

Sự tiến hóa của lớp vỏ hạt nhân trong các đồng vị giàu neutron N=32 và N=34

Đỗ Công Cường^{1*}, Bùi Duy Linh², Nguyễn Đức Tôn¹

¹Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam,
179 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Cục An toàn Bức xạ và Hạt nhân,
113 Trần Duy Hưng, phường Trung Hòa, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 15/7/2022; ngày chuyển phản biện 19/7/2022; ngày nhận phản biện 8/8/2022; ngày chấp nhận đăng 12/8/2022

Tóm tắt:

Bài báo trình bày tổng quát về bố trí thí nghiệm nghiên cứu cấu trúc đồng vị hạt nhân không bền trong vùng từ ^{47}Cl đến ^{63}V của dự án SEASTAR 3 cùng với sự tiến hóa của lớp vỏ hạt nhân trong các đồng vị giàu neutron N=32 và N=34. Kết quả năng lượng kích thích đầu tiên của các đồng vị Cl, Ar và K xung quanh N=32, N=34 thu được từ dự án SEASTAR 3 đã được xác định. Sự tiến hóa của lớp vỏ hạt nhân trong các đồng vị giàu neutron N=32 và N=34 được giải thích là do đóng góp của lực tensor bên cạnh lực xuyên tâm và lực spin - quỹ đạo. Sự xuất hiện của số magic neutron mới N=34 trong ^{54}Ca được giải thích là do ảnh hưởng của lực tensor proton-neutron đã kéo neutron ở mức $0f_{5/2}$ xuống thấp hơn mức $1p_{1/2}$ dẫn đến không chỉ đảo ngược neutron ở mức $1p_{1/2}$ và $0f_{5/2}$, mà còn làm độ rộng khe năng lượng giữa hai mức này tăng lên. Sự thay đổi mức năng lượng của các vỏ proton và neutron trong các đồng vị Cl, Ar và K xung quanh N=32, N=34 gây ra bởi lực tensor cũng được bàn luận trong bài báo này.

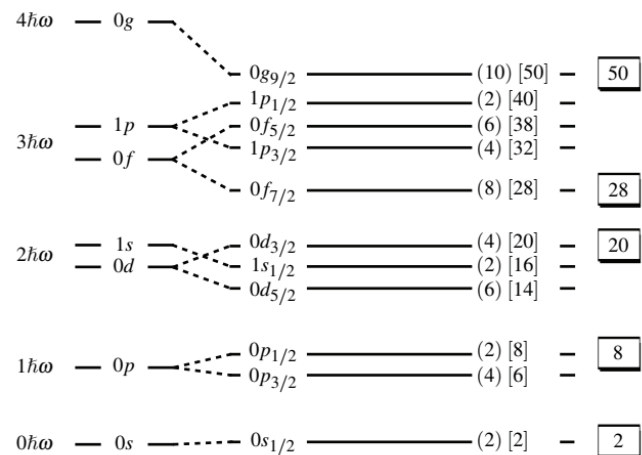
Từ khóa: lớp vỏ hạt nhân, lực tensor, phổ gamma của năng lượng kích thích, SEASTAR.

Chỉ số phân loại: 1.3

1. Đặt vấn đề

Kể từ khi M.G. Mayer (1949) [1] và nhóm nghiên cứu của O. Haxel và cs (1949) [2] độc lập đề xuất thêm thành phần thể spin - quỹ đạo trong nghiên cứu cấu trúc hạt nhân năm 1949, mẫu vỏ hạt nhân đã trở thành lý thuyết xương sống của các nghiên cứu cấu trúc hạt nhân. Mẫu vỏ mô tả được đầy đủ các đặc trưng cấu trúc của hầu hết các hạt nhân bền và các đồng vị phóng xạ tự nhiên đã được biết đến, đặc biệt là tính bền của các hạt nhân có số neutron (proton) 2, 8, 20, 28, 50, 82 và 126 (được gọi là các số magic). Hình 1 minh họa sơ đồ phân lớp của các nucleon trong hạt nhân theo mẫu vỏ. Sự phát triển của khoa học và công nghệ ngày nay đã giúp chúng ta tạo ra được các đồng vị giàu neutron (proton) mới nằm xa vùng bền với thời gian sống vô cùng ngắn. Kết quả của các thí nghiệm nghiên cứu cấu trúc hạt nhân xa vùng bền trong thời gian gần đây đã cho thấy sự xuất hiện của các số magic mới N=16 trong đồng vị ^{24}O [3, 4] và N=34 trong đồng vị ^{54}Ca [5], cùng với sự biến mất của số magic N=28 trong đồng vị ^{42}Si [6]. Nguồn gốc của sự thay đổi số magic mới trong các đồng vị giàu neutron được giải thích là do đặc tính của lực tensor đã làm tách phân lớp $0d_{3/2}$ ra xa phân lớp $1s_{1/2}$ trong ^{24}O hoặc đảo phân lớp $1p_{1/2}$ và phân lớp $0f_{5/2}$ trong ^{54}Ca [7, 8].

*Tác giả liên hệ: Email: cuong1981us3@gmail.com



Hình 1. Sơ đồ mức năng lượng trong mẫu vỏ hạt nhân (giới hạn đến số hạt 50 nucleon), sự tách mức nhận được khi thêm vào số hạng spin - quỹ đạo [1].

Trong những năm đầu thế kỷ XXI, nhiều thí nghiệm đã được thiết lập để nghiên cứu sự tiến hóa của các lớp nucleon ngoài cùng trong các đồng vị hạt nhân giàu neutron xa vùng bền. Tiêu biểu là các thí nghiệm đo khối lượng và năng lượng tách nucleon dựa vào phương trình Einstein về mối liên hệ khối lượng - năng lượng, trong đó khối lượng được xác định từ tỷ số giữa khối lượng và điện tích qua độ

Evolution of nuclear shell structure in neutron-rich nuclei $N=32$ and $N=34$

Cong Cuong Do^{1*}, Duy Linh Bui², Duc Ton Nguyen¹

¹Institute for Nuclear Science and Technology, Vietnam Atomic Energy Institute, 179 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

²Vietnam Agency for Radiation and Nuclear Safety, 113 Tran Duy Hung Street, Trung Hoa Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 15 July 2022; revised 8 August 2022; accepted 12 August 2022

Abstract:

This paper presents an overview of the experimental setup to study the structure of unstable nuclear isotopes in the region from ^{47}Cl to ^{63}V of the SEASTAR 3 project and the evolution of shell structure in neutron-rich nuclei $N=32$ and $N=34$. The first excited energies of Cl, Ar, and K isotopes around $N=32$, $N=34$ obtained from the SEASTAR 3 project were determined. The evolution of shell structure in neutron-rich nuclei $N=32$ và $N=34$ is explained by the contribution of tensor forces in addition to central and spin-orbit forces. The appearance of new magic neutron $N=34$ in ^{54}Ca is explained due to proton-neutron tensor force that pulls neutron $0f_{5/2}$ lower than $1p_{1/2}$ level, leading to not only causes the spin inversion of neutrons at $1p_{1/2}$ and $0f_{5/2}$ levels and enlarges an energy gap between these levels. The change of proton and neutron energy levels in Cl, Ar, and K isotopes around $N=32$, $N=34$ driven by tensor force was also discussed in this article.

Keywords: gamma spectroscopy of excite energies, nuclear shells, SEASTAR, tensor force.

Classification number: 1.3

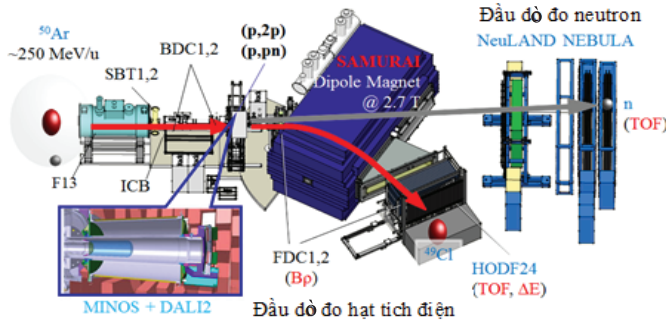
lệch của các ion trong trường điện từ [9]. Các thí nghiệm đo phổ gamma từ các quá trình phân rã β [10] hoặc từ các phản ứng hạt nhân trực tiếp [3-6] cung cấp cho chúng ta những thông tin về năng lượng kích thích hạt nhân, đặc biệt là năng lượng kích thích của trạng thái 2^+ đầu tiên trong các hạt nhân chẵn - chẵn (đây là thông tin quan trọng để xác định số magic mới) [4, 5]. Bên cạnh đó, các phản ứng hạt nhân trực tiếp còn là một công cụ quan trọng để thăm dò các thông tin cấu trúc khác như thời gian sống của các trạng thái kích thích, độ biến dạng tứ cực điện hạt nhân thông qua các phép đo cường độ dịch chuyển điện từ $B(\sigma\lambda)$ trong tán xạ phi đàn hồi [11], hoặc hệ số phổ của các hàm sóng đơn hạt. Các phản ứng trực tiếp thường được sử dụng bao gồm phản ứng chuyển nucleon [12], phản ứng loại trừ một nucleon [3] và các phản ứng bứt nucleon ($p,2p$), (p,pn) [13]. Dự án “Shell

evolution and systematic search for two-plus energies at RIBF” (SEASTAR) là một dự án hợp tác khoa học lớn trên thế giới, có sự tham gia của Việt Nam. Dự án này được thiết lập và thực hiện tại Viện Nghiên cứu RIKEN (Nhật Bản) để nghiên cứu sự tiến hóa của lớp vỏ hạt nhân trong các đồng vị giàu neutron qua phép đo phổ gamma kích thích từ các phản ứng hạt nhân trực tiếp. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày tổng quan về cấu trúc của các đồng vị giàu neutron xung quanh $N=32$, $N=34$ và các kết quả mới nhất thu được từ các thí nghiệm nghiên cứu các trạng thái kích thích qua phổ gamma trong dự án SEASTAR.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Dự án SEASTAR có mục đích nghiên cứu các trạng thái kích thích thông qua việc đo đặc nhiều tham số liên quan đến các sản phẩm của phản ứng hạt nhân, trong đó có năng lượng gamma phát xạ của các hạt nhân giàu neutron từ ^{47}Cl đến ^{110}Zr [14]. Các thí nghiệm của SEASTAR lần thứ 3 (SEASTAR 3) tập trung đo các hạt nhân trong vùng từ ^{47}Cl đến ^{63}V . Hình 2 là sơ đồ bố trí thí nghiệm trong dự án SEASTAR 3. Hệ thống gia tốc của RIKEN, Nhật Bản [15] gia tốc chùm sơ cấp ^{70}Zn đến năng lượng 345 MeV/u với cường độ 250 pnA và bắn vào bia sơ cấp ^9Be đặt tại vị trí lõi vào của hệ thống phân tách chùm hạt của BigRIPS. Phản ứng phân mảnh của chùm hạt tới trên bia ^9Be tạo ra sản phẩm là hỗn hợp các đồng vị giàu neutron (chùm thứ cấp). Các mảnh vỡ trong hỗn hợp này được phân tách và nhận diện bằng phương pháp TOF-Bp- ΔE trong BigRIPS [15] để xác định chùm thứ cấp cần quan tâm. Sau đó, chùm hạt thứ cấp này được dẫn tới bia phản ứng thứ cấp (hydro lỏng - LH_2) đặt tại mặt phẳng hội tụ (vị trí F13 trong hình 2) của hệ phổ kế từ SAMURAI. Vị trí F13 có đặt 2 đầu dò nhấp nháy SBT [16] cho phép phát xung, kích hoạt việc ghi nhận của các hệ ghi nhận tín hiệu trong SAMURAI. Tại vị trí này, chùm hạt tới thứ cấp có năng lượng cỡ 200-270 MeV/nucleon. Hai đầu dò BDC1 và BDC2 [16] sẽ theo dõi vị trí của chùm hạt tới trước khi đi vào bia thứ cấp (LH_2) trong thiết bị MINOS [17]. Phản ứng loại bỏ (knock-out) một hoặc vài nucleon trên bia proton cũng tạo ra chùm hạt hỗn hợp gồm rất nhiều hạt nhân sản phẩm. Chúng 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 [16] và NeuLAND [18], trong khi quỹ đạo bay của các hạt có điện tích sẽ bị bẻ cong và được đo bởi hệ đầu dò FDC1, FDC2 [16]. Độ mất năng lượng và thời gian bay của các hạt mang điện tích được đo bằng HODOF24 [16]. Tại vị trí đặt bia thứ cấp (LH_2), thiết bị MINOS có khả năng theo dõi quỹ đạo bay của các proton phát từ các phản ứng xảy ra trong bia để xác định vị trí phản ứng. Các tia gamma tức thời phát ra từ các hạt nhân sản phẩm sau phản ứng ở bia LH_2 sẽ được đo bằng hệ đầu dò nhấp nháy DALI2+ [19, 20] bố trí xung quanh MINOS. Hệ đầu dò DALI2+ bao gồm 226 tinh thể NaI có hiệu suất ghi ~26% với tia gamma có năng lượng 1

MeV và góc ghi đo xấp xỉ 4π . Tất cả các thông tin về hạt sản phẩm cuối cùng được ghi nhận trong phổ gamma của hệ đầu dò nhấp nháy DALI2+ này.



Hình 2. Bố trí thí nghiệm của SAMURAI trong thí nghiệm SEASTAR 3. Hình ảnh được sửa đổi từ trích dẫn [21].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Sự tiến hóa của lớp vỏ neutron và sự xuất hiện của số magic mới $N=34$

Trước khi bàn luận về cấu trúc lớp vỏ của các đồng vị có số neutron $N=32$ và $N=34$, chúng tôi giới thiệu lại cấu trúc của đồng vị ^{54}Ca và sự xuất hiện của số magic neutron $N=34$. Việc thêm vào thành phần spin - quỹ đạo của thể tương tác, các tính toán theo mẫu vỏ hạt nhân (gọi tắt là mẫu vỏ) đã mô tả thành công các đặc trưng cấu trúc của hầu hết các đồng vị tự nhiên (bao gồm các đồng vị bền và đồng vị không bền có thời gian sống dài), đặc biệt là các hạt nhân magic có số neutron hoặc proton bằng 2, 8, 20, 28, 50... Các số magic hạt nhân này hoàn toàn khác biệt các số 2, 10, 18, 36... trong các khí trơ được giải thích bằng vỏ nguyên tử (không có đóng góp của lực spin - quỹ đạo). Tuy nhiên, mẫu vỏ này đã không thể dự đoán được cấu trúc của các đồng vị xa vùng bền với thời gian sống vỏ cùng ngắn (cỡ 10^{-3} s). Vào đầu những năm 2000, các nhà khoa học thuộc Đại học Tokyo (Nhật Bản) đã đề xuất thêm vào thành phần lực tensor trong các tính toán mẫu vỏ bên cạnh lực spin - quỹ đạo và thể xuyên tâm để giải thích cấu trúc của các hạt nhân xa vùng bền này [22, 23]. Lực tensor là lực tương tác giữa các proton và neutron ngoài cùng với nhau và phụ thuộc vào sự định hướng spin của các hạt tham gia tương tác. Trong đó, lực tensor của các nucleon có định hướng spin ngược nhau ($l+1/2$ và $l-1/2$), hút nhau và các nucleon có cùng định hướng spin (cùng $l+1/2$ hoặc $l-1/2$) đẩy nhau. Trong các hạt nhân $N=34$, lực tensor (bao gồm lực đẩy $\pi f_{7/2}-\nu p_{3/2}$ và lực hút $\pi f_{7/2}-\nu(f_{5/2}p_{1/2})$) trong hạt nhân bền ^{62}Ni là mạnh nhất, kết hợp với các lực xuyên tâm và lực spin - quỹ đạo hình thành sơ đồ mức như ở hình 1. Khi số proton mức $f_{7/2}$ giảm, lực tensor trên giảm, sự cân bằng như hình 1 dần bị phá vỡ với phân lớp $p_{3/2}$ bị kéo xuống, trong khi các phân lớp $f_{5/2}$ và $p_{1/2}$ bị đẩy lên. Chú ý rằng, cường độ lực hút $\pi f_{7/2}-\nu f_{5/2}$ mạnh hơn $\pi f_{7/2}-\nu p_{1/2}$ nhiều, do đó, khi số proton mức $f_{7/2}$ giảm thì mức $\nu f_{5/2}$ đẩy mạnh hơn, dẫn đến sự đảo ngược của hai mức $\nu f_{5/2}$ và $\nu p_{1/2}$ rồi tạo thành khe lớp rộng giữa trong hạt nhân ^{54}Ca

và xuất hiện số magic mới [7, 22]. Những tiên đoán về sự xuất hiện của số magic mới $N=34$ của nhóm nghiên cứu này đã được D. Steppenbeck và cs (2013) [5] chứng minh vào năm 2013 thông qua thí nghiệm đo năng lượng kích thích 2^+ tại RIKEN.

Để chứng minh sự tồn tại của lực tensor ảnh hưởng lên sự tiến hóa của lớp vỏ neutron ngoài cùng, chúng tôi khảo sát năng lượng kích thích 2^+ của các hạt nhân chắn - chắn $N=34$ và số proton ngoài cùng ở lớp $f_{7/2}$ khác nhau. Bắt đầu từ hạt nhân bền ^{62}Ni (8 proton ngoài cùng lấp đầy lớp $f_{7/2}$), năng lượng kích thích 2^+ được xác định từ các phản ứng chuyển 2 neutron (t,p) [24] và phản ứng chuyển hạt alpha ($^6\text{Li},d$) [25] có giá trị 1172 keV là khoảng cách của khe năng lượng neutron $\nu f_{5/2}-\nu p_{1/2}$. Như đã bàn luận ở trên, khi số proton trong lớp $f_{7/2}$ giảm, cường độ lực tensor giảm làm thu hẹp khoảng cách giữa hai mức neutron và đưa đến năng lượng kích thích 2^+ giảm. Thực tế, năng lượng kích thích 2^+ đầu tiên của ^{60}Fe là 824 keV được xác định từ những năm 1970 trong phản ứng chuyển alpha ($^3\text{He}, ^7\text{Be}$) [26] hoặc từ phản ứng nhiệt hạch - bốc hơi [27]. Trong khi đó, năng lượng kích thích 2^+ của các đồng vị giàu neutron ^{58}Cr được quan sát trong thời gian gần đây thông qua phổ gamma từ các phép đo phân rã β với các giá trị tương ứng là 880 keV [28]. Năng lượng kích thích của ^{56}Ti , hạt nhân chắn - chắn cuối cùng $N=34$ và có proton nằm trên lớp $\pi f_{7/2}$, được xác định qua quá trình phân rã β là 1128 keV [29]. Giá trị năng lượng này của ^{56}Ti cao hơn nhiều các giá trị của ^{60}Fe , ^{58}Cr (các hạt nhân có số proton nhiều hơn) và gần bằng giá trị của ^{62}Ni . Điều này được giải thích là do khi lực tensor giảm, mức vỏ $f_{5/2}$ bị đẩy lên cao hơn dẫn tới sự đảo ngược của hai mức $f_{5/2}$ và $p_{1/2}$. Chúng ta có thể thấy rõ sự đảo ngược các mức neutron $f_{5/2}$, $p_{1/2}$ này và tạo ra một khe rộng giữa hai mức với năng lượng kích thích 2043 keV trong hạt nhân ^{54}Ca [5]. Bằng chứng xuất hiện sự đảo ngược của hai mức $f_{5/2}$ và $p_{1/2}$ này trong các đồng vị titanium là spin và độ chắn lẻ $J^\pi=1/2^-$ của ^{55}Ti được xác định từ phân rã β với cấu hình 5 neutron ngoài cùng $(p_{3/2})^4(p_{1/2})^1$ [30, 31]. Dải năng lượng kích thích 2^+ và những ảnh hưởng của lực tensor lên sự tiến hóa của lớp vỏ neutron trong các đồng vị neutron $N=32$ cũng có xu hướng tương tự như các đồng vị $N=34$. Năng lượng kích thích 2^+ của ^{60}Ni và ^{58}Fe được xác định từ các phản ứng hạt nhân trực tiếp tương ứng là 1332 keV [24, 25] và 810 keV [26, 27]. Phổ gamma từ các quá trình phân rã β đã xác định mức năng lượng kích thích 2^+ cho các đồng vị ^{54}Ti và ^{56}Cr tương ứng là 1495 keV [32] và 1007 keV [28]. Năng lượng kích thích 2^+ đầu tiên của ^{52}Ca thậm chí còn lớn hơn với giá trị 2563 keV [33].

3.2. Sự tiến hóa của lớp vỏ proton và kết quả thí nghiệm SEASTAR 3

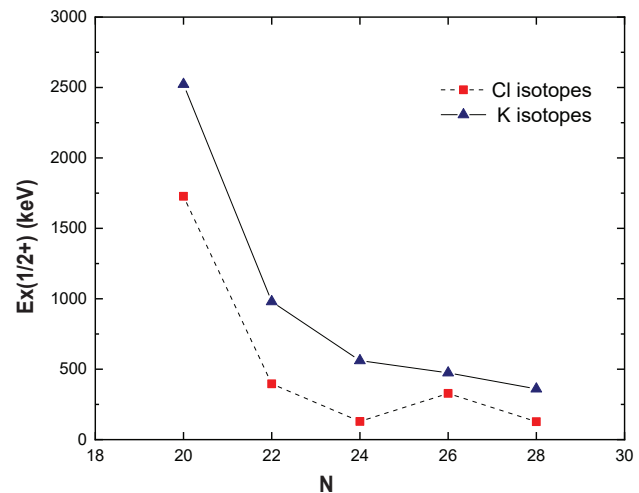
Sự tiến hóa của lớp vỏ nucleon trong các hạt nhân chắn - chắn có $Z<20$ trong thí nghiệm SEASTAR 3. Trong số các hạt nhân chắn - chắn $N=32$, $N=34$, $^{50,52}\text{Ar}$ là những đồng vị thấp nhất có thể quan sát được năng lượng kích thích 2^+ từ

thực nghiệm. Năng lượng kích thích 2^+ của ^{52}Ar ở 1656 keV được quan sát lần đầu tiên từ phổ gamma của phản ứng bứt proton (knock-out) $^{53}\text{K}(p,2p)^{52}\text{Ar}$ [29]. Mặc dù giá trị này thấp hơn năng lượng kích thích 2^+ của ^{54}Ca [5], nhưng giá trị này là năng lượng kích thích 2^+ cao nhất trong số các đồng vị Ar, thậm chí cao hơn mức năng lượng kích thích 1554 keV của ^{46}Ar (hạt nhân có số magic neutron $N=28$). Điều này cho thấy tính chất đóng lớp neutron $N=34$ ở $(p_{3/2}p_{1/2})$ trong ^{52}Ar cũng xuất hiện. Năng lượng kích thích 2^+ của ^{52}Ar thấp hơn của ^{54}Ca là do có thêm sự dịch chuyển của proton từ $1s_{1/2}$ đến chưa lấp đầy $0d_{3/2}$ bên cạnh sự dịch chuyển của neutron từ $1p_{1/2}$ đến $0f_{5/2}$. Dựa vào các kết quả phân tích xấp xỉ xung sóng méo (Distorted - wave impulse approximation - DWIA) của phản ứng bứt proton $^{53}\text{K}(p,2p)^{52}\text{Ar}$, năng lượng kích thích 2^+ của ^{52}Ar được xác định là do sự dịch chuyển đồng thời của cả proton và neutron.

Hệ số phổ của neutron dịch chuyển từ $1p_{1/2}$ đến $0f_{5/2}$ và của proton từ $1s_{1/2}$ đến $0d_{3/2}$ đều là 0,5 [29]. Đối với đồng vị ^{50}Ar , phổ gamma từ các phản ứng loại trừ nucleon $^{9}\text{Be}(^{54}\text{Ca}, ^{50}\text{Ar})\text{X}$, $^{9}\text{Be}(^{55}\text{Sc}, ^{50}\text{Ar})\text{X}$ và $^{9}\text{Be}(^{56}\text{Ti}, ^{50}\text{Ar})\text{X}$ đã xác định năng lượng kích thích của trạng thái 2^+ đầu tiên là 1178 keV [34]. Phân tích các phản ứng bứt nucleon (knock-out) $^{51}\text{K}(p,2p)^{50}\text{Ar}$ và $^{51}\text{Ar}(p,pn)^{50}\text{Ar}$ cũng ghi nhận được mức năng lượng kích thích này là 1150 keV [35]. Có thể thấy rằng, năng lượng kích thích 2^+ đo được của ^{50}Ar ($N=32$) thấp hơn của ^{52}Ar ($N=34$) và hoàn toàn trái ngược với kết quả của các hạt nhân $Z \geq 20$ từ Ca đến Ni.

Như đã bàn luận ở trên, ảnh hưởng của lực tensor đã làm đảo ngược mức năng lượng $1p_{1/2}$ và $0f_{5/2}$ của lớp vỏ neutron và hình thành lên hạt nhân magic mới ($N=34$) [5]. Tuy nhiên, sự ảnh hưởng của lực tensor cũng có thể làm thay đổi sơ đồ mức năng lượng của lớp vỏ proton. Trong phần này, chúng tôi thảo luận về sự tiến hóa của lớp vỏ proton trong các đồng vị Cl và K với số neutron chẵn từ các số liệu thực nghiệm. Bắt đầu từ 2 đồng vị bền ^{37}Cl và ^{39}K với số neutron magic $N=20$, spin và độ chẵn lẻ ở trạng thái của hai đồng vị này là $3/2^+$ được xác định từ các quá trình phân rã β [36]. Trạng thái kích thích $1/2^+$ với năng lượng khá cao với giá trị 1727 keV trong ^{37}Cl và 2523 keV trong ^{39}K [37]. Kết quả này cho thấy, các proton ngoài cùng nằm mức $0d_{3/2}$ và khoảng cách khe năng lượng giữa hai mức $0d_{3/2}$ và $1s_{1/2}$ khá lớn. Tuy nhiên, khi số neutron $f_{7/2}$ ($20 \leq N \leq 28$) trong các đồng vị Cl và K tăng, năng lượng kích thích $1/2^+$ giảm như minh họa trong hình 3. Điều này được giải thích là do lực tensor giữa của các neutron $f_{7/2}$ với proton $d_{3/2}$ là lực hút và với proton $s_{1/2}$ là lực đẩy [22, 23]. Lực này tăng lên khi có nhiều neutron lớp $f_{7/2}$ hơn, kéo mức $d_{3/2}$ lên và đẩy mức $s_{1/2}$ xuống, dẫn đến khe năng lượng giữa hai mức này giảm dần và bị đảo ngược trong các đồng vị ^{47}K và $^{43,45}\text{Cl}$ [37]. Bằng chứng về sự đảo ngược proton mức $d_{3/2}$ và $s_{1/2}$ trong ^{47}K và $^{43,45}\text{Cl}$ được quan sát từ phản ứng chuyển proton $^{48}\text{Ca}(t,\alpha)$ [38] và phản mảnh hạt nhân ^{48}K [39]. Do những hạn chế của kỹ thuật gia tốc, các thí nghiệm nghiên cứu hạt nhân giàu neutron $N=32$ và $N=34$ của chuỗi đồng vị Cl và K chỉ được thực hiện trong thời gian gần đây. Phổ gamma thu được từ các thí nghiệm phản ứng bứt

nucleon trong dự án SEASTAR 3 đã xác định được phổ kích thích, spin và độ chẵn lẻ của các đồng vị ^{51}K và ^{49}Cl đều là $3/2^+$ [40, 41]. Kết quả này là bằng chứng của sự khôi phục lại mức $0d_{3/2}$ và $1s_{1/2}$ của các proton ngoài cùng như hình 1 với trạng thái kích thích đầu tiên $1/2^+$. Lực tensor đẩy $\pi s_{1/2}-\nu p_{3/2}$ và lực tensor hút $\pi d_{3/2}-\nu p_{3/2}$ giảm so với lực đẩy ($\pi s_{1/2}-\nu f_{7/2}$) và lực hút ($\pi d_{3/2}-\nu f_{7/2}$) trong các hạt nhân $N=28$ là nguyên nhân gây ra hiện tượng này. Sự giảm của lực tensor do neutron mức $\nu p_{3/2}$ gây ra sự chồng chập lên nhau của proton ở hai mức $0d_{3/2}$ và $1s_{1/2}$ trong các đồng vị $^{46,47,48}\text{Cl}$ và $^{48,49,50}\text{K}$.



Hình 3. Năng lượng kích thích đầu tiên của các đồng vị Cl và K có số neutron $20 \leq N \leq 28$ [36].

4. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu tổng quát về bố trí thí nghiệm nghiên cứu cấu trúc đồng vị hạt nhân không bền trong vùng từ ^{47}Cl đến ^{63}V của dự án SEASTAR 3 sử dụng phổ kế từ có độ chính xác cao SAMURAI. Ảnh hưởng của lực tensor proton-neutron là nguồn gốc hình thành số magic neutron mới $N=34$ trong đồng vị giàu neutron ^{54}Ca . Sự thay đổi cường độ lực tensor do sự thay đổi số proton, ảnh hưởng lên lớp vỏ neutron $N=34$ trong các đồng vị ^{52}Ar , ^{56}Ti và ^{58}Cr cũng đã được trình bày thông qua bằng chứng thực nghiệm là năng lượng kích thích của trạng thái 2^+ đầu tiên. Sự ảnh hưởng của lực tensor không chỉ làm thay đổi sơ đồ mức của lớp vỏ neutron mà còn gây ra sự thay đổi sơ đồ mức của lớp vỏ proton. Báo cáo cũng giải thích nguồn gốc các kết quả thí nghiệm về sự đảo ngược của lớp vỏ proton ngoài cùng ở hai mức $1s_{1/2}$ - $0d_{3/2}$ trong các đồng vị $^{43,45}\text{Cl}$ và ^{47}K , sau đó lớp vỏ proton ngoài cùng được khôi phục trong các đồng vị ^{49}Cl và ^{51}K ($N=32$).

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện bởi sự tài trợ của Bộ Khoa học và Công nghệ thông qua đề tài “Nghiên cứu cấu trúc của các hạt nhân giàu neutron lân cận ^{49}Ar và ^{78}Ni thông qua thí nghiệm phản ứng hạt nhân trực tiếp trong vùng năng lượng trung gian”, mã số ĐTCB.01/21/VKHKTHN. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.G. Mayer (1949), "On closed shells in nuclei. II", *Phys. Rev. J. Ar.*, **75(12)**, DOI: 10.1103/PhysRev.75.1969.
- [2] O. Haxel, J.H.D. Jensen, H.E. Suess (1949), "On the 'magic numbers' in nuclear structure", *Phys. Rev. J. Ar.*, **75(11)**, DOI: 10.1103/PhysRev.75.1766.2
- [3] R. Kanungo, C. Nociforo, A. Prochazka, et al. (2009), "One-neutron removal measurement reveals ^{24}O as a new doubly magic nucleus", *Phys. Rev. Lett.*, **102(15)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.152501.
- [4] C.R. Hoffman, T. Baumann, D. Bazin, et al. (2009), "Evidence for a doubly magic ^{24}O ", *Phys. Lett. B*, **672(1)**, pp.17-21, DOI: 10.1016/j.physletb.2008.12.066.
- [5] D. Steppenbeck, S. Takeuchi, N. Aoi, et al. (2013), "Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of ^{54}Ca ", *Nature*, **502**, pp.207-210, DOI: 10.1038/nature12522.
- [6] B. Bastin, S. Grévy, D. Sohler, et al. (2007), "Collapse of the N=28 shell closure in ^{42}Si ", *Phys. Rev. Lett.*, **99(2)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.022503.
- [7] T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, et al. (2005), "Evolution of nuclear shells due to the tensor force", *Phys. Rev. Lett.*, **95(23)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.232502.
- [8] T. Otsuka, A. Gade, O. Sorlin, et al. (2020), "Evolution of shell structure in exotic nuclei", *Rev. Mod. Phys.*, **92**, DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015002.
- [9] E.G. Myers (2013), "The most precise atomic mass measurements in penning traps", *Int. J. Mass Spectrom.*, **349-350**, pp.107-122, DOI: 10.1016/j.ijms.2013.03.018.
- [10] F. Rotaru, F. Negoita, S. Grévy, et al. (2012), "Unveiling the intruder deformed O^+_2 state in ^{34}Si ", *Phys. Rev. Lett.*, **109(9)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.092503.
- [11] T. Nakamura, H. Sakurai, H. Watanabe (2017), "Exotic nuclei explored at in-flight separators", *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **97**, pp.53-122, DOI: 10.1016/j.pnpnp.2017.05.001.
- [12] M.H. Macfarlane, J.B. French (1960), "Stripping reactions and the structure of light and intermediate nuclei", *Rev. Mod. Phys.*, **32(3)**, DOI: 10.1103/RevModPhys.32.567.
- [13] T. Aumann, C.A. Bertulani, J. Ryckebusch (2013), "Quasifree (p,2p) and (p,pn) reactions with unstable nuclei", *Phys. Rev. C*, **88(6)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.064610.
- [14] P. Doornenbal, A. Obertelli (2013), *RIKEN Proposal for Scientific Program: Shell Evolution and Search for Two-Plus States at The RIBF (SEASTAR)*, 16pp.
- [15] B.D. Linh, N.D. Ton, L.X. Chung, et al. (2017), "Particle identification for Z=25-28 exotic nuclei from seastar experimental data", *Nuclear Science and Technology*, **7(2)**, pp.8-15, DOI: 10.53747/jnst.v7i2.106.
- [16] T. Kobayashi, N. Chiga, T. Isobe, et al. (2013), "SAMURAI spectrometer for RI beam experiments", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **317**, pp.294-304, DOI: 10.1016/j.nimb.2013.05.089.
- [17] A. Obertelli, A. Delbart, S. Anvar, et al. (2014), "MINOS: A vertex tracker coupled to a thick liquid-hydrogen target for in-beam spectroscopy of exotic nuclei", *Eur. Jour. Phys. A*, **50(8)**, DOI: 10.1140/epja/i2014-14008-y.
- [18] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (2021), *Neutron ToF Spectrometer NeuLAND*, <https://www.gsi.de/neuland/>, accessed 30 December 2021.
- [19] I. Murray, F. Browne, S. Chen, et al. (2018), "DALI2+ at the RIKEN Nishina Center RIBF", *RIKEN Accelerator Progress Report*, **51**, p.158.
- [20] S. Takeuchi, T. Motobayashi, Y. Togano, et al. (2014), "DALI2: A NaI(Tl) detector array for measurements of γ rays from fast nuclei", *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **763**, pp.596-603, DOI: 10.1016/j.nima.2014.06.087.
- [21] Z. Yang, F.M. Marqués, N.L. Achouri, et al. (2020), "Study of multi-neutron systems with SAMURAI spectrometer", *Recent Progress in Few-Body Physics: FB22 2018. Springer Proceedings in Physics*, **238**, DOI: 10.1007/978-3-030-32357-8_87.
- [22] T. Otsuka, R. Fujimoto, Y. Utsuno, et al. (2001), "Magic numbers in exotic nuclei and spin-isospin properties of the NN interaction", *Phys. Rev. Lett.*, **87(8)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.082502.
- [23] T. Otsuka (2002), "Shell, shape and spin/isospin structures of exotic nuclei", *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, **146**, pp.6-15, DOI: 10.1143/PTPS.146.6.
- [24] W. Darcey, R. Chapman, S. Hinds (1971), "A study of the states of ^{60}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni and ^{66}Ni using the (t, p) reaction", *Nucl. Phys. A*, **170(2)**, pp.253-272, DOI: 10.1016/0375-9474(71)90635-X.
- [25] N. Stein, J.W. Sunier, C.W. Woods (1977), "Correspondence between α -transfer and two-proton and two-neutron transfer reactions to the Nickel isotopes", *Phys. Rev. Lett.*, **38(11)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.38.587.
- [26] W.F. Steele, P.A. Smith, J.E. Finck, et al. (1976), "A survey of the (3He, 7Be) reaction at 70 MeV", *Nucl. Phys. A*, **266(2)**, pp.424-456, DOI: 10.1016/0375-9474(76)90368-7.
- [27] E.K. Warburton, J.W. Olness, A.M. Nathan, et al. (1977), "Yrast decay schemes from heavy-ion + ^{48}Ca fusion-evaporation reactions. II. $^{59-60}\text{Fe}$ and $^{59-60}\text{Co}$ ", *Phys. Rev. C*, **16(3)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.16.1027.
- [28] J.I. Prisciandaro, P.F. Mantica, B.A. Brown, et al. (2001), "New evidence for a subshell gap at N=32", *Phys. Lett. B*, **510(1-4)**, pp.17-23, DOI: 10.1016/S0370-2693(01)00565-2.
- [29] H.N. Liu, A. Obertelli, P. Doornenbal, et al. (2019), "How robust is the N=34 subshell closure? First spectroscopy of ^{52}Ar ", *Phys. Rev. Lett.*, **122(7)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.072502.
- [30] S. Zhu, R.V.F. Janssens, B. Fornal, et al. (2007), "One-particle excitations outside the ^{54}Ti semi-magic core: The ^{55}V and ^{55}Ti yrast structures", *Phys. Lett. B*, **650(2-3)**, pp.135-140, DOI: 10.1016/j.physletb.2007.05.014.
- [31] P.F. Mantica, B.A. Brown, A.D. Davies, et al. (2003), " β -decay properties of $^{55,56}\text{Ti}$ ", *Phys. Rev. C*, **68(4)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.68.044311.
- [32] R.V.F. Janssens, B. Fornal, P.F. Mantica, et al. (2002), "Structure of $^{52,54}\text{Ti}$ and shell closures in neutron-rich nuclei above ^{48}Ca ", *Phys. Lett. B*, **546(1-2)**, pp.55-62, DOI: 10.1016/S0370-2693(02)02682-5.
- [33] A. Huck, G. Klotz, A. Knipper, et al. (1985), "Beta decay of the new isotopes ^{52}K , ^{52}Ca , and ^{52}Sc ; a test of the shell model far from stability", *Phys. Rev. C*, **31(6)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.31.2226.
- [34] D. Steppenbeck, S. Takeuchi, N. Aoi, et al. (2015), "Low-lying structure of ^{50}Ar and the N=32 subshell closure", *Phys. Rev. Lett.*, **114(25)**, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.252501.
- [35] M.L. Cortés, W. Rodriguez, P. Doornenbal, et al. (2020), "N=32 shell closure below calcium: Low-lying structure of ^{50}Ar ", *Phys. Rev. C*, **102(6)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.102.064320.
- [36] G. Klotz, G. Walter (1970), "Electromagnetic transitions in ^{37}Cl following the β^- decay of ^{37}S ", *Nucl. Phys. A*, **156(1)**, pp.28-32, DOI: 10.1016/0375-9474(70)91110-3 (in French).
- [37] National Nuclear Data Center (2023), *Nuclear Levels and Gammas Search*, https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/indx_adopted.jsp, accessed 2 June 2023.
- [38] J.H. Bjerregaard, O. Hansen, O. Nathan, et al. (1967), "Proton-hole states in $^{47,45}\text{K}$ ", *Phys. Lett. B*, **24(11)**, pp.568-570, DOI: 10.1016/0370-2693(67)90391-7.
- [39] S.R. Stroberg, A. Gade, T. Baugher, et al. (2012), "In-beam γ -ray spectroscopy of $^{43-46}\text{Cl}$ ", *Phys. Rev. C*, **86(2)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.86.024321.
- [40] Y. Sun, A. Obertelli, P. Doornenbal, et al. (2020), "Restoration of the natural $E(1/2^-) - E(3/2^-)$ energy splitting in odd-K isotopes towards N=40", *Phys. Lett. B*, **802**, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135215.
- [41] B.D. Linh, A. Corsi, A. Gillibert, et al. (2021), "Investigation of the ground-state spin inversion in the neutron-rich $^{47,49}\text{Cl}$ isotopes", *Phys. Rev. C*, **104(4)**, DOI: 10.1103/PhysRevC.104.044331.