

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HCM
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

NGUYỄN TRÍ TOÀN PHÚC

NGHIÊN CỨU CÁC HIỆU ỨNG CẤU TRÚC HẠT NHÂN
TỪ PHẢN ỨNG CHUYỂN ALPHA
TRONG TÁN XẠ HẠT NHÂN-HẠT NHÂN
VÀ TỪ PHẢN ỨNG BỨT NUCLEON

Ngành: Vật lý nguyên tử và hạt nhân

Mã số ngành: 9440106

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. Hồ Chí Minh - năm 2025

Công trình được hoàn thành tại: trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG HCM

Người hướng dẫn khoa học:

1. HDC: GS.TS. Đào Tiến Khoa
2. HDP: TS. Võ Hồng Hải

Phản biện 1: GS.TS. Nguyễn Quang Hưng

Phản biện 2: PGS.TS. Hồ Mạnh Dũng

Phản biện 3: PGS.TS. Phạm Nguyễn Thành Vinh

Phản biện độc lập 1: miễn

Phản biện độc lập 2: miễn

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án cấp cơ sở đào tạo họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, vào hồi 08 giờ 30, ngày 08 tháng 06 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Khoa học Tổng hợp TP.HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia TP.HCM
- Thư viện Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

Mở đầu

Nghiên cứu cấu trúc và tương tác trong hạt nhân nguyên tử luôn là mục tiêu trọng tâm của Vật lý hạt nhân. Tính phức tạp của lực hạt nhân và hành vi của các nucleon trong hạt nhân tạo ra những thách thức liên tục đòi hỏi những phương pháp tiếp cận thực nghiệm và lý thuyết tiên tiến. Luận án *Nghiên cứu các hiệu ứng cấu trúc hạt nhân từ phản ứng chuyển alpha trong tán xạ hạt nhân-hạt nhân và từ phản ứng bắt nucleon* tập trung khám phá các hiệu ứng cấu trúc hạt nhân thông qua hai quá trình là chuyển dần hồi và phi dần hồi trong tán xạ ion nặng và phản ứng bắt nucleon gây ra bởi proton.

Mục tiêu chính của luận án gồm hai phần:

1. **Nghiên cứu đối xứng trao đổi lõi trong quá trình chuyển hạt α dần hồi và phi dần hồi trong tán xạ ion nặng** Phần này bao gồm ba nghiên cứu:

(1.1) **Dẫn ra thể trao đổi lõi từ quá trình chuyển α dần hồi** Phân tích cơ chế đối xứng trao đổi lõi ảnh hưởng đến thể quang học và ma trận S trong tán xạ ion nặng.

(1.2) **Tổng quát hóa phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa cho các hệ đồng nhất** Mở rộng phương pháp Fuller để kết hợp đối xứng trao đổi hạt đồng nhất và làm rõ vai trò của quá trình trao đổi lõi trong tán xạ.

(1.3) **Khảo sát cơ chế chuyển α phi dần hồi** Phân tích dữ liệu thực nghiệm để định lượng ảnh hưởng của các kênh chuyển phi dần hồi và kiểm chứng đối xứng trao đổi lõi trong quá trình tán xạ dần hồi và phi dần hồi trong các hệ đối xứng, cũng như nghiên cứu tính chất sóng phía gần-phía xa trong các quá trình chịu ảnh hưởng của đối xứng trao đổi.

2. **Nghiên cứu tính chất đơn hạt của hạt nhân thông qua phản ứng bắt nucleon gây ra bởi proton (p, pN)**

Phần này bao gồm hai nghiên cứu:

- (2.1) **Đánh giá sự suy giảm hệ số phổ** Phân tích dữ liệu (p, pN) để rút ra hệ số suy giảm và làm rõ sự phụ thuộc của chúng vào độ bất đối xứng proton-neutron.
- (2.2) **Đánh giá độ bất định lý thuyết trong việc rút ra hệ số phổ** Đánh giá độ bất định lý thuyết của mô hình xấp xỉ xung sóng biến dạng (DWIA) trong việc rút ra hệ số phổ, đặc biệt cho trường hợp $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$. Khảo sát độ bất định từ các thể quang học và tiết diện tán xạ nucleon-nucleon khác nhau để nâng cao độ chính xác.

Để đạt được các mục tiêu này, luận án được cấu trúc như sau:

- **Chương 1: Giới thiệu** trình bày tầm quan trọng của phản ứng hạt nhân trực tiếp trong việc khám phá cấu trúc hạt nhân, phác thảo các khái niệm cơ bản về đối xứng trao đổi lõi và phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton.
- **Chương 2: quá trình chuyển hạt α đàn hồi và phi đàn hồi trong tán xạ ion nặng**
 - 2.1 Hình thức luận của các phương pháp liên kênh phản ứng, thể folding và quá trình trao đổi lõi
 - 2.2 Dẫn ra thể trao đổi lõi từ quá trình chuyển α đàn hồi
 - 2.3 Tổng quát hóa phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa cho các hệ hạt đồng nhất
 - 2.4 Khảo sát cơ chế chuyển α phi đàn hồi
- **Chương 3: Phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton (p, pN)**
 - 3.1 Hình thức luận của mô hình DWIA
 - 3.2 Phân tích DWIA về sự suy giảm hệ số phổ
 - 3.3 Độ bất định của mô hình DWIA tại giới hạn năng lượng thấp
- **Kết luận và kiến nghị:** Chương này tổng kết các kết quả nghiên cứu chính, thảo luận về ý nghĩa đối với mô hình hóa phản ứng hạt nhân và nghiên cứu cấu trúc hạt nhân, đồng thời phác thảo các hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai.

Chương 1

Tổng quan

1.1. Giới thiệu

Hạt nhân nguyên tử là một hệ lượng tử nhiều hạt phức tạp được cấu thành từ proton và neutron (nucleon) liên kết bởi lực hạt nhân mạnh và thể hiện những mẫu hình phong phú về cấu trúc và động lực học trên toàn cảnh hạt nhân. Để hệ thống hóa các hạt nhân, ta sử dụng bản đồ hạt nhân được tổ chức theo số proton (Z) và số neutron (N), bao gồm các hạt nhân bền dọc theo thung lũng độ bền và các hạt nhân hiếm ở xa vùng bền hướng tới đường biên (dripline), nơi sự tương tác giữa các hiệu ứng đơn hạt và tập thể như cấu trúc vỏ, số ma thuật, và các tương quan khác nhau (ví dụ: kết cụm, ghép cặp, tầm xa và tầm ngắn) tạo ra các hiện tượng hạt nhân đa dạng. Một câu hỏi cơ bản trong Vật lý hạt nhân hiện đại, được nhấn mạnh trong các báo cáo tổng quan gần đây, là: “Làm thế nào mà các mẫu hình phong phú quan sát được trong cấu trúc và phản ứng hạt nhân lại được hình thành thông qua tương tác giữa neutron và proton?”

Để giải quyết câu hỏi này, nhiều mô hình lý thuyết khác nhau đã được phát triển để mô tả và dự đoán tính chất của hạt nhân. Các mô hình này bao gồm mẫu tầng hiện đại, lý thuyết trường trung bình, và các phương pháp *ab initio*. Bên cạnh sự phát triển của lý thuyết thì những tiến bộ trong kỹ thuật thực nghiệm đã cho phép nghiên cứu ở các giới hạn tồn tại của hạt nhân tại các cơ sở gia tốc như RIKEN RIBF, GSI FAIR, và MSU FRIB. Các phản ứng hạt nhân trực tiếp, đặc biệt là chuyển đàn hồi và phi đàn hồi trong tán xạ ion nặng và phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton (p, pN), là những công cụ quan trọng để nghiên cứu cấu trúc và động lực học hạt nhân. Các phản ứng này cho phép trích xuất các thông tin cấu trúc hạt nhân bằng cách kết nối các quan sát thực nghiệm với các mô hình lý thuyết thông qua các hàm chồng lấp và hệ số phổ. Luận án này nhằm đến việc cung cấp thêm thông tin về cấu trúc hạt nhân, cụ thể là đối xứng trao đổi lõi và cấu hình đơn hạt, bằng cách sử dụng một cách có hệ thống các phản ứng trực tiếp như chuyển hạt α trong tán xạ và phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton. Thông qua cách tiếp cận này, luận án tìm cách hoàn thiện các mô hình hạt nhân hiện có và cung cấp những thông tin hữu ích về tính chất của các hiệu ứng cấu trúc hạt nhân.

1.2. Chuyển đàn hồi và phi đàn hồi trong tán xạ ion nặng

1.2.1. Tổng quan về tán xạ ion nặng

Các thí nghiệm tán xạ ion nặng (HI) đóng vai trò then chốt trong việc hiểu cấu trúc và tương tác hạt nhân thông qua các quá trình đàn hồi và phi đàn hồi. Tán xạ đàn hồi cung cấp thông tin về mật độ và bán kính, trong khi tán xạ phi đàn hồi tiết lộ các quá trình kích thích hạt nhân. Cả hai quá trình tán xạ có thể được phân tích một cách hiệu quả sử dụng thế quang học hạt nhân-hạt nhân trong khuôn khổ mẫu quang học (OM) và mẫu folding kép (DFM). Trong các hệ có sự hấp thụ yếu, tán xạ cầu vồng hạt nhân có thể được quan sát trong tiết diện vi phân của tán xạ do giao thoa giữa các thành phần sóng phía xa bị khúc xạ. Hiện tượng cầu vồng hạt nhân này cho phép xác định chính xác thế tương tác hạt nhân-hạt nhân thực. Đáng chú ý, trong hệ $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$, các dao động tăng cường ở góc lớn phá vỡ các mẫu cầu vồng, được cho là do sự chuyển đàn hồi của hạt α giữa các lõi đồng nhất.

Trong các hệ đồng nhất lõi như $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$, sự trao đổi các lõi đồng nhất thông qua quá trình chuyển đàn hồi hoặc phi đàn hồi dẫn đến các cấu trúc dao động tăng cường trong dữ liệu tán xạ góc lớn. Chuyển đàn hồi liên quan đến việc trao đổi một hạt α , dẫn đến kênh ra đồng nhất với kênh vào nhưng với vai trò của hạt nhân tới và bia được hoán đổi. Đối xứng trao đổi lõi này gây ra các mẫu tán xạ góc lớn bất thường (ALAS), được quan sát như các phân bố góc hình chữ V ở năng lượng cao. Các quá trình chuyển này là công cụ quan trọng trong việc trích xuất hệ số phổ và hệ số chuẩn hóa tiệm cận (ANC), cung cấp hiểu biết về cấu hình đơn hạt và tương quan nucleon. Mặc dù được biết đến từ những năm 1970, đối xứng trao đổi lõi và mối liên hệ của nó với thế quang học vẫn chưa được nghiên cứu kỹ lưỡng do các hạn chế về thực nghiệm và tính toán. Đây chính là một chủ đề được tập trung nghiên cứu trong luận án này.

1.2.2. Ảnh hưởng của đối xứng trao đổi lõi lên tán xạ đàn hồi và thế quang học

Nhiều phương pháp lý thuyết khác nhau, như xấp xỉ Born sóng biến dạng (DWBA), liên kênh phản ứng (CRC), và mẫu quang học phụ thuộc tính chắn lẻ, đã được sử dụng để diễn giải các hiệu ứng đối xứng trao đổi lõi. Việc

thêm vào một thể trao đổi lõi (CEP) phụ thuộc tính chẵn lẻ trong OP giải thích cho sự trao đổi các lõi đồng nhất. Tuy nhiên, việc dẫn ra CEP một cách tường minh từ các tính toán chuyển đàn hồi vẫn còn là một thách thức. Sử dụng phương pháp nghịch đảo lặp nhiễu loạn (IP) để đảo ma trận S thu được từ tính toán CRC cung cấp một cách để xác định CEP trực tiếp. Dựa trên các phân tích CRC trước đây về tán xạ đàn hồi $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$, luận án này sử dụng phương pháp đảo IP để diễn giải quá trình chuyển đàn hồi theo các quá trình trao đổi lõi, suy ra cường độ theo bán kính của CEP và nghiên cứu sự phụ thuộc tính chẵn lẻ của OP. Vấn đề này được nghiên cứu trong bài báo [CTTG1] và được trình bày trong phần 2.2 của luận án.

1.2.3. Phân tách sóng phía gần-phía xa của các hệ đối xứng lõi

Tán xạ đàn hồi của các hệ đồng nhất lõi như $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ thể hiện các phân bố góc hình chữ V ở góc lớn, giống với các mẫu trong tán xạ hạt đồng nhất như $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$. Sự tương tự này gợi ý rằng đối xứng trao đổi lõi trong các hệ đồng nhất lõi liên quan đến đối xứng trao đổi trong tán xạ hạt đồng nhất. Tuy nhiên, phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa (NF) truyền thống không tính đến đối xứng này. Bằng cách tổng quát hóa phương pháp NF của Fuller để bao gồm đối xứng trao đổi hạt nhân bắn-dịch một cách tường minh, chúng ta có thể phân tích biên độ tán xạ trong các hệ hạt nhân đồng nhất. Áp dụng phương pháp phân tách NF đối xứng hóa này cho các hệ đồng nhất và đồng nhất lõi làm sáng tỏ hành vi của các thành phần NF trong sự hiện diện của quá trình trao đổi lõi, cung cấp hiểu biết về động lực học tán xạ của $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$. Vấn đề này được nghiên cứu trong bài báo [CTTG2] và được trình bày trong phần 2.3 của luận án.

1.2.4. Chuyển α phi đàn hồi như biểu hiện của đối xứng trao đổi lõi

Đối xứng trao đổi lõi cũng biểu hiện trong tán xạ phi đàn hồi thông qua chuyển α phi đàn hồi, mặc dù vẫn ít được khám phá hơn so với chuyển nucleon. Các nghiên cứu trước đây sử dụng phương pháp DWBA tầm hữu hạn và CRC cho thấy những đóng góp đáng kể của chuyển α vào tán xạ phi đàn hồi ở góc lớn trong các hệ như $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$. Quá trình chuyển α phi đàn hồi cung cấp thông tin trực tiếp về kích thích lõi và cấu hình α -lõi của các trạng thái kích

thích. Một phân tích CRC nhất quán của cả tán xạ đàn hồi và phi đàn hồi, bao gồm các kênh chuyển α , giúp xác định một cách chính xác thể quang học hạt nhân-hạt nhân và các hệ số dạng chuyển. Luận án này trình bày việc phân tích dữ liệu tán xạ đàn hồi và phi đàn hồi $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ ở các năng lượng mà đóng góp của chuyển α phi đàn hồi là đáng kể, cung cấp khả năng xác định chính xác các biên độ chuyển và nâng cao hiểu biết của chúng ta về các hiệu ứng đối xứng trao đổi lõi. Vấn đề này được nghiên cứu trong bài báo [CTTG3] và được trình bày trong phần 2.4 của luận án.

1.3. Phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton (p, pN)

Phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton, ký hiệu là $A(p, pN)B$, khiến cho một nucleon N bị bứt ra từ hạt nhân A để lại phần dư B . Phản ứng này đã được biết đến là một công cụ mạnh mẽ để khảo sát tính chất đơn hạt của hạt nhân. Các phản ứng này, đặc biệt ở năng lượng tới cao (trên 200 MeV/nucleon), cho phép nghiên cứu năng lượng tách, mô-men góc, và hệ số phổ (SF), cung cấp hiểu biết về cấu trúc hạt nhân của cả hạt nhân bền và không bền. Những tiến bộ gần đây đã cho phép thực hiện các nghiên cứu này sử dụng chùm tia không bền tại các cơ sở chùm tia đồng vị hiếm, mở rộng việc khám phá đến nhiều hạt nhân không bền từ khối lượng nhẹ đến trung bình.

Phản ứng (p, pN) đóng vai trò như một công cụ hiệu quả để khảo sát các tính chất hạt nhân đơn hạt. Mặc dù phản ứng ($e, e'p$) cung cấp độ chính xác vượt trội cho một số tính chất nhất định, các hạn chế thực nghiệm giới hạn việc áp dụng phản ứng này cho hạt nhân không bền và trạng thái đơn hạt neutron. Ngược lại, phản ứng (p, pN) không bị giới hạn bởi những ràng buộc này, và trong các điều kiện động học thích hợp, chúng cho kết quả phù hợp với kết quả từ phản ứng ($e, e'p$). Phần nghiên cứu thứ hai của luận án này tập trung vào việc sử dụng phản ứng bứt gây ra bởi proton (p, pN) trong việc trích xuất hệ số phổ.

1.3.1. Sự suy giảm của hệ số phổ

Phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton là công cụ quan trọng trong việc nghiên cứu sự suy giảm cường độ trạng thái đơn hạt và sự phụ thuộc của nó vào độ bất đối xứng proton-neutron. Hệ số phổ thu được từ thí nghiệm ($e, e'p$)

cho thấy sự giảm 30%–40% so với dự đoán của mô hình hạt độc lập (IPM), được định lượng bởi hệ số suy giảm R_s . Trong khi phân tích phản ứng dời nucleon (nucleon removal) trên bia nhẹ gợi ý một sự tương quan mạnh giữa R_s và độ bất đối xứng proton-neutron, các nghiên cứu có hệ thống sử dụng phản ứng chuyển nucleon và tính toán *ab initio* ủng hộ một sự phụ thuộc yếu hơn. Các thí nghiệm (p, pN) gần đây được thực hiện trong động học ngược ở năng lượng cao cung cấp tiết diện với độ tin cậy cao, với các phân tích chỉ ra sự phụ thuộc yếu của R_s vào độ bất đối xứng, mâu thuẫn với xu hướng dốc hơn quan sát được trong phân tích sử dụng phản ứng dời nucleon. Vấn đề này được nghiên cứu trong bài báo [CTTG4] và được trình bày trong phần 3.2 của luận án.

1.3.2. Độ bất định và giới hạn hiệu lực trong việc trích xuất hệ số phổ

Một mô hình lý thuyết chính xác là yếu tố quan trọng để trích xuất hệ số phổ từ phản ứng (p, pN) . Độ tin cậy của các mô hình như xấp xỉ xung sóng biến dạng (DWIA) phụ thuộc vào việc lựa chọn các thông số đầu vào hạt nhân, đặc biệt là thế quang học và tương tác nucleon-nucleon. Do nhu cầu ngày càng tăng về giá trị tiết diện chính xác, việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số đầu vào này lên hệ số phổ được trích xuất là rất quan trọng. Nghiên cứu này phân tích phản ứng $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ ở 100 và 200 MeV sử dụng phương pháp DWIA sóng riêng phần, xem xét nhiều thế quang học và tiết diện tán xạ nucleon-nucleon khác nhau để khảo sát độ bất định trong SF trạng thái p được trích xuất. Bằng cách so sánh các kết quả này với những kết quả từ phản ứng đo tại RCNP sử dụng các thành phần tính toán giống nhau, luận án hướng tới việc đạt được hiểu biết chi tiết về độ bất định và giới hạn trong việc trích xuất hệ số phổ từ phản ứng (p, pN) . Vấn đề này được nghiên cứu trong bài báo [CTTG5] và được trình bày trong phần 3.3 của luận án.

Chương 2

Chuyển đàn hồi và phi đàn hồi hạt α trong tán xạ ion nặng

2.1. Giới thiệu

Chương này trình bày các phân tích về phản ứng chuyển đàn hồi và phi đàn hồi trong tán xạ ion nặng, cụ thể với hệ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$, tập trung vào đối xứng trao đổi lõi cơ bản. Nghiên cứu của luận án bắt đầu bằng việc thiết lập các khái niệm cơ bản của phương trình CRC trong phản ứng hạt nhân trực tiếp. Những yếu tố nền tảng này là then chốt cho việc dẫn ra hàm sóng tán xạ và các phần tử ma trận S đa kênh, những yếu tố thiết yếu để dự đoán các đại lượng quan sát được như tiết diện trong các thí nghiệm hạt nhân.

Để mô tả quá trình phản ứng, ta xét một phản ứng $A(a, b)B$, trong đó a và A là hạt tới và hạt bia trong kênh vào α , còn b và B là hạt thoát ra và hạt nhân giạt lùi trong kênh ra β . Các kênh được ký hiệu bằng chữ cái Hy Lạp ($\alpha, \beta, \dots$). Đối với phản ứng chuyển hạt z đàn hồi và phi đàn hồi, ta có

$$a(=b+z) + A \rightarrow b + B(=A+z), \quad (2.1)$$

trong đó a (b) và A (B) lần lượt là hạt tới và hạt bia. Phương pháp kênh phản ứng liên kết (CRC) là công cụ lý thuyết chính được sử dụng.

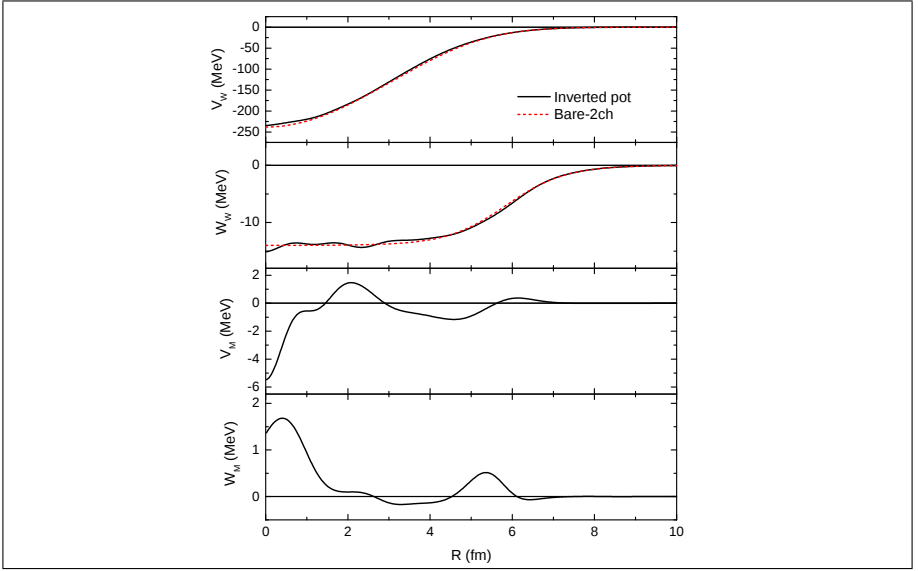
2.2. Thế trao đổi lõi từ quá trình chuyển α đàn hồi

Nghiên cứu này dẫn ra thế trao đổi lõi (CEP) phát sinh từ quá trình chuyển α đàn hồi trong các hệ có lõi đồng nhất. Nghiên cứu tập trung cụ thể vào hệ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ tại năng lượng 132 và 300 MeV.

Đối xứng trao đổi lõi trong các hệ hạt nhân có lõi đồng nhất (như $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$, với lõi ^{12}C đồng nhất) dẫn đến sự xuất hiện của thành phần phụ thuộc tính chẵn lẻ trong thế quang học. Việc trao đổi hai lõi ^{12}C tương đương với quá trình chuyển đàn hồi hạt α . Về mặt cơ học lượng tử, quá trình trao đổi này có thể được biểu diễn bằng toán tử Majorana trao đổi lõi P_c

$$P_c \Psi_L(\mathbf{R}) = X(R) \Psi_L(-\mathbf{R}) = (-1)^L X(R) \Psi_L(\mathbf{R}). \quad (2.2)$$

Từ phương trình trên ta có thể dẫn ra được thế quang học hiệu dụng V_{OP} bao gồm cả thành phần Wigner V_W (không phụ thuộc L) và thành phần Majorana



Hình 2.1. Thế quang học (OP) được đảo ngược từ ma trận S do tính toán CRC hai kênh của tán xạ đàn hồi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ tại $E_{\text{lab}} = 132$ MeV, bao gồm cả thành phần Wigner và Majorana (đường liền nét). Đường nét đứt tương ứng với OP ban đầu hoặc SRP.

V_M (phụ thuộc L)

$$V_{\text{OP}}(R) = V_W(R) + (-1)^L V_M(R). \quad (2.3)$$

Thành phần Majorana V_M chính là thế trao đổi lõi CEP. Biên độ tán xạ tổng cộng là tổng kết hợp chặt chẽ của biên độ tán xạ đàn hồi trực tiếp (ES) và biên độ chuyển đàn hồi (ET) tại góc $\pi - \theta$

$$f(\theta) = f_{\text{ES}}(\theta) + f_{\text{ET}}(\pi - \theta). \quad (2.4)$$

Sử dụng tính toán CRC hai kênh (kênh tán xạ đàn hồi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ và kênh chuyển đàn hồi hạt α) và kỹ thuật đảo ngược ma trận S , luận án đã xác định một cách tường minh thế CEP cho hệ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$. Kết quả đảo ngược ma trận S từ tính toán CRC (Hình 2.1) cho thấy thế quang học tương đương bao gồm một thành phần Majorana V_M phức và có tầm tương tác ngắn, bên cạnh thành phần Wigner V_W gần với thế folding ban đầu.

Bằng cách kết hợp tính toán CRC với kỹ thuật đảo ma trận S , nghiên cứu chỉ ra rằng việc đưa vào các kênh chuyển đàn hồi tạo ra một thành phần phụ thuộc tính chẵn lẻ trong thế quang học, biểu hiện như một thành phần

Majorana phức. Sự phụ thuộc tính chẵn lẻ này ảnh hưởng đáng kể đến tiết diện tán xạ đàn hồi, đặc biệt ở các góc lớn. Việc xác định tường minh thể CEP giúp làm rõ cơ chế đối xứng trao đổi lõi trong tán xạ hạt nhân và nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đưa các hiệu ứng này vào để có các dự đoán lý thuyết chính xác cho các quá trình tán xạ của hệ hạt đồng lõi. Kết quả của nghiên cứu này được công bố trong công trình [CTTG1].

2.3. Phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa cho các hệ hạt đồng nhất

Phần này mô tả việc tổng quát hóa phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa (nearside-farside, NF) của Fuller để áp dụng cho tán xạ đàn hồi của các hạt nhân đồng nhất, có tính đến đối xứng trao đổi giữa hạt nhân tới và bia. Nghiên cứu cho thấy đối với các hệ đồng nhất như $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ và $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, đối xứng trao đổi gây ra sự hoán đổi đối xứng giữa các dạng tán xạ phía gần và phía xa quanh góc 90° . Việc hiểu rõ hành vi của các thành phần NF trong hệ đồng nhất, nơi đối xứng trao đổi là chính xác, cho phép diễn giải tốt hơn hành vi của chúng trong các hệ đồng nhất lõi (như $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$), nơi đối xứng chỉ là gần đúng.

Đối với hai hạt nhân đồng nhất (spin 0), hàm sóng tán xạ tổng cộng phải đối xứng qua việc hoán đổi hạt tới và bia. Do đó, biên độ tán xạ đàn hồi tổng cộng f_{ES} có dạng đối xứng

$$f_{\text{ES}}(\theta) = f_{\text{Mott}}(\theta) + f(\theta) + f(\pi - \theta), \quad (2.5)$$

trong đó f_{Mott} là biên độ tán xạ Mott (tán xạ Coulomb cho hạt đồng nhất), $f(\theta)$ và $f(\pi - \theta)$ lần lượt là biên độ tán xạ hạt nhân trực tiếp và trao đổi.

Áp dụng các biến đổi giải tích mở rộng cho kỹ thuật của Fuller, các thành phần NF của biên độ Mott được biểu diễn qua các thành phần NF của biên độ Rutherford f_{R} như sau

$$f_{\text{Mott}}^{(\text{N})}(\theta) = f_{\text{R}}^{(\text{N})}(\theta) + f_{\text{R}}^{(\text{F})}(\pi - \theta), \quad (2.6)$$

$$f_{\text{Mott}}^{(\text{F})}(\theta) = f_{\text{R}}^{(\text{F})}(\theta) + f_{\text{R}}^{(\text{N})}(\pi - \theta). \quad (2.7)$$

Tương tự, các thành phần NF của biên độ hạt nhân đối xứng hóa $f_{\text{sym}}(\theta) =$

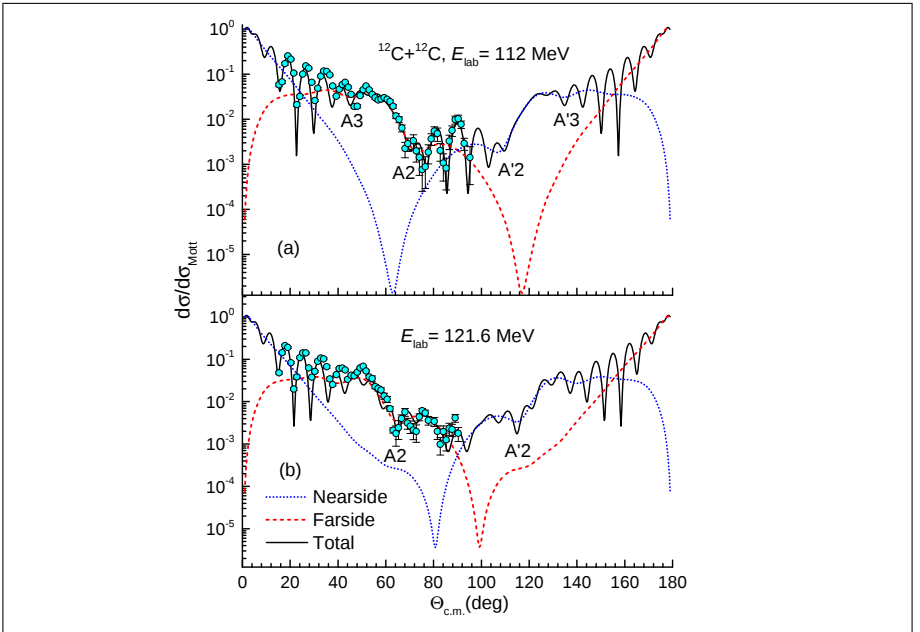
$f(\theta) + f(\pi - \theta)$ là

$$f_{\text{sym}}^{(N)}(\theta) = f^{(N)}(\theta) + f^{(F)}(\pi - \theta), \quad (2.8)$$

$$f_{\text{sym}}^{(F)}(\theta) = f^{(F)}(\theta) + f^{(N)}(\pi - \theta), \quad (2.9)$$

trong đó $f^{(N,F)}$ là các thành phần NF của biên độ hạt nhân không đối xứng hóa $f(\theta)$. Các công thức (2.8)–(2.9) cho thấy có sự hoán đổi đối xứng giữa các thành phần phía gần và phía xa của biên độ tán xạ hạt nhân tổng cộng khi góc tán xạ đi qua 90° .

Kết quả tính toán OM và phân tách NF cho tán xạ đàn hồi $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ (Hình 2.2) và $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ cho thấy rõ sự đối xứng này. Tiết diện tán xạ tổng cộng đối xứng qua 90° . Các tiết diện thành phần NF ở $\theta < 90^\circ$ hoán đổi đối xứng với các thành phần NF tương ứng ở $\theta > 90^\circ$. Các cực tiểu Airy trong thành phần phía xa tạo thành cấu trúc “cánh bướm” đối xứng qua 90° .



Hình 2.2. Dữ liệu tán xạ đàn hồi $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ tại $E_{\text{lab}} = 112$ MeV so sánh với kết quả tính toán OM có đối xứng hóa chính xác (đường liền nét). Phân tách NF của biên độ ES cho ra tiết diện phía gần (đường chấm) và phía xa (đường nét đứt). A_k là cực tiểu Airy thứ k của tiết diện phía xa trực tiếp tại θ , A'_k là đối xứng của nó trong tiết diện phía xa trao đổi tại $\pi - \theta$.

Đối với hệ đồng nhất lõi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$, biên độ tán xạ tổng cộng là tổng của tán xạ đàn hồi (ES) tại θ và chuyển đàn hồi (ET) tại $\pi - \theta$, theo Eq. (2.4). Mặc dù S_{ES} và S_{ET} không hoàn toàn đối xứng như trong hệ đồng nhất, các thành phần NF của biên độ tổng cộng vẫn thể hiện sự hoán đổi tương tự

$$f_{\text{total}}^{(\text{N})}(\theta) = f_{\text{ES}}^{(\text{N})}(\theta) + f_{\text{ET}}^{(\text{F})}(\pi - \theta), \quad (2.10)$$

$$f_{\text{total}}^{(\text{F})}(\theta) = f_{\text{ES}}^{(\text{F})}(\theta) + f_{\text{ET}}^{(\text{N})}(\pi - \theta). \quad (2.11)$$

Mở rộng các phương pháp phân tích tán xạ, nghiên cứu này tổng quát hóa phương pháp phân tích NF cho các hệ hạt nhân đồng nhất, có tính đến đối xứng trao đổi hạt nhân. Sự tổng quát hóa này là cần thiết cho việc diễn giải hiện tượng cầu vồng hạt nhân trong các hệ như $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ và $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, nơi đối xứng trao đổi dẫn đến sự hoán đổi đối xứng của các mẫu hình biên độ tán xạ NF quanh góc 90° . Phương pháp phân tích NF mở rộng cung cấp thêm các thông tin về động lực học tán xạ của các hệ đồng nhất như $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ và đồng nhất lõi như $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$, minh họa cách các quá trình trao đổi ảnh hưởng đến các tiết diện tán xạ quan sát được và hỗ trợ việc diễn giải dữ liệu thực nghiệm trong phân tích tán xạ ion nặng, đặc biệt là những phân tích liên quan đến hiện tượng cầu vồng hạt nhân. Kết quả của nghiên cứu này được công bố trong công trình [CTTG2].

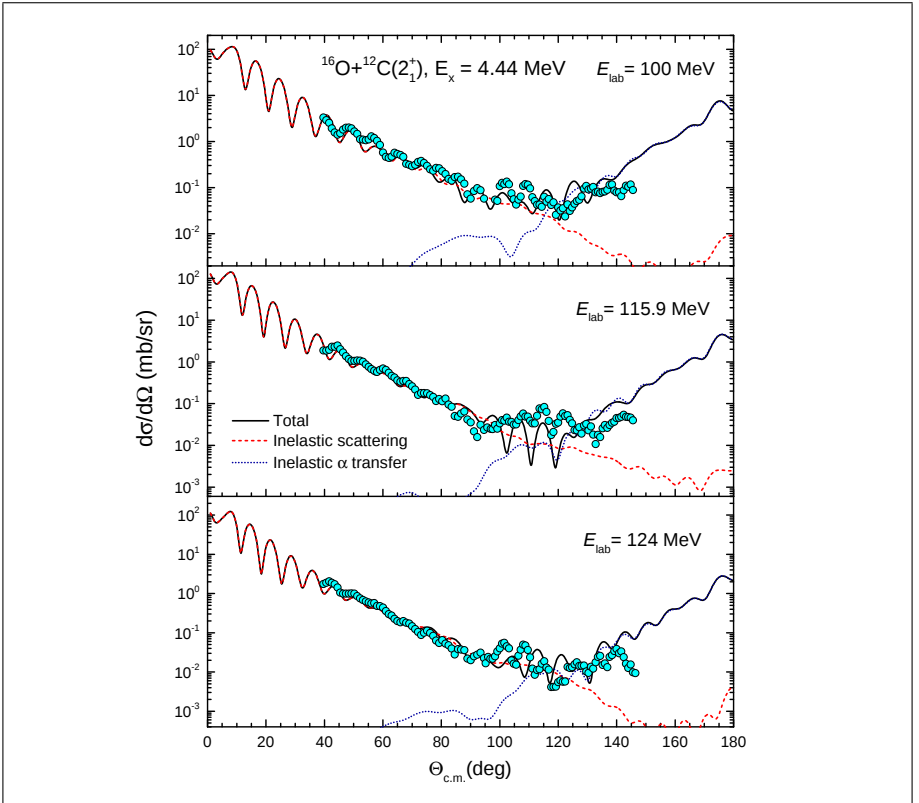
2.4. Khảo sát cơ chế chuyển hạt α phi đàn hồi

Phần này trình bày nghiên cứu về cơ chế chuyển hạt α phi đàn hồi. Tương tự như chuyển đàn hồi, đối xứng trao đổi lõi cũng có thể dẫn đến chuyển α phi đàn hồi trong tán xạ HI, cung cấp thông tin về kích thích lõi và cấu trúc kết cụm α của trạng thái kích thích. Nghiên cứu tập trung vào tán xạ phi đàn hồi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ (^{12}C kích thích lên trạng thái 2_1^+ ở 4.44 MeV) tại các năng lượng $E \lesssim 10$ MeV/nucleon.

Mô hình CRC bốn kênh được sử dụng, bao gồm cả kênh đàn hồi và phi đàn hồi ($^{12}\text{C}(2_1^+)$), cùng với các kênh chuyển α đàn hồi và phi đàn hồi tương ứng. Kết quả tính toán CRC mô tả thành công dữ liệu tán xạ đàn hồi và phi đàn hồi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ tại $E_{\text{lab}} = 100, 115.9$, và 124 MeV. Tương tự tán xạ đàn hồi, tiết diện tán xạ phi đàn hồi ở các góc lớn bị chi phối bởi quá trình chuyển α phi đàn hồi (Hình 2.3). Đóng góp của kênh chuyển α phi đàn hồi trở nên rõ

rệt hơn khi năng lượng tăng lên. Ở các góc $\theta_{c.m.} > 120^\circ$, kênh chuyển α phi đàn hồi chiếm ưu thế, tạo ra tiết diện hình chữ V đặc trưng mà các tính toán CC bỏ qua kênh chuyển không thể tái tạo được.

Phân tích này nhấn mạnh sự cần thiết của việc liên kết các kênh chuyển α trong các mô hình lý thuyết để mô tả chính xác dữ liệu tán xạ, đặc biệt là ở các góc lớn trong các hệ có đối xứng trao đổi lõi. Nó cũng cho thấy tán xạ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ ở các năng lượng cao hơn là một công cụ thăm dò giá trị cho cấu trúc kết cụm α của ^{16}O và ^{12}C thông qua các phản ứng chuyển α đàn hồi và phi đàn hồi. Kết quả của nghiên cứu này được công bố trong công trình [CTTG3].



Hình 2.3. Phân tích CRC bốn kênh (đường liền nét) của tán xạ phi đàn hồi $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ lên trạng thái 2_1^+ của ^{12}C so với dữ liệu. Tiết diện tán xạ phi đàn hồi thuần túy (đường nét đứt) và chuyển α phi đàn hồi (đường chấm) được tính bằng cùng OP sử dụng trong tính toán đàn hồi.

Chương 3

Phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton

3.1. Giới thiệu

Trong chương ba, tác giả nghiên cứu phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton (p, pN) như một công cụ hiệu quả cho tính chất đơn hạt của hạt nhân. Nghiên cứu của chúng tôi tập trung vào hai mục tiêu chính: đánh giá sự suy giảm SF trong dữ liệu động học ngược tại GSI [CTTG4] và phân tích độ bất định lý thuyết trong việc trích xuất SF từ phản ứng $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ [CTTG5], cả hai đều sử dụng khuôn khổ DWIA sóng riêng phần.

Ma trận T của DWIA cho phản ứng bứt thường được viết dưới dạng

$$\bar{T}_{\mathbf{K}_0 \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2}^{nlj} = \int d\mathbf{R} \chi_{1, \mathbf{K}_1}^{*(-)}(\mathbf{R}) \chi_{2, \mathbf{K}_2}^{*(-)}(\mathbf{R}) \chi_{0, \mathbf{K}_0}^{(+)}(\mathbf{R}) \varphi_{nlj}(\mathbf{R}) e^{-i\mathbf{K}_0 \cdot \mathbf{R}/A}. \quad (3.1)$$

trong đó $\chi^{(\pm)}$ là các hàm sóng biến dạng mô tả tán xạ đàn hồi của các hệ p -A, p -B và N -B, φ_{nlj} là hàm chồng lấp (hàm sóng trạng thái liên kết) của nucleon N trong hạt nhân A với lõi B, và t_{12} là tương tác NN hiệu dụng trong không gian tự do. Các hàm sóng biến dạng χ được tính bằng cách giải phương trình Schrödinger với thế quang học phù hợp.

Tiết diện vi phân ba (TDX) trong hệ phòng thí nghiệm (L) được tính theo công thức

$$\frac{d^3\sigma}{dE_1^L d\Omega_1^L d\Omega_2^L} = F_{\text{kin}} C_0 \frac{d\sigma_{pN}}{d\Omega_{pN}} \left| \bar{T}_{\mathbf{K}_0 \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2}^{nlj} \right|^2, \quad (3.2)$$

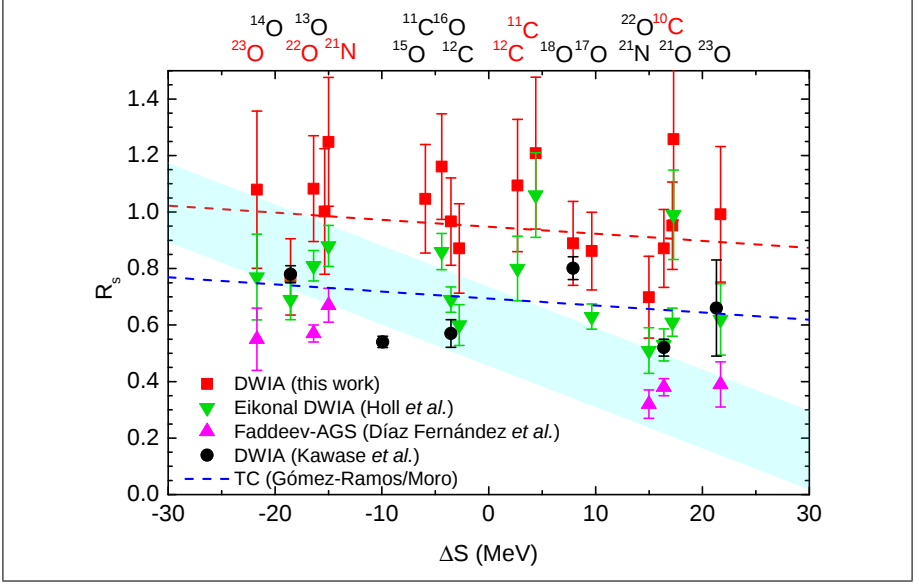
trong đó F_{kin} là hệ số động học, C_0 là hệ số chuẩn hóa, $d\sigma_{pN}/d\Omega_{pN}$ là tiết diện tán xạ pN . Tiết diện tích phân tổng cộng σ_{sp} được tính bằng cách tích phân tiết diện vi phân theo động lượng của hạt nhân giật lùi $\mathbf{K}_B^A$ trong hệ quy chiếu hạt nhân A đứng yên. Động học tương đối tính được sử dụng trong tất cả các tính toán.

3.2. Phân tích DWIA về sự suy giảm hệ số phổ

Phần này trình bày phân tích về sự suy giảm hệ số phổ (SF quenching) sử dụng phương pháp DWIA, áp dụng cho dữ liệu (p, pN) đo tại GSI. Mục tiêu là đánh giá tiết diện đơn hạt và xác định sự suy giảm SF thông qua hệ số suy giảm $R_s = \sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{th}}$.

Các tính toán DWIA được thực hiện cho 18 trường hợp (p, pN) đo tại

$R^3B/LAND$. Các yếu tố đầu vào chính bao gồm: động học tương đối tính, hiệu chỉnh phi định xứ (Perey/Darwin), thể quang học Dirac EDAD2, hàm sóng đơn hạt WS với bán kính được điều chỉnh theo tính toán Hartree-Fock (SkX), và tiết diện pN sơ cấp từ tham số hóa ma trận t của Franey và Love. Hệ số phổ lý thuyết C^2S được lấy từ tính toán mẫu tăng.



Hình 3.1. So sánh hệ số suy giảm từ phân tích DWIA hiện tại với các phân tích (p, pN) khác: eikonal DWIA, FAGS, TC cho dữ liệu GSI, và DWIA sóng riêng phần cho dữ liệu RIKEN/RCNP (chấm tròn). Vùng tô màu xanh lam chỉ xu hướng quan sát được trong phân tích phản ứng chuyển dời nucleon trên bia nhẹ.

Hình 3.1 so sánh R_s từ DWIA hiện tại với các mô hình phản ứng khác. Độ dốc R_s theo ΔS phù hợp tốt với mô hình TC. Tuy nhiên, giá trị tuyệt đối của R_s từ DWIA hiện tại cao hơn so với TC và eikonal DWIA. Sự khác biệt này chủ yếu đến từ việc các mô hình khác thiếu các hiệu chỉnh quan trọng như phi định xứ và hệ số Møller. Việc bỏ qua các hiệu chỉnh này có thể dẫn đến sự trùng hợp ngẫu nhiên với kết quả ($e, e'p$) nhưng che khuất bản chất thực sự của vấn đề. Phân tích phân bố động lượng ngang (TMD) cho phản ứng $^{12}C(p, 2p)^{11}B$ cho thấy DWIA hiện tại (có hiệu chỉnh) đánh giá thấp dữ

liệu ở vùng động lượng giạt lùi lớn, gợi ý về sự thiếu vắng của các hiệu ứng bậc cao (như tán xạ nhiều bước) trong mô hình.

Kết luận từ phần này là R_s phụ thuộc rất yếu vào ΔS . Sự khác biệt với kết quả $(e, e'p)$ và các mô hình khác nhấn mạnh tầm quan trọng của việc bao gồm đầy đủ các hiệu chỉnh (phi định xứ, động học tương đối tính, thừa số Møller) và sự cần thiết phải xem xét các hiệu ứng bậc cao, đặc biệt ở các điều kiện động học xa vùng tựa tự do. Kết quả của nghiên cứu này được công bố trong công trình [CTTG4].

3.3. Độ bất định của mô hình DWIA tại giới hạn năng lượng thấp

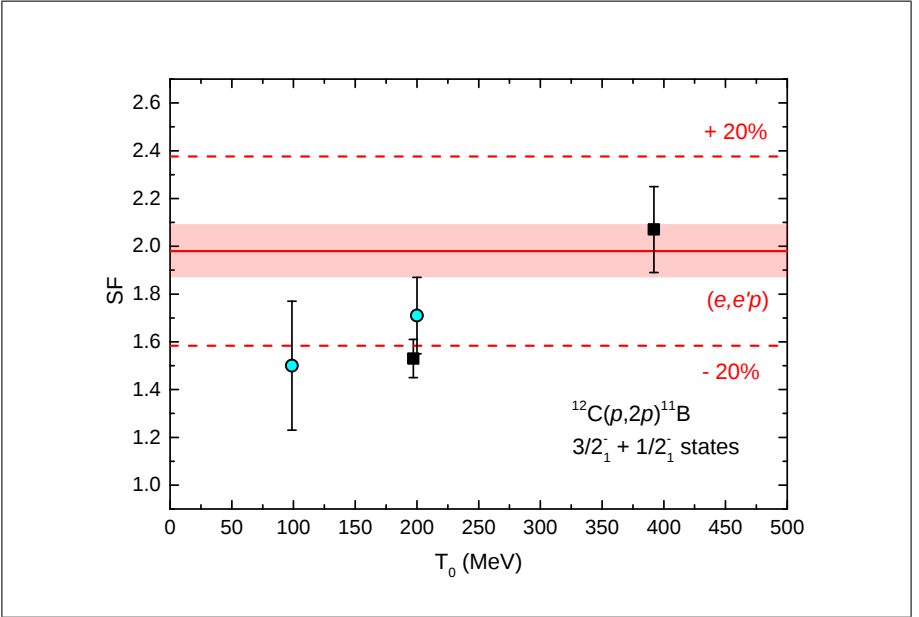
Phần này khảo sát độ bất định của mô hình DWIA trong việc trích xuất SF ở giới hạn năng lượng thấp, tập trung vào phản ứng $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ tại 100 và 200 MeV. Nghiên cứu tập trung khảo sát độ bất định từ việc lựa chọn thể quang học (OP) và tiết diện tán xạ NN.

Ba loại OP được xem xét gồm thể folding vi mô (g -MOP và t -MOP), thể hiện tượng luận Schrödinger (KD), và thể hiện tượng luận Dirac (EDAD1). Ba bộ tham số hóa tiết diện NN cũng được sử dụng gồm ma trận t Franey-Love, thể Reid93, và phân tích sóng riêng phần SP07. Hàm sóng trạng thái liên kết được tính bằng thể WS với tham số hình học từ phân tích $(e, e'p)$.

Tại 200 MeV, các tính toán với OP g -MOP, KD và EDAD1 mô tả tốt hình dạng TDX, đặc biệt ở vùng tựa tự do ($45^\circ, 35^\circ$). SF trạng thái p trích xuất (tổng SF cho trạng thái cơ bản $3/2^-$ và trạng thái kích thích $1/2^-$ của ^{11}B) lần lượt là 1.60, 1.60 và 1.82. Giá trị SF từ EDAD1 gần nhất với giá trị 1.98(11) từ $(e, e'p)$. Độ bất định từ việc chọn OP là khoảng 6%. Tính toán với t -MOP cho SF quá lớn (2.45), cho thấy việc sử dụng ma trận t tự do mà không có hiệu chỉnh môi trường là không phù hợp ở năng lượng này.

Tại 100 MeV, sự phù hợp giữa tính toán và dữ liệu thực nghiệm kém hơn ở các góc lớn ($\theta_2^L > 70^\circ$), cho thấy giới hạn của DWIA ở năng lượng thấp. Tổng SF trạng thái p trích xuất là 1.61 (g -MOP), 1.69 (KD) và 1.32 (EDAD1). Độ bất định từ việc chọn OP tăng lên 12%. Tại năng lượng này, SF từ KD gần nhất với giá trị $(e, e'p)$. Khác với 200 MeV, EDAD1 cho SF nhỏ nhất, cho thấy sự phụ thuộc năng lượng mạnh hơn của thể Dirac so với các thể Schrödinger. Sự nhạy cảm với lựa chọn tiết diện NN cũng tăng lên ở 100 MeV.

Hình 3.2 tổng hợp các SF trạng thái p trích xuất ở bốn năng lượng. Giá trị SF tại 392 MeV phù hợp hoàn hảo với $(e, e'p)$. Ở các năng lượng thấp hơn, giá trị SF vẫn nằm trong phạm vi $\pm 20\%$ so với $(e, e'p)$, nhưng sự phù hợp giảm dần khi năng lượng giảm. Điều này có thể do ảnh hưởng ngày càng tăng của các hiệu ứng không được mô tả tường minh trong DWIA (ghép kênh, ngoài vỏ năng lượng, hiệu ứng môi trường). Kết quả cho thấy DWIA vẫn cho SF hợp lý xuống đến 100 MeV nếu chọn động học phù hợp, nhưng phân tích tối ưu nên thực hiện ở 400–600 MeV trong điều kiện tựa tự do. Năng lượng 100 MeV được xem là giới hạn hiệu lực dưới của DWIA sóng riêng phần. Nghiên cứu này củng cố vai trò của (p, pN) như một công cụ phổ học và nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng các yếu tố đầu vào hạt nhân chính xác. Kết quả của nghiên cứu này được công bố trong công trình [CTTG5].



Hình 3.2. SF trạng thái p trích xuất từ phản ứng $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ ở các năng lượng tối khác nhau. Giá trị từ phân tích này tại 100 và 200 MeV là chấm tròn, kết quả từ 197 và 392 MeV là ô vuông. Đường liền nét đỏ với vùng tô màu chỉ giá trị SF từ $(e, e'p)$ và độ bất định. Đường nét đứt biểu diễn độ lệch $\pm 20\%$ so với kết quả $(e, e'p)$.

Kết luận và kiến nghị

Kết luận

Trong luận án này, tác giả đã nghiên cứu các tính chất của cấu trúc và phản ứng hạt nhân thông qua hai hướng nghiên cứu chính: quá trình chuyển hạt α đàn hồi và phi đàn hồi trong tán xạ ion nặng, và phản ứng bắt nucleon gây ra bởi proton (p, pN). Các nghiên cứu trong luận án cung cấp thêm những hiểu biết về vai trò của đối xứng trao đổi lõi trong tán xạ ion nặng và khả năng của phản ứng (p, pN) như một công cụ hiệu quả để khảo sát tính chất đơn hạt của hạt nhân.

Các nghiên cứu về quá trình trao đổi lõi [CTTG1-3] đã chỉ ra vai trò cơ bản của chúng trong việc phân tích tiết diện tán xạ ion nặng. Đầu tiên, trong [CTTG1], chúng tôi đã khảo sát các hiệu ứng của quá trình trao đổi lõi trong phản ứng chuyển hạt α đàn hồi và phi đàn hồi, tập trung vào các hệ đồng nhất lõi như hệ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$. Bằng cách dẫn ra thế CEP từ quá trình chuyển α đàn hồi thông qua kỹ thuật đảo nghịch các phần tử ma trận S từ tính toán CRC, tác giả phát hiện rằng việc đưa các kênh chuyển đàn hồi vào không gian mô hình tạo ra một thành phần phụ thuộc tính chắn lẻ trong thế quang học. Thành phần này có dạng là một thành phần Majorana phức, ảnh hưởng đáng kể đến tiết diện tán xạ đàn hồi, đặc biệt ở các góc lớn. Phát hiện này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tính đến một cách tường minh đối xứng trao đổi lõi trong các mô hình lý thuyết để đạt được các dự đoán chính xác về các đại lượng quan sát được trong tán xạ.

Phát hiện về đối xứng trao đổi lõi này dẫn tác giả đến việc nghiên cứu sâu hơn ảnh hưởng của nó lên các mẫu hình tán xạ, dẫn đến công trình [CTTG2], trong đó tác giả đã tổng quát hóa phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa để xét đến đối xứng trao đổi vốn có trong các hệ hạt nhân đồng nhất. Sự mở rộng này cho phép phân tích chính xác các tiết diện tán xạ trong các hệ như $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ và $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, khi sự trao đổi hạt nhân dẫn đến các mẫu hình tán xạ NF đối xứng quanh góc 90° . Phương pháp phân tách NF tổng quát hóa đã cung cấp những hiểu biết sâu sắc hơn về cách các quá trình trao đổi định hình tiết diện phân bố góc và biên độ tán xạ, nhấn mạnh sự cần thiết phải xem xét cẩn thận các hiệu ứng trao đổi lõi trong việc phân tích dữ liệu thực nghiệm từ tán xạ ion nặng, đặc biệt là những hệ thể hiện hiện tượng cầu

vòng hạt nhân.

Dựa trên những hiểu biết này về tán xạ đàn hồi, trong nghiên cứu khám phá về cơ chế chuyển α phi đàn hồi [CTTG3], tác giả đã chứng minh rằng quá trình chuyển α phi đàn hồi đóng góp đáng kể vào tiết diện tán xạ phi đàn hồi của hệ $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ ở các góc lớn. Bằng cách sử dụng một mô hình CRC bốn kênh tối thiểu bao gồm cả quá trình chuyển α trực tiếp và gián tiếp thông qua trạng thái kích thích đầu tiên của ^{12}C , ta thể mô tả chính xác dữ liệu thực nghiệm. Điều này nhấn mạnh sự cần thiết phải đưa các kênh chuyển phi đàn hồi vào các phân tích lý thuyết để có được hiểu biết toàn diện về cơ chế phản ứng và cấu trúc hạt nhân cơ bản.

Trong hướng nghiên cứu chính thứ hai, tác giả đã khảo sát phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton như một công cụ để khảo sát tính chất đơn hạt của hạt nhân. Trong [CTTG4], phân tích DWIA về sự suy giảm SF trong các thí nghiệm (p, pN) gần đây được thực hiện trong động học ngược tại GSI đã chỉ ra sự phụ thuộc rất yếu của hệ số suy giảm R_s vào độ bất đối xứng proton-neutron ΔS . Kết quả này phù hợp với các phát hiện trước đây từ các nghiên cứu (p, pN) và $(e, e'p)$, cũng như các tính toán *ab initio*, cho thấy sự nhất quán giữa các cơ chế phản ứng và phương pháp lý thuyết khác nhau.

Trong [CTTG5], tác giả cũng đánh giá độ bất định lý thuyết trong việc trích xuất SF từ các tính toán DWIA, tập trung vào phản ứng $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ ở năng lượng 100 và 200 MeV. Bằng cách phân tích có hệ thống các độ bất định phát sinh từ các lựa chọn khác nhau của thể quang học và tiết diện tán xạ NN , tác giả đã xác định rằng phương pháp DWIA vẫn đáng tin cậy trong việc trích xuất SF ngay cả ở năng lượng thấp. Các kết quả của chúng tôi chỉ ra rằng, với việc lựa chọn cẩn thận các thể quang học nhất quán và đưa vào các hiệu chỉnh cần thiết như hiệu ứng phi định xứ và tương đối tính, công thức DWIA sóng riêng phần có thể cung cấp các xác định SF chính xác xuống đến 100 MeV. Các phát hiện của chúng tôi đề xuất năng lượng 100 MeV này như giới hạn hiệu lực thấp nhất cho công thức DWIA sóng riêng phần, cung cấp một ranh giới quan trọng cho các ứng dụng tương lai của khuôn khổ DWIA.

Tổng quan lại, các nghiên cứu trong luận án cung cấp cho chúng ta thêm thông tin về phản ứng và cấu trúc hạt nhân bằng cách kết nối các mô hình lý thuyết với các quan sát thực nghiệm. Chúng nhấn mạnh vai trò quan trọng của

quá trình trao đổi và các hiệu ứng bậc cao trong việc định hình các đại lượng quan sát được trong tán xạ và làm nổi bật hiệu quả của phản ứng (p, pN) trong việc khảo sát tính chất đơn hạt của hạt nhân. Chúng cũng chứng minh rằng đối với nhiều nghiên cứu vật lý hạt nhân, các quá trình trao đổi và hiệu ứng bậc cao không chỉ đơn thuần là các hiệu chỉnh mà là những quá trình quan trọng phải được đưa vào một cách thích hợp trong các khuôn khổ lý thuyết để diễn giải chính xác các đại lượng quan sát được của hạt nhân.

Điểm mới của luận án

Trong các nghiên cứu về tán xạ ion nặng [CTTG1,CTTG2,CTTG3], luận án khám phá đối xứng trao đổi lõi và ảnh hưởng của nó lên các đại lượng quan sát được trong tán xạ. Trong [CTTG1], thông qua việc dẫn ra thế trao đổi lõi từ quá trình chuyển α đàn hồi trong các hệ đồng nhất lõi, tác giả phát hiện rằng quá trình trao đổi lõi đưa vào một thành phần phụ thuộc tính chẵn lẻ và phức trong thế quang học. Phát hiện này chỉ ra rằng sự phụ thuộc tính chẵn lẻ cần được đưa vào các mô hình lý thuyết để dự đoán chính xác tiết diện tán xạ đàn hồi, đặc biệt ở các góc lớn.

Trong [CTTG2], luận án đã mở rộng phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa để bao gồm đối xứng trao đổi hạt nhân-dịch trong các hạt nhân spin-không đồng nhất. Áp dụng phương pháp tổng quát này cho các hệ như $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ và $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, ta có thể quan sát thấy đối xứng trao đổi dẫn đến sự hoán đổi đối xứng của các mẫu tán xạ phía gần và phía xa quanh góc $\theta_{\text{c.m.}} = 90^\circ$.

Trong [CTTG3], việc đưa cả các kênh chuyển α đàn hồi và phi đàn hồi vào mô hình CRC đã chứng minh rằng các quá trình này làm tăng tiết diện tán xạ ở góc lớn trong các hệ có đối xứng trao đổi lõi. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đưa các kênh chuyển phi đàn hồi vào mô hình phản ứng để có được mô tả chính xác về các đại lượng quan sát được trong tán xạ và hiểu rõ hơn về tương tác hạt nhân cơ bản.

Trong nghiên cứu về phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton [CTTG4,CTTG5], tác giả đã xác định các yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến việc phân tích và diễn giải phản ứng (p, pN). Luận án đã chỉ ra rằng việc

đưa vào các hiệu chỉnh phi định xứ, hệ số Møller, và lựa chọn cẩn thận thể quang học và tiết diện tán xạ NN là thiết yếu cho việc tính toán chính xác tiết diện và trích xuất hệ số phổ. Công trình này cung cấp hướng dẫn về việc giảm thiểu độ bất định trong phân tích phản ứng (p, pN) và nâng cao độ tin cậy của việc xác định hệ số phổ.

Đánh giá có hệ thống của luận án về độ bất định lý thuyết trong việc trích xuất hệ số phổ đã làm nổi bật ảnh hưởng của các thông số đầu vào hạt nhân khác nhau lên việc phân tích phản ứng (p, pN) . Bằng cách định lượng ảnh hưởng của các thể quang học và tương tác NN khác nhau, luận án đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc ràng buộc cẩn thận các thông số đầu vào này để trích xuất thông tin cấu trúc hạt nhân đáng tin cậy từ dữ liệu thực nghiệm.

Tổng quan lại, những đóng góp của luận án này bao gồm việc phát triển các mô hình lý thuyết có tính đến đối xứng trao đổi lõi và các hiệu ứng trao đổi trong tán xạ ion nặng, và việc xác định các yếu tố chính ảnh hưởng đến việc phân tích phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton. Những phát hiện này đóng góp vào hiểu biết của chúng ta về tương tác và cấu trúc hạt nhân và cung cấp nền tảng cho các nghiên cứu trong tương lai trong lĩnh vực này.

Kiến nghị

Đối với quá trình chuyển α đàn hồi và phi đàn hồi, việc mở rộng các phương pháp đã phát triển ở đây cho các hệ hạt nhân khác có thể cho phép kiểm tra tính phổ quát của các hiệu ứng trao đổi lõi. Việc áp dụng thể trao đổi lõi đã dẫn ra và phương pháp phân tách sóng phía gần-phía xa tổng quát hóa cho các hạt nhân khác hoặc các hệ có các tính chất cấu trúc khác nhau có thể tiết lộ những hiểu biết mới về đối xứng trao đổi và ảnh hưởng của nó lên các đại lượng quan sát được trong tán xạ. Các nghiên cứu về các hệ có lõi bất đối xứng hoặc có đặc tính spin khác nhau có thể nâng cao hiểu biết của chúng ta về tương tác hạt nhân.

Việc đưa vào các hiệu ứng bậc cao trong các mô hình lý thuyết là một lĩnh vực quan trọng khác cần phát triển. Các nghiên cứu của chúng tôi chỉ ra rằng các quá trình như phản ứng nhiều bước và liên kết với các trạng thái liên tục có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiện tượng tán xạ. Việc phát triển các mô hình lý thuyết có tính đến một cách tường minh các hiệu ứng này có thể cải thiện

độ chính xác của các tính toán phản ứng và nâng cao việc diễn giải dữ liệu thực nghiệm.

Đối với phản ứng bứt nucleon gây ra bởi proton, việc thực hiện các nghiên cứu có hệ thống về sự suy giảm hệ số phổ trên một phạm vi rộng hơn các hạt nhân, bao gồm cả những hạt nhân có độ bất đối xứng proton-neutron cực đoan, có thể cung cấp hiểu biết sâu sắc hơn về cơ chế suy giảm. Những nghiên cứu như vậy sẽ giúp kiểm chứng các dự đoán *ab initio* và đóng góp vào việc hoàn thiện các mô hình hạt nhân.

Các phép đo (p, pN) thực nghiệm ở các năng lượng và điều kiện động học khác nhau có thể kiểm tra các mô hình lý thuyết, trong khi việc tích hợp các tính toán *ab initio* vào các mô hình phản ứng có thể thu hẹp khoảng cách giữa lý thuyết cấu trúc và phản ứng. Việc phát triển các khuôn khổ thống nhất bao gồm các quá trình chuyển, bứt và vỡ sẽ thúc đẩy sự hiểu biết toàn diện về động lực học hạt nhân.

Danh mục các công trình của tác giả

Bài báo liên quan đến luận án

- [CTTG1] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Raymond Mackintosh, Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa (2019). Elastic transfer and parity dependence of the nucleus-nucleus optical potential, *Physical Review C*, 100, 054615.
- [CTTG2] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa (2024). Nuclear rainbow of the symmetric nucleus-nucleus system: Interchange of the nearside and farside scattering, *Physical Review C*, 109, 064606.
- [CTTG3] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa (2021). Elastic and Inelastic Alpha Transfer in the $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ Scattering, *Communications in Physics*, 31, 425-438.
- [CTTG4] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Kazuki Yoshida, Kazuyuki Ogata (2019). Toward a reliable description of (p, pN) reactions in the distorted-wave impulse approximation, *Physical Review C*, 100, 064604.
- [CTTG5] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Kazuyuki Ogata, Nguyen Hoang Phuc, Bui Duy Linh, Vo Hong Hai, Le Xuan Chung (2022). Ambiguities from Nuclear Interactions in the $^{12}\text{C}(p, 2p)^{11}\text{B}$ Reaction, *Communications in Physics*, 32, 117-132.

Báo cáo hội nghị

- [BCTG1] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Kazuki Yoshida, Kazuyuki Ogata (2019), Reliability of current reaction models for (p, pN) reactions in inverse kinematics, International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSym 2019), Da Nang.
- [BCTG2] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Nguyen Hoang Phuc, Do Cong Cuong, Dao Tien Khoa (2020), Elastic and inelastic transfers in collisions of Oxygen and Carbon nuclei, The 12th Scientific Conference, University of Science, VNU-HCM (VNUHCM-US-Conf 2020), Ho Chi Minh City.
- [BCTG3] **Nguyen Tri Toan Phuc**, Nguyen Hoang Phuc, Do Cong Cuong, Dao Tien Khoa (2021), Core-exchange symmetry and refractive effects in nucleus-nucleus scattering, 14th Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology (VINANST-14), Da Lat.

[BCTG4] Nguyen Tri Toan Phuc, Kazuyuki Ogata, Nguyen Hoang Phuc, Bui Duy Linh, Vo Hong Hai, Le Xuan Chung (2021), Theoretical ambiguities of the $^{12}\text{C}(p,2p)^{11}\text{B}$ reaction at the low-energy limit, 7th Academic Conference on Natural Science for Young Scientists, Master and PhD Students from ASEAN Countries (CASEAN 7), Ha Noi-Vinh.

Các công trình khác

1. **Nguyen Tri Toan Phuc**, Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa (2018). Direct and indirect α transfer in elastic $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ scattering, Physical Review C, 98, 024613.
2. Bui Duy Linh et al. (2021). Investigation of the ground-state spin inversion in the neutron-rich $^{47,49}\text{Cl}$ isotopes, Physical Review C, 104, 044331.
3. Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa, **Nguyen Tri Toan Phuc** (2021). Elastic α transfer in the $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ scattering and its impact on the nuclear rainbow, The European Physical Journal A, 57, 7.
4. Nguyen Hoang Phuc, Dao Tien Khoa, **Nguyen Tri Toan Phuc**, Do Cong Cuong (2021). Suppression of the nuclear rainbow in the inelastic nucleus-nucleus scattering, The European Physical Journal A, 57, 75.
5. **Nguyen Tri Toan Phuc**, Mengjiao Lyu, Yohei Chiba, Kazuyuki Ogata (2021). Manifestation of the divergence between antisymmetrized-molecular-dynamics and container pictures of ^9Be via $^9\text{Be}(p,pn)^8\text{Be}$ knockout reaction, Physics Letters B, 819, 136466.
6. **Nguyen Tri Toan Phuc**, Vo Hong Hai (2023). Effects of single-particle overlap function on the $^{16}\text{O}(p,2p)^{15}\text{N}$ reaction, Science and Technology Development Journal, 26, 2838-2847.
7. Bui Duy Linh et al. (2024). Onset of collectivity for argon isotopes close to $N=32$, Physical Review C, 109, 034312.
8. Nguyen Hoang Phuc, **Nguyen Tri Toan Phuc**, Do Cong Cuong (2024). Systematics of supernumerary nuclear rainbow in inelastic $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ scattering, Physical Review C, 110, 044608.