

Ứng dụng mẫu đơn hạt trong việc xác định spin và độ chắn lẻ ở các mức của hạt nhân ^{59}Fe

• Nguyễn An Sơn

• Đặng Lành

Trường Đại học Đà Lạt

(Bài nhận ngày 03 tháng 02 năm 2015, nhận đăng ngày 18 tháng 06 năm 2015)

TÓM TẮT

Spin và độ chắn lẻ ở các mức kích thích và mức cơ bản của hạt nhân là hai đại lượng quan trọng trong các tính chất lượng tử của hạt nhân. Tuy nhiên, hiện nay ở Việt Nam chưa có hệ đo nào có thể xác định trực tiếp hai đại lượng này. Bài báo trình bày phương pháp dùng mẫu lớp để xác định spin và độ

Từ khóa: Spin hạt nhân, độ chắn lẻ, mức kích thích, mẫu lớp, mẫu đơn hạt.

chắn lẻ của mức trung gian cũng như trạng thái cơ bản của hạt nhân ^{59}Fe . Kết quả được so sánh với những thực nghiệm trước đây. Kết quả của bài báo này cũng cho thấy sự phù hợp trong ứng dụng mẫu đơn hạt của hạt nhân A lẻ ở vùng hạt nhân trung bình.

MỞ ĐẦU

Các đặc trưng lượng tử của hạt nhân là vấn đề cần quan tâm trong nghiên cứu cấu trúc hạt nhân ngay cả trong lý thuyết cũng như thực nghiệm. Tuy nhiên, một số đặc trưng lượng tử rất khó xác định bằng thực nghiệm, chẳng hạn spin và độ chắn lẻ của các mức trung gian. Thông thường, hệ đo tương quan góc thường được dùng trong việc xác định spin và độ chắn lẻ của các mức kích thích trung gian.

Cho đến nay, Việt Nam chưa có hệ phổ kế đo đặc spin cũng như năng lượng kích thích mức trung gian. Tại Lò phản ứng Đà Lạt có hệ trùng phùng gamma – gamma, nhưng hệ này cũng không thể xác định tất cả spin của các mức trung gian một cách trực tiếp, mà chỉ giải đoán giá trị năng lượng mức trung gian cũng như spin và độ chắn lẻ của mức qua năng lượng các cặp chuyển dời nối tầng [1, 2].

Trên cơ sở sử dụng các mẫu cấu trúc hạt nhân để hỗ trợ giải quyết một số vấn đề mà thực nghiệm khó xác định, tùy vào loại hạt nhân cũng

như các tính chất cần quan tâm mà sử dụng các mẫu lý thuyết khác nhau. Ở hạt nhân nhẹ, mẫu giọt chất lỏng khá phù hợp khi giải thích một số tính chất về năng lượng liên kết; ở các hạt nhân trung bình không bị suy biến thì mẫu lớp là phù hợp hơn cả; trong khi ở hạt nhân nặng suy biến thì mẫu suy rộng được ứng dụng nhiều hơn. Tuy nhiên, khi tính toán đến spin và độ chắn lẻ của hạt nhân ở trạng thái cơ bản cũng như các mức kích thích thì mẫu lớp là khá phù hợp cho những hạt nhân trong dải số khối $20 < A < 120$.

Sắt là kim loại được sử dụng trong thiết kế một số thiết bị trong cấu trúc Lò phản ứng hạt nhân. Do vậy, để tiếp cận với công nghệ Lò phản ứng, thì việc nghiên cứu tính chất của các vật liệu là cần thiết và thiết thực. ^{59}Fe là hạt nhân trung bình, có A lẻ, do vậy lý thuyết mẫu đơn hạt có thể áp dụng cho quá trình tính toán với hạt nhân này. Các nghiên cứu trước đây đã xác định các năng lượng chuyển dời gamma của ^{59}Fe trên kết quả giải kích thích từ phân rã beta của ^{59}Mn . Một

số công trình đã xác định các mức spin thực nghiệm [3, 4]. Tuy nhiên các tác giả này chỉ xác định được spin thực nghiệm ở mức năng lượng thấp < 2 MeV. Việc khó khăn khi xác định bằng thực nghiệm của các tia gamma của ^{59}Fe là vì chính ^{59}Fe cũng tiếp tục phân rã beta để về ^{59}Co , và thời gian bán rã của ^{59}Mn rất ngắn, chỉ khoảng 4,59 s [5].

Công trình nghiên cứu thực nghiệm đầy đủ nhất cho đến nay là công trình của Coral M. Baglin [5]. Ở nghiên cứu này, tác giả đã đo và tính được các năng lượng, cường độ chuyển dời, hệ số rẽ nhánh của các tia gamma phát ra của ^{59}Fe khi giải kích thích từ quá trình phân rã beta của ^{59}Mn .

Các công bố trước cũng chưa thấy có công trình công bố về áp dụng mẫu cấu trúc hạt nhân cho việc tính toán các đặc trưng lượng tử của các mức năng lượng kích thích.

CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Mẫu lớp hạt nhân được xây dựng theo mô hình mẫu nguyên tử, bằng cách chuyển bài toán hệ nhiều nucleon (bài toán nhiều hạt) về bài toán một hạt chuyển động trong trường thế xuyên tâm tự hợp. Giải bài toán Schodinger đối với chuyển động của nucleon trong trường thế tự hợp sẽ nhận

được một hệ các trạng thái ứng với một mức năng lượng xác định. Theo nguyên lý loại trừ Pauli, mỗi nucleon trong hạt nhân chiếm một mức năng lượng, và bắt đầu từ mức thấp nhất.

Phương pháp đơn giản nhất của mẫu lớp là mẫu đơn hạt đối với hạt nhân có số khối A lẻ. Trong mẫu này, ngoại trừ nucleon lẻ cuối cùng thì các nucleon còn lại tạo nên một cái lõi đối xứng cầu với moment động lượng và moment từ bằng không. Như vậy, các tính chất của hạt nhân được quyết định bởi tính chất của nucleon lẻ không liên kết cặp.

Trong hạt nhân, trạng thái của nucleon trong trường thế tự hợp được đặc trưng bởi 4 số lượng tử n, l, j và m_j . Với n là số lượng tử chính nhận các giá trị nguyên 1, 2, 3, ... xác định phân bố các mức năng lượng tăng dần; l là số lượng tử quỹ đạo nhận các giá trị 0, 1, 2, 3, ... và được ký hiệu là s, p, d, f, ... ; j là moment toàn phần (spin) của nucleon, $j = l \pm 1/2$; m_j là hình chiếu của j, $m_j = -j, -j-1, \dots, j-1, j$ nhận $2j+1$ giá trị.

Các mức sắp xếp theo thứ tự tăng dần và được đặc trưng bằng 2 số lượng tử n và l. Theo nguyên lý loại trừ Pauli được trình bày ở Bảng 1, mỗi mức chứa tối đa $N = 2(2l + 1)$ nucleon mỗi loại proton hay neutron.

Bảng 1. Các trạng thái nhận được từ việc giải phương trình Schodinger với thế chữ nhật [6, 7].

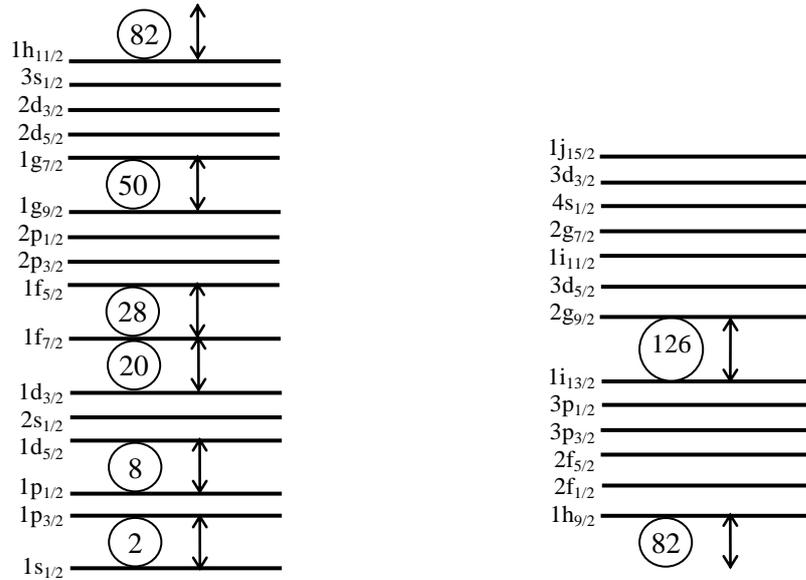
Trạng thái	1s	1p	2s	1d	1f	2p	1g	2d	3s	1h	2f	3p
<i>l</i>	0	1	0	2	3	1	4	2	0	5	3	1
$N = 2(2l + 1)$	2	6	2	10	14	6	18	10	2	22	14	6

Thông thường một mức năng lượng nucleon trong hạt nhân được ký hiệu bởi 3 số lượng tử là

n, l, j. Bảng 2 và Hình 1 mô tả sự phân bố các mức đối với mẫu lớp.

Bảng 2. Các trạng thái ứng với các lớp vỏ có tính đến spin quỹ đạo [6, 7].

Lớp vỏ	Trạng thái	m_j	N
I	$1s_{1/2}$	2	2
II	$1p_{3/2}1p_{1/2}$	4 + 2	8
III	$1d_{5/2}2s_{1/2}1d_{3/2}$	6 + 2 + 4	20
IV	$1f_{7/2}1f_{5/2}2p_{3/2}2p_{1/2}1g_{9/2}$	8 + 6 + 4 + 2 + 10	50
V	$1g_{7/2}2d_{5/2}2d_{3/2}3s_{1/2}1h_{11/2}$	8 + 6 + 4 + 2 + 12	82
VI	$1h_{9/2}2f_{7/2}2f_{5/2}3p_{3/2}3p_{1/2}1i_{13/2}$	10 + 8 + 6 + 4 + 2 + 14	126



Hình 1. Sơ đồ các mức nucleon trong hạt nhân theo mẫu lớp.

Spin của hạt nhân được xác định theo nguyên tắc sau:

Nếu hạt nhân có A lẻ thì spin của hạt nhân chính là spin của nucleon riêng lẻ không liên kết cặp;

Các trường hợp khác thì spin của hạt nhân được xác định theo quy tắc Brennan – Bernstein [7] (áp dụng $20 < A < 120$) như sau:

Nếu l lớp cuối của proton và neutron là chẵn - lẻ hoặc lẻ - chẵn thì spin của hạt nhân được xác định theo hiệu spin của lớp cuối, $J = | J_p - J_n |$;

Nếu l lớp cuối của proton và neutron là lẻ - lẻ thì spin của hạt nhân được xác định theo tổng spin của lớp cuối, $J = | J_p + J_n |$;

Nếu l lớp cuối của proton và neutron là chẵn - chẵn thì spin của hạt nhân $J = | J_p + J_n - 1 |$.

Độ chẵn lẻ được xác định theo nguyên tắc $\pi_\gamma = (-1)^l$. Trường hợp hạt nhân A lẻ thì l được xác định là l ở lớp của nucleon không liên kết cặp. Các trường hợp khác được xác định theo tổng của l ở hai lớp proton và neutron cuối cùng.

Khi hạt nhân phát gamma thì không làm thay đổi số proton và neutron của hạt nhân, mà chỉ là quá trình sắp xếp lại cấu trúc lớp của các

nucleon. Quá trình phát gamma là dạng dịch chuyển điện từ. Giả sử hạt nhân có năng lượng, spin và độ chẵn lẻ ở trạng thái đầu tương ứng là E_i, J_i, π_i và trạng thái kế sau là E_f, J_f, π_f , thì năng lượng của tia gamma phát ra được xác định từ độ lệch giữa hai mức năng lượng:

$$E_\gamma = E_i - E_f \quad (1)$$

Gamma là những photon, tức là hạt boson, có spin bằng 1, vì spin J_γ của photon phải là nguyên dương. Trong dịch chuyển điện từ giữa hai trạng thái hạt nhân $|J_i^{\pi_i}\rangle \rightarrow |J_f^{\pi_f}\rangle$ thì spin J_γ của photon được xác định từ hệ thức tam giác sau:

$$|J_i - J_f| \leq J_\gamma \leq J_i + J_f \quad (2)$$

Độ chẵn lẻ cũng được bảo toàn trong quá trình dịch chuyển điện từ.

$$\pi_i \pi_\gamma \pi_f = 1 \quad (3)$$

Như vậy độ chẵn lẻ của photon π_γ là dương nếu $\pi_i = \pi_f$ và π_γ phải là âm nếu $\pi_i = -\pi_f$.

Trong dịch chuyển điện từ thì:

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

và dịch chuyển từ thì:

$$\pi_\gamma = (-1)^{J_\gamma+1} \quad (5)$$

Bức xạ gamma với $J_\gamma = 1$ gọi là bức xạ lưỡng cực, $J_\gamma = 2$ gọi là bức xạ tứ cực, $J_\gamma = 3$ gọi là bức xạ bát cực, ...

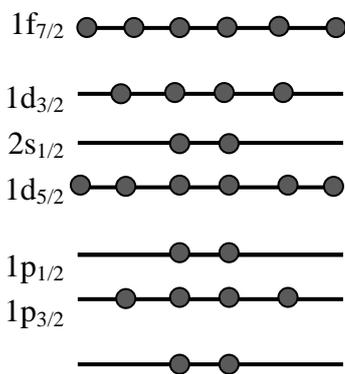
KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ SO SÁNH THỰC NGHIỆM

Sắp xếp các nucleon theo mẫu lớp

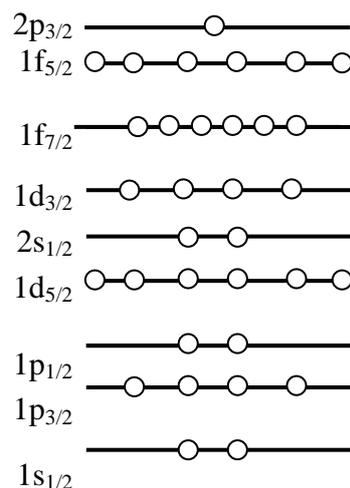
Hạt nhân ^{59}Fe có 26 proton và 33 neutron. Hình 2 trình bày sự sắp xếp các nucleon của ^{59}Fe theo mẫu lớp. Ở trạng thái cơ bản, sự sắp xếp các nucleon trong hạt nhân như sau:

$$\text{Proton: } 1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6 2s_{1/2}^2 1d_{3/2}^4 1f_{7/2}^6 \cdot$$

$$\text{Neutron: } 1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6 2s_{1/2}^2 1d_{3/2}^4 1f_{7/2}^6 2f_{5/2}^6 2p_{3/2}^1 \cdot$$



2.A) Sắp xếp proton



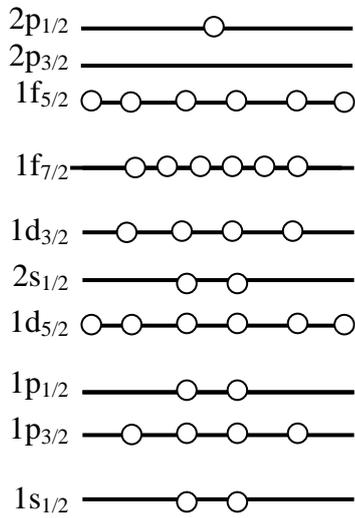
2.B) Sắp xếp neutron

Hình 2. Sự sắp xếp các nucleon của ^{59}Fe ở trạng thái cơ bản.

Như vậy với các sắp xếp này, ^{59}Fe ở trạng thái cơ bản có spin được quyết định bởi nucleon riêng lẻ, đó là neutron nằm ở mức $2p_{3/2}$, tức spin hạt nhân $I = 3/2$, độ chẵn lẻ $\pi_\gamma = (-1)^l = (-1)^1 = -1$. Như vậy, ở mức cơ bản $I = 3/2^-$. Kết quả này phù hợp với các kết quả thực nghiệm đã xác định [5, 8].

Bây giờ xem hạt nhân ^{59}Fe gồm một lõi hạt nhân với sự liên kết cặp bền của 26 proton và 26 neutron. Các mức kích thích tiếp theo nếu có là sự thay đổi mức của 8 neutron thừa ở mức trên. Vậy xem xét các trường hợp cụ thể sau:

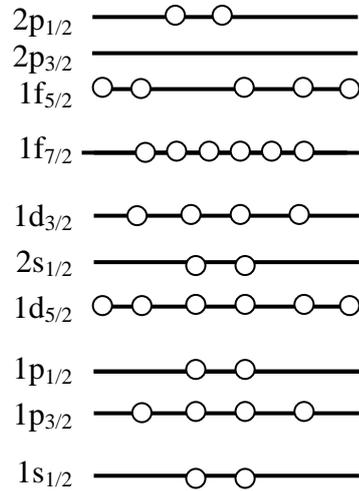
Mức kích thích thứ nhất: 1 neutron ở lớp $2p_{3/2}$ nhảy lên mức cao hơn liền kề (Hình 3), tức là mức $2p_{1/2}$. Như vậy ở mức kích thích này độ chẵn lẻ $\pi_\gamma = (-1)^l = (-1)^1 = -1$, và spin của



Hình 3. Mức kích thích thứ nhất.

hạt nhân ở mức kích thích này là $I = 1/2^-$. Mặt khác, ở mức $2p_{3/2}$ không còn nucleon, do đó theo quy tắc, spin của hạt nhân cũng có thể quyết định bởi spin của mức này và độ chẵn lẻ ngược với độ chẵn lẻ ở mức này, tức đây là mức kép, có thêm $I = 3/2^+$.

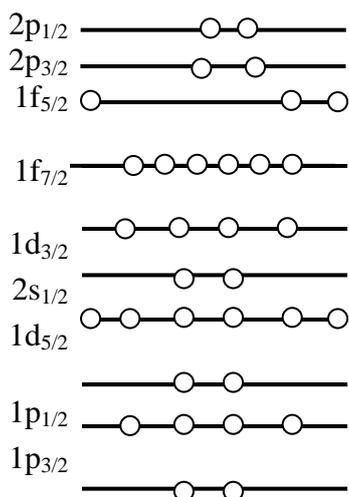
Mức kích thích thứ hai: 1 neutron từ mức $1f_{5/2}$ dịch chuyển lên mức $2p_{1/2}$ (Hình 4), nên spin của hạt nhân quyết định bởi mức lẻ, tức mức $1f_{5/2}$ (còn 5 neutron). Như vậy ở mức kích thích này độ chẵn lẻ $\pi_\gamma = (-1)^l = (-1)^3 = -1$, và hạt nhân ở mức này có spin là $I = 5/2^-$. Tương tự như giải thích ở mức kích thích thứ nhất, spin của hạt nhân còn ảnh hưởng bởi mức $2p_{3/2}$ không còn nucleon, do đó có thêm $I = 3/2^+$.



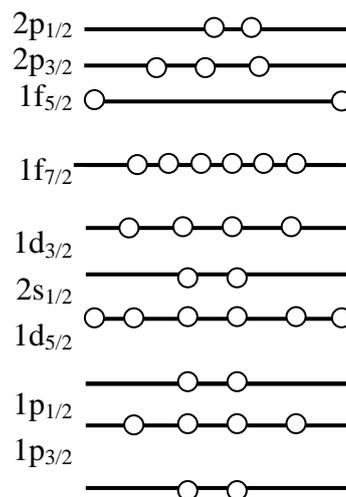
Hình 4. Mức kích thích thứ hai.

Mức kích thích thứ ba: 2 neutron ở mức $1f_{5/2}$ chuyển lên mức $2p_{3/2}$ (Hình 5), nên spin của hạt nhân quyết định bởi mức lẻ, tức mức $1f_{5/2}$ (còn 3 neutron). Như vậy ở mức kích thích này hạt nhân cũng có spin là $I = 5/2^-$.

Mức kích thích thứ tư: 1 neutron ở mức $1f_{5/2}$ tiếp tục chuyển lên mức $2p_{3/2}$ (Hình 6). Do đó spin của hạt nhân ở mức này quyết định bởi lớp nucleon lẻ, tức mức $2p_{3/2}$, hạt nhân ở mức này có spin là $I = 3/2^-$.

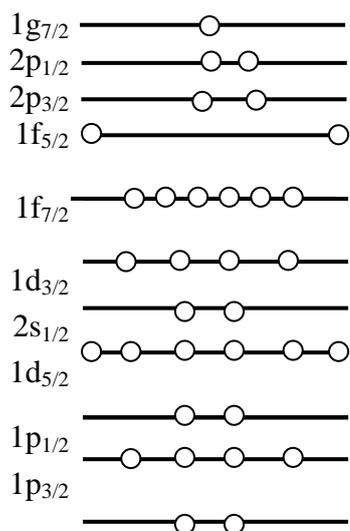


Hình 5. Mức kích thích thứ ba.

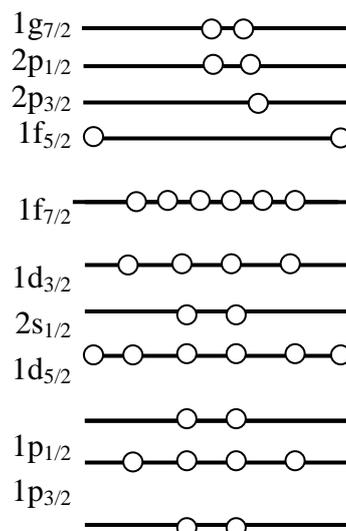


Hình 6. Mức kích thích thứ tư.

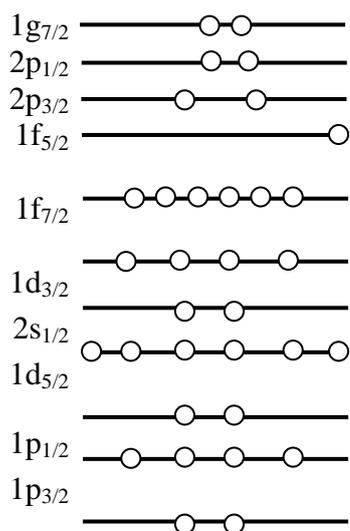
Tương tự như vậy, spin và độ chẵn lẻ ở các mức kích thích thứ năm $I = 7/2+$, mức thứ sáu $I = 3/2-$, mức thứ bảy $I = 5/2-$, mức thứ tám là mức kép với $I = 3/2-$ và $I = 5/2+$, mức thứ chín là mức kép với $I = 7/2-$ và $I = 5/2+$, mức thứ mười là mức kép với $I = 3/2-$ và $I = 5/2+$. Hình 7, 8, 9, 10, 11, 12 trình bày sự sắp xếp các neutron trong các lớp.



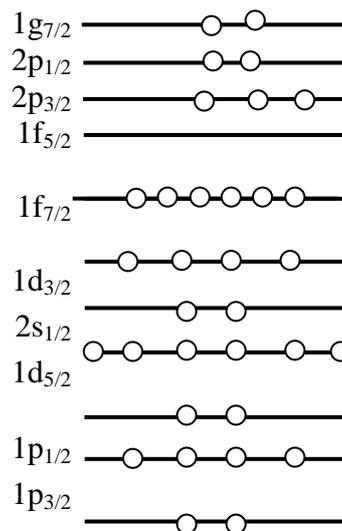
Hình 7. Mức kích thích thứ năm.



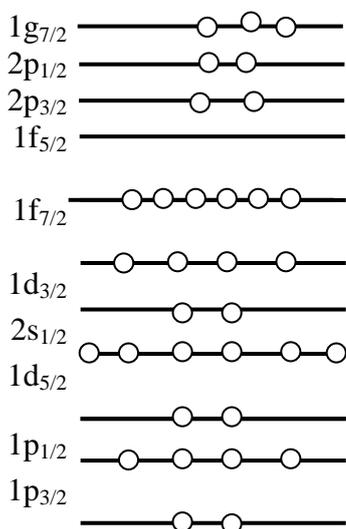
Hình 8. Mức kích thích thứ sáu.



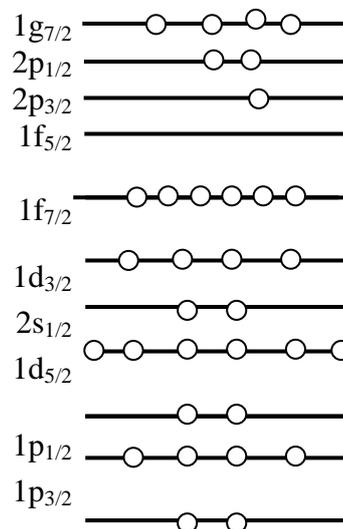
Hình 9. Mức kích thích thứ bảy.



Hình 10. Mức kích thích thứ tám.



Hình 11. Mức kích thích thứ chín.

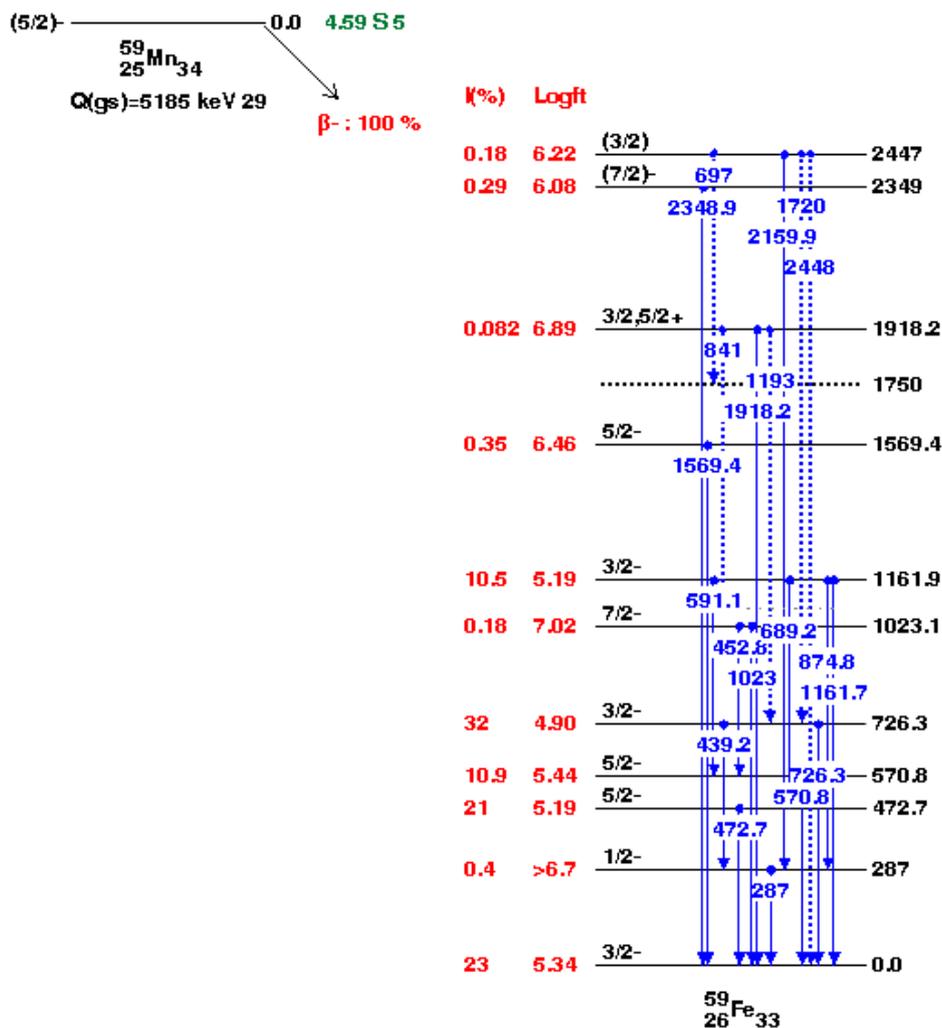


Hình 12. Mức kích thích thứ mười.

So sánh kết quả thực nghiệm

Kết quả tính toán spin và độ chắn lẻ ở các mức kích thích của ⁵⁹Fe được so sánh với thực nghiệm đo đạc [5]. Hình 13 là các mức kích thích

của ⁵⁹Fe đo được từ phân rã beta của hạt nhân ⁵⁹Mn.



Hình 13. Các mức kích thích của ^{59}Fe đo được từ phát beta của dòng vị ^{59}Mn [8].

Có thể ứng dụng cách tính toán này cho những hạt nhân khác với số khối A lẻ và trung bình. Lấy thí dụ với hạt nhân $^{33}\text{Si}_{19}$ cho việc ứng dụng mẫu lớp trong vùng số khối hạt nhân đã nêu.

Ở mức cơ bản, $^{33}\text{Si}_{19}$ có cấu trúc nucleon theo mẫu lớp theo quy tắc ở Bảng 1, Bảng 2 và Hình 1 là:

Proton: $1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6$.

Neutron: $1s_{1/2}^2 1p_{3/2}^4 1p_{1/2}^2 1d_{5/2}^6 2s_{1/2}^2 1d_{3/2}^3$.

Như vậy theo cách giải thích mẫu lớp thì spin ở trạng thái cơ bản của $^{33}\text{Si}_{19}$ quyết định bởi

nucleon không liên kết cặp, tức nucleon ở lớp $1d_{3/2}$, và độ chắn lẻ được xác định $\pi_\gamma = (-1)^l = (-1)^2 = +1$, tức spin và độ chắn lẻ ở mức cơ bản của $^{33}\text{Si}_{19}$ là $3/2+$.

Khi bị kích thích, những nucleon ở các mức ngoài cùng bị đẩy lên mức năng lượng cao hơn. Các mức cao hơn có thể có theo mẫu vỏ (Hình 1) là mức $1f_{7/2}, 1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2}, \dots$ Do đó, spin và độ chắn lẻ khả dĩ của các mức trung gian là $7/2-, 3/2+, 1/2+, 9/2-, \dots$ Kết quả này là phù hợp với thực nghiệm [9] khi xác định spin và độ chắn lẻ của các nghiên cứu khác.

Như vậy, trong nghiên cứu này, kết quả tính toán bằng mẫu lớp cho thấy khá phù hợp với kết quả thực nghiệm đo được của ^{59}Fe và ^{33}Si . Ở ^{59}Fe , trong 10 mức tính toán lý thuyết theo mẫu đơn hạt, thì các mức đơn phù hợp hoàn toàn giữa tính toán spin và độ chẵn lẻ của các mức trung gian. Ở các mức kép, thực nghiệm đo đạc trùng hợp với lý thuyết ở mức kích thích thứ tám. Tuy nhiên các mức thứ nhất, thứ hai, thứ chín và thứ mười thực nghiệm chỉ xác định được mức đơn. Điều này là hoàn toàn có thể, bởi chưa có mẫu lý thuyết nào phù hợp hoàn toàn, và do vậy không thể thay thế thực nghiệm bằng việc tính toán toàn bộ qua lý thuyết trong nghiên cứu cấu trúc hạt nhân.

KẾT LUẬN

Bằng việc ứng dụng mẫu lớp đã xác định được spin và độ chẵn lẻ của 10 mức kích thích và trạng thái cơ bản của ^{59}Fe . Kết quả cho thấy việc tính toán theo mẫu đơn hạt là phù hợp với kết quả thực nghiệm cho bài toán xác định spin và độ chẵn lẻ của các trạng thái hạt nhân ở hạt nhân có A lẻ và khối lượng trung bình. Như vậy, kết quả nghiên cứu này giúp xác định được spin và độ chẵn lẻ của các mức của hạt nhân trung bình bằng lý thuyết khá chính xác, điều này đã khắc phục được hạn chế thiết bị nghiên cứu các đặc trưng lượng tử ở các mức trung gian của hạt nhân trong điều kiện thực hiện nghiên cứu hạt nhân ở Việt Nam còn hạn chế.

Application of single particle model to determine the spin and parity of levels of ^{59}Fe nucleus

- Nguyen An Son
- Dang Lanh
Dalat University

ABSTRACT

The spin and parity of the excited state and the ground state of nuclei are two of important properties of the nuclei quantum. However, up to now we do not have appropriate equipments to directly determine the spin and parity of nuclei. This paper shows the application of nuclear shell

model to study the spin and parity of intermediate levels and ground state of ^{59}Fe nucleus. Comparing to previously experimental data, this nucleus single-particle model is suitable of the average mass and odd A nuclei.

Keywords: Spin nuclei, Parity nuclei, excited nuclear level, nuclear shell model, nuclear single particle model.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. V.H. Tấn và các cộng sự, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp bộ, Nghiên cứu cường độ chuyển dời gamma nối tầng và sơ đồ mức kích thích vùng năng lượng trung gian của các hạt nhân ^{153}Sm , ^{182}Ta , ^{59}Ni và

^{239}U bằng phương pháp cộng biên độ các xung trùng phùng, Viện NCHN, Đà Lạt (2006).

[2]. V.H. Tấn và cộng sự, Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp bộ - 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, Viện NCHN, Đà Lạt (2010).
- [3]. http://www.inl.infn.it/~annrep/read_ar/2007/contributions/pdfs/013_A_125_A120.pdf
- [4]. V. Subrahmanyam, Spins and γ -multipolarities in the decay of ^{59}Fe , *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 3319–3322, 34, 11 (1972).
- [5]. C.M. Baglin, Nuclear Data Sheets for A = 59, *Science Direct*, 95, 2, 215-541 (2002).
- [6]. N.Q. Huy, Cơ sở vật lý hạt nhân, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, (2006).
- [7]. J.M. Blatt, V.F. Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics*, John Wiley and Sons, Newyork (1972).
- [8]. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/getdecaysheme.jsp?nucleus=59FE&dsid=59mn%20bM%20decay&unc=nds>
- [9]. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/getbandplot.jsp?unc=nds>