúng được đo bởi hệ detector FDC1 và FDC2 [17], độ mất năng lượng và thời gian bay được đo bằng detector HODOF [17].

## 2. Các hiệu chỉnh ở phổ kế từ SAMURAI



Hình 2. Tương quan  $Z$  và tỉ số  $A/Q$  để nhận diện hạt trong phổ kế từ SAMURAI trước khi hiệu chỉnh.

Như đã trình bày ở trên, các hạt nhân sản phẩm trong phản ứng trên bia MINOS được nhận diện bởi hệ phổ kế từ SAMURAI dựa trên phương pháp TOF- $B\rho$ - $\Delta E$ . Trong đó,  $B\rho$  được xác định bằng quỹ đạo bay xây dựng từ vị trí đo bởi detector FDC1 và FDC2 kết hợp với ma trận từ trường đã biết của nam châm siêu dẫn. TOF và  $\Delta E$  thu được từ các phép đo trên detector HODOF. Các detector nhấp nháy SBT có chức năng mở cổng thời gian đo TOF trên detector HODOF, do đó, phép đo của SBT sẽ ảnh hưởng rất nhiều đến kết quả nhận diện hạt sản phẩm sau phản ứng ở bia thứ cấp. Hình 2 là tương quan  $Z$  và  $A/Q$  dùng để nhận diện hạt trong phân tích trước khi thực hiện các hiệu chỉnh. Ta thấy các đồng vị không được phân tách rõ ràng, ví dụ, hạt nhân  $^{51}\text{K}$  vùng khoanh đen trên hình 2 không được phân biệt rõ với hạt nhân  $^{50}\text{K}$  và  $^{52}\text{K}$ .



Hình 3. PMT “R” và “L” trong detector SBT – hình a; PMT “U” và “D” trong detector HODOF – hình b.

Detector HODOF bao gồm 24 thanh detector nhấp nháy ghép theo phương thẳng đứng, mỗi thanh có gắn ống nhân quang điện (PMT) ở 2 đầu. Các PMT gắn ở phía trên được ký hiệu trong phân tích là “U” còn gắn ở phía dưới là “D” (hình 3). Các detector SBT ngoài tên “Plastic scintillator for Beam Trigger”, nó còn có tên là “Scintillator before Target” dùng để khởi tạo cho phép đo thời gian của HODOF. SBT là hai tấm detector nhấp nháy (SBT1 và SBT2) dạng bản mỏng và được đặt theo phương ngang. Mỗi tấm cũng được gắn PMT ở 2 đầu như các thanh của HODOF. Nhìn theo hướng chùm tia tới, các PMT gắn ở phía trái ký hiệu là “L” và gắn ở phía phải ký hiệu là “R” (hình 3).

#### a. Hiệu chỉnh độ nghiêng

Sự phụ thuộc của kết quả đo thời gian vào quá trình cắt ngưỡng đỉnh trong các PMT và sự phụ thuộc vào sự đáp ứng ánh sáng ra PMT của tinh thể nhấp nháy trên detector SBT và HODOF là nguyên nhân làm cho độ phân giải thời gian đo được trên chúng bị thay đổi. Các báo cáo của Kobayashi trong tài liệu tham khảo [23] cũng khẳng định hiệu ứng này. Phương pháp thường dùng để loại bỏ hiệu ứng này là hiệu chỉnh độ nghiêng của tương quan thời gian trên SBT hoặc HODOF với điện tích thu nhận về PMT của mỗi tấm. Dưới đây, báo cáo trình bày phương pháp hiệu chỉnh này và áp dụng vào số liệu của thí nghiệm SEASTAR 3. Các hiệu chỉnh đều thực hiện với từng sự kiện (event-by-event). Kết quả đo thời gian ở SBT được dùng cho nhận diện hạt sau phản ứng ở bia MINOS là giá trị mốc thời gian trung bình (F13\_Time). Hình 4 biểu diễn kết quả trước khi hiệu chỉnh và sau hiệu chỉnh: hình a) và a’) là tương quan F13\_1\_Time - F13\_2\_Time với F13Pla\_1\_Q; hình b) và b’) là tương quan F13\_1\_Time - F13\_2\_Time với F13Pla\_2\_Q; hình c) và c’) là phổ F13\_1\_Time - F13\_2\_Time đối với hạt nhân chuẩn  $^{50}\text{Ar}$ . Trong đó,  $F13\_1\_Time = (F13Pla\_1\_TL + F13Pla\_1\_TR)/2$ ,  $F13\_2\_Time = (F13Pla\_2\_TL + F13Pla\_2\_TR)/2$ ,  $F13Pla\_1\_Q = \sqrt{F13Pla\_1\_QL \times F13Pla\_1\_QR}$ ,  $F13Pla\_1\_Q = \sqrt{F13Pla\_2\_QL \times F13Pla\_2\_QR}$  là thời gian đo và điện tích góp ở mỗi đầu của detector SBT1 và SBT2; F13Pla\_1\_TL, F13Pla\_1\_TR, F13Pla\_2\_TL, F13Pla\_2\_TR, F13Pla\_1\_QL, F13Pla\_1\_QR, F13Pla\_2\_QL, F13Pla\_2\_QR lần lượt là thời gian đo và điện tích thu nhận phía bên trái, bên phải của detector SBT1 và SBT2.

Trước khi được hiệu chỉnh các vùng tương quan bị nghiêng về một phía, nên khi chiếu xuống trục Y (trục hiệu thời gian giữa SBT1 và SBT2) thì sẽ thu được một phổ Gauss có độ

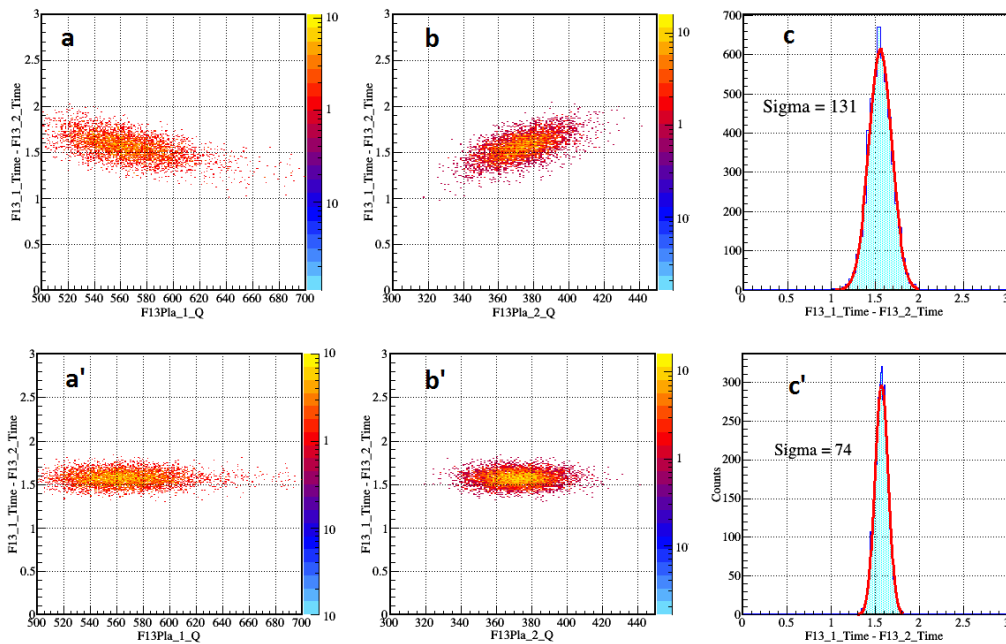
lệch tiêu chuẩn sigma lớn khoảng 131 (hình 4-c). Nguyên nhân gây ra sự chênh lệch giữa F13\_1\_Time và F13\_2\_Time là độ nghiêng. Do đó, một công thức được xây dựng để hiệu chỉnh thời gian trên SBT1 và SBT2 như sau:

$$F13\_1\_Time = (F13Pla\_1\_TL + F13Pla\_1\_TR)/2 - 35./\sqrt{F13Pla\_1\_QL} + 1.095 - 25./\sqrt{F13Pla\_1\_QR} + 1.179$$

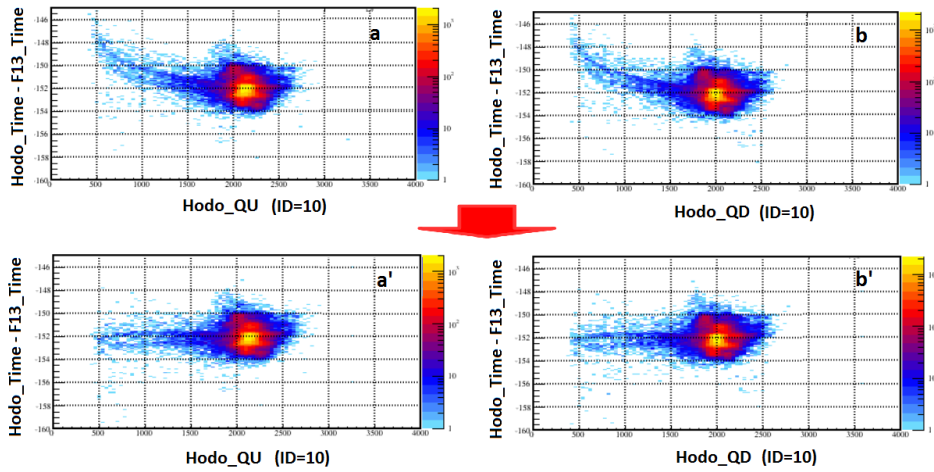
$$F13\_2\_Time = (F13Pla\_2\_TL + F13Pla\_2\_TR)/2 - 28./\sqrt{F13Pla\_2\_QL} + 1.230 - 40./\sqrt{F13Pla\_2\_QR} + 2.118$$

Sau khi hiệu chỉnh, các vùng tương quan đã nằm song song với trục X nên khi chiếu lên trục Y thì độ lệch tiêu chuẩn sigma của phổ Gauss giảm xuống còn 74 (hình 4-c'). So sánh hai hình 4-c) và hình 4-c'), ta thấy độ lệch tiêu chuẩn sigma của hiệu giữa thời gian trên SBT1 và SBT2 đã giảm từ 131 ps xuống 74 ps, tức là độ phân giải thời gian trên detector đã được cải thiện một cách đáng kể.

Detector HODOF cũng được thực hiện tương tự bằng cách sử dụng tương quan hiệu thời gian của mỗi thanh detector HODOF (Hodo\_Time) và thời gian trung bình của hai detector SBT (F13\_Time) với điện tích ghi nhận phía trên (Hodo\_QU) hoặc phía dưới (Hodo\_QD) của detector HODOF. Hình 5 là một ví dụ, hình a và b là tương quan trước hiệu chỉnh, hình a' và b' là tương quan sau hiệu chỉnh của thanh thứ 10.



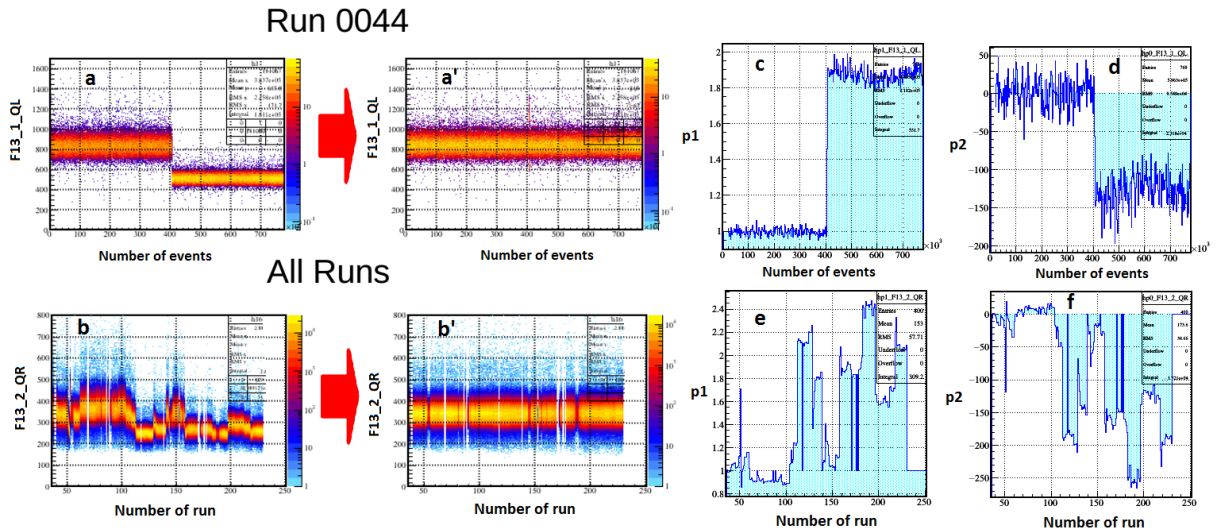
Hình 4. Tương quan giữa thời gian với điện tích thu nhận của hai detector SBT trước khi hiệu chỉnh (a, b, c) và sau khi hiệu chỉnh (a', b', c').



Hình 5. Tương quan trước và sau hiệu chỉnh của thanh thứ 10 giữa HODOF\_Time – F13 với Hodo\_QU – hình a và a', Hodo\_QD – hình b và b'.

### b. Hiệu chỉnh đồng bộ tín hiệu

Trong thí nghiệm SEASTAR, thời gian diễn ra thí nghiệm là 8 ngày liên tục và được chia thành 230 lần ghi nhận số liệu. Trong quá trình làm việc, nhiệt độ của các thiết bị điện tử và detector thay đổi dẫn đến kết quả ghi nhận số liệu cũng bị thay đổi. Ngoài ra, một số nguyên nhân khác làm cho ngưỡng đặt ban đầu của detector và thiết bị không còn giống nhau trong mỗi lần chạy. Ví dụ, hình 6-a) cho thấy sự thay đổi điện tích ghi nhận ở bên trái của SBT1 trong lần ghi nhận số liệu thứ 44 bị thay đổi, hình 6-b) biểu diễn sự thay đổi điện tích ghi nhận ở bên phải của SBT2 bị thay đổi với mỗi lần chạy, điều này sẽ dẫn đến kết quả nhận diện chưa được tối ưu như hình 2. Do đó, đồng bộ tín hiệu ghi nhận đối với mỗi detector trong một lần ghi nhận số liệu và cho tất cả các lần ghi nhận số liệu là rất cần thiết.



Hình 6. Kết quả: đồng bộ tín hiệu điện tích bên trái của detector SBT1 theo một lần chạy (lần thứ 44) là từ hình a và a'; đồng bộ tín hiệu điện tích bên phải của detector SBT2 theo tất cả các lần chạy là từ hình b và b'. hình c, d, e, f là các tham số của đường thẳng đồng bộ. Chi tiết được thảo luận trong báo cáo.

Phương pháp để đồng bộ tín hiệu như sau:

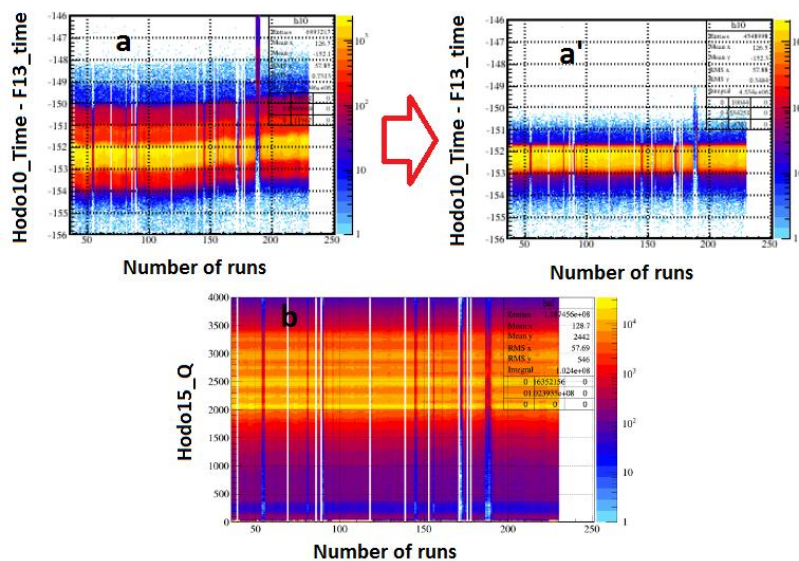
+ Đối với một lần ghi nhận số liệu: sử dụng 5 vùng đồng vị có thống kê tốt là  $^{51}\text{K}$ ,  $^{53}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Sc}$ ,  $^{60}\text{Ti}$ ,  $^{62}\text{V}$  ở BigRIPS để xây dựng tương quan F13\_1\_QL (trục Y) với các sự kiện

(Number of events – trục X), hình 6 – a là tương quan với đồng vị  $^{51}\text{K}$ . Đối với mỗi tương quan, giả sử giá trị Y của bin thứ nhất là  $Y_1$ , của bin thứ i là  $Y_i$  và lập tỉ số  $Y_i/Y_1$ . Ta sẽ có 5 điểm đối với mỗi bin thứ i. Sau khi ta khớp hàm đường thẳng  $y = p_1 \cdot x + p_2$  qua 5 điểm đó thì thu được hệ số  $p_1$  (hình c) và  $p_2$  (hình d) của đường thẳng. Xây dựng hai tệp tin định dạng root có chứa  $p_1$  và  $p_2$  để chương trình phân tích đọc vào thực hiện hiệu chỉnh đồng bộ. Hình 6 – a' là kết quả đồng bộ tín hiệu đo cho lần đo thứ 44 đối với điện tích phía bên trái của SBT1.

+ Đối với tất cả các lần ghi nhận số liệu: làm tương tự như một lần ghi nhận số liệu. Trên hình 5 – b, ta có trục X là các lần ghi nhận số liệu từ 36 đến 230 (Number of events), trục Y là điện tích phía bên phải của SBT2 (F13\_2\_QR) với đồng vị  $^{51}\text{K}$ . Lấy bin của lần ghi nhận số liệu 36 làm chuẩn, xây dựng tỉ số  $Y_i/Y_{36}$ . Hình 6 – e, 6 – f biểu diễn hệ số  $p_1$  và  $p_2$  của đường thẳng. Xây dựng tệp tin có chứa  $p_1$  và  $p_2$  sử dụng để hiệu chỉnh. Chúng ta sử dụng lần ghi nhận số liệu 36 để so sánh vì lần ghi nhận số liệu này đã được chuẩn các tham số cho các quá trình phân tích sau này. Hình 6 – b' là kết quả đồng bộ tín hiệu cho tất cả các lần đo đối với điện tích phía bên phải của SBT2.

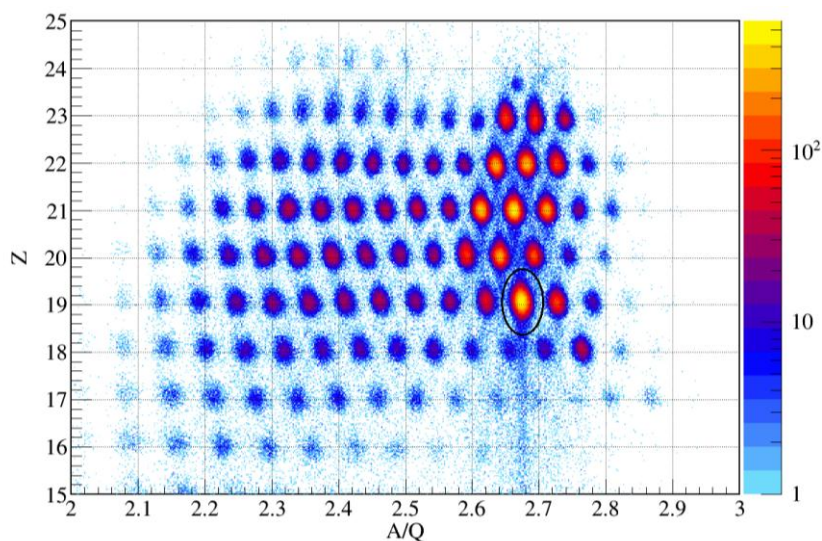
Hình 5 là ví dụ biểu diễn kết quả đồng bộ tín hiệu ghi nhận trong detector SBT: lượng điện tích thu nhận về phía bên trái của SBT1 trong lần ghi nhận số liệu thứ 44 trước hiệu chỉnh – hình a và sau khi hiệu chỉnh đồng bộ tín hiệu hình a'; lượng điện tích thu nhận về phía bên phải của SBT2 từ lần ghi nhận số liệu thứ 36 đến lần ghi nhận số liệu thứ 230 trước khi hiệu chỉnh – hình b và sau khi hiệu chỉnh đồng bộ tín hiệu – hình b'. Sau khi đồng bộ, tín hiệu đã đồng nhất theo đường thẳng ở trong một lần ghi nhận số liệu và trong tất cả các lần ghi nhận số liệu.

Đối với các detector HODOF, việc đồng bộ cũng cần được thực hiện. Ví dụ, hình 7 – a là tương quan của giữa hiệu thời gian của thanh thứ 10 trong detector HODOF (Hodo10\_Time) và F13\_time với tất cả các lần ghi nhận số liệu (Number of runs) trước khi hiệu chỉnh, hình 7 – a' là tương quan Hodo10\_Time – F13\_Time với Number of runs sau khi hiệu chỉnh đồng bộ. Hình 7 – b là kết quả sau khi đồng bộ điện tích của thanh thứ 15 trong HODOF với tất cả các lần chạy.



Hình 7. Kết quả biểu diễn tương quan giữa hiệu thời gian của detector HODOF24 và detector SBT với tất cả các lần ghi nhận số liệu theo từng tấm HODOF sau khi đồng bộ.

Kết quả nhận diện sau khi hiệu chỉnh độ nghiêng và đồng bộ tín hiệu được biểu diễn ở hình 8. Kết quả nhận diện cũng được cải thiện rõ ràng, ví dụ, vùng hạt nhân  $^{51}\text{K}$  vùng khoanh đen (khoanh đen) đã phân tách với với hạt nhân  $^{50}\text{K}$  và  $^{52}\text{K}$  ở bên cạnh.



Hình 8. Tương quan  $Z$  và tỉ số  $A/Q$  để nhận diện hạt trong phổ kế từ SAMURAI sau khi thực hiện các hiệu chỉnh.

### III. KẾT LUẬN

Báo cáo đã giới thiệu tổng quát về mục tiêu nghiên cứu của thí nghiệm SEASTAR về các hạt nhân lạ giàu neutron. Chi tiết về bố trí thí nghiệm SEASTAR 3 sử dụng phổ kế từ có độ chính xác cao SAMURAI và chi tiết phương pháp và kết quả của hiệu chỉnh độ nghiêng và hiệu chỉnh đồng bộ detector SBT và HODOF cũng được nhóm tác giả trình bày. Kết quả so sánh nhận diện hạt của thí nghiệm này trước và sau khi hiệu chỉnh cho thấy mức độ ảnh hưởng đến khả năng nhận diện hạt của hai hiệu chỉnh này. Các vùng đồng vị trong tương quan nhận diện  $Z$  và  $A/Q$  sử dụng phương pháp TOF-Bp- $\Delta E$  sau khi hiệu chỉnh đã được tách biệt rõ ràng, đây là cơ sở để thực hiện các phân tích số liệu tiếp theo.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] I. Tanihata, “Neutron halo nuclei”, J. Phys. G 22, (1996), 157, and references therein.
- [2] L. X. Chung et al., “Elastic proton scattering at intermediate energies as a probe of the  $^{6,8}\text{He}$  nuclear matter densities”, Physical Review C 92, 034608 (2015).
- [3] S. D. Pain et al., “Structure of  $^{12}\text{Be}$ : Intruder d-Wave Strength at  $N=8$ ”, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 032502.
- [4] Le Xuan Chung et al., “The dominance of the  $\nu(0d5/2)_2$  configuration in the  $N = 8$  shell in  $^{12}\text{Be}$  from the breakup reaction on a proton target at intermediate energy”, Physics Letters B 774, 559-563 (2017).
- [5] O. Sorlin et al., “Nuclear magic number: New features far from stability”, Progress in Particle and Nuclear Physics 61, Issue 2, 602-673 (2008)
- [6] Bastin, B. et al., “Collapse of the  $N = 28$  shell closure in  $^{42}\text{Si}$ ”, Phys. Rev. Lett. 99, 022503 (2007).
- [7] E. Becheva et al., “The  $N=14$  shell closure in  $^{22}\text{O}$  viewed through a neutron sensitive probe”, Phys. Rev. Lett. 96, 012501 (2006).
- [8] F. Wienholtz et al., Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces, Nature 498, 346 (2013).
- [9] D. Steppenbeck et al., “Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of  $^{54}\text{Ca}$ ”, Nature 502, 207–210 (2013)



- [10] D. Steppenbeck et al., “Low-Lying Structure of  $^{50}\text{Ar}$  and the  $N = 32$  Subshell Closure”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 252501 (2015)
- [11] M. Rosenbusch et al., “Probing the  $N = 32$  Shell Closure below the Magic Proton Number  $Z = 20$ : Mass Measurements of the Exotic Isotopes  $^{52,53}\text{K}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 202501 (2015).
- [12] P. Doornenbal and A. Obertelli, “Shell Evolution and Systematic Search for  $2^+_1$  Energies”, Proposal for Nuclear Physics Experiment at RI Beam Factory RIBF NP-PAC-13 (2013).
- [13] C. Santamaria, L. X. Chung et al., “Extension of the  $N=40$  Island of Inversion towards  $N=50$ : Spectroscopy of  $\text{Cr}^{66}$ ,  $\text{Fe}^{70,72}$ ”, *Physical Review Letters* 115, 192501 (2015).
- [14] P. Nancy et al., L. X. Chung, B. D. Linh., “Are There Signatures of Harmonic Oscillator Shells Far from Stability? First Spectroscopy of  $^{110}\text{Zr}$ ”, *Physical Review Letters*, 118, 032501 (2017).
- [15] F. Flavigny et al., L.X. Chung, B.D. Linh, “Shape Evolution in Neutron-rich Krypton Isotopes beyond  $N = 60$ : First spectroscopy of  $^{98,100}\text{Kr}$ ”, *Physical Review Letters* 118, 242501 (2017).
- [16] X.Y. Liu et al., L.X. Chung, B.D. Linh, “Spectroscopy of  $^{65,25}_{67}\text{Mn}$ : Strong Coupling in the  $N = 40$  “Island of Inversion”, *Physics Letters B* 784, 392–396 (2018).
- [17] T. Kobayashi et al., “SAMURAI spectrometer for RI beam experiments”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 317, 294–304 (2013).
- [18] B. D. Linh et al., “Particle identification for  $Z = 25 - 28$  exotic nuclei from SEASTAR experimental data”, *Nuclear Science and Technology*, Vol.7, No. 2, pp. 01-07 (2017).
- [19] A. Obertelli et al., "MINOS: A vertex tracker coupled to a thick liquid-hydrogen target for in-beam spectroscopy of exotic nuclei", *Eur. Jour. Phys. A* 50, 8 (2014).
- [20] P. Doornenbal, "In-beam gamma-ray spectroscopy at the RIBF", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 03C004 (2012).
- [21] S. Takeuchi, “DALI2: A NaI(Tl) detector array for measurements of  $\gamma$  rays from fast nuclei”, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sect. A*, 763-596 (2014).
- [22] <https://www.gsi.de/neuland/>
- [23] <http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~kobayash/samuraiD/memo/index.html>