BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐÀ LẠT

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CỦA SINH VIÊN

Mô phỏng, xác định thông lượng nơtrôn nhiệt và nơtrôn trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang LPƯ hạt nhân Đà Lạt

Mã số đề tài……..

Đà Lạt, 5/2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐÀ LẠT

BÁO CÁO TỔNG KẾT

ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CỦA SINH VIÊN

Mô phỏng, xác định thông lượng nơtrôn nhiệt và nơtrôn trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang LPƯ hạt nhân Đà Lạt

Mã số đề tài……..

Sinh viên thực hiện: Trần Nguyên Kha Nam, Nữ:

Dân tộc: Kinh

Lớp, khoa: HNK42 Năm thứ: 4 /Số năm đào tạo: 4.5

Ngành học: Kỹ thuật hạt nhân

Người hướng dẫn: TS. Phạm Đăng Quyết

Đà Lạt, 5/2022

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, em xin gửi lời cảm ơn đến Ban Giám Hiệu, Ban Chủ nhiệm Khoa Vật lý - Kỹ thuật hạt nhân trường Đại học Đà Lạt đã tạo điều kiện để chúng em được thực hiện nghiên cứu này.

Xin bày tỏ lòng biết ơn thầy TS. Phạm Đăng Quyết đã tận tình chỉ dẫn cho chúng em thực hiện và hoàn thành được nghiên cứu này.

Mặc dù chúng em đã có nhiều cố gắng để hoàn thiện bài nghiên cứu bằng tất cả sự nhiệt tình và năng lực của mình, tuy nhiên không thể tránh khỏi những thiếu sót, chúng em rất mong nhận được những đóng góp quý báu của quý Thầy Cô và các bạn.

Lâm Đồng, ngày 12 tháng 5 năm 2022

Thay mặt nhóm nghiên cứu

Trần Nguyên Kha

Mục lục

LỜI CẢM ƠN ..... **i**

Danh mục các hình vẽ ..... **v**

Danh mục những từ viết tắt ..... **vi**

Lời mở đầu **1**

Chương 1: Tổng quan **2**

1.1. Phân tích kích hoạt nơtrôn dựa trên dòng nơtrôn phin lọc **2**

1.1.1. Cơ sở của phương pháp phân tích kích hoạt nơtrôn 2

1.1.2. Dòng nơtrôn phin lọc 10

1.1.3. Xác định thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt bằng kĩ thuật NAA 10

1.2. Chương trình MCNP5 ..... **13**

1.2.1. Giới thiệu 13

1.2.2. Cấu trúc input file và các loại đánh giá 13

1.2.3. Đánh giá sai số 14

1.3. Dòng nơtrôn phi lọc tại CN2DR **16**

1.3.1. LPƯ Đà Lạt 16

1.3.2. Dòng nơtrôn phin lọc tại CN2DR 16

Chương 2: Mô phỏng và thực nghiệm **18**

2.1. Mô phỏng thông lượng nơtrôn nhiệt tại LPƯ Đà Lạt **18**

2.2. Thực nghiệm đo thông lượng nơtrôn **23**

2.2.1. Chuẩn bị và kích hoạt mẫu lá dò 23

2.2.2. Đường cong hiệu suất của detector HPGe đối với các đỉnh năng lượng 24

Chương 3. Kết quả và thảo luận **26**

3.1. Kết quả mô phỏng **26**

3.1.1. Thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt 26

3.1.2. Hệ số đánh giá mô phỏng 27

3.2. Kết quả thực nghiệm 29

3.3. So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng 31

Kết luận 33

Tài liệu tham khảo 34

Danh mục các bảng

Bảng 1.1 Phân loại các phản ứng hạt nhân khi nơtrôn tương tác với hạt nhân bia 9
Bảng 1.2. Các loại đánh giá trong MCNP5 14
Bảng 1.3. Ý nghĩa của giá trị sai số tương đối R trong MCNP5 15
Bảng 1.4. Các thông số vật lý của dòng nơtrôn nhiệt tại vị trí đo mẫu của CN2DR ... 17
Bảng 2.1. Dữ liệu phổ nơtrôn tại lối vào kênh ngang số 2 của LPƯ Đà Lạt [4]..... 19
Bảng 2.2. Các phản ứng hạt nhân và các số liệu hạt nhân. 23
Bảng 2.3. Khối lượng các lá dò dùng để kích hoạt. 24
Bảng 2.4. Các dữ liệu thời gian đối với các lá dò kích hoạt..... 24
Bảng 3.1. Thông lượng trung bình của nơtrôn nhiệt và trên nhiệt được mô phỏng bằng MCNP5 26
Bảng 3.2. Thông số của phổ nơtrôn nhiệt tại vị trí chiếu mẫu 26
Bảng 3.3. Thông số của phổ nơtrôn trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu 27
Bảng 3.4. Các thông số đánh giá cho mô phỏng nơtrôn nhiệt..... 28
Bảng 3.5. Các thông số đánh giá cho mô phỏng nơtrôn trên nhiệt 28
Bảng 3.6. Diện tích đỉnh và sai số diện tích đỉnh, tiết diện hiệu dụng đối với nơtrôn nhiệt, hiệu suất ghi ứng với các đỉnh năng lượng tương ứng của các lá dò bọc Cd đo bằng hệ phổ kế gamma HPGe 30
Bảng 3.7. Diện tích đỉnh và sai số diện tích đỉnh, tiết diện hiệu dụng đối với nơtrôn nhiệt, hiệu suất ghi ứng với các đỉnh năng lượng tương ứng của các lá dò trần 30
Bảng 3.8. Hoạt độ và tốc độ phản ứng đối với lá dò bọc Cd 30
Bảng 3.9. Hoạt độ và tốc độ phản ứng đối với lá dò trần..... 30
Bảng 3.10. Thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt 31
Bảng 3.11. Thông lượng nơtrôn tổng, hệ số Cadmium và sai số của thực nghiệm 31
Bảng 3.12. So sánh kết quả thông lượng nơtrôn nhiệt 31

Danh mục các hình vẽ

Hình 1.1. Quá trình bắt nơtrôn và phát tia gamma của hạt nhân bia [6] 3
Hình 1.2. Sơ đồ phân rã và phát tia gamma của ^{28}Al 4
Hình 1.3. Khả năng phân tích và giới hạn phát hiện của NAA 5
Hình 1.4. Phân bố thông lượng nơtrôn của LPU 7
Hình 1.5. Mô tả tiết diện tương tác của nơtrôn 8
Hình 1.6. Hai loại tương tác của nơtrôn với hạt nhân bia 9
Hình 2.1. Cấu trúc phần dẫn nơtrôn tại CN2DR 18
Hình 2.2. Cấu trúc phần chuẩn trực dòng nơtrôn tại CN2DR 19
Hình 2.3. Cấu trúc CN2DR với cấu hình và vị trí phantom nước sử dụng trong mô phỏng MCNP5 19
Hình 2.4. Các mẫu lá dò sử dụng trong thực nghiệm 23
Hình 2.5. Đồ thị hiệu suất ghi theo năng lượng tại vị trí 0 cm đến detector. 25

Danh mục những từ viết tắt

AAS	Hấp thụ nguyên tử quang phổ
CN2DR	Kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt
DGNAA	Kích hoạt nơtrôn gamma trễ
ICP	Phổ plasma kết hợp cảm ứng
INAA	Kích hoạt nơtrôn dụng cụ
LPƯ	Lò phản ứng
MCNP5	Monte-Carlo N-Particle Transport
NAA	Kích hoạt nơtrôn
NOH	Số hạt gieo
PGNAA	Kích hoạt nơtrôn gamma tức thời
VOV	Phương sai của phương sai
XRF	Huỳnh quang tia X

Lời mở đầu

Mỗi nguyên tố tồn tại trong tự nhiên được đặc trưng bởi các thông số như: Khối lượng nguyên tử (M), độ phổ biến đồng vị (θ), tiết diện bắt nơtrôn nhiệt (σ), v.v… Khi nơtrôn có năng lượng thấp tương tác với hạt nhân bia qua quá trình tán xạ không đàn hồi, một hạt nhân hợp phần trung gian ở trạng thái kích thựcch được tạo ra. Hầu hết các hạt nhân hợp phần đều có khuynh hướng trở về trạng thái cân bằng hơn bằng cách phát ra tia gamma tức thời đặc trưng (trong khoảng thời gian 10^{-14} s) [6].

Trong nhiều trường hợp, trạng thái cân bằng mới này lại tạo ra một hạt nhân phóng xạ phân rã bêta, đồng thời phát một hoặc nhiều gamma trễ đặc trưng, nhưng ở một tốc độ chậm hơn nhiều so với quá trình phát tia gamma tức thời ở trên.

Các tia gamma có thể được phát hiện bằng detector bán dẫn có độ phân giải năng lượng cao. Trong phổ gamma nhận được, năng lượng của đỉnh xác định sự có mặt của nguyên tố trong mẫu (định tính) và diện tích của đỉnh cho phép xác định hàm lượng của nguyên tố đó (định lượng).

Trong phương pháp kích hoạt, các nhân phóng xạ thường phân rã về các nhân con cháu (daughter) bằng cách phát ra các hạt bêta (β) trước khi trở thành hạt nhân bền. Các nhân con cháu được tạo ra thường là ở trạng thái kích thựcch và phát ra một hay nhiều tia gamma khi trở về trạng thái cơ bản. Đo các tia gamma này bằng các hệ phổ kế gamma, chúng ta sẽ thu được những thông tin cần thiết để xác định hàm lượng của những nguyên tố trong mẫu chiếu xạ [6].

Để xác định được hàm lượng của các nguyên tố trong mẫu phân tích bằng phương pháp pháp kích hoạt nơtrôn, các thông số cần thiết liên quan đến thông số phổ nơtrôn như là: thông lượng nơtrôn nhiệt, thông lượng nơtrôn trên nhiệt cần phải được xác định. Vì vậy, nhóm nghiên cứu của chúng em đã thực hiện đề tài này, mong muốn được hiểu rõ hơn về phần thực nghiệm xác định hai thông số đã nêu ra ở trên tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 LPƯ Đà Lạt

Cách tiếp cận, phương pháp nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu

1. Cách tiếp cận: Thực tế và thông qua tài liệu.
2. Phương pháp nghiên cứu: Mô phỏng sử dụng chương trình MCNP và kích hoạt nơtrôn sử dụng kênh ngang của lò phản ứng.
3. Phạm vi nghiên cứu: Kênh ngang số 2 của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt.

Chương 1: Tổng quan

1.1. Phân tích kích hoạt nơtrôn dựa trên dòng nơtrôn phin lọc

1.1.1. Cơ sở của phương pháp phân tích kích hoạt nơtrôn

- *Phân tích kích hoạt nơtrôn*

Phân tích kích hoạt hạt nhân là phương pháp phân tích nguyên tố trong đó quá trình nhận diện nguyên tố và xác định hàm lượng đều căn cứ vào các đặc trưng của hạt nhân nguyên tử. Về nguyên tắc, phân tích kích hoạt không phụ thuộc vào trạng thái vật lý và liên kết hoá học của nguyên tố. Bản chất vật lý của phương pháp là tạo ra sự biến đổi trạng thái của hạt nhân nguyên tử thông qua các phân ứng hạt nhản gây bởi bức xạ nơtrôn, photon hoặc các hạt tích điện. Chính vì vậy mà trong một số trường hợp phương pháp phân tích kích hoạt còn được gọi theo tên của bức xạ kích hoạt, cụ thể là phân tích kích hoạt nơtrôn (NAA), phân tích kích hoạt photon (PAA),...[2, 6].

Phản ứng hạt nhân biến các hạt nhân bền trở thành phóng xạ. Việc nhận diện nguyên tố và xác định hàm lượng được thực hiện dựa trên kết quả đo thời gian bán rã, năng lượng và cường độ của các bức xạ gamma phát ra từ các sản phẩm kích hoạt.

Phản ứng bắt nơtrôn hay phán ứng (n,γ) là một trong những loại phản ứng hạt nhân dược sử dụng phổ biến nhất trong phân tích kích hoạt.

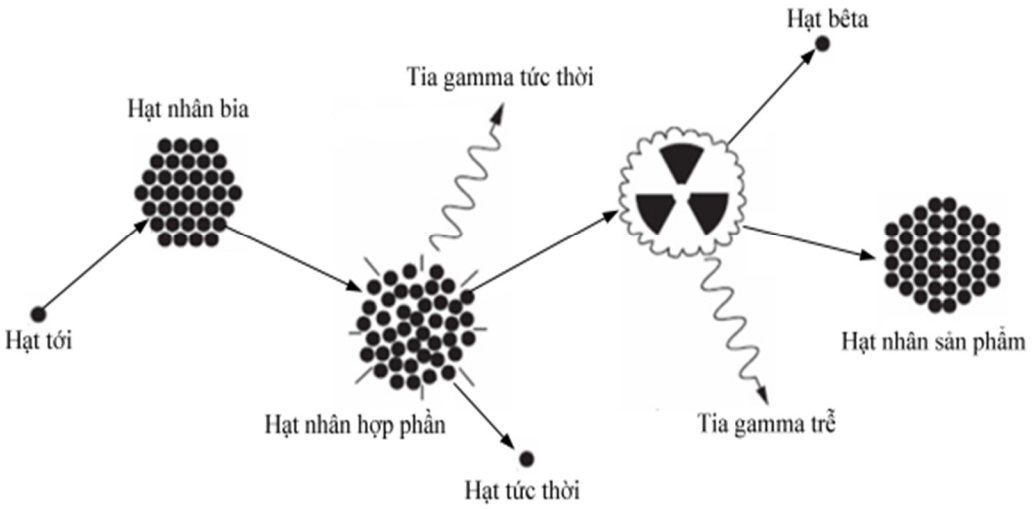
Sau khi bắt nơtrôn, hạt nhân X trở thành hạt nhân hợp phần [2]:

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n = {}^{A+1}_{Z}X^{*} \qquad (1.1) $$

trong đó A là số khối và Z là nguyên tử số của nguyên tố.

Mỗi nguyên tố tồn tại trong tự nhiên được đặc trưng bởi các thông số như: khối lượng nguyên tử (M), độ phổ biến đồng vị (θ), tiết diện bắt nơtrôn nhiệt (σ), v.v… Khi nơtrôn có năng lượng thấp tương tác với hạt nhân bia, một hạt nhân hợp phần trung gian ở trạng thái kích thựcch được tạo ra.

Hầu hết các hạt nhân hợp phần đều có khuynh hướng trở về trạng thái cân bằng hơn bằng cách phát ra tia gamma tức thời đặc trưng (trong khoảng thời gian 10^{-14} s). Trong nhiều trường hợp, trạng thái cân bằng mới này lại tạo ra một hạt nhân phóng xạ với chu kì xác định, phân rã bêta và đồng thời phát một hoặc nhiều gamma trễ đặc trưng, nhưng ở một tốc độ chậm hơn nhiều so với quá trình phát tia gamma tức thời ở trên. Quá trình kích hoạt hạt nhân bằng nơtrôn được thể hiện trong Hình 1.1.



Hình 1.1. Quá trình bắt nơtrôn và phát tia gamma của hạt nhân bia [6]

Năng lượng kích thựcch của hạt nhân hợp phần (E^*) bằng tổng năng lượng liên kết của nơtrôn (E_b) và động năng (E_k) của nơtrôn tới:

$$E^* = E_b + E_k \quad (1.2)$$

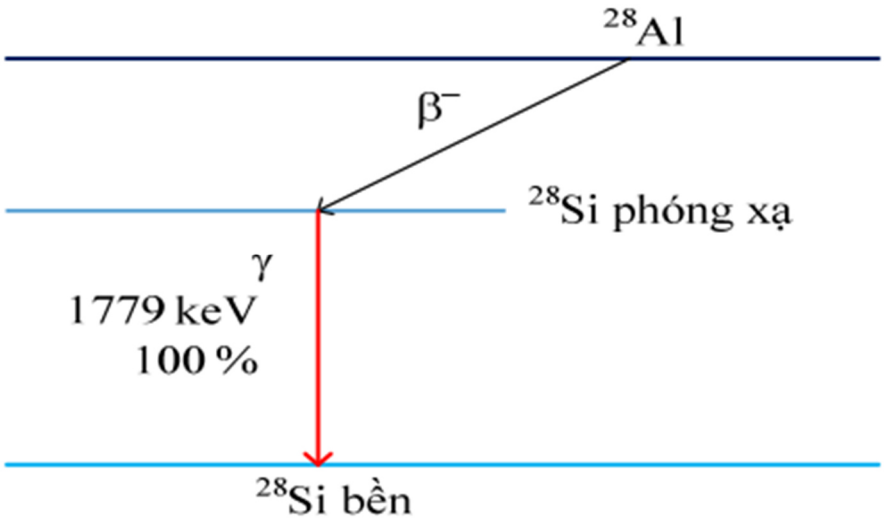
Mỗi năng lượng gamma đặc trưng cho quá trình phân rã của từng đồng vị, dựa vào đó có thể xác định các nguyên tố có mặt trong mẫu. Số hạt nhân nguyên tử bị kích hoạt tỉ lệ với số nguyên tử của mẫu, vì vậy hàm lượng nguyên tố trong mẫu sẽ được định lượng. Cụ thể là trong phổ gamma, năng lượng của đỉnh xác định sự có mặt của nguyên tố hay còn gọi là phép định tính và diện tích của đỉnh cho phép ta định lượng nguyên tố đó.

Dựa vào thời gian sống của các hạt nhân sản phẩm, phương pháp NAA được chia làm 2 loại:

- Phân tích kích hoạt nơtrôn gamma tức thời (PGNAA), các phép đo được thực hiện ngay trong lúc chiếu mẫu.
- Phân tích kích hoạt nơtrôn gamma trễ (với một số ký hiệu DGNAA, INAA hoặc NAA), các phép đo được thực hiện sau quá trình phân rã phóng xạ.

Các tia gamma có thể được phát hiện bằng detector bán dẫn có độ phân giải năng lượng cao, chúng ta sẽ thu được những thông tin cần thiết để xác định hàm lượng của những nguyên tố trong mẫu chiếu xạ

Sơ đồ phân rã của các nhân phóng xạ sắp xếp từ đơn giản đến phức tạp. Hình 1.2 minh họa phân rã của ^{28}Al (*T1/2* = 2,24 phút), nó được tạo ra bởi việc chiếu xạ đồng vị ^{27}Al. Hạt nhân ^{28}Al phân rã β- để về mức kích thựcch 1779 keV của hạt nhân con là ^{28}Si [6].



Hình 1.2. Sơ đồ phân rã và phát tia gamma của ^{28}Al

Trong trường hợp này, việc dịch chuyển từ trạng thái kích thựcch về trạng thái bền, hạt nhân ^{28}Si phát ra một tia gamma có năng lượng 1779 keV với hiệu suất phát là 100 %.

- *Xác định hàm lượng của nguyên tố trong mẫu phân tích*

Khi đặt hạt nhân trong trường nơtrôn, nhân phóng xạ được hình thành trực tiếp bởi phản ứng (n,γ), và giả sử không có hiệu ứng đốt cháy thì tốc độ phản ứng R, theo quy ước Hogdahl, có thể được viết như sau [2]:

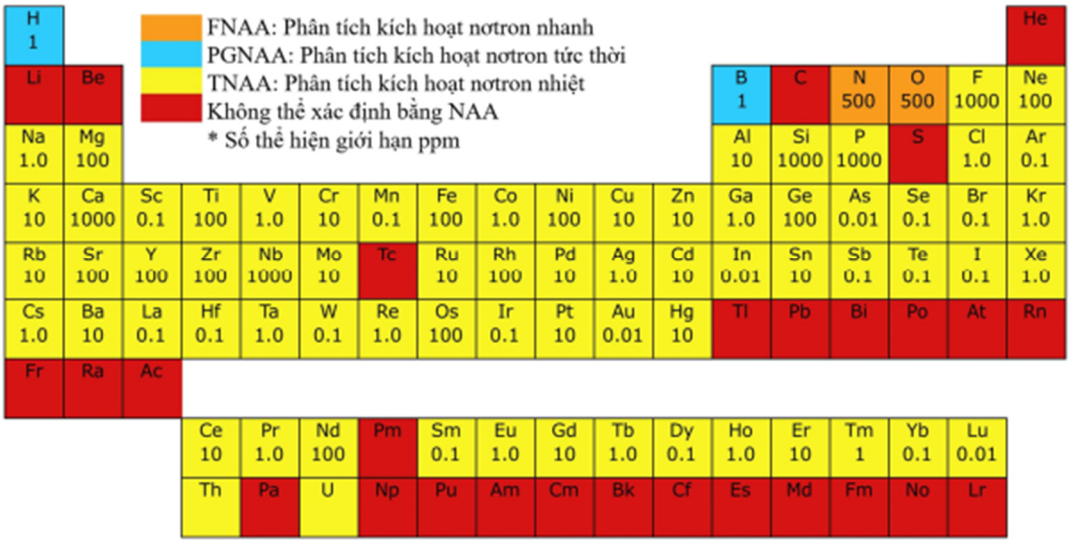
$$R = G_{th}.\phi_{th}.\sigma_0 + G_e.\phi_e.I_0(\alpha) \quad (1.3)$$

trong đó: σ_0 là tiết diện nơtrôn nhiệt; I_0 là tích phân cộng hưởng của hạt nhân tương ứng với phân bố thông lượng nơtrôn trên nhiệt tuân theo quy luật 1/E; ϕ_e là thông lượng nơtrôn trên nhiệt; G_{th} và G_e là hệ số hiệu chính tự che chắn của nơtrôn nhiệt và nơtrôn trên nhiệt tương ứng. Hàm lượng của nguyên tố trong mẫu (g/g) được tính như sau [2]:

$$\rho = \left(\frac{N_p/t_c}{SDCW}\right).\frac{M}{\theta\gamma N_A}.\frac{1}{[G_{th}\phi_{th}\sigma_0 + G_e\phi_e I_0(\alpha)]}.\frac{1}{\varepsilon_p} \quad (1.4)$$

- *Khả năng phân tích*

NAA là một trong những phương pháp phân tích có độ nhạy cao nhất, có khả năng phân tích không hủy mẫu, xác định hàm lượng ở mức bằng hoặc dưới ppm (µg/g) đối với khoảng 60 nguyên tố.



Hình 1.3. Khả năng phân tích và giới hạn phát hiện của NAA

NAA ít được áp dụng rộng rãi hơn các kỹ thuật phân tích khác để phân tích nguyên tố, chẳng hạn như hấp thụ nguyên tử quang phổ (AAS), phổ khối-plasma kết hợp cảm ứng (ICP) và huỳnh quang tia X (XRF) vì phương pháp này cần nguồn nơtrôn thông lượng cao nên chúng chỉ được sử dụng trong LPƯ nghiên cứu hạt nhân.

Mỗi kỹ thuật phân tích có những ưu điểm và nhược điểm riêng khiến nó phù hợp hoặc không phù hợp cho một ứng dụng nhất định. Phương pháp NAA không cần hòa tan mẫu, thựcch hợp để phân tích các vật liệu không hòa tan như nhựa, sợi carbon và các hợp chất bo. Phù hợp với việc xác định các nguyên tố dễ bay hơi có thể bị mất khi hòa tan chẳng hạn như asen, selen và thủy ngân.

Độ chính xác tương đối không bị ảnh hưởng từ có nguồn nhiễm bẩn trong phòng thực nghiệm và thuốc thử, hiệu ứng matrix (hiệu ứng nền) hầu như có thể bỏ qua ,… NAA không làm phá hủy mẫu nên mẫu có thể được phân tích lại bằng phương pháp này hoặc phương pháp khác. Dựa vào những lợi thế khi xem xét đến độ nhạy và độ chính xác thì NAA đóng một vai trò đặc biệt như một kỹ thuật tham chiếu cho các phương pháp phân tích khác.

Tuy nhiên, các mẫu chất lỏng không thể được phân tích một cách hiệu quả bằng kỹ thuật INAA vì một số nguyên tố vi lượng có thể có ở nồng độ rất thấp. Rất khó để xác định các nguyên tố này một cách trực tiếp mà không có bước cô đặc trước (chiếu xạ một khối lượng lớn mẫu chất lỏng bị hạn chế trong các cơ sở LPƯ bởi kích thước của các kênh chiếu xạ, đồng thời việc vận chuyển nhanh lượng mẫu tương đối lớn giữa địa điểm chiếu xạ và detector gần như là không thể). Trong hầu hết các trường hợp, cần cô đặc trước để giảm thể tích của mẫu.

Để tiến hành phân tích kích hoạt, cần phải có nguồn bức xạ kích hoạt (nơtrôn hoặc photon), thiết bị đo và phân tích phổ gamma cùng với những kiến thức cơ bản về phản ứng hạt nhân, về tương tác của bức xạ hạt nhân.

- *Nguồn nơtrôn được sử dụng trong phân tích kích hoạt nơtrôn*

Nơtrôn được dùng phổ biến trong lĩnh vực phân tích kích hoạt là do loại hạt này có một số ưu điểm như sau:

+ Nơtrôn là hạt trung hòa điện nên khi bắn phá vật chất, nó không bị hạt nhân đẩy ra (do tương tác do lực Cu-lông), cho nên có thể đi sâu vào và làm biến đổi hạt nhân nguyên tử.

+ Ngoài ra, nơtrôn có thể dễ dàng xuyên sâu nhiều loại vật chất (ngược với hạt tích điện).

+ Một ưu điểm nữa là kích hoạt bằng nơtrôn không làm cho vật liệu mẫu nóng lên ở nhiệt độ cao với trường nơtrôn của LPƯ.

Việc lựa chọn nguồn nơtrôn đóng vai trò rất quan trọng, tùy theo yêu cầu và phương pháp phân tích mà lựa chọn nguồn phù hợp, chúng được đặc trưng bởi thông lượng và năng lượng do nguồn phát ra. Những nguồn nơtrôn có thể dùng như: LPƯ hạt nhân, máy phát nơtrôn hoặc các nguồn đồng vị phóng xạ.

Trong đó, nguồn nơtrôn từ LPƯ hạt nhân (thông lượng nơtrôn nhiệt khoảng 10^{12} - 10^{14} $n.cm^{-2}.s^{-1}$ tương ứng với công suất LPƯ từ 100 kW đến 10 MW) được cho là tối ưu nhất cho phân tích kích hoạt do tiết diện hấp thụ nơtrôn tương đối lớn đối với đa số các nguyên tố nên phép phân tích có độ nhạy cao. Từ 1938 đến 1940, người ta phân tích kích hoạt bằng các hạt mang điện như proton (p), alpha (α),... Với sự phát triển của LPƯ hạt nhân đã cho phép tạo ra dòng nơtrôn có thông lượng cao nên ngay từ cuối năm 1943,

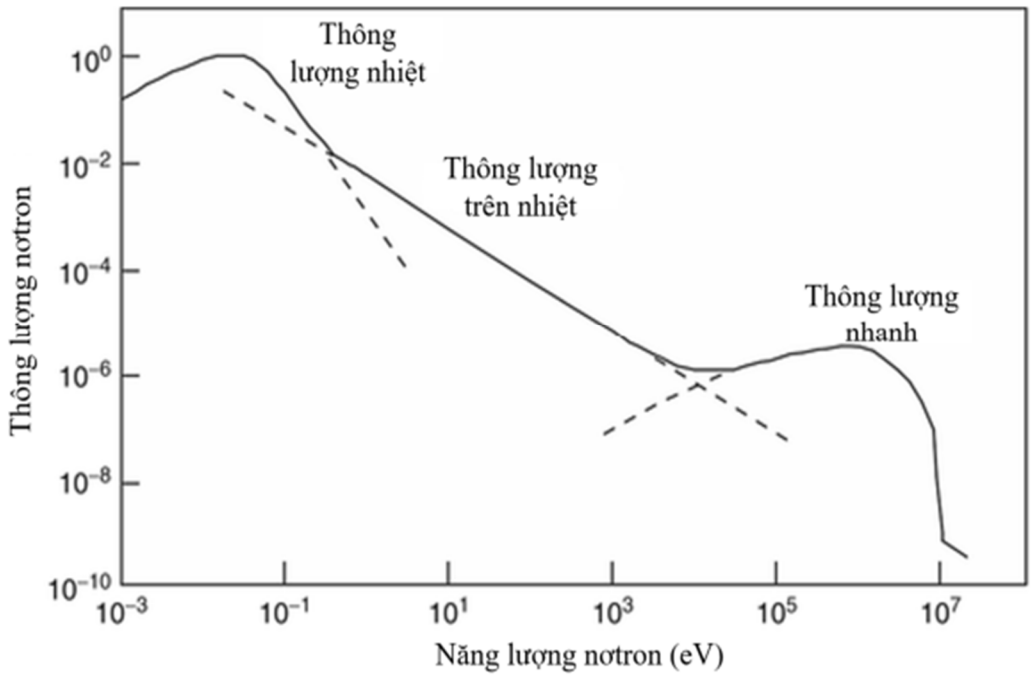
việc xác định một số thành phần vi lượng đã được thực hiện thường xuyên bằng nguồn nơtrôn tại các LPƯ.

Nơtrôn trong LPƯ có năng lượng từ 0 đến 20 MeV, chia làm 3 vùng [2]:

+ Nơtrôn nhiệt có năng lượng E_n trong khoảng $0 < E_n \leq 0,5$ eV. Phân bố nơtrôn nhiệt tuân theo quy luật Maxwell Boltzmann.

+ Nơtrôn trên nhiệt có năng lượng E_n trong khoảng 0,5 eV $< E_n \leq$ 500 keV. Tiết diện tương tác của nơtrôn với vật chất có dạng cộng hưởng. Trường hợp lý tưởng, thông lượng nơtrôn trên nhiệt phân bố tỉ lệ nghịch với năng lượng nơtrôn.

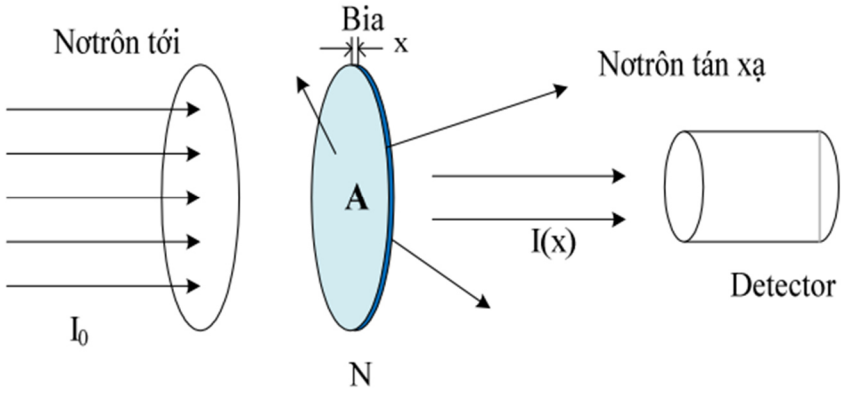
+ Nơtrôn nhanh có năng lượng En trong khoảng 500 keV $< E_n \leq$ 20 MeV. Phân bố nơtrôn nhanh cực đại ở 0,7 MeV và được mô tả bởi phân bố Watt. Phân bố thông lượng nơtrôn của một lò phản ứng đặc trưng được thể hiện trong Hình 1.4.



Hình 1.4. Phân bố thông lượng nơtrôn của LPƯ

- *Tiết diện tương tác của nơtrôn*

Trong vật lý hạt nhân, khái niệm tiết diện tương tác của nơtrôn (hay gọi tắt là tiết diện nơtrôn) là đại lượng biểu thị xác suất phản ứng giữa nơtrôn với vật chất. Để hiểu khái niệm tiết diện nơtrôn, người ta khảo sát chùm nơtrôn song song và đơn năng chiếu tới một bia mỏng có diện tích bề mặt (A), bề dày (x), chứa N nguyên tử/cm^3 (Hình 1.5).



Hình 1.5. Mô tả tiết diện tương tác của nơtrôn

Cường độ của chùm nơtrôn tới được xác định bởi số nơtrôn trên đơn vị thể tích (n), và vận tốc của chúng (v). Mối liên hệ của chúng được biểu diễn như sau [4, 5]:

$$I_0 = n.v \tag{1.5}$$

Số hạt nhân trong bia được tính theo công thức sau:

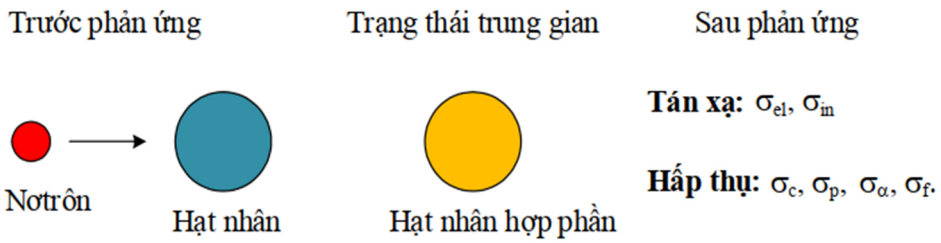
$$N_t = N.A.x \tag{1.6}$$

Số nơtrôn va chạm với các hạt nhân trong bia tỉ lệ với cường độ của chùm nơtrôn và với số hạt nhân trong bia. Vì vậy, số nơtrôn va chạm với hạt nhân trong bia trong 1 giây là được xác định bằng:

$$w = \sigma.I_0.N_t \tag{1.7}$$

trong đó, tích số $\sigma.I_0$ biểu thị cho số nơtrôn va chạm với một hạt nhân trong bia trong 1 đơn vị thời gian, và σ được gọi là tiết diện vi mô (tiết diện hiệu dụng). Đơn vị của tiết diện vi mô là barn (kí hiệu là b, 1 b = 10^{-24} cm^2).

Tiết diện nơtrôn là một hàm theo năng lượng của nơtrôn và bản chất của các hạt nhân trong bia. Tiết diện này phụ thuộc nhiều vào năng lượng của nơtrôn tới, loại hạt nhân mà nó tương tác và loại phản ứng xảy ra. Có 2 loại tiết diện tương tác là tiết diện tán xạ và tiết diện hấp thụ. Tiết diện toàn phần của nơtrôn được định nghĩa là tổng của hai loại tiết diện trên. Hình 1.6 thể hiện 2 loại tương tác của nơtrôn với hạt nhân bia.



Hình 1.6. Hai loại tương tác của nơtrôn với hạt nhân bia

Một số loại phản ứng chính xảy ra khi nơtrôn tương tác với hạt nhân được thể hiện trong Bảng 1.1 và kèm theo ví dụ.

Bảng 1.1 Phân loại các phản ứng hạt nhân khi nơtrôn tương tác với hạt nhân bia

Phân loại	**Phản ứng**	**Kí hiệu tiết diện**	**Ví dụ phản ứng**
Tán xạ (s)	Tán xạ đàn hồi (n,n)	σ_{el}	$^{1}H(n,n)$
	Tán xạ không đàn hồi (n,n')	σ_{in}	$^{238}U(n, n')$
Hấp thụ (a)	Bắt bức xạ (n,γ)	σ_c	$^{238}U(n, \gamma)$
	Phân hạch (n,f)	σ_f	$^{235}U(n, f)$
	Phát xạ hạt (n,p), (n, α), (n,2n)	σ_p	$^{14}N(n, p)$
		σ_α	$^{10}B(n, \alpha)$
		$\sigma_{(n,2n)}$	$^{9}Be(n, 2n)$

Tổng của tất cả các tiết diện nơtrôn đối với mỗi loại phản ứng riêng biệt được gọi là tiết diện toàn phần và được diễn tả bởi biểu thức sau [4]:

$$\sigma_{total} = \sigma_s + \sigma_a = \sigma_{el} + \sigma_{in} + \sigma_c + \sigma_p + \sigma_\alpha + \sigma_f \quad (1.8)$$

trong đó, σ_{el} là tiết diện tán xạ đàn hồi (n, n), σ_{in} là tiết diện tán xạ không đàn hồi (n, n'); σ_c là tiết diện bắt bức xạ (n, c), σ_p là tiết diện phản ứng (n, p), σ_α là tiết diện phản ứng (n, α), σ_f là tiết diện phản ứng phân hạch (n, f).

1.1.2. Dòng nơtrôn phin lọc

Thông thường các nguồn nơtrôn từ LPƯ hoặc máy gia tốc có phổ năng lượng phân bố trên một dải rộng năng lượng. Tuy nhiên để tiến hành các thực nghiệm nghiên cứu số liệu phản ứng hạt nhân thì nguồn nơtrôn đơn năng là yêu cầu thiết yếu bắt buộc phải có [5].

Kỹ thuật phin lọc nơtrôn trên cơ sở các kênh ngang dẫn dòng nơtrôn từ LPƯ có ưu điểm là cho phép người sử dụng nhận được dòng nơtrôn đơn năng, có cường độ tương đối cao và ít tốn kém. Ngoài ra, các dòng nơtrôn phin lọc từ LPƯ còn có phông gamma thấp và được chuẩn trực rất tốt (đường kính của chùm cỡ 4 - 40 mm) [4].

Vì vậy, chùm nơtrôn phin lọc thường được sử dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu: đo đạc số liệu hạt nhân, nghiên cứu phản ứng hạt nhân, y học hạt nhân, v.v... Trong đó, các phin lọc đơn tinh thể kết hợp Si và Bi hoặc Sapphire và Bi thường được sử dụng để tạo ra dòng nơtrôn nhiệt, ngoài ra đơn tinh thể Bi còn có tác dụng làm giảm bức xạ gamma [4, 5].

1.1.3. Xác định thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt bằng kĩ thuật NAA

Khi đặt hạt nhân trong trường nơtrôn, nhân phóng xạ được hình thành trực tiếp bởi phản ứng (n, γ), và giả sử không có hiệu ứng đốt cháy thì tốc độ phản ứng R, theo quy ước Hogdahl, có thể được viết như sau [2, 6]:

$$R=G_{th}\phi_{th}\sigma_0 + G_e\phi_e I(\alpha) = \frac{\frac{N_p}{t_m}}{\frac{S.D.C.W}{\frac{N_A\theta\varepsilon_p\gamma}{M}}} \quad (1.9)$$

Với :

N_A - hằng số Avogadro,

W- khối lượng của các lá dò trong thực nghiệm.

θ - độ giàu đồng vị,

M - khối lượng nguyên tử của nguyên tố bia,

σ_0 - tiết diện bắt nơtrôn của các hạt nhân tại mức năng lượng nhiệt 0,0253 eV,

G_{th} : hệ số hiệu chỉnh cho việc tự che chắn nơtrôn nhiệt,

G_e : hệ số hiệu chỉnh cho việc tự che chắn nơtrôn trên nhiệt,

γ : Cường độ phát gamma tương đối tương ứng với đỉnh năng lượng,

ε_p : Hiệu suất ghi tuyệt đối tương ứng với đỉnh.

N_p : Diện tích đỉnh năng lượng quan tâm,

S=1-$e^{-\lambda t_i}$, D=$e^{-\lambda t_d}$, C=$\frac{1-e^{-\lambda t_m}}{\lambda t_m}$

trong đó S là hệ số hiệu chỉnh cho sự phân rã trong quá trình chiếu, λ là hằng số phân rã, D là hệ số hiệu chỉnh thời gian phân rã, C là hệ số hiệu chỉnh cho thời gian đo và t_i, t_d, t_m là thời gian chiếu, thời gian rã, thời gian đo, tương ứng,

$I(\alpha)$ - là tích phân cộng hưởng của hạt nhân tương ứng với phân bố thông lượng nơtrôn trên nhiệt tuân theo quy luật 1/E, $I(\alpha)$ được viết như sau [2]:

$$\mathrm{I}(\alpha) = \int_{\mathrm{E_{cd}}}^{\infty} \frac{\sigma(\mathrm{E})\mathrm{dE}}{\mathrm{E}^{1+\alpha}} (1\mathrm{eV})^{\alpha} \qquad (1.10)$$

trong đó 1 eV biểu diễn cho năng lượng tham khảo. Hệ số α độc lập với năng lượng nơtrôn – được xem như một thông số phổ nơtrôn – biểu diễn cho độ lệch phân bố phổ nơtrôn trên nhiệt khỏi quy luật 1/E.

Phương trình tính hoạt độ (A) của mẫu:

$$A_{sp}\ or\ A_{sp,e} = \frac{\frac{N_p}{t_m}}{S.D.C.W} \qquad (1.11)$$

với A_{sp} là hoạt độ của lá dò trần, $A_{sp,e}$ là hoạt độ của lá dò bọc Cd. Đối với mẫu tại thời điểm kết thúc chiếu xạ thì hoạt độ tại thời điểm kết thúc chiếu xạ được xác định bằng công thức sau:

$$A = R(1 - e^{-\lambda t_i}) \qquad (1.12)$$

Phương trình tính tốc độ phản ứng như sau:

$$R_s\ or\ R_{s,Cd} = \frac{A_{sp}\ hoặc\ A_{sp,e}.M.F_g}{N_A \theta \varepsilon_p \gamma} \qquad (1.13)$$

Với R_s là tốc độ phản ứng của lá dò trần và $R_{s,Cd}$ là tốc độ phản ứng của lá dò bọc Cd. F_g là hệ số hiệu chỉnh cho sự suy giảm gamma trong mẫu.

Phương trình tính thông lượng nơtrôn nhiệt, nơtrôn trên nhiệt.

Thông lượng nơtrôn nhiệt:

$$\phi_0 = \frac{R_s - F_{Cd} R_{S,Cd}}{g.\sigma_0 G_{th}} \qquad (1.14)$$

Với F_{Cd} là hệ số hiệu chỉnh Cadmium và g là hiệu chỉnh cho bắt đầu từ tiết diện $\frac{1}{v}$.

Thông lượng nơtrôn trên nhiệt :

$$\phi_e = \frac{\phi_0.g.\sigma_0.G_{th}}{(R_A - F_{Cd}).I_0(\alpha).G_{epi}} \quad (1.15)$$

Với R_A là tỷ số cadmium $R_A = \frac{A_{sp}}{A_{sp,e}}$ (1.16)

Sai số của thực nghiệm.

Trong thực nghiệm này các yếu tố chính đóng góp đến sai số của thực nghiệm bao gồm sai số diện tích đỉnh σ_{N_p}, sai số của tiết diện σ_{σ_0} và sai số của hiệu suất ghi σ_{ε_p} . Vì vậy ta sử dụng công thức truyền sai số để tính sai số hoạt độ và thông lượng theo các công thức đã nêu ở trên.

Công thức truyền sai số được biểu diễn tổng quát như sau:

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\frac{\partial f}{\partial x_i}.\sigma_{x_i})^2} \quad (1.17)$$

Trong đó $f(x_i)$ là một hàm của các biến số x_i.

Từ (1.11) và (1.17) ta có sai số hoạt độ là:

$$\sigma_A = \sqrt{(\frac{1}{S.D.C.W.t_m})^2.\sigma_{N_p}^2} \quad (1.18)$$

Từ (1.13) và (1.17) ta có sai số tốc độ phản ứng

$$\sigma_R = \sqrt{(\frac{M.F_g}{N_A.\theta.\varepsilon_p.\gamma})^2.\sigma_A^2 + (-\frac{A.M.F_g}{N_A.\theta.\varepsilon_p^2.\gamma})^2.\sigma_{\varepsilon_p}^2} \quad (1.19)$$

Hay

$$\sigma_R = \sqrt{(\frac{M.F_g}{N_A.\theta.\varepsilon_p.\gamma})^2.(\frac{1}{S.D.C.W.t_m})^2.\sigma_{N_p}^2 + (-\frac{A.M.F_g}{N_A.\theta.\varepsilon_p^2.\gamma})^2.\sigma_{\varepsilon_p}^2} \quad (1.20)$$

Từ (1.14) và (1.17) sai số thông lượng nơtrôn nhiệt là:

$$\sigma_{\phi_0} = \sqrt{(\frac{1}{g.\sigma_0.G_{th}})^2\sigma_{R_s}^2 + (\frac{-F_{Cd}}{g.\sigma_0.G_{th}})^2\sigma_{R_{s,Cd}}^2 + (-\frac{R_s - F_{Cd}R_{S,Cd}}{g.\sigma_0^2 G_{th}})^2.(\sigma_{\sigma_0})^2} \quad (1.21)$$

Từ (1.15) và (1.17) ta có sai số thông lượng nơtrôn trên nhiệt là: $\sigma_{\phi_e} =$

$$\sqrt{(\frac{g.\sigma_0.G_{th}}{(R_A - F_{Cd}).I_0(\alpha).G_{epi}})^2\sigma_{\phi_0}^2 + (\frac{\phi_0.g.G_{th}}{(R_A - F_{Cd}).I_0(\alpha).G_{epi}})^2(\sigma_{\sigma_0})^2 + (\frac{\phi_0.g.\sigma_0.G_{th}}{(R_A - F_{Cd}).(I_0(\alpha))^2.G_{epi}})^2(\sigma_{I_0(\alpha)})^2 + (\frac{\phi_0.g.\sigma_0.G_{th}}{I_0(\alpha).G_{epi}})^2.(\frac{A_{sp} - A_{sp,e}.F_{Cd} + F_{Cd}}{(A_{sp} - A_{sp,e}.F_{Cd})^2})^2(\sigma_{A_{sp,e}})^2 + (\frac{\phi_0.g.\sigma_0.G_{th}}{I_0(\alpha).G_{epi}})^2.(-\frac{A_{sp,e}}{(A_{sp} - A_{sp,e}.F_{Cd})^2})^2(\sigma_{A_{sp}})^2} \quad (1.22)$$

1.2. Chương trình MCNP5

1.2.1. Giới thiệu

MCNP5 là chương trình ứng dụng phương pháp Monte Carlo để mô phỏng các quá trình vật lí hạt nhân đối với nơtrôn, photon, electron (các quá trình phân rã hạt nhân, tương tác giữa các tia bức xạ với vật chất, thông lượng nơtrôn,...). MCNP5 được phát triển bởi nhóm Monte Carlo tại Trung tâm thực nghiệm quốc gia Los Alamos (Mỹ). Trong phiên bản này, một số thành phần đã được hiệu chỉnh và thêm vào so với các phiên bản trước như là: hiện tượng quang hạt nhân, hiệu ứng giãn nở Doppler, khả năng tính toán song song, v.v…

Đây là một công cụ tính toán rất mạnh, có thể mô phỏng vận chuyển nơtrôn, photon và electron, và giải các bài toán vận chuyển bức xạ 3 chiều sử dụng trong các lĩnh vực từ thiết kế LPU đến an toàn bức xạ và vật lý y học với các miền năng lượng của nơtrôn từ 10-11 MeV đến 20 MeV và các miền năng lượng photon hoặc electron từ 1 keV đến 100 GeV [4, 5].

1.2.2. Cấu trúc input file và các loại đánh giá

Để tiến hành mô phỏng bằng chương trình MCNP5, trước tiên người dùng cần phải tạo ra một file input có chứa các thông tin cần thiết của bài toán như: mô tả hình học, vật liệu, các kết quả cần ghi nhận, các quá trình vật lý, v.v... Cấu trúc file input của chương trình MCNP5 bao gồm 3 phần bắt buộc là: phần thẻ ô mạng (cell cards), phần thẻ bề mặt (surface cards), và phần thẻ dữ liệu (data cards).

Dòng đầu tiên trong input file chính là dòng tiêu đề (có thể bỏ trống dòng này), tiếp theo là 3 khối bắt buộc của chương trình: khối các thẻ ô mạng (cell), khối các thẻ bề mặt (surface) và khối các thẻ dữ liệu (data), các khối thẻ này được cách nhau chính xác bằng 1 dòng trắng (chương trình sẽ báo lỗi nếu nhiều hơn 1 dòng trắng).

Trong MCNP5 có nhiều loại đánh giá (tally) khác nhau. Người sử dụng có thể dùng các tally khác nhau tùy theo mục đích, yêu cầu được đưa ra. Tally có thể biến đổi bởi người sử dụng theo nhiều cách khác nhau.

Tất cả các tally được chuẩn hóa để tính trung bình trên một hạt nguồn phát ra, ngoại trừ một vài trường hợp đối với nguồn tới hạn [4, 5]. Chương trình MCNP5 có 7 loại tally và được liệt kê trong Bảng 1.2:

Bảng 1.2. Các loại đánh giá trong MCNP5

Kí hiệu	Đánh giá	Loại hạt
F1	Cường độ dòng hạt qua bề mặt.	N, P, E
F2	Thông lượng trung bình qua một bề mặt.	N, P, E
F4	Thông lượng trung bình qua một cell.	N, P, E
F5	Thông lượng tại một đầu dò điểm hay vòng.	N, P
F6	Năng lượng trung bình để lại trong cell.	N, P
F7	Năng lượng phân hạch trung bình để lại trong cell.	N
F8	Sự phân bố độ cao xung trong cell.	P, E

1.2.3. Đánh giá sai số

Sau mỗi quá trình mô phỏng bằng MCNP5, chương trình MCNP5 sẽ đưa ra sai số tương đối, R, của các đại lượng cần được đánh giá. Sai số tương đối R được tính theo công thức:

$$R = \frac{S_{\bar{x}}}{X} \tag{1.23}$$

trong đó, $S_{\bar{x}}$ là độ lệch chuẩn, và x là giá trị trung bình. Giá trị trung bình và phương sai của đại lượng x sau N quá trình mô phỏng được tính bởi công thức (1.24) và (1.25):

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{1.24}$$

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{N}\left\{\overline{x^2} - (\bar{x})^2\right\} \tag{1.25}$$

Sai số tương đối R cho phép người dùng đánh giá những đóng góp khác nhau vào kết quả truy xuất của một quá trình mô phỏng. Ý nghĩa của các giá trị sai số tương đối R được thể hiện trong Bảng 1.3:

Bảng 1.3. Ý nghĩa của giá trị sai số tương đối R trong MCNP5

Giá trị R	Ý nghĩa
> 0.5	Không có ý nghĩa
0.2 – 0.5	Có thể chấp nhận được
0.1 – 0.2	Chưa tin cậy hoàn toàn
< 0.1	Tin cậy (ngoại trừ đối với detector vòng/điểm)
< 0.05	Tin cậy (đối với detector vòng/điểm)

Để theo dõi diễn biến của kết quả truy xuất, MCNP5 còn đưa ra tiêu chuẩn FOM (Figure Of Merit) sau mỗi lần truy xuất kết quả. Giá trị của FOM được tính theo công thức:

$$FOM = \frac{1}{R^2 T} \tag{1.26}$$

trong đó, T là thời gian tính toán (đo bằng phút).

Giá trị FOM càng lớn thì quá trình mô phỏng Monte Carlo càng hiệu quả bởi vì chỉ cần ít thời gian tính toán cũng có thể đạt được giá trị R mong muốn. Vì vậy, việc sử dụng tiêu chuẩn đánh giá FOM để kiểm tra diễn biến của kết quả truy xuất là rất cần thiết. Giá trị của sai số tương đối R chỉ liên quan đến độ chính xác của phương pháp Monte Carlo chứ không phải là độ chính xác của phương pháp mô phỏng so với kết quả thực nghiệm. Bên cạnh đó, để đánh giá độ chính xác của R, người ta sử dụng đại lượng phương sai của phương sai (Variance Of Variance – VOV), giá trị của VOV phải nhỏ hơn 0,1 đối với tất cả các loại Tally, và đại lượng này được tính như sau:

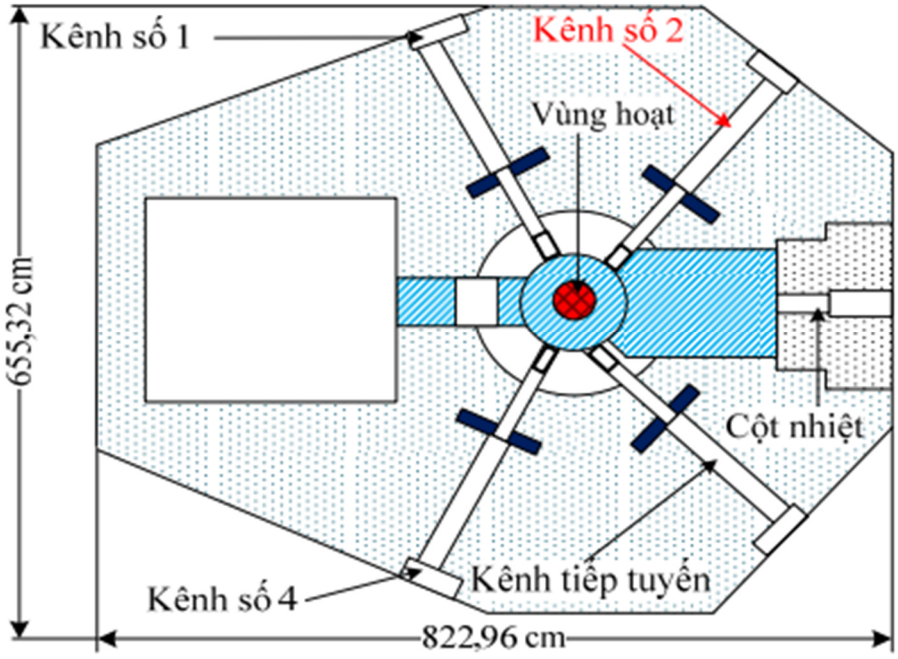
$$\mathrm{VOV} = \frac{S^2\left(S_{\bar{x}}^2\right)}{S_{\bar{x}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2\right]^2} - \frac{1}{N} \tag{1.27}$$

1.3. Dòng nơtrôn phi lọc tại CN2DR

1.3.1. LPƯ Đà Lạt

Ở Việt Nam, với sự giúp đỡ của Liên Xô, LPƯ tại Đà Lạt đã được khôi phục, nâng cấp và đạt tới hạn lần đầu vào ngày 01/11/1983, đưa vào hoạt động chính thức với công suất danh định 500 kWt vào ngày 20/3/1984.

LPƯ Đà Lạt có 4 kênh ngang dẫn dòng nơtrôn, trong đó có 3 kênh xuyên tâm và 1 kênh tiếp tuyến. Cho đến nay đã có 3 kênh ngang được đưa vào sử dụng là kênh tiếp tuyến số 3, các kênh xuyên tâm số 2 và 4. Các dòng nơtrôn phin lọc từ kênh ngang số 3 và số 4 đã được đưa vào sử dụng từ những năm 1990 phục vụ các nghiên cứu cơ bản và ứng dụng [4]. Mặt cắt ngang của LPƯ Đà Lạt được thể hiện trong Hình 1.7.



Hình 1.7. Mặt cắt ngang của LPƯ Đà Lạt

1.3.2. Dòng nơtrôn phin lọc tại CN2DR

Năm 1990 kỹ thuật phin lọc nơtrôn được phát triển ở LPƯ Đà Lạt cho phép nhận được các chùm nơtrôn chuẩn đơn năng với thông lượng nằm trong dải từ 10^4-10^6 n.cm^{-2}.s^{-1}, thựcch hợp cho các nghiên cứu số liệu phản ứng hạt nhân với nơtrôn. Các dòng nơtrôn chuẩn đơn năng trên kênh ngang số 4 bao gồm: nhiệt, 54 keV và 148 keV đã được phát triển và đưa vào sử dụng từ những năm 1990; các dòng nơtrôn đơn năng 24 keV, 59 keV và 133 keV đã được phát triển và đưa vào sử dụng từ năm 2008 [4, 5].

Năm 2011 dòng nơtrôn nhiệt có chất lượng tốt trên CN2DR đã được lắp đặt thành công. Hai hướng nghiên cứu chủ yếu trên dòng nơtrôn này là:

- Nghiên cứu vật lý hạt nhân cơ bản bao gồm đo đạc số liệu hạt nhân (tiết diện bắt bức xạ nơtrôn, tiết diện toàn phần, v.v...),
- Phân tích nguyên tố và đồng vị phóng xạ bằng phương pháp đo phổ gamma tức thời.

Bằng việc sử dụng tổ hợp phin lọc đơn tinh thể 80 cm Si và 4 cm Bi, dòng nơtrôn thuần nhiệt đã được tạo ra tại CN2DR [4], và các thông số vật lý của dòng nơtrôn này được liệt kê trong Bảng 1.4.

Bảng 1.4. Các thông số vật lý của dòng nơtrôn nhiệt tại vị trí đo mẫu của CN2DR

Thông lượng nơtrôn nhiệt Φ_{th} (n.cm^{-2}.s^{-1})	**Tỉ số Cadmi R_{cd} (Au)**	**Chiều dài phin lọc (cm)**		**Đường kính của dòng nơtrôn (cm)**
		Si	**Bi**	
1.6 x10^{6}	420	80	4	3

Chương 2: Mô phỏng và thực nghiệm

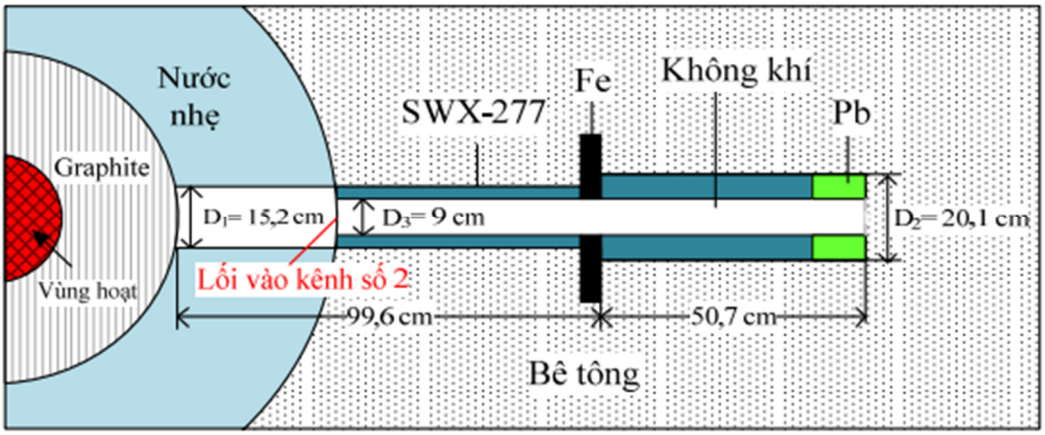
2.1. Mô phỏng thông lượng nơtrôn nhiệt tại LPƯ Đà Lạt

Các thành phần bức xạ trong CN2DR là gamma và nơtrôn. Do vậy, các vật liệu che chắn hữu ích đối với gamma và nơtrôn đã được lựa chọn trong thiết kế và chế tạo là: Chì có độ tinh khiết 99%, Borat-Hydrogenat (SWX-277) chứa $3,4\times10^{22}$ (nguyên tử hydro).cm^{-3} và $1,43\times10^{21}$ (nguyên tử bor).cm^{-3}, BoratPolyethylene (SWX-207HD) chứa $6,15\times10^{22}$ (nguyên tử hydro).cm^{-3} và $8,14\times10^{20}$ (nguyên tử bor).cm^{-3} [4, 5].

Hệ dẫn dòng nơtrôn tại CN2DR theo thiết kế có dạng hình trụ có tổng chiều dài là 240,3 cm được chia làm hai phần:

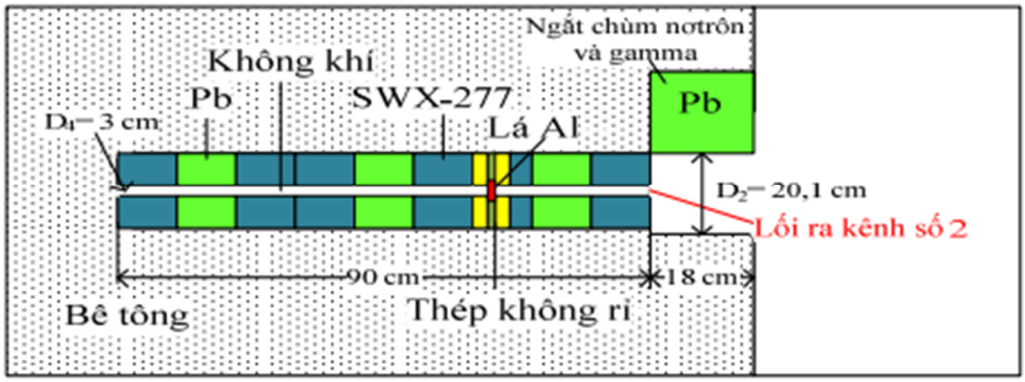
- Phần dẫn dòng nơtrôn; và
- Phần chuẩn trực dòng nơtrôn.

Phần dẫn dòng nơtrôn dài 150,3 cm với đường kính trong D3 = 9,0 cm gồm 2 phần: phần thứ nhất (hướng vào phía vành phản xạ của LPƯ) có chiều dài 99,6 cm với đường kính ngoài D1 = 15,2 cm; và phần thứ 2 có chiều dài 50,7 cm với đường kính ngoài là D2 = 20,1 cm. Hình 2.1 mô tả cấu trúc phần dẫn dòng của CN2DR.



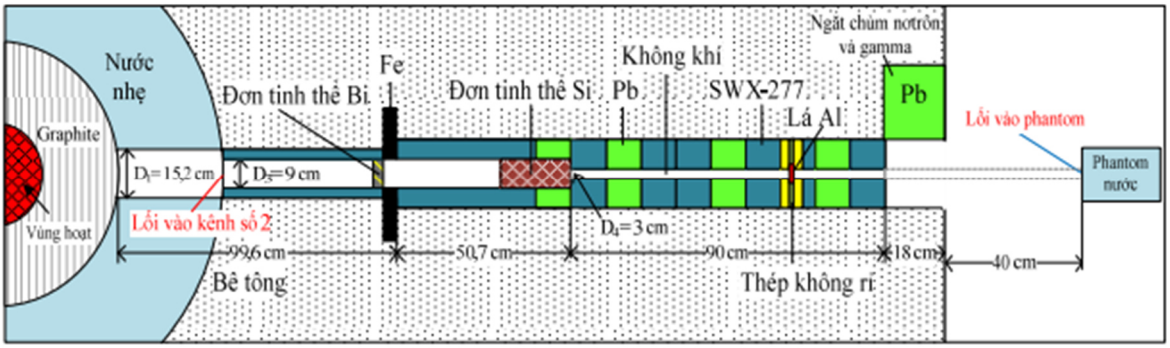
Hình 2.1. Cấu trúc phần dẫn nơtrôn tại CN2DR

Phần chuẩn trực dòng nơtrôn có chiều dài 90 cm với đường kính trong D4 = 3 cm được trình bày trong Hình 2.2.



Hình 2.2. Cấu trúc phần chuẩn trực dòng nơtrôn tại CN2DR

Hình 2.3 thể hiện cấu trúc của hệ dẫn dòng nơtrôn tại CN2DR, có chuẩn trực hình trụ với tổ hợp phin lọc 20 cm Si và 3 cm Bi [3].



Hình 2.3. Cấu trúc CN2DR với cấu hình và vị trí phantom nước sử dụng trong mô phỏng MCNP5

Bảng 2.1. Dữ liệu phổ nơtrôn tại lối vào kênh ngang số 2 của LPƯ Đà Lạt [4].

Năng lượng (MeV)	**Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**	**Năng lượng (MeV)**	**Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**	**Năng lượng (MeV)**	**Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**
1.00E-09	1.41E+10	3.20E-02	7.93E+02	1.24E-01	1.92E+02
5.00E-09	6.05E+10	3.30E-02	7.67E+02	1.25E-01	1.92E+02
1.00E-08	9.96E+10	3.40E-02	7.44E+02	1.26E-01	1.90E+02
1.50E-08	1.23E+11	3.50E-02	7.22E+02	1.27E-01	1.88E+02
2.00E-08	1.35E+11	3.60E-02	7.00E+02	1.28E-01	1.86E+02
2.50E-08	1.39E+11	3.70E-02	6.82E+02	1.29E-01	1.85E+02

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
3.00E-08	1.38E+11	3.80E-02	6.62E+02	1.30E-01	1.83E+02
3.50E-08	1.32E+11	3.90E-02	6.44E+02	1.31E-01	1.81E+02
4.00E-08	1.25E+11	4.00E-02	6.28E+02	1.32E-01	1.80E+02
4.50E-08	1.16E+11	4.10E-02	6.12E+02	1.33E-01	1.79E+02
5.00E-08	1.06E+11	4.20E-02	5.97E+02	1.34E-01	1.78E+02
5.50E-08	9.59E+10	4.30E-02	5.83E+02	1.35E-01	1.76E+02
6.00E-08	8.63E+10	4.40E-02	5.68E+02	1.36E-01	1.75E+02
6.50E-08	7.71E+10	4.50E-02	5.56E+02	1.37E-01	1.74E+02
7.00E-08	6.84E+10	4.60E-02	5.43E+02	1.38E-01	1.72E+02
7.50E-08	6.05E+10	4.70E-02	5.30E+02	1.39E-01	1.71E+02
8.00E-08	5.30E+10	4.80E-02	5.19E+02	1.40E-01	1.70E+02
8.50E-08	4.65E+10	4.90E-02	5.09E+02	1.41E-01	1.69E+02
9.00E-08	4.05E+10	5.00E-02	4.98E+02	1.42E-01	1.67E+02
9.50E-08	3.53E+10	5.10E-02	4.87E+02	1.43E-01	1.66E+02
1.00E-07	3.06E+10	5.20E-02	4.78E+02	1.44E-01	1.65E+02
1.25E-07	1.46E+10	5.30E-02	4.69E+02	1.45E-01	1.64E+02
1.50E-07	6.64E+09	5.40E-02	4.60E+02	1.46E-01	1.62E+02
1.75E-07	2.95E+09	5.50E-02	4.51E+02	1.47E-01	1.61E+02
2.00E-07	1.28E+09	5.60E-02	4.42E+02	1.48E-01	1.60E+02
2.25E-07	5.47E+08	5.70E-02	4.34E+02	1.49E-01	1.59E+02
2.50E-07	2.32E+08	5.80E-02	4.25E+02	1.50E-01	1.58E+02
2.75E-07	2.52E+08	5.90E-02	4.18E+02	1.51E-01	1.57E+02
3.00E-07	1.83E+08	6.00E-02	4.11E+02	1.52E-01	1.56E+02
3.25E-07	1.47E+08	6.10E-02	4.04E+02	1.53E-01	1.55E+02
3.50E-07	1.28E+08	6.20E-02	3.98E+02	1.54E-01	1.54E+02
3.75E-07	1.15E+08	6.30E-02	3.91E+02	1.55E-01	1.53E+02
4.00E-07	1.06E+08	6.40E-02	3.84E+02	1.56E-01	1.51E+02
4.25E-07	9.92E+07	6.50E-02	3.78E+02	1.57E-01	1.51E+02

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
4.50E-07	9.32E+07	6.60E-02	3.73E+02	1.58E-01	1.50E+02
4.75E-07	8.80E+07	6.70E-02	3.66E+02	1.59E-01	1.49E+02
5.00E-07	8.34E+07	6.80E-02	3.60E+02	1.60E-01	1.48E+02
6.00E-07	6.90E+07	6.90E-02	3.55E+02	1.61E-01	1.47E+02
7.00E-07	5.86E+07	7.00E-02	3.49E+02	1.62E-01	1.46E+02
8.00E-07	5.10E+07	7.10E-02	3.46E+02	1.63E-01	1.45E+02
9.00E-07	4.51E+07	7.20E-02	3.40E+02	1.64E-01	1.44E+02
1.00E-06	4.04E+07	7.30E-02	3.35E+02	1.65E-01	1.43E+02
5.00E-06	7.51E+06	7.40E-02	3.31E+02	1.66E-01	1.42E+02
1.00E-05	3.64E+06	7.50E-02	3.26E+02	1.67E-01	1.41E+02
2.00E-05	1.77E+06	7.60E-02	3.20E+02	1.68E-01	1.40E+02
3.00E-05	1.16E+06	7.70E-02	3.17E+02	1.69E-01	1.39E+02
4.00E-05	8.56E+05	7.80E-02	3.13E+02	1.70E-01	1.38E+02
5.00E-05	6.79E+05	7.90E-02	3.08E+02	1.71E-01	1.38E+02
6.00E-05	5.61E+05	8.00E-02	3.04E+02	1.72E-01	1.37E+02
7.00E-05	4.78E+05	8.10E-02	3.00E+02	1.73E-01	1.36E+02
8.00E-05	4.14E+05	8.20E-02	2.97E+02	1.74E-01	1.35E+02
9.00E-05	3.67E+05	8.30E-02	2.93E+02	1.75E-01	1.34E+02
1.00E-04	3.29E+05	8.40E-02	2.90E+02	1.76E-01	1.34E+02
2.00E-04	1.59E+05	8.50E-02	2.86E+02	1.77E-01	1.33E+02
3.00E-04	1.04E+05	8.60E-02	2.82E+02	1.78E-01	1.32E+02
4.00E-04	7.73E+04	8.70E-02	2.79E+02	1.79E-01	1.31E+02
5.00E-04	6.12E+04	8.80E-02	2.75E+02	1.80E-01	1.31E+02
6.00E-04	5.05E+04	8.90E-02	2.72E+02	1.81E-01	1.30E+02
7.00E-04	4.31E+04	9.00E-02	2.70E+02	1.82E-01	1.29E+02
8.00E-04	3.75E+04	9.10E-02	2.66E+02	1.83E-01	1.28E+02
9.00E-04	3.31E+04	9.20E-02	2.62E+02	1.84E-01	1.28E+02
1.00E-03	2.97E+04	9.30E-02	2.61E+02	1.85E-01	1.27E+02

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
2.00E-03	1.44E+04	9.40E-02	2.57E+02	1.86E-01	1.26E+02
3.00E-03	9.41E+03	9.50E-02	2.55E+02	1.87E-01	1.25E+02
4.00E-03	6.97E+03	9.60E-02	2.52E+02	1.88E-01	1.25E+02
5.00E-03	5.52E+03	9.70E-02	2.50E+02	1.89E-01	1.24E+02
6.00E-03	4.56E+03	9.80E-02	2.46E+02	1.90E-01	1.23E+02
7.00E-03	3.87E+03	9.90E-02	2.44E+02	1.91E-01	1.23E+02
8.00E-03	3.38E+03	1.00E-01	2.41E+02	1.92E-01	1.22E+02
9.00E-03	2.99E+03	1.01E-01	2.39E+02	1.93E-01	1.21E+02
1.00E-02	2.68E+03	1.02E-01	2.37E+02	1.94E-01	1.21E+02
1.10E-02	2.43E+03	1.03E-01	2.33E+02	1.95E-01	1.20E+02
1.20E-02	2.21E+03	1.04E-01	2.32E+02	1.96E-01	1.19E+02
1.30E-02	2.03E+03	1.05E-01	2.30E+02	1.97E-01	1.19E+02
1.40E-02	1.88E+03	1.06E-01	2.26E+02	1.98E-01	1.18E+02
1.50E-02	1.75E+03	1.07E-01	2.24E+02	1.99E-01	1.17E+02
1.60E-02	1.64E+03	1.08E-01	2.23E+02	2.00E-01	1.17E+02
1.70E-02	1.54E+03	1.09E-01	2.21E+02	2.50E-01	9.27E+01
1.80E-02	1.45E+03	1.10E-01	2.19E+02	3.00E-01	7.66E+01
1.90E-02	1.37E+03	1.11E-01	2.15E+02	3.50E-01	6.52E+01
2.00E-02	1.30E+03	1.12E-01	2.14E+02	4.00E-01	5.67E+01
2.10E-02	1.23E+03	1.13E-01	2.12E+02	4.50E-01	5.01E+01
2.20E-02	1.17E+03	1.14E-01	2.10E+02	5.00E-01	4.49E+01
2.30E-02	1.12E+03	1.15E-01	2.08E+02	5.50E-01	4.05E+01
2.40E-02	1.07E+03	1.16E-01	2.06E+02	6.00E-01	3.71E+01
2.50E-02	1.03E+03	1.17E-01	2.05E+02	6.50E-01	3.42E+01
2.60E-02	9.85E+02	1.18E-01	2.03E+02	7.00E-01	3.15E+01
2.70E-02	9.47E+02	1.19E-01	2.01E+02	7.50E-01	2.93E+01
2.80E-02	9.12E+02	1.20E-01	1.99E+02	8.00E-01	2.75E+01
2.90E-02	8.80E+02	1.21E-01	1.97E+02	8.50E-01	2.57E+01

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
3.00E-02	8.49E+02	1.22E-01	1.95E+02	9.00E-01	2.43E+01
3.10E-02	8.20E+02	1.23E-01	1.94E+02	9.50E-01	2.30E+01

2.2. Thực nghiệm đo thông lượng nơtrôn

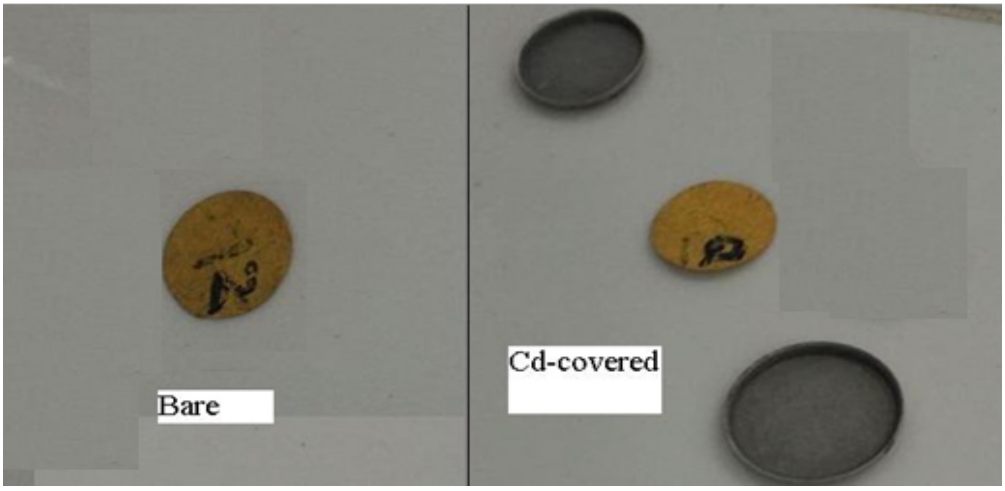
2.2.1. Chuẩn bị và kích hoạt mẫu lá dò

Các mẫu lá dò kích hoạt bằng Au đã được chuẩn bị để chiếu tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, có các thông số được liệt kê trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2. Các phản ứng hạt nhân và các số liệu hạt nhân.

Phản ứng hạt nhân	Thời gian bán rã (h)	Năng lượng (keV)	Cường độ (%)	Độ phổ biến θ (%)
$^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$	64.68	411	95.58	100

Hình ảnh hai mẫu lá dò: chiếu trần (không ọc Cadimium – Cd), và chiếu bọc Cd được thể hiện trong Hình 2.4.



Hình 2.4. Các mẫu lá dò sử dụng trong thực nghiệm

Các mẫu lá dò trên được ký hiệu như sau:

- Lá dò chiếu **trần (không bọc Cd)**: Au-N.
- Lá dò được **bọc Cd**: Au-Q.

Khối lượng của các lá dò Au-N và Au-Q được liệt kê trong Bảng 2.3

Bảng 2.3. Khối lượng các lá dò dùng để kích hoạt.

Bọc Cd	**Mẫu**	**Khối lượng (g)**
	Au-Q	0.12100
Không bọc Cd	Au-N	0.1268

Dữ liệu thời gian chiếu kích hoạt các lá dò đã sử dụng trong thực nghiệm, được liệt kê trong Bảng 2.4.

Bảng 2.4. Các dữ liệu thời gian đối với các lá dò kích hoạt

Mẫu	**Thời gian chiếu (h)**	**Thời gian rã (h)**	**Thời gian đo (h)**
Au-Q	6.6333	94.7500	0.9873
Au-N	2.4750	94.0208	0.6236

2.2.2. Đường cong hiệu suất của detector HPGe đối với các đỉnh năng lượng

Trước khi sử dụng hệ phổ kế gamma để đo mẫu đã chiếu kích hoạt, cần thực hiện việc hiệu chuẩn hệ phổ kế gamma bao gồm việc chuẩn năng lượng, chuẩn độ rộng đỉnh và chuẩn hiệu suất ghi.

Chuẩn năng lượng là tìm mối quan hệ giữa số kênh (vị trí đỉnh) và năng lượng của bức xạ gamma. Chuẩn năng lượng được tiến hành bằng cách đo phổ của một nguồn phát gamma đã biết chính xác năng lượng, sau đó so sánh vị trí kênh tại đỉnh năng lượng đo được với năng lượng của nguồn đã biết.

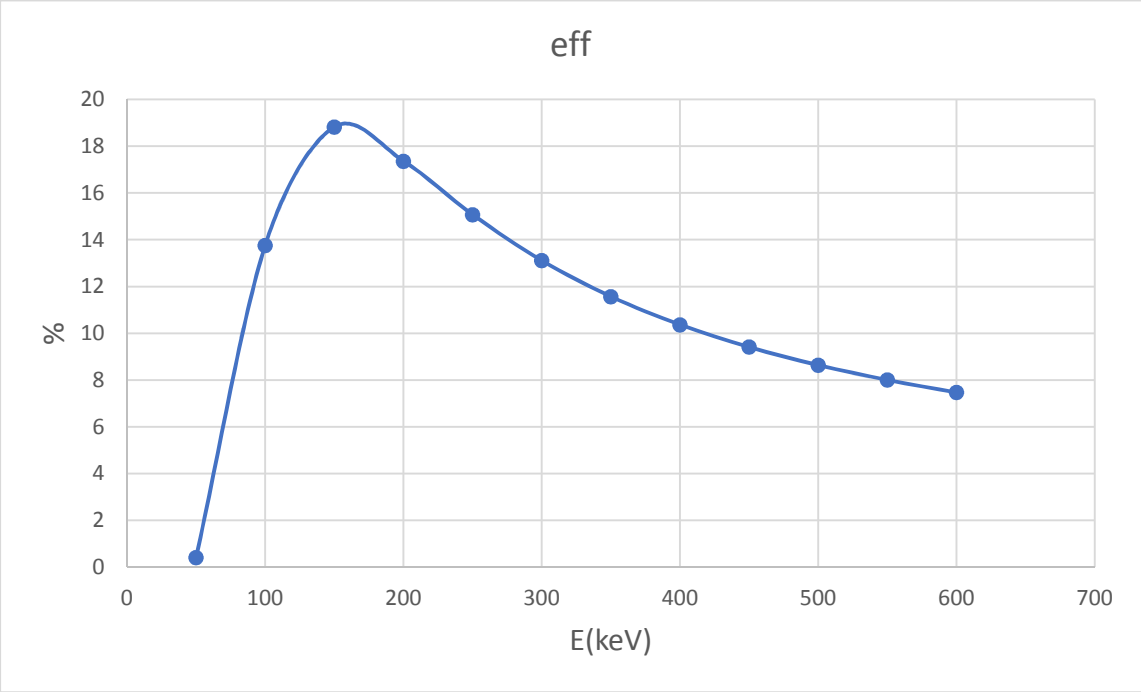
Chuẩn độ rộng đỉnh là xác định sự tương quan của độ rộng đỉnh theo năng lượng. Độ rộng đỉnh thường được biểu diễn bằng độ rộng ở nửa chiều cao của đỉnh (FWHM) là một hàm phụ thuộc năng lượng. Xác định chính xác độ rộng đỉnh để làm cơ sở cho việc xác định diện tích đỉnh và quá trình làm khớp đỉnh [1].

Chuẩn hiệu suất ghi của detector là tìm mối liên hệ giữa số đếm đỉnh mà hệ phổ kế ghi nhận được với tốc độ phát tia gamma từ nguồn phóng xạ chuẩn theo cấu hình đo thực tế.

Trong nghiên cứu này, phương trình đường cong hiệu suất ghi của detector tại vị trí đo mẫu 0 cm đến detector [7]:

$$\varepsilon_p(E\ keV) = 10\text{^}(-0.598263829248(\log(E))^6 + 10.491002417461((\log(E))^5 - 76.916463101819(\log(E))^4 + 301.544609507954(\log(E))^3 - 666.101604930987(\log(E))^2 + 784.538680154263.\log E - 382.648849757544)\ (\%) \quad (2.1)$$

Từ phương trình (2.1) ta có đồ thị biểu diễn hiệu suất ghi của detector theo năng lượng của gamma như sau :



Hình 2.5. Đồ thị hiệu suất ghi theo năng lượng tại vị trí 0 cm đến detector.

Chương 3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả mô phỏng

3.1.1. Thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt

Thông lượng trung bình của nơtrôn nhiệt và trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, đã mô phỏng bằng MCNP5 được trình bày trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Thông lượng trung bình của nơtrôn nhiệt và trên nhiệt được mô phỏng bằng MCNP5

Thông lượng nơtrôn nhiệt - ϕ_{th} ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)		**Thông lượng nơtrôn trên nhiệt - ϕ_e ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**	
Trung bình	**Sai số tương đối**	**Trung bình**	**Sai số tương đối**
1.26×10^7	0.01	1.14×10^4	0.03

Dữ liệu của các phổ nơtrôn nhiệt và trên nhiệt tại (chưa chuẩn hóa) vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt được trình bày trong các Bảng 3.2 và 3.3.

Bảng 3.2. Thông số của phổ nơtrôn nhiệt tại vị trí chiếu mẫu

Năng lượng (MeV)	**Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**	**Sai số tương đối**	**Năng lượng (MeV)**	**Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)**	**Sai số tương đối**
1.00E-11	0.00E+00	0.000	3.78E-08	5.32E-06	0.029
3.52E-10	9.70E-09	0.710	4.58E-08	4.39E-06	0.032
1.47E-09	2.06E-07	0.148	5.45E-08	3.79E-06	0.034
3.34E-09	7.59E-07	0.077	6.40E-08	3.04E-06	0.038
5.98E-09	1.71E-06	0.051	7.43E-08	2.12E-06	0.046
9.38E-09	2.76E-06	0.040	8.54E-08	1.52E-06	0.054
1.35E-08	4.45E-06	0.032	9.71E-08	1.04E-06	0.066

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối
1.85E-08	5.45E-06	0.029	1.10E-07	2.46E-07	0.136
2.42E-08	5.61E-06	0.028	1.23E-07	7.29E-08	0.249
3.06E-08	5.99E-06	0.028	1.37E-07	2.46E-08	0.427

Bảng 3.3. Thông số của phổ nơtrôn trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu

Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối	Năng lượng (MeV)	Thông lượng ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối
4.14E-07	4.46E-08	0.121	7.73E-07	2.42E-07	0.051
4.69E-07	7.57E-08	0.092	8.76E-07	2.42E-07	0.052
5.32E-07	1.96E-07	0.057	9.93E-07	2.32E-07	0.053
6.02E-07	2.75E-07	0.048	1.13E-06	1.20E-08	0.233
6.83E-07	2.42E-07	0.051	1.28E-06	2.71E-10	1.000

Có thể nhận thấy rằng, để đạt được thông tin tốt về thông số phổ nơtrôn nhiệt và trên nhiệt, việc tăng thời gian chạ máy (tăng số hạt gieo lên nhiều hơn). Tuy nhiên, với cấu hình máy tính cá nhân thực sự là vấn đề trở ngại. Vì vậy chúng em chỉ có thể gieo với số hạt bằng 10^9 hạt (1 tỷ hạt).

3.1.2. Hệ số đánh giá mô phỏng

Các thông số sử dụng để đánh giá cho quá trình mô phỏng thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, đã mô phỏng bằng MCNP5 được trình bày trong các Bảng 3.4 và 3.5.

Bảng 3.4. Các thông số đánh giá cho mô phỏng nơtrôn nhiệt

Số hạt gieo (NOH)	Thông lượng nơtrôn nhiệt		Các thông số đánh giá		
	Trung bình ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối	VOV	Slope	FOM
6.55E+07	1.27E+07	0.0374	0.0016	2.4	3.10E+00
1.31E+08	1.25E+07	0.0268	0.0008	3.1	3.00E+00
1.97E+08	1.24E+07	0.0219	0.0005	3.6	3.00E+00
2.62E+08	1.24E+07	0.019	0.0004	10	3.00E+00
3.28E+08	1.25E+07	0.0169	0.0003	10	3.00E+00
3.93E+08	1.28E+07	0.0153	0.0003	4.1	3.10E+00
4.59E+08	1.28E+07	0.0141	0.0002	10	3.10E+00
5.24E+08	1.28E+07	0.0132	0.0002	10	3.10E+00
5.90E+08	1.27E+07	0.0125	0.0002	10	3.10E+00
6.55E+08	1.26E+07	0.0119	0.0002	10	3.00E+00
7.21E+08	1.26E+07	0.0113	0.0001	10	3.10E+00
7.86E+08	1.26E+07	0.0109	0.0001	10	3.00E+00
8.52E+08	1.26E+07	0.0104	0.0001	10	3.00E+00
9.18E+08	1.26E+07	0.0101	0.0001	10	3.10E+00
9.83E+08	1.27E+07	0.0097	0.0001	10	3.10E+00
1.00E+09	1.26E+07	0.0096	0.0001	10	3.10E+00

Bảng 3.5. Các thông số đánh giá cho mô phỏng nơtrôn trên nhiệt

Số hạt gieo (NOH)	Thông lượng nơtrôn trên nhiệt		Các thông số đánh giá		
	Trung bình ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối	VOV	Slope	FOM
6.55E+07	1.21E+04	0.1189	0.0155	0	3.00E-01
1.31E+08	1.12E+04	0.0871	0.0085	0	2.80E-01

Số hạt gieo (NOH)	Thông lượng nơtrôn trên nhiệt		Các thông số đánh giá		
	Trung bình ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)	Sai số tương đối	VOV	Slope	FOM
1.97E+08	1.18E+04	0.0695	0.0054	0	3.00E-01
2.62E+08	1.13E+04	0.0612	0.0042	0	2.90E-01
3.28E+08	1.15E+04	0.0544	0.0033	0	2.90E-01
3.93E+08	1.18E+04	0.0492	0.0027	0	3.00E-01
4.59E+08	1.18E+04	0.0454	0.0023	10	3.00E-01
5.24E+08	1.17E+04	0.0426	0.002	10	3.00E-01
5.90E+08	1.16E+04	0.0404	0.0018	10	2.90E-01
6.55E+08	1.16E+04	0.0383	0.0016	10	3.00E-01
7.21E+08	1.17E+04	0.0365	0.0015	10	3.00E-01
7.86E+08	1.15E+04	0.0352	0.0014	10	2.90E-01
8.52E+08	1.12E+04	0.0342	0.0013	10	2.90E-01
9.18E+08	1.12E+04	0.0329	0.0012	10	2.90E-01
9.83E+08	1.14E+04	0.0316	0.0011	10	2.90E-01
1.00E+09	1.14E+04	0.0314	0.0011	10	2.90E-01

Sử dụng các giá trị đã trình bày trong các Bảng 3.4 và 3.5 so sánh với Bảng 1.3, có thể khẳng định rằng việc lựa chọn số hạt gieo (NOH) cho các trường hợp trên thỏa mãn yêu cầu bắt buộc của chương trình MCNP5. Điều đó thể hiện, số liệu của kết quả mô phỏng là đáng tin cậy.

Để kiểm chứng số liệu đã mô phỏng ở trên, các phép đo thực nghiệm tại CN2DR đã được tiến hành để so sánh và đánh giá kết quả giữa thực nghiệm và mô phỏng.

3.2. Kết quả thực nghiệm

Kết quả ghi nhận diện tích đỉnh và sai số tương ứng của các lá dò kích hoạt, được liệt kê trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Diện tích đỉnh và sai số diện tích đỉnh, tiết diện hiệu dụng đối với nơtrôn nhiệt, hiệu suất ghi ứng với các đỉnh năng lượng tương ứng của các lá dò bọc Cd đo bằng hệ phổ kế gamma HPGe

Mẫu	E_γ (keV)	σ_0 (b)	$\Delta\sigma_0$ (b)	ε_p (%)	$\Delta\varepsilon_p$ (%)	N_p (số đếm)	ΔN_p (số đếm)
Au-Q	411.802	98.65	0.09	10.12	0.20	51181	478

Bảng 3.7. Diện tích đỉnh và sai số diện tích đỉnh, tiết diện hiệu dụng đối với nơtrôn nhiệt, hiệu suất ghi ứng với các đỉnh năng lượng tương ứng của các lá dò trần

Mẫu	E_γ (keV)	σ_0 (b)	$\Delta\sigma_0$ (b)	ε_p (%)	$\Delta\varepsilon_p$ (%)	N_p (số đếm)	ΔN_p (số đếm)
Au-N	411.802	98.65	0.09	10.12	0.20	1009535	2135

Dựa vào dữ liệu trong các Bảng 3.6 và 3.7, áp dụng các phương trình 1.11-1.13, 1.18 và 1.19 các kết quả tính toán của hoạt độ phóng xạ, tốc độ phản ứng và sai số tương ứng, được thể hiện trong các Bảng 3.8 và 3.9.

Bảng 3.8. Hoạt độ và tốc độ phản ứng đối với lá dò bọc Cd

Mẫu	$A_{sp,e}$ (Bq)	$\Delta A_{sp,e}$ (Bq)	R_e	ΔR_e
Au-Q	4.81×10^3	44.95	1.63×10^{-17}	3.56×10^{-19}

Bảng 3.9. Hoạt độ và tốc độ phản ứng đối với lá dò trần

Mẫu	A_{sp} (Bq)	ΔA_{sp} (Bq)	R	ΔR
Au-N	3.72×10^5	787.45	1.26×10^{-15}	2.50×10^{-17}

Tương tự như vậy, áp dụng các phương trình 1.14-1.16 và 1.21, thông lượng nơtrôn nhiệt, thông lượng nơtrôn trên nhiệt, tỷ số Cadmi và các sai số tương ứng được tính toán và thể hiện trong các Bảng 3.8 và 3.9, trong đó các hệ số hiệu chỉnh được lấy bằng 1.

Bảng 3.10. Thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt

I (b)	**ΔI (b)**	**ϕ_{th} (n.cm^{-2}.s^{-1})**	**$\Delta\phi_{th}$ (n.cm^{-2}.s^{-1})**	**ϕ_e (n.cm^{-2}.s^{-1})**	**$\Delta\phi_e$ (n.cm^{-2}.s^{-1})**
1550	28	1.26×10^7	2.55×10^5	1.05×10^4	2.84×10^2

Bảng 3.11. Thông lượng nơtrôn tổng, hệ số Cadmium và sai số của thực nghiệm

ϕ (n.cm^{-2}.s^{-1})	**$\Delta\phi$ (n.cm^{-2}.s^{-1})**	**$\delta\phi$ (%)**	**Cadmium Ratio**
1.26×10^7	2.54×10^5	2.01	77.36

3.3. So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng

Kết quả so sánh thông lượng nơtrôn nhiệt và trên nhiệt giữa của quá trình thực nghiệm và mô phỏng được trình bày trong Bảng 3.12

Bảng 3.12. So sánh kết quả thông lượng nơtrôn nhiệt

Thông lượng (n.cm^{-2}.s^{-1})	**MCNP**	**Thực nghiệm**
nơtrôn nhiệt	$(1.26 \pm 0.01) \times 10^7$	$(1.26 \pm 0.03) \times 10^7$
nơtrôn trên nhiệt	$(1.14 \pm 0.04) \times 10^4$	$(1.05 \pm 0.03) \times 10^4$

Từ kết quả đã thể hiện trong Bảng 3.12, có thể thấy rằng, kết quả xác định thông lượng nơtrôn tại vị trí chiếu mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà lạt với cấu hình chuẩn trực hình trụ đường kính 3 cm, kết hợp với tổ hợp phin lọc 40 cm Si + 3 cm Bi giữa thực nghiệm và mô phỏng là tốt. Trong đó, thông lượng nơtrôn nhiệt có sự phù hợp tốt giữa thực nghiệm và mô phỏng, thông lượng nơtrôn trên nhiệt đo bằng thực nghiệm nhỏ khoảng 8 % so với giá trị mô phỏng.

Kết luận

Đề tài này đã đạt được những yêu cầu đề ra bao gồm:

- Nghiên cứu và mô phỏng tính toán thông lượng nơtrôn nhiệt và nơtrôn trên nhiệt tại vị trí đo mẫu của kênh ngang số 2 lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, với cấu hình chuẩn trực hình trụ có đường kính 3 cm và tổ hợp phin lọc 40 cm Si + 4 cm Bi.
- Xác định thông lượng nơtrôn nhiệt và nơtrôn trên nhiệt với cấu hình ở trên bằng phương pháp kích hoạt lá dò.
- Kết quả thực nghiệm và mô phỏng thông có sự phù hợp tốt, trong đó (theo thực nghiệm) thông lượng nơtrôn nhiệt là 1.26×10^{7} ($n.cm^{-2}.s^{-1}$), thông lượng nơtrôn trên nhiệt là 1.05×10^{4} ($n.cm^{-2}.s^{-1}$) và tỷ số Cadmi là 77.

Kết quả trên giúp chúng em hiểu được nhiều hơn về phương pháp kích hoạt lá dò, phương pháp kiểm chứng giữa thực nghiệm và mô phỏng. Đồng thời, thông qua đề tài nghiên cứu này chúng em đã hình dung tốt hơn cách xác định hàm lượng của nguyên tố trong mẫu bằng phương pháp phân tích kích hoạt.

Tài liệu tham khảo

[1]. Trần Tuấn Anh (2016), Xác định hiệu suất ghi của các hệ đo bức xạ, Viện Nghiên cứu hạt nhân.

[2]. Hồ Mạnh Dũng (2003), Nghiên cứu và phát triển triển phương pháp K–zero trong phân tích kích hoạt neutron lò phản ứng hạt nhân cho việc xác định đa nguyen tố, Luận án Tiến sĩ Vật lý, Trường ĐHKHTN Tp.HCM.

[3]. Pham Dang Quyet, Pham Ngoc Son, Nguyen Nhi Dien, Trinh Thi Tu Anh, Cao Dong Vu (2020), "Simulation Design of Thermal Neutron Collimators for Neutron Capture Studies at The Dalat Research Reactor", Asian Journal of Scientific Research 13(3): 214-218.

[4]. Phạm Ngọc Sơn (2015), Nghiên cứu tiết diện phản ứng bắt neutron bằng kỹ thuật phin lọc neutron, Luận án Tiến sĩ Vật lý, Hà nội.

[5]. Phạm Ngọc Sơn (2012), Phát triển dòng neutron phin lọc trên kênh ngang số 2 của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt để phục vụ nghiên cứu và đào tạo, Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ, năm 2009-2010.

[6]. Cao Đông Vũ (2009), Áp dụng phương pháp phân tích kích hoạt neutron dụng cụ (INAA) trên lò phản ứng và phương pháp xử lý thống kê đa biến trong nghiên cứu đặc trưng đa nguyên tố và xuất xứ của vật liệu khảo cổ đất nung thu thập từ một số khu di chỉ di tích ở Việt Nam, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ năm 2007-2008.

[7]. Số liệu được cung cấp bởi Trung tâm Vật lý và điện tử hạt nhân, Viện Nghiên cứu hạt nhân.