

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Phạm Hoàn Dạ Hương**

**NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH PHỔ NĂNG LƯỢNG NEUTRON CỦA  
NGUỒN CHUẨN Am-241/Be BẰNG PHƯƠNG PHÁP BONNER-  
CYLINDER**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ**

**Hà Nội – 2023**

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Phạm Hoàn Dạ Hương**

**NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH PHỔ NĂNG LƯỢNG NEUTRON CỦA  
NGUỒN CHUẨN Am-241/Be BẰNG PHƯƠNG PHÁP BONNER-  
CYLINDER**

**Chuyên ngành** : Vật lý nguyên tử và hạt nhân  
**Mã số** : 8440106

**LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:**

1. TS. Phạm Ngọc Sơn

Chữ ký:.....

2. PGS.TS. Nguyễn Văn Hùng

Chữ ký:.....

**Hà Nội – 2023**

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu dưới sự hỗ trợ của người hướng dẫn khoa học. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan nhất. Đồng thời, kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực, nếu sai tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm.

**Tác giả luận văn**

**Phạm Hoàn Dạ Hương**

## LỜI CẢM ƠN

Sau một thời gian tiếp cận phương pháp nghiên cứu và thực hiện các nội dung đã được đặt vấn đề trong đề cương đã phê duyệt, luận văn đã được hoàn thành tại Viện Nghiên cứu hạt nhân (Đà Lạt). Tôi xin trân trọng cảm ơn Ban Lãnh đạo Viện, Ban Lãnh đạo khoa Vật lý của Học viện Khoa học và Công nghệ, các anh chị em ở Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân (thuộc Viện Nghiên cứu hạt nhân) đã luôn quan tâm, tạo điều kiện, giúp đỡ tôi trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận văn.

Đặc biệt, tôi xin bày tỏ lòng kính trọng, biết ơn sâu sắc nhất tới TS. Phạm Ngọc Sơn, PGS.TS. Nguyễn Văn Hùng, những người thầy đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ tôi trong suốt thời gian nghiên cứu và thực hiện. Sự tâm huyết và động viên của hai thầy đã giúp tôi tập trung vào đúng hướng, tự tin và kiên định hơn trong nghiên cứu, hoàn thành đầy đủ các mục tiêu và nội dung của bản luận văn tốt nghiệp này. Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới gia đình, bạn bè đồng nghiệp đã luôn đồng hành, động viên, chia sẻ, hỗ trợ và tạo điều kiện tốt nhất cho tôi trong quá trình học tập, hoàn thành khóa cao học và luận văn tốt nghiệp này.

Hà Nội, ngày 10 tháng 06 năm 2023

**Phạm Hoàn Dạ Hương**

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

<b>Ký hiệu</b>	<b>Tiếng Anh</b>	<b>Tiếng Việt</b>
ADC	Analog to Digital Converter	Bộ/khối biến đổi tương tự sang số
AI	Artificial Intelligence	Phương pháp trí tuệ nhân tạo
ATND	Active Thermal Neutron Detector	Đầu dò đo neutron nhiệt chủ động
BSS	Bonner Sphere Spectrometer	Phổ kế bằng phương pháp nhiệt hóa neutron, đề xuất bởi Bonner
IAEA	International Atomic Energy Agency	Cơ quan Năng lượng nguyên tử quốc tế
MCNP	Monte Carlo N-Particle	Chương trình mô phỏng Monte Carlo với N-hạt
NCHN	Nuclear Research	Nghiên cứu hạt nhân
NNS	Nested Neutron Spectrometer	Phổ kế neutron có các lớp chất làm chậm neutron có thể xếp lồng vào nhau
PE	Polyethylene	Nhựa Polyethylen
PHITS	Particle and Heavy Ion Transport code System	Phần mềm mô phỏng vận chuyển hạt và ion nặng

## DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1: Đặc trưng của một số đồng vị phóng xạ alpha .....	9
Bảng 1.2: Các đặc trưng của nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	10
Bảng 1.3: Hệ số suy giảm neutron của một số chất làm chậm neutron .....	16
Bảng 2.1: Kích thước các lớp làm chậm PE hình trụ.....	28
Bảng 2.2: Thông số đầu dò $^3\text{He}$ .....	34
Bảng 3.1: Kết quả đo nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại khoảng cách 200 cm.....	45
Bảng 3.2: Kết quả đo nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại khoảng cách 150 cm.....	46
Bảng 3.3: Kết quả đo nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại khoảng cách 120 cm.....	46
Bảng 3.4: Kết quả đo nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại khoảng cách 100 cm.....	47
Bảng 3.5: Kết quả đo nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại khoảng cách 65 cm.....	47
Bảng 3.6: Kết quả đo nguồn $^{252}\text{Cf}$ tại khoảng cách 200 cm.....	50
Bảng 3.7: Kết quả đo nguồn $^{252}\text{Cf}$ ở khoảng cách 100 cm .....	51
Bảng 3.8: Kết quả đo nguồn $^{252}\text{Cf}$ ở khoảng cách 60 cm .....	51
Bảng 3.9: Kết quả phổ thông lượng neutron của nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	53
Bảng 3.10: Kết quả phổ thông lượng neutron của nguồn $^{252}\text{Cf}$ .....	54
Bảng 3.11: Kết quả suất liều neutron của nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ở các khoảng cách khác nhau.....	55
Bảng 3.12: Kết quả suất liều neutron của nguồn $^{252}\text{Cf}$ ở các khoảng cách khác nhau .....	55

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1: Phổ năng lượng tương đối của neutron từ nguồn đồng vị $^{252}\text{Cf}$ .....	7
Hình 1.2: Hiệu suất phát neutron theo năng lượng hạt alpha đối với Be.....	8
Hình 1.3: Phổ năng lượng tương đối của neutron từ nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	11
Hình 1.4: Cấu trúc đơn giản của một nguồn quang neutron hình cầu .....	12
Hình 1.5: Sơ đồ tán xạ neutron đàn hồi .....	13
Hình 1.6: Sơ đồ tán xạ neutron không đàn hồi .....	14
Hình 1.7: Phản ứng bắt neutron của $^{23}\text{Na}$ .....	15
Hình 1.8: Sơ đồ tán xạ đàn hồi của neutron lên hạt nhân A trong hệ phòng thí nghiệm (a) và hệ tâm quán tính (b).....	16
Hình 1.9: Sơ đồ cấu tạo của một hệ đo neutron nhanh dùng ống đếm $\text{BF}_3$ ...	22
Hình 1.10: Mô hình hệ phổ kế hình cầu BSS .....	25
Hình 1.11: Mô hình hệ phổ kế hình trụ NSS(a) và sơ đồ cấu tạo(b) .....	26
Hình 2.1: Mô hình hệ làm chậm neutron bằng PE.....	27
Hình 2.2: Các lớp làm chậm neutron có bằng vật liệu PE .....	28
Hình 2.3: Hệ gồm 15 khối trụ được lắp ghép với đầu dò $^3\text{He}$ .....	29
Hình 2.4: Các bước tạo ra xung đầu ra của đầu dò neutron $^3\text{He}$ .....	32
Hình 2.5: Phổ độ cao xung của đầu dò $^3\text{He}$ .....	32
Hình 2.6: Hình thực tế và bản vẽ chi tiết đầu dò $^3\text{He}$ .....	34
Hình 2.7: Cấu tạo và kích thước nguồn $^{252}\text{Cf}$ .....	35
Hình 2.8: Nguồn neutron $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại Viện NCHN.....	36
Hình 2.9: Mạch tiền khuếch đại .....	36
Hình 2.10: Bộ chuyển đổi tương tự sang số.....	37
Hình 2.11: Màn hình hiển thị phần mềm ghi đo phổ .....	37
Hình 2.12: Hệ phổ kế Bonner-cylinder đang hoạt động ghi đo phổ neutron nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	38
Hình 2.13: Sơ đồ ghép nối các khối điện tử của hệ phổ kế .....	38
Hình 2.14: Phổ đo thực nghiệm từ phần mềm Genie-2000 .....	39
Hình 2.15: Hàm đáp ứng của hệ phổ kế Bonner-cylinder .....	40
Hình 3.1: Đồ thị biểu diễn tốc độ đếm thực nghiệm tại các khoảng cách khác nhau từ của nguồn neutron $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	48
Hình 3.2: Phổ đo thực nghiệm với nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ở khoảng cách 65 cm với tổ hợp các lớp chất làm chậm PE1+PE2+ PE3 .....	49

Hình 3.3: Phổ đo thực nghiệm với nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ở khoảng cách 65 cm với tổ hợp các lớp chất làm chậm PE1+PE2+.....+PE12.....	49
Hình 3.4: Đồ thị biểu diễn tốc độ đếm thực nghiệm ở khoảng cách khác nhau của nguồn neutron $^{252}\text{Cf}$ .....	52
Hình 3.5: Kết quả phổ thông lượng neutron phân bố theo năng lượng của nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ tại các khoảng cách khác nhau .....	53
Hình 3.6: Kết quả phổ thông lượng neutron phân bố theo năng lượng của nguồn $^{252}\text{Cf}$ tại các khoảng cách khác nhau .....	54



## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

DANH MỤC CÁC BẢNG

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

MỤC LỤC.....	1
MỞ ĐẦU.....	3
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN LÝ THUYẾT VỀ PHƯƠNG PHÁP ĐO PHỔ NEUTRON.....	6
1.1. CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA NEUTRON .....	6
1.2. NGUỒN PHÁT BỨC XẠ NEUTRON .....	6
1.2.1. Nguồn neutron đồng vị từ phản ứng phân hạch tự phát .....	6
1.2.2. Các nguồn neutron đồng vị phóng xạ từ phản ứng ( $\alpha, n$ ) .....	8
1.2.3. Các nguồn quang neutron .....	11
1.2.4. Nguồn neutron từ máy gia tốc.....	12
1.3. TƯƠNG TÁC CỦA NEUTRON VỚI VẬT CHẤT .....	13
1.3.1. Các loại tương tác của neutron với vật chất.....	13
1.3.2. Sự suy giảm chùm neutron khi đi qua vật chất.....	15
1.3.3. Làm chậm neutron do tán xạ đàn hồi.....	16
1.4. GHI ĐO PHỔ NEUTRON.....	18
1.4.1. Ghi đo neutron nhiệt.....	19
1.4.2. Ghi đo neutron nhanh.....	22
1.4.3. Ghi đo neutron năng lượng trung bình.....	23
CHƯƠNG 2. ĐO THỰC NGHIỆM PHỔ NĂNG LƯỢNG NEUTRON BẰNG PHỔ KẾ BONNER-CYLINDER .....	27
2.1. HỆ LÀM CHẬM NEUTRON .....	27
2.2. MA TRẬN HÀM ĐÁP ỨNG VÀ CHƯƠNG TRÌNH GIẢI CUỘN.....	29
2.3. HỆ ĐO THỰC NGHIỆM .....	32
2.3.1. Đầu dò neutron $^3\text{He}$ .....	32
2.3.2. Nguồn phát neutron.....	34
2.3.3. Mạch tiền khuếch đại .....	36
2.3.4. Bộ chuyển đổi tương tự sang số.....	37
2.3.5. Phần mềm điều hành ghi đo.....	37

2.4. BỐ TRÍ HỆ ĐO THỰC NGHIỆM .....	37
2.4.1. Lắp đặt hệ thống đo.....	37
2.4.2. Đo phổ thực nghiệm.....	39
2.4.3. Chuẩn bị file số liệu hàm đáp ứng .....	40
2.4.4. Chuẩn bị Input-file số liệu thực nghiệm tốc độ đếm .....	43
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN .....	45
3.1. KẾT QUẢ ĐO THỰC NGHIỆM .....	45
3.1.1. Kết quả đo đối với nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	45
3.1.2. Kết quả đo đối với nguồn $^{252}\text{Cf}$ .....	49
3.2. KẾT QUẢ XÁC ĐỊNH PHÂN BỐ PHỔ THÔNG LƯỢNG NEUTRON THEO NĂNG LƯỢNG .....	52
3.2.1. Kết quả xác định phổ năng lượng nguồn neutron $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .....	52
3.2.2. Kết quả xác định phổ năng lượng neutron từ nguồn chuẩn $^{252}\text{Cf}$ . 53	
3.3. KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ SUẤT LIỀU NEUTRON.....	54
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	56
1. KẾT LUẬN.....	56
2. KIẾN NGHỊ .....	56
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	58

## MỞ ĐẦU

Khoa học và công nghệ hạt nhân ngày càng có nhiều ứng dụng sâu rộng và thiết thực trong nhiều lĩnh vực kinh tế - xã hội, trong đó một số điển hình có thể kể đến như: năng lượng nguyên tử, y học hạt nhân, quan trắc phóng xạ môi trường, công nghệ chiếu xạ nông sản xuất khẩu, đột biến tạo giống cây trồng, công nghệ xử lý nước thải bằng bức xạ, ứng dụng công nghệ bức xạ trong sản xuất công nghiệp và nông nghiệp,... Ngoài các loại bức xạ như tia X, gamma, electron và proton thì bức xạ neutron cũng có vai trò quan trọng trong các lĩnh vực thực tiễn nêu trên, không những có nhiều ứng dụng thiết thực vào thực tiễn mà còn được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu khoa học cơ bản và đào tạo chuyên ngành vật lý nguyên tử và hạt nhân và các hướng nghiên cứu khác liên quan. Do đó, các nghiên cứu về phát triển phương pháp ghi đo và định liều bức xạ neutron luôn có tính cần thiết cao, nhằm đáp ứng yêu cầu ngày càng cao trong tiến trình phát triển kinh tế - xã hội cả ở trong nước và quốc tế. Những hoạt động nghiên cứu chuyên sâu về tương tác của neutron với vật chất, kỹ thuật nhận diện và xử lý xung tín hiệu điện tử hạt nhân, các thuật toán và chương trình xử lý số liệu phổ năng lượng luôn là một trong những vấn đề có tính cấp thiết cao thuộc chuyên ngành nguyên tử và hạt nhân. Thực tế cho thấy rằng cần có năng lực ngày cao hơn về việc phát triển các phương tiện thiết bị, kỹ thuật, phương pháp hiện đại ứng dụng trong đo lường bức xạ neutron cũng như các loại bức xạ khác với khả năng về độ nhạy, độ phân giải, hiệu suất ghi và chất lượng xử lý số liệu có độ chính xác và chất lượng cao.

Các nguồn bức xạ neutron trong thực tế thường là các nguồn đồng vị phát neutron, chùm neutron từ lò phản ứng hoặc từ máy gia tốc. Các nguồn neutron khác nhau có thông lượng, phổ năng lượng và trường liều bức xạ khác nhau, cho nên các loại nguồn neutron này cũng có vai trò, chức năng và phạm vi sử dụng khác nhau. Do đó, các thông số đặc trưng của mỗi nguồn neutron như hoạt độ, phổ năng lượng, suất liều neutron, phân bố liều bức xạ cần phải được xác định với độ chính xác cao nhất có thể.

Tại các cơ sở có sử dụng bức xạ neutron đều cần thiết trang bị liều kế neutron theo quy định hiện hành về an toàn bức xạ, thông thường thì các loại liều kế loại nhiệt phát quang (TLD), quang phát quang (OSLD) hoặc loại

Abeldo được sử dụng. Tuy nhiên các loại liều kế này thông thường chỉ có độ nhạy tốt với neutron năng lượng thấp (neutron nhiệt) vì có hàm đáp ứng tỉ lệ với nghịch đảo năng lượng neutron, và cần thiết phải được chuẩn hóa bởi các thiết bị ghi đo độc lập có độ chính xác cao. Để đạt được phép đo liều neutron có độ chính xác cao, các máy đo liều neutron cần được sử dụng. Trong đó, một trong các phương pháp là xác định phổ năng lượng neutron và một thủ tục xử lý số liệu cần được thực hiện để xác định số liệu tuyệt đối về phân bố phổ năng lượng neutron tại vị trí thực nghiệm và từ số liệu này, giá trị tương đương liều neutron sẽ được xác định thông qua một bảng số quy chuẩn do Ủy ban An toàn và bảo vệ bức xạ quốc tế ICRP ban hành [1].

Như vậy, phép đo phổ năng lượng neutron có vai trò quyết định trong phép đo chính xác liều neutron. Một trong những phương pháp đo phổ năng lượng neutron hiệu quả là sử dụng các quả cầu Bonner (Bonner-Sphere) làm chậm có đường kính khác nhau làm bằng vật liệu PE (Polyethylene) và sử dụng một đầu dò có độ nhạy cao với neutron nhiệt như ống đếm  $^3\text{He}$ ,  $\text{BF}_3$  hoặc ống đếm nhấp nháy loại  $^6\text{Li}$ -plastic. Phương pháp này có nhiều ưu điểm như đo được phổ neutron với dải năng lượng rộng (từ năng lượng nhiệt tới vài chục MeV, thậm chí có thể lên đến hơn 2 GeV) và nguyên tắc vận hành đơn giản. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là các quả cầu Bonner có khối lượng tương đối nặng, trong quá trình đo phải tháo lắp ống đếm nhiều lần (thường phải thực hiện một loạt phép đo phổ neutron đối với lần lượt từng quả cầu Bonner với đường kính khác nhau một cách riêng biệt). Hơn nữa các quả cầu Bonner là phải mua ở nước ngoài hoặc chế tạo với chi phí cao. Hiện nay, trong nước chỉ có một hệ đo như vậy được lắp đặt tại Phòng thí nghiệm chuẩn liều bức xạ, thuộc Viện Khoa học kỹ thuật hạt nhân (Hà Nội).

Hiện nay, Viện Nghiên cứu hạt nhân (Đà Lạt) đang nghiên cứu thiết kế và chế tạo một hệ làm chậm neutron mới bằng vật liệu PE, có dạng những hình trụ được xếp lồng vào nhau để thiết lập một hệ đo phổ neutron tương tự phương pháp Bonner-sphere. Hệ phổ kế mới này còn được gọi là hệ phổ kế Bonner-cylinder đã được lắp đặt hoàn thành và sẵn sàng đưa vào sử dụng cho việc đo phổ năng lượng trong khoảng từ 1 MeV đến 13 MeV và đánh giá liều neutron đối với các nguồn đồng vị phát bức xạ neutron tại Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt. Trên cơ sở nghiên cứu tài liệu, thiết bị phổ kế, các ưu điểm và giới hạn của các phương pháp ghi đo phổ neutron khác nhau, hệ phổ kế

Bonner-cylinder nêu trên và phương pháp giải cuộn số liệu (unfolding) được lựa chọn để giải quyết vấn đề đặt ra của Luận văn này với mục tiêu là nghiên cứu xác định thực nghiệm phổ năng lượng neutron của nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$  và tính toán suất liều neutron tương đương đối với 2 nguồn neutron đồng vị này.

Về bố cục, ngoài các phần mở đầu, kết luận, kiến nghị và tài liệu tham khảo, luận văn được trình bày với ba chương chính như sau: Chương 1 trình bày tổng quan lý thuyết về phương pháp đo phổ neutron; Chương 2 trình bày phương pháp Bonner-cylinder ghi đo phổ neutron và phương pháp giải cuộn số liệu; Chương 3 trình bày kết quả nghiên cứu và thảo luận.

## **CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN LÝ THUYẾT VỀ PHƯƠNG PHÁP ĐO PHỔ NEUTRON**

### **1.1. CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA NEUTRON**

Neutron có các thông số cơ bản như sau: khối lượng  $m_n = 1,008662 \text{ u} = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ; điện tích  $q_n = 0$  (thực tế có giá trị bằng  $-0,4 \cdot 10^{-21} \text{ e}$ ); thời gian sống ở trạng thái tự do  $\tau = 886 \text{ s}$ ; spin  $s_n = 1/2$ ; mômen từ  $\mu_n = -1,913 \mu_N$ .

Thông thường, neutron được phân loại theo giá trị động năng  $E_n$  như sau [2]:

Neutron siêu lạnh:  $E_n < 2 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$ ;

Neutron rất lạnh:  $2 \cdot 10^{-7} \text{ eV} \leq E_n \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$ ;

Neutron lạnh:  $5 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \leq E_n \leq 0,001 \text{ eV}$ ;

Neutron nhiệt:  $0,001 \text{ eV} < E_n < 0,55 \text{ eV}$ ;

Neutron trên nhiệt:  $0,55 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ keV}$ ;

Neutron nhanh:  $E_n > 0,1 \text{ MeV}$ .

Neutron là hạt trung hòa về điện nên không có tương tác coulomb với điện tích trong hạt nhân và các electron trong lớp vỏ nguyên tử, do đó bức xạ neutron có khả năng xuyên sâu trong môi trường vật chất cao hơn so với các loại bức xạ ion hóa khác. Ở điều kiện nhiệt độ bình thường, khi neutron có năng lượng cao hơn neutron nhiệt sẽ tương tác tán xạ đàn hồi với các hạt nhân nguyên tử trong môi trường vật chất, kết quả mất năng lượng qua mỗi lần va chạm cho đến khi đạt đến neutron nhiệt và tuân theo phân bố Maxwell-Boltzmann với đỉnh cực đại tại năng lượng  $E_n = 0,0253 \text{ eV}$ .

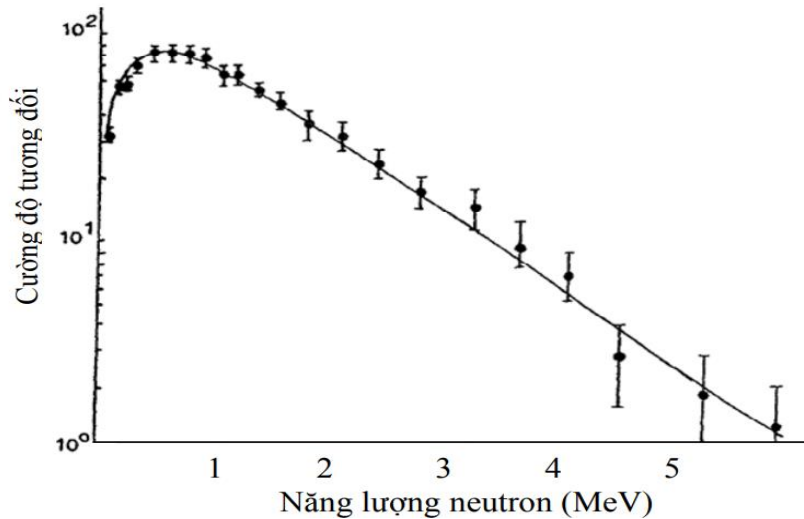
### **1.2. NGUỒN PHÁT BỨC XẠ NEUTRON**

Các nguồn phát bức xạ neutron khác nhau có thể được phân biệt theo cách mà neutron được tạo thành. Các loại nguồn neutron được sử dụng phổ biến có thể kể đến bao gồm: nguồn neutron đồng vị: được tạo thành trên cơ sở phản ứng phân hạch hạt nhân tự phát hoặc phản ứng  $(\alpha, n)$ ; nguồn neutron từ máy gia tốc: được tạo thành trên cơ sở tương tác của photon hoặc hạt mang điện đã được gia tốc đến năng lượng cao với một bia mẫu hạt nhân thích hợp. Các phản ứng tạo neutron có thể là  $(\gamma, n)$ ,  $(d, n)$ ,  $(p, n)$ ; nguồn neutron trong lò phản ứng: được hình thành trên cơ sở phản ứng phân hạch hạt nhân  $(n, f)$  [3].

#### **1.2.1. Nguồn neutron đồng vị từ phản ứng phân hạch tự phát**

Phản ứng phân hạch tự phát xảy ra đối với một hạt nhân nặng không bền. Khi đó hạt nhân tự phân rã thành hai hạt nhân khác có số khối nhỏ hơn,

đồng thời phát ra tức thời một hoặc một số hạt neutron nhanh. Ngoài ra, những sản phẩm khác của quá trình phân hạch có thể phát ra các tia beta, gamma, alpha. Vì vậy, khi sử dụng các nguồn neutron này, thì đồng vị phóng xạ neutron phải được bao bọc kín trong một lớp vỏ bọc đủ dày sao cho chỉ có các neutron nhanh và tia gamma có thể thoát ra khỏi nguồn.



Hình 1.1: Phổ năng lượng tương đối của neutron từ nguồn đồng vị  $^{252}\text{Cf}$ [3]

Nguồn neutron từ đồng vị phân hạch tự phát phổ biến nhất là Californium ( $^{252}\text{Cf}$ ). Đồng vị  $^{252}\text{Cf}$  có chu kỳ bán rã 2,65 năm, đủ dài để thuận tiện trong sử dụng, và là đồng vị được sản xuất nhiều nhất trong tất cả các chất có hoạt tính phóng xạ neutron cao. Cơ chế phân rã chủ yếu của  $^{252}\text{Cf}$  là phân rã alpha, trong đó tốc độ phát alpha gấp khoảng 32 lần tốc độ phân hạch tự phát. Hiệu suất phát neutron là 0,116 n/s/Bq hay là  $2,30 \cdot 10^6$  n/s/ $\mu\text{g}$ . So với các nguồn neutron khác thì nguồn  $^{252}\text{Cf}$  chứa lượng chất phóng xạ nhỏ, thường là cỡ vài  $\mu\text{g}$ , và do vậy có thể sản xuất nguồn với kích thước rất nhỏ, kích thước này hầu như do lớp bao bọc bên ngoài quyết định. Phổ năng lượng tương đối của neutron từ nguồn  $^{252}\text{Cf}$  được biểu thị trên Hình 1.1, có đỉnh cực đại phân bố trong khoảng từ 0,5 MeV đến 1 MeV. Tuy nhiên, hiệu suất phát neutron có thể mở rộng đến 10 MeV. Số phân rã phụ thuộc năng lượng được xác định theo công thức:

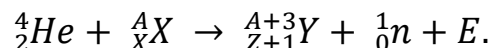
$$\frac{dN}{dE} = \sqrt{E} \cdot e^{-E/T}. \quad (1.1)$$

Đối với phổ phân hạch tự phát của  $^{252}\text{Cf}$ , hằng số T trong công thức (1.1) có giá trị 1,3 MeV. Trong luận văn này, có sử dụng hệ phổ kế Bonner-

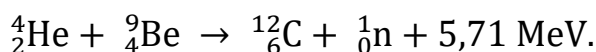
cylinder để đo thực nghiệm xác định phổ năng lượng tuyệt đối và suất liều tương đương của nguồn phân hạch  $^{252}\text{Cf}$  tại Viện NCHN.

### 1.2.2. Các nguồn neutron đồng vị phóng xạ từ phản ứng ( $\alpha, n$ )

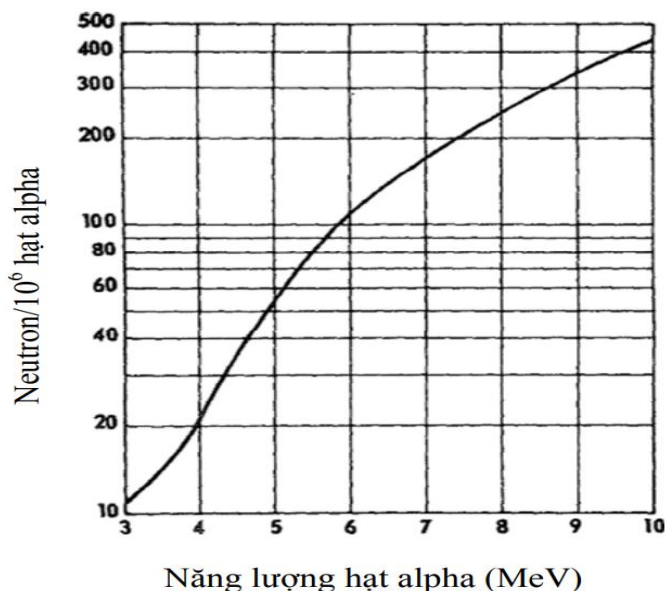
Cơ chế của phản ứng ( $\alpha, n$ ) là :



Do các hạt alpha có thể phát ra từ phân rã trực tiếp của nhiều đồng vị phóng xạ phổ biến như  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  nên có thể sản xuất nguồn neutron loại nhỏ bằng cách pha trộn đồng vị phát alpha với vật liệu bia thích hợp. Một vài chất dùng làm bia có thể dẫn đến phản ứng ( $\alpha, n$ ), tuy nhiên hiệu suất phát neutron lớn nhất thu được khi sử dụng bia Be với neutron được sinh ra thông qua phản ứng:



Neutron phát ra từ phản ứng này khi chùm tia alpha tương tác với hạt nhân bia Be đủ dày so với quãng chạy của neutron được biểu thị trên Hình 1.2. Hầu hết hạt alpha dừng lại trong bia, chỉ có một tỉ lệ 1/104 hạt là phản ứng với hạt nhân Be. Hiệu suất phát neutron từ một hỗn hợp trộn đều của chất phát alpha và Be gần như là giống nhau, miễn là chất phát hạt alpha được phân bố đồng đều trong thể tích bia Be với hàm lượng tương đối nhỏ.



Hình 1.2: Hiệu suất phát neutron theo năng lượng hạt alpha đối với Be[3]

#### 1.2.2.1. Nguồn neutron đồng vị $^{226}\text{Ra}/\text{Be}$

Cơ chế phát neutron: Hạt nhân  $^{238}\text{U}$  trong tự nhiên phân rã tạo thành hạt  $^{226}\text{Ra}$ . Cứ 1g  $^{226}\text{Ra}$  có  $3,7 \cdot 10^{10}$  phân rã/s. Cứ 1 phân rã sẽ phát ra 1 hạt  $\alpha$  có



năng lượng cao  $E_{\alpha 1} = 4,79 \text{ MeV}$  (94%) và  $E_{\alpha 2} = 4,59 \text{ MeV}$  (6%). Ngoài  $^{226}\text{Ra}$  còn có 4 hạt nhân con khác cũng phát hạt  $\alpha$  với năng lượng cao (từ 5,5 đến 7,7 MeV) làm tăng độ phóng xạ của  $^{226}\text{Ra}$ . Các đồng vị này đều góp phần vào việc sinh neutron, được trình bày ở Bảng 1.1.

Bảng 1.1: Đặc trưng của một số đồng vị phóng xạ alpha[3]

Đồng vị phóng xạ	Năng lượng hạt $\alpha$ (MeV)	Chu kỳ bán rã	Phần đóng góp tạo ra neutron (%)
$^{226}\text{Ra}$	4,791	1620 năm	5,2
$^{222}\text{Rn}$	5,486	3,83 ngày	11,1
$^{218}\text{Po}$	5,998	3,05 phút	18,1
$^{214}\text{Po}$	7,680	$1,5 \cdot 10^{-4}$ giây	56,5
$^{210}\text{Po}$	5,298	138,3 giây	9,1

Các đặc điểm của loại nguồn này là nguồn neutron phát ra có cường độ cao, đẳng hướng. Mặc khác chu kỳ bán rã của  $^{226}\text{Ra}$  lớn ( $T_{1/2} = 1.620$  năm) nên nguồn neutron này hầu như không thay đổi hoạt độ theo thời gian. Vì thế nguồn  $^{226}\text{Ra}/\text{Be}$  thường được dùng làm nguồn chuẩn. Tuy nhiên nó có nhược điểm lớn là phát bức xạ  $\gamma$  kèm theo khá mạnh nên khó che chắn bảo vệ, các tia gamma này lại gây ra các phản ứng thứ cấp sinh thêm neutron làm phổ neutron phân bố liên tục và mở rộng, năng lượng cực đại của neutron có thể đạt đến 14 MeV. Số neutron có năng lượng 4 MeV chiếm nhiều nhất, năng lượng trung bình của neutron là 5 MeV, khoảng năng lượng có cường độ mạnh nhất là từ 3 MeV đến 7 MeV.

Tia  $\alpha$  có năng lượng  $E_{\alpha} = 5 \text{ MeV}$  khối lượng riêng của nguồn  $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$  có quãng chạy của hạt alpha là  $37 \mu\text{m}$ ,  $1\text{g } ^{226}\text{Ra}$  sinh ra nguồn neutron có cường độ  $1,5 \cdot 10^7 \text{ n/s}$ .

#### 1.2.2.2. Nguồn neutron đồng vị $^{210}\text{Po}/\text{Be}$

Hạt nhân  $^{210}\text{Po}$  phát ra hạt  $\alpha$  với năng lượng  $E_{\alpha} = 5,298 \text{ MeV}$ , chu kỳ bán rã 138,5 ngày và Hạt nhân  $^{210}\text{Po}$  được tạo từ phản ứng:



Các đặc điểm:  $^{210}\text{Po}$  không phát bức xạ  $\beta$  và  $\gamma$ . Vì vậy nguồn  $^{210}\text{Po}/\text{Be}$  có ưu điểm lớn là không có phong  $\gamma$  kèm theo, rất tiện cho việc che chắn bảo vệ. Phổ neutron liên tục từ 0 đến 11 MeV, năng lượng trung bình  $E_n = 4 \text{ MeV}$ .

Hiệu suất: Một lượng phóng xạ  $^{210}\text{Po}$  có hoạt độ phóng xạ là 1Ci cho nguồn neutron có cường độ  $2,5 \cdot 10^6$  n/s.

Nhược điểm của nguồn này là thời gian sống ngắn.

### 1.2.2.3. Nguồn neutron đồng vị $^{239}\text{Pu}/\text{Be}$

Hạt nhân  $^{239}\text{Pu}$  phát ra các hạt  $\alpha$  có năng lượng sau:  $E_{\alpha 1} = 5,15$  MeV,  $E_{\alpha 2} = 5,13$  MeV,  $E_{\alpha 3} = 5,10$  MeV với chu kỳ bán rã 24.360 năm.

Các đặc điểm:  $^{239}\text{Pu}$  phát kèm theo bức xạ  $\gamma$  mềm, phổ năng lượng liên tục, cứ 1 gam  $^{239}\text{Pu}$  cho nguồn neutron có cường độ  $8,5 \cdot 10^4$  n/s.

Nguồn  $^{239}\text{Pu}/\text{Be}$  được sử dụng rộng rãi nhất trong các nguồn neutron đồng vị ( $\alpha, n$ ), tuy nhiên để có hoạt độ phóng xạ 1 Ci thì cần phải có khoảng 16 g chất  $^{239}\text{Pu}$ , nên nguồn này thường có kích thước lớn khoảng vài centimet, khó che chắn và cường độ bị giới hạn ở khoảng  $10^7$  n/s. Mặt khác khi nguồn nằm trong trường neutron thì cường độ nguồn neutron bị thay đổi do  $^{239}\text{Pu}$  bị phân hạch.

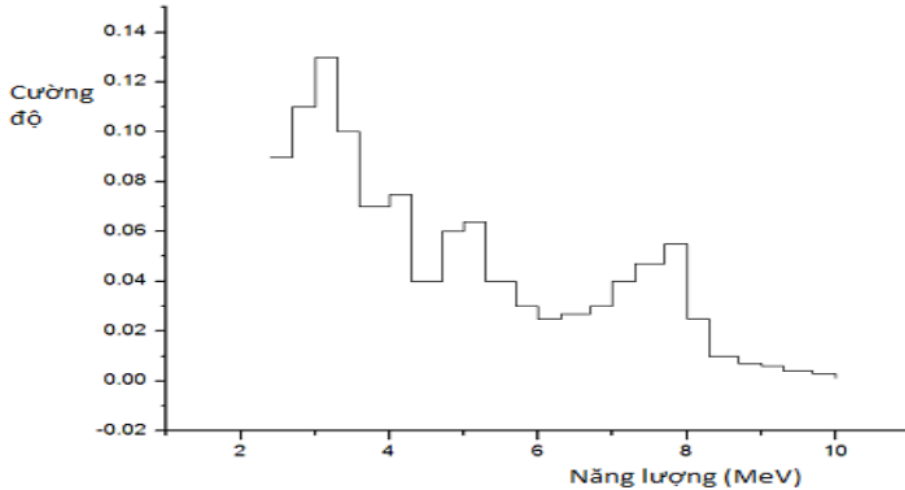
Để tăng hiệu suất phát neutron mà không tăng kích thước vật lý của nguồn thì cần phải thay thế chất phát alpha có hoạt độ riêng cao hơn. Do đó, người ta có thể sử dụng nguồn kết hợp gồm  $^{241}\text{Am}$  có chu kỳ bán rã khoảng 433 năm và  $^{238}\text{Pu}$  có chu kỳ bán rã khoảng 87,4 năm để có hiệu suất phát neutron lớn.

### 1.2.2.4. Nguồn neutron đồng vị $^{241}\text{Am}/\text{Be}$

Hạt nhân  $^{241}\text{Am}$  có chu kỳ bán rã 470 năm, phát hạt  $\alpha$  với năng lượng  $E_{\alpha} = 5,4$  MeV, sau đó phát  $\gamma$  có năng lượng trong khoảng 40 đến 60 keV. Phổ năng lượng neutron của nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  được cho ở Hình 1.3. Runnals và Boucher đã điều chế hai hợp chất Am-Be theo hai tỉ số nguyên tử  $\frac{\text{Be}}{\text{Am}}$  và tìm thấy các đặc trưng tương ứng ở Bảng 1.2 [4].

Bảng 1.2. Các đặc trưng của nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$

Đặc trưng bức xạ hạt $\alpha$ và n	Tỷ lệ pha trộn Be:Am	
	236 : 1	14 : 1
Hạt $\alpha$ phát trong mỗi giây	$2,97 \cdot 10^9$	$3,24 \cdot 10^9$
Hiệu suất phát neutron (n/s)	$2,13 \cdot 10^5$	$1,57 \cdot 10^5$
Số neutron phát ra trên $10^6$ hạt $\alpha$	71,7	48,5

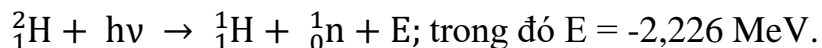
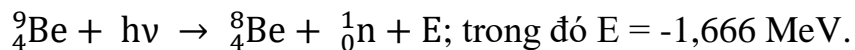


Hình 1.3: Phổ năng lượng tương đối của neutron từ nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ [4]

Trong luận văn này có sử dụng hệ phổ kế Bonner-cylinder để đo thực nghiệm xác định phổ năng lượng tuyệt đối và suất liều tương đương của nguồn đồng vị  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại Viện NCHN.

### 1.2.3. Các nguồn quang neutron

Các nguồn quang neutron được tạo thành dựa trên việc cung cấp năng lượng kích thích cao cho hạt nhân bia bằng cách hấp thụ bức xạ gamma và bức xạ một neutron tự do. Chỉ có hai hạt nhân bia là  $^9\text{Be}$  và  $^2\text{H}$  là có tầm quan trọng thực tế đối với nguồn quang neutron. Những phản ứng tương ứng có thể được viết như sau:



Bức xạ gamma có năng lượng cần thiết ít nhất phải bằng  $-E$  để phản ứng có thể xảy ra, nên chỉ những tia gamma năng lượng tương đối cao mới có thể được áp dụng. Đối với năng lượng gamma vượt qua giá trị nhỏ nhất này, năng lượng neutron sinh ra tương ứng có thể được tính toán theo công thức:

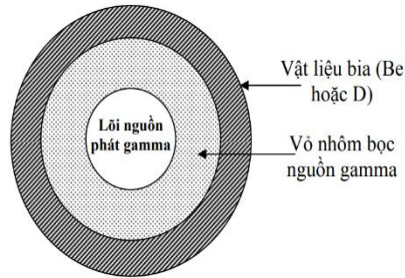
$$E_n(\theta) = \frac{M(E_\gamma + E)}{m + M} + \frac{E_\gamma [(2mM)(m + M)(E_\gamma + E)]^{1/2}}{(m + M)^2} \cos\theta; \quad (1.2)$$

trong đó:  $\theta$  là góc giữa bức xạ gamma và hướng của neutron;  $E_\gamma$  là năng lượng của gamma (MeV);  $m$  là khối lượng của hạt nhân giật lùi  $\times c^2$ ; và  $M$  là khối lượng của neutron  $\times c^2$ .

Theo công thức 1.2 khi góc  $\theta$  biến đổi từ 0 đến  $\pi$  có thể làm mở rộng phổ năng lượng của neutron thêm vài phần trăm. Với các nguồn có kích thước

lớn, phổ cũng bị suy biến ở mức độ nhất định do xảy ra tán xạ của một số neutron trong nguồn trước khi thoát ra ngoài.

Ưu điểm của các nguồn quang neutron là nếu tia gamma đơn năng thì neutron sinh ra cũng gần như đơn năng.

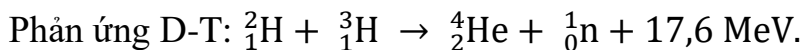
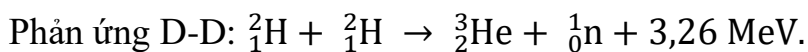


Hình 1.4: Cấu trúc đơn giản của một nguồn quang neutron hình cầu[4]

Nhược điểm của nguồn quang neutron là hoạt độ gamma sử dụng phải rất lớn để tạo ra nguồn neutron có cường độ cần thiết. Với loại nguồn như Hình 1.4, chỉ có khoảng  $1/10^5$  tia gamma xảy ra tương tác để sinh ra một neutron, do vậy neutron thường xuất hiện trên phông bức xạ gamma rất lớn. Một số hạt nhân như  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{140}\text{La}$  và  $^{24}\text{Na}$  là một số chất phát tia gamma được sử dụng. Đối với những nguồn này, thời gian bán rã của chất phát tia gamma phải đủ ngắn để có thể tái kích hoạt lại chúng trong lò phản ứng hạt nhân giữa các lần sử dụng.

#### 1.2.4. Nguồn neutron từ máy gia tốc

Hai trong các phản ứng phổ biến nhất được sử dụng để sinh ra neutron là [2]:



Vì rào thế Coulomb giữa hạt nhân deuteri và hạt nhân bia nhẹ là tương đối nhỏ nên hạt deuteri không cần thiết phải gia tốc đến năng lượng rất cao để có thể tạo ra hiệu suất phát neutron lớn. Những phản ứng này được sử dụng rất rộng rãi trong các nguồn phát neutron, trong đó các ion deuteri được gia tốc bởi điện thế cỡ 100 - 300 kV. Mặt khác năng lượng hạt tới nhỏ so với giá trị E của phản ứng, nên tất cả các neutron sinh ra đều có năng lượng gần bằng nhau (gần 3 MeV đối với phản ứng D-D và 14 MeV đối với phản ứng D-T). Chùm deuteri 1 mA sẽ sinh ra khoảng  $10^9$  n/s trên bia deuteri dày, và khoảng  $10^{11}$  n/s trên bia triti.

### 1.3. TƯƠNG TÁC CỦA NEUTRON VỚI VẬT CHẤT

#### 1.3.1. Các loại tương tác của neutron với vật chất

Các quá trình tương tác chủ yếu của neutron với vật chất là: Tán xạ đàn hồi, tán xạ không đàn hồi và phản ứng bắt neutron [4].

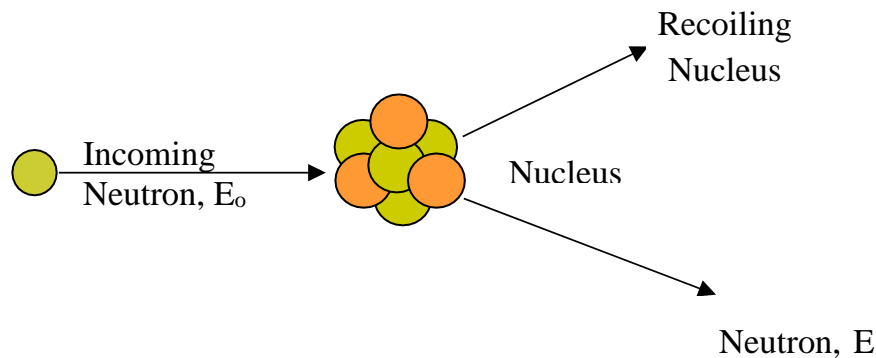
##### 1.3.1.1. Tán xạ đàn hồi

Tán xạ đàn hồi là tương tác hạt nhân không có sự phân bố lại các nucleon giữa các hạt tham gia tương tác và không làm thay đổi trạng thái nội tại của chúng, ký hiệu phản ứng là  $(n, n): a + A \rightarrow A + a$

Sau tương tác hạt nhân A vẫn ở trạng thái cơ bản chỉ có hạt tới a mất một phần động năng của mình do nó truyền cho hạt nhân giạt lùi.

Khi neutron va chạm với hạt nhân nguyên tử, neutron sẽ bị lệch phương và mất một lượng năng lượng  $dE$ . Năng lượng  $dE$  được truyền cho hạt nhân giạt lùi.

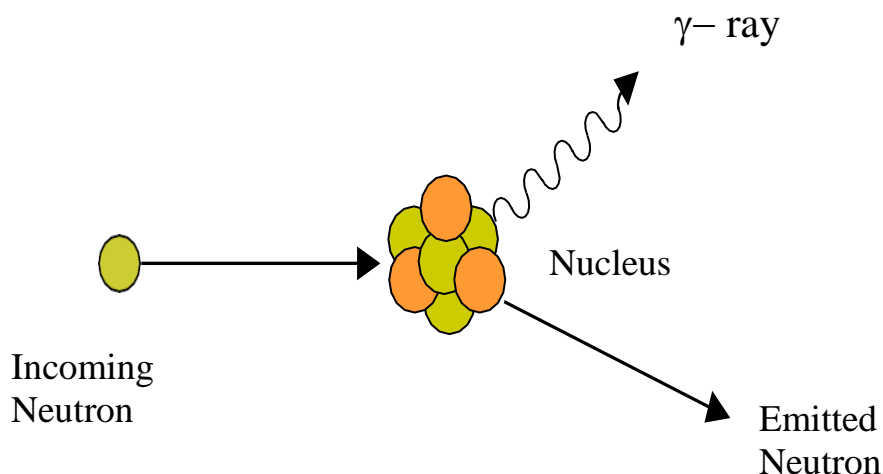
Tán xạ đàn hồi có hiệu quả cao đối với việc làm chậm neutron trong các vật liệu nhẹ, đặc biệt là hydrogen. Phổ năng lượng neutron sẽ thay đổi một cách đáng kể khi xảy ra tương tác tán xạ này. Sau quá trình làm chậm, neutron có thể bị hấp thụ qua phản ứng bắt neutron hoặc phân rã thành proton và một hạt beta. Cơ chế của tán xạ đàn hồi được biểu diễn ở Hình 1.5.



Hình 1.5: Sơ đồ tán xạ neutron đàn hồi[4]

##### 1.3.1.2. Tán xạ không đàn hồi

Tán xạ không đàn hồi là tương tác hạt nhân không dẫn tới sự thay đổi thành phần của các hạt tham gia tương tác mà chỉ làm thay đổi trạng thái nội tại của chúng (spin, moment động lượng...phân bố lại nucleon), ký hiệu phản ứng là  $(n, n'): a + A \rightarrow A^* + a^*$



Hình 1.6: Sơ đồ tán xạ neutron không đàn hồi[4]

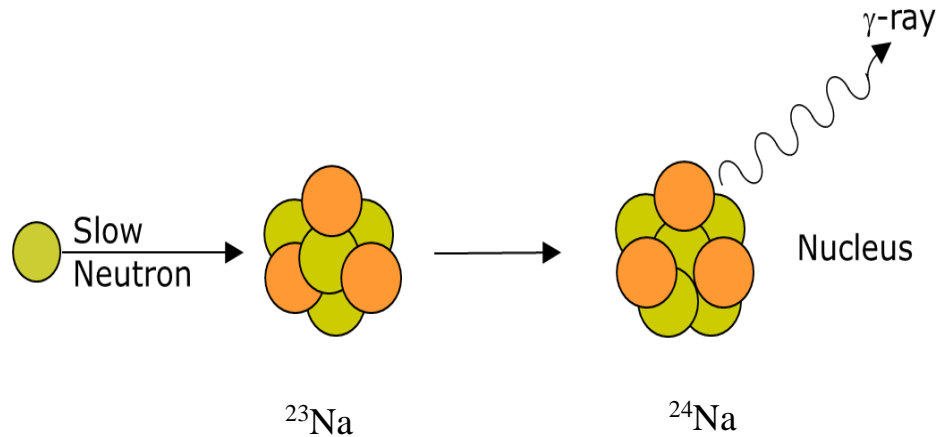
Trong tán xạ không đàn hồi, các neutron có năng lượng dưới 0,5 MeV tương tác với hạt nhân môi trường. Trong quá trình này, neutron truyền năng lượng cho hạt nhân và hạt nhân ở trạng thái kích thích. Khi trở về trạng thái cơ bản, hạt nhân phát ra bức xạ gamma. Tán xạ không đàn hồi của neutron chủ yếu diễn ra đối với các hạt nhân nặng. Cơ chế của tán xạ không đàn hồi được biểu diễn ở Hình 1.6.

### 1.3.1.3. Phản ứng bắt neutron

Đặc điểm của quá trình bắt neutron là số khối của hạt nhân tăng lên một đơn vị và hạt nhân sẽ ở trạng thái kích thích. Các hạt nhân bị kích thích khi trở về trạng thái cơ bản có thể phát ra các hạt mang điện và bức xạ gamma. Hình 1.7 mô tả quá trình bắt neutron của hạt nhân  $^{23}\text{Na}$ .

Một phản ứng bắt neutron quan trọng là phản ứng  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ . Điểm quan trọng của phản ứng này là tiết diện phản ứng lớn và sản phẩm phóng xạ chủ yếu của phản ứng là hạt  $\alpha$  rất dễ bị hấp thụ trong vật liệu. Tuy nhiên, hầu hết phản ứng bắt neutron đều dẫn đến sự phát bức xạ gamma, ví dụ phản ứng  $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ . Tia gamma trong phản ứng này có năng lượng 1098,6 keV và 1291,5 keV. Xác suất của những quá trình trên là khác nhau và phụ thuộc vào năng lượng của neutron và bản chất của môi trường tương tác. Các hạt nhân bắt neutron đều trở thành hạt nhân phóng xạ.

Neutron nhiệt và neutron trên nhiệt tương tác với vật chất chủ yếu qua phản ứng bắt neutron. Để che chắn neutron nhiệt ta dùng các vật liệu có tiết diện hấp thụ neutron lớn, ví dụ Bo và Cadmi. Phản ứng bắt neutron rất quan trọng trong các phép đo lường neutron và che chắn bức xạ, cũng được sử dụng làm phản ứng chính cho một số máy đo liều neutron.



Hình 1.7: Phản ứng bắt neutron của  $^{23}\text{Na}$ [4]

### 1.3.2. Sự suy giảm chùm neutron khi đi qua vật chất

Sự tương tác của neutron với vật chất chủ yếu là tương tác với hạt nhân nguyên tử. Tương tác của neutron với hạt nhân phụ thuộc rất mạnh vào năng lượng của nó. Tất cả các neutron khi sinh ra đều là neutron nhanh. Các neutron nhanh mất năng lượng khi va chạm đàn hồi với các hạt nhân môi trường chất làm chậm trở thành neutron nhiệt hoặc trên nhiệt và cuối cùng bị hấp thụ trong phạm vi môi trường vật chất của thiết bị.

Xét một chùm hẹp các hạt neutron đi qua môi trường. Gọi bề dày của tấm bia là  $x$  (cm), độ suy giảm cường độ chùm neutron được xác định:

$$-dI(x) = N\sigma I(x)dx \quad (1.3)$$

Đặt  $\Sigma = N\sigma$ , khi đó, cường độ chùm neutron  $I(x)$  sau bản hấp thụ có bề dày  $x$  liên hệ với cường độ chùm neutron  $I_0$  trước bản hấp thụ được xác định bởi:

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma x} \quad (1.4)$$

Trong đó:  $I(x)$  là cường độ chùm neutron sau bản hấp thụ có bề dày  $x$  được đo bởi đầu dò;  $I_0$  là cường độ chùm neutron trước bản hấp thụ;  $\Sigma$  là hệ số suy giảm neutron trong môi trường vật chất;  $\sigma$  là tiết diện hấp thụ vi mô của môi trường;  $N$  là số các hạt nhân hấp thụ của môi trường trong  $1\text{cm}^3$ .

Một chất làm chậm tốt phải có những tính chất sau: Khả năng tán xạ neutron lớn; khả năng hấp thụ neutron thấp và khả năng làm giảm năng lượng neutron lớn nhất trong một lần va chạm.

Bảng 1.3: Hệ số suy giảm neutron của một số chất làm chậm neutron[4]

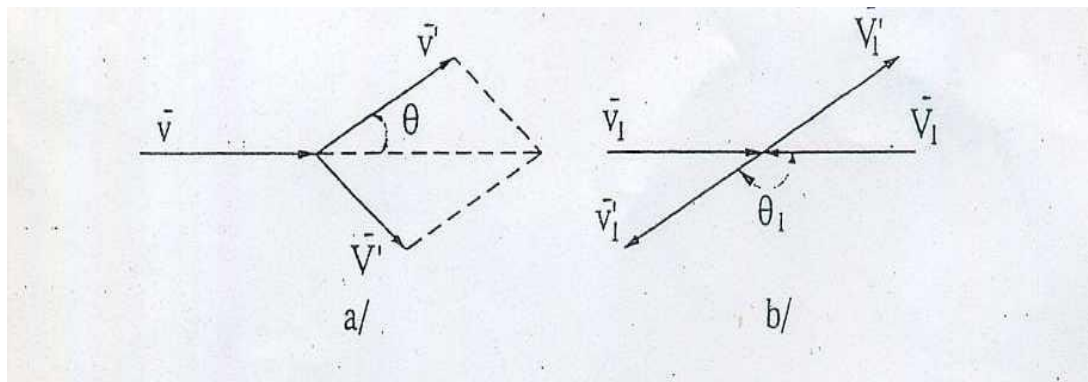
Chất	Graphite	C	Bê tông	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Paraffin	Poly ethylen	Be
Tiết diện vĩ mô $\Sigma(\text{cm}^{-1})$	0,078	0,084	0,089	0,092	0,103	0,106	0,111	0,132

Những chất chứa hydro như paraffin, nước che chắn neutron hiệu quả do tán xạ đàn hồi với nguyên tử hydro.

### 1.3.3. Làm chậm neutron do tán xạ đàn hồi

Quá trình làm chậm neutron là quá trình làm giảm năng lượng của neutron do tán xạ đàn hồi với các nguyên tử của chất làm chậm. Trong quá trình làm chậm thì một phần neutron có thể bị hạt nhân hấp thụ hoặc thoát ra khỏi môi trường bên ngoài. Tán xạ đàn hồi là quá trình phổ biến nhất trong quá trình làm chậm neutron. Khi đó neutron nhanh tương tác với các hạt nhân môi trường chất làm chậm có số nguyên tử nhỏ.

Xét quá trình tán xạ đàn hồi của neutron khối lượng 1, đang chuyển động với vận tốc  $v$  lên hạt nhân đứng yên có khối lượng  $A$ . Sau va chạm, neutron có vận tốc  $v'$  và hạt nhân có vận tốc  $V'$ . Xét trong hệ tâm quán tính (xem Hình 1.8)[[4], neutron và hạt nhân có vận tốc trước va chạm là  $v_1$  và  $V_1$ , sau va chạm là  $v_1'$  và  $V_1'$ .



Hình 1.8: Sơ đồ tán xạ đàn hồi của neutron lên hạt nhân A trong hệ phòng thí nghiệm (a) và hệ tâm quán tính(b)

Vận tốc tâm quán tính được xác định:

$$V_C = \frac{v}{A+1}; \quad (1.5)$$



từ đó suy ra vận tốc của neutron trước va chạm là:

$$v_1 = v - V_C = \frac{A}{A+1} v. \quad (1.6)$$

Do tổng động lượng trong hệ tâm quán tính bằng không nên:  $v_1 = AV_1$ , từ đó ta xác định được vận tốc của hạt nhân trước va chạm là:

$$V_1 = \frac{v}{A+1}. \quad (1.7)$$

Theo định luật bảo toàn năng lượng trong hệ tâm quán tính:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{A}{2} V_1^2 = \frac{v_1'^2}{2} + \frac{A}{2} V_1'^2 \text{ và } v_1' = AV_1'; \quad (1.8)$$

ta suy ra được vận tốc của hạt neutron và hạt nhân sau va chạm là:

$$v_1' = \frac{A}{A+1} v; \quad V_1' = \frac{1}{A+1} v. \quad (1.9)$$

Các vận tốc neutron trong hệ tọa độ phòng thí nghiệm và hệ tọa độ tâm quán tính liên hệ nhau qua biểu thức:

$$\vec{v}' = \vec{V}_C + \vec{v}'_1; \quad (1.10)$$

Từ đó ta có:

$$v'^2 = V_C^2 + v_1'^2 + 2V_C v_1' \cos\theta_1; \quad (1.11)$$

trong đó:  $\theta_1$  là góc bay của neutron trong hệ tâm quán tính.

Sử dụng phép biến đổi ta có:

$$v'^2 = \frac{v^2}{(A+1)^2} (A^2 + 2A \cos\theta_1 + 1). \quad (1.12)$$

Vậy tỉ số động năng neutron sau va chạm so với trước va chạm là:

$$\frac{E'}{E} = \frac{v'^2}{v^2} = \frac{A^2 + 2A \cos\theta_1 + 1}{(A+1)^2}; \quad (1.13)$$

hay:

$$\frac{E'}{E} = \left(\frac{1+\varepsilon}{2}\right) + \left(\frac{1-\varepsilon}{2}\right) \cos\theta_1; \quad (1.14)$$

$$\text{trong đó: } \varepsilon = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}. \quad (1.15)$$

Từ biểu thức (1.13) ta rút ra các kết luận sau:

- Khi  $\theta_1 = 0$ ,  $\cos\theta_1 = 1$  thì  $\frac{E'}{E} = 1$ , tức là neutron không thay đổi năng lượng sau va chạm, độ mất năng lượng của neutron bằng 0.

- Khi  $\theta_1 = \pi$ ,  $\cos\theta_1 = -1$  thì  $\frac{E'}{E} = \varepsilon$ , tức là neutron thay đổi năng lượng từ  $E$  sang  $E' = \varepsilon E$ , độ mất năng lượng neutron cực đại và bằng  $E - E' = (1 - \varepsilon) E$ . Như vậy, sau khi va chạm đàn hồi, neutron có năng lượng  $E'$  thỏa điều kiện  $\varepsilon E \leq E' \leq E$ .

- Từ biểu thức 1.14 ta có  $E' = E$  là trường hợp neutron tán xạ về phía trước, còn  $E' = \varepsilon E$  là trường hợp neutron tán xạ giật lùi về phía sau, tức là va chạm trực diện.

- Từ biểu thức 1.15, xét với hạt nhân hydro thì  $\varepsilon = 0$ , khi đó neutron truyền toàn bộ động năng của mình cho hydro khi va chạm trực diện. Tuy nhiên, đối với các hạt nhân nặng hơn,  $\varepsilon \neq 0$  nên neutron không thể truyền toàn bộ động năng của mình trong một va chạm. Chẳng hạn, đối với tán xạ đàn hồi giữa neutron với oxy thì  $\varepsilon = 0,778$ , do đó phần động năng của neutron truyền cho oxy trong một va chạm trực diện là:

$$\frac{E-E'}{E} = 1 - \varepsilon = 1 - 0,778 = 0,222 = 22,2\%.$$

Như vậy, hạt nhân có khối lượng càng nhỏ sẽ làm chậm neutron hiệu quả hơn hạt nhân có khối lượng lớn.

#### 1.4. GHI ĐO PHỔ NEUTRON

Một trong những đặc điểm của neutron là hạt không mang điện tích nên không xảy ra quá trình ion hóa trực tiếp khi tương tác với môi trường vật chất của đầu dò ghi đo bức xạ hạt nhân như các hạt bức xạ mang điện tích khác. Do đó, quá trình ghi nhận neutron phải gồm hai giai đoạn liên tiếp nhau: đầu tiên các cơ chế tương tác của neutron với vật chất trong đầu dò được vận dụng để tạo thành bức xạ thứ cấp có khả năng gây ion hóa hoặc kích thích các phân tử có trong thành phần vật chất của đầu dò, sau đó các bức xạ thứ cấp hoặc năng lượng kích thích tiếp tục thực hiện quá trình gây ion hóa hoặc quang electron và từ đó sẽ thu nhận được tín hiệu xung điện tại lối ra của đầu dò ghi đo neutron. Đối với những neutron có năng lượng khác nhau thì gây nên những hiệu ứng khác nhau trong môi trường vật chất của đầu dò, do đó các phương pháp ghi nhận cũng sẽ khác nhau.

Thực tế không phải mỗi một neutron đi vào đầu dò đều có khả năng tạo nên một hạt mang điện thứ cấp trong đó. Điều đó có nghĩa rằng trong tất cả các neutron đi vào đầu dò, chỉ có một phần tỷ lệ neutron có thể được ghi nhận. Hơn nữa, trong tất cả các trường hợp có tương tác, không phải bất cứ hạt mang điện thứ cấp nào đều gây nên hiệu ứng ion hóa đủ mạnh để đầu dò có thể ghi nhận được. Tất cả những hiệu ứng này đều được tính đến trong khái niệm hiệu suất ghi nhận của đầu dò, tức là phần trăm số neutron được ghi nhận trên tổng số neutron vào đến đầu dò.

Một đặc điểm thứ hai của các đầu dò neutron là các tín hiệu xung điện tại lõi ra không thể hiện đặc tính của bản thân neutron, mà là những hạt mang điện thứ cấp. Mặc dù những hạt mang điện thứ cấp này có mang thông tin về cường độ và năng lượng của các neutron tới. Nói chung việc nghiên cứu ghi đo bức xạ neutron là có tính chất chuyên sâu nhất định. Một số phản ứng thường được dùng trong các phương pháp ghi đo neutron như sau:

- Phản ứng  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ : Được dùng trong ống đếm chứa khí  $\text{BF}_3$  hoặc dưới dạng tấm phim mỏng bên mặt trong của ống đầu dò. Cường độ ion hóa của hạt  $\alpha$  và năng lượng giật lùi của  $^7\text{Li}$  sẽ được ghi nhận.

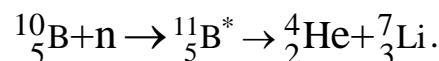
- Phản ứng proton giật lùi: Đây là quá trình tán xạ đàn hồi của neutron năng lượng cao với nguyên tử hydro, những proton này chính là hạt ion hóa thứ cấp, tín hiệu xung điện do sự ion hóa của proton sẽ được ghi nhận.

- Phản ứng phân hạch hạt nhân (n,f): Những chất phân hạch như  $^{235}\text{U}$  được phủ lên bề mặt của ống đếm như một tấm phim mỏng, chúng bắt neutron và phân hạch, những mảnh vỡ phân hạch này gây ion hóa và tín hiệu xung điện sẽ được ghi nhận.

- Phản ứng kích hoạt neutron: Những hạt nhân bia bắt neutron và trở thành đồng vị phóng xạ. Hoạt độ phóng xạ của những đồng vị này có tương quan với thông lượng và năng lượng của trường neutron chiếu. Những phản ứng này có ngưỡng năng lượng, nên có thể xác định được phân bố năng lượng của neutron bằng các thuật toán xử lý số liệu phù hợp. Ưu điểm của phương pháp này là có thể xác định được thông lượng neutron trong một khoảng rộng năng lượng.

#### 1.4.1. Ghi đo neutron nhiệt

Để ghi đo neutron nhiệt với năng lượng rất thấp,  $1 \text{ meV} < E_n < 0,55 \text{ eV}$ , người ta sử dụng phản ứng hấp thụ neutron bởi những hạt nhân nhẹ và có kèm theo sự bức xạ tia alpha gọi là phản ứng  $(n, \alpha)$ . Đặc biệt là các hạt nhân  $^7\text{Li}$  và  $^{10}\text{B}$  có tiết diện hấp thụ neutron nhiệt rất lớn. Cơ chế của phản ứng  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  được biểu diễn như sau:



Hạt nhân  $^{10}\text{B}$  có tiết diện hấp thụ neutron nhiệt rất lớn (khoảng 4.010 barn). Khi hạt nhân bia  $^{10}\text{B}$  hấp thụ 1 neutron tạo thành hạt nhân bia  $^{11}\text{B}$  ở trạng thái kích thích. Vì khối lượng của hạt nhân  $^{11}\text{B}$  nhỏ hơn tổng khối

lượng của hạt nhân  $^{10}\text{B}$  và neutron là  $2,78 \text{ MeV}/c^2$  (gọi là năng lượng liên kết neutron của hạt nhân  $^{11}\text{B}$ ), do đó đồng vị  $^{11}\text{B}$  ở trạng thái kích thích. Thời gian sống của hạt nhân kích thích rất ngắn (cỡ  $10^{-12} \text{ s}$ ), sau đó chúng bị phân rã thành hạt  $\alpha$  và hạt nhân  $^7\text{Li}$ . Trong phần lớn các trường hợp, hạt nhân  $^7\text{Li}$  ở trạng thái kích thích và khi trở về trạng thái cơ bản kèm theo bức xạ ra tia  $\gamma$  với năng lượng  $0,48 \text{ MeV}$ . Phần năng lượng còn lại  $2,30 \text{ MeV}$  chuyển thành động năng của các hạt sản phẩm sau phản ứng. Vì động năng của hạt neutron tới trong trường hợp này rất nhỏ, do đó tổng động lượng của cả hệ hạt nhân và neutron ban đầu gần bằng không. Theo định luật bảo toàn động lượng thì sau phản ứng, các sản phẩm của phản ứng bay về hai phía đối diện nhau, động năng của chúng sẽ tỷ lệ nghịch với khối lượng, từ đó xác định được năng lượng hạt  $\alpha$  bằng  $1,5 \text{ MeV}$ , năng lượng  $^7\text{Li}$  bằng  $0,8 \text{ MeV}$ .

Các đầu dò sử dụng khí boron trifluoride ( $\text{BF}_3$ ) để ghi đo neutron nhiệt bởi vì tiết diện phản ứng ( $n, \alpha$ ) của  $^{10}\text{B}$  là lớn. Độ cao xung điện được sinh ra trong ống đếm  $\text{BF}_3$  là khá lớn do giá trị  $E$  bằng  $2,31 \text{ MeV}$ . Các xung có biên độ lớn này cho phép phân biệt với các xung của tia gamma, thường có mặt trong cùng với các nguồn neutron, và cũng có thể ion hóa khí  $\text{BF}_3$  nhưng với biên độ xung nhỏ hơn nhiều.

Trong đầu dò mà  $^{10}\text{B}$  đưa vào ở dạng khí, sản phẩm của phản ứng sẽ được tạo thành ngay trong môi trường khí làm việc. Vì quãng đường đi của hạt  $\alpha$  rất nhỏ, do đó chúng bị dừng lại ngay trong môi trường khí làm việc. Như vậy, những xung tín hiệu, về nguyên tắc sẽ có cùng một biên độ giống nhau. Thậm chí trong trường hợp khí, phản ứng xảy ra ở gần thành ống đếm. Nếu như một hạt  $\alpha$  (hoặc  $\text{Li}$ ) bị hấp thụ bởi thành ống đi nữa, thì hạt còn lại cũng có thể gây nên hiệu ứng ion hóa đủ mạnh để có thể ghi nhận được neutron và phân biệt được tín hiệu đó với phong của ống đếm. Khi tăng áp suất khí, hiệu ứng bờ (tức là xác suất các phản ứng xảy ra gần thành ống) giảm và đặc tuyến phân bố xung theo biên độ sẽ tốt lên nhiều. Bằng cách chọn hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại tuyến tính với một điện áp cố định trên ống đếm (hoặc ngược lại), ta có thể nhận được một tốc độ hầu như không đổi khi cường độ bức xạ neutron không đổi và hầu như không phụ thuộc vào ngưỡng của máy đo. Điều đó làm cho ống đếm rất phù hợp với mục đích xác định thông lượng và định liều neutron [5].

Tốc độ đếm của đầu dò BF<sub>3</sub> phụ thuộc vào năng lượng neutron. Trong trường hợp neutron nhiệt, thông lượng neutron tuân theo phân bố Maxell–Boltzmann, và ống đếm BF<sub>3</sub> chứa tổng cộng N nguyên tử <sup>10</sup>B. Giả sử hiệu suất đếm là 100% thì tốc độ đếm của đầu dò cho bởi công thức[6]:

$$CR = N \int \Phi(v) \sigma(v) dv; \quad (1.16)$$

trong đó: CR là tốc độ đếm;  $\Phi(v)\sigma(v)$  là thông lượng và tiết diện bắt neutron ở vận tốc  $v$ ;  $n(v)$  là số neutron trong 1 cm<sup>3</sup>.

$$\text{Vậy: } CR = \sigma_0 v_0 \int n(v) dv = \sigma_0 v_0 n. \quad (1.17)$$

Từ phương trình (1.17) ta thấy: trong vùng neutron nhiệt (có năng lượng tuân theo định luật  $1/v$ ), tốc độ đếm của đầu dò BF<sub>3</sub> tỉ lệ với mật độ neutron. Nếu gọi  $\bar{v}$  là tốc độ trung bình của neutron, thì:

$$\Phi = n\bar{v} \Rightarrow n = \frac{\Phi}{\bar{v}}. \quad (1.18)$$

Từ đó tính được thông lượng neutron:

$$\Phi = \frac{\bar{v}}{v_0} \cdot \frac{CR}{N\sigma_0}. \quad (1.20)$$

Trong phân bố Maxell – Boltzmann, đối với neutron nhiệt là:

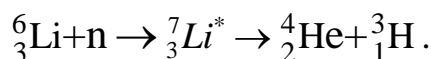
$$\frac{\bar{v}}{v_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1,128.$$

Vậy quan hệ giữa thông lượng với tốc độ đếm là:

$$\Phi = 1,128 \frac{CR}{N\sigma_0}. \quad (1.21)$$

Các đầu dò neutron khác được thiết kế bằng cách phủ bề mặt thành bên trong của đầu dò bằng một hợp chất của boron và nạp vào bên trong nó một chất khí phù hợp. Boron cũng có thể được trộn lẫn với các chất nhấp nháy (ví dụ ZnS) để phát hiện neutron chậm. Nguyên nhân là do tiết diện tương tác của boron lớn và sự ion hóa được tạo ra bởi các sản phẩm giật lùi.

Cơ chế phản ứng hấp thụ neutron của hạt nhân <sup>6</sup>Li(n,α)<sup>3</sup>H xảy ra một cách tương tự:



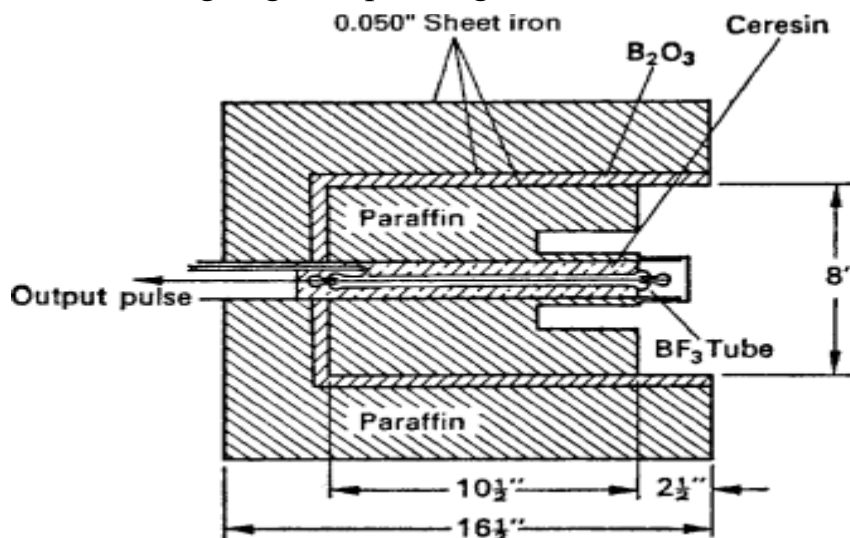
Năng lượng do phản ứng này sinh ra 4,78 MeV lớn hơn so với trường hợp <sup>10</sup>B.

Phản ứng  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  có năng lượng lớn hơn phản ứng  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$  do đó cho phép phân biệt tín hiệu giữa neutron và gamma tốt hơn, nhưng độ nhạy giảm xuống do tiết diện nhỏ hơn. Đồng vị  ${}^6\text{Li}$  chỉ có độ giàu 7,5 % trong tự nhiên, nhưng  ${}^6\text{Li}$  có thể được làm giàu tương đối dễ dàng. Các hợp chất của lithium cũng có thể được pha trộn với ZnS để tạo thành các đầu dò nhỏ với khả năng phân biệt tia gamma tốt bởi vì các electron thứ cấp được tạo ra bởi các tia gamma thì dễ dàng thoát ra khỏi tinh thể mà không tương tác để tạo ra xung điện.

Các đầu dò chứa khí helium có ưu điểm là tiết diện phản ứng  $(n, p)$  của  ${}^3\text{He}$  lớn, hiệu suất ghi cao vì có thể nạp khí  ${}^3\text{He}$  với áp suất cao [6].

#### 1.4.2. Ghi đo neutron nhanh

Hai phương pháp phổ biến để đo neutron nhanh là làm chậm neutron xuống năng lượng nhiệt rồi sau đó ghi đo bằng một đầu dò neutron nhiệt hay sử dụng các lá dò kích hoạt và một hệ phổ kế gamma dùng đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe để đo phổ gamma từ các sản phẩm kích hoạt, từ đó có thể xác định phổ năng lượng neutron. Tuy nhiên phương pháp kích hoạt lá dò có độ nhạy thấp hơn phương pháp dùng đầu dò ( ${}^3\text{He}$ ,  $\text{BF}_3$  hoặc  ${}^6\text{Li}$ -plastic) và do đó thường được áp dụng hiệu quả đối với các nguồn neutron có công suất lớn như lò phản ứng hạt nhân, máy gia tốc. Ngoài ra, để ghi đo neutron nhanh còn có thể sử dụng ống đếm proton giạt lùi.



Hình 1.9: Sơ đồ cấu tạo của một hệ đo neutron nhanh dùng ống đếm  $\text{BF}_3$ [6]

Để chế tạo một hệ đo neutron nhanh, mà hiệu suất có độ ổn định trong dải năng lượng từ hàng trăm keV đến vài MeV, người ta dùng một ống đếm

loại BF<sub>3</sub> đặt đồng trục với một khối hình trụ parafin (chiều dài làm việc của ống đếm phải lớn hơn quãng chạy tự do trung bình của neutron trong parafin). Để giảm phong, người ta bọc ngoài khối parafin (trừ mặt đáy) một lớp Cadmi hoặc lớp Carbit Bo và một lớp parafin phụ thêm (Hình 1.9). Neutron từ nguồn phát vào lớp parafin sẽ được làm chậm đến năng lượng nhiệt và ghi nhận bằng ống đếm BF<sub>3</sub>. Khi năng lượng neutron càng lớn thì độ dài quãng đường làm chậm càng lớn. Khi đó, xác suất mất mát neutron do hấp thụ càng lớn, và như vậy, hiệu suất ghi nhận càng giảm. Những neutron chậm hơn, kịp làm chậm nhanh hơn, và có hiệu suất ghi nhận cao hơn. Bằng phương pháp điều chỉnh kích thước và thay đổi hình dạng khối làm chậm, có thể phần nào làm cân bằng hiệu suất ghi nhận neutron trong một dải năng lượng cho trước.

Ống đếm proton giạt lùi: Ống đếm tỉ lệ dựa trên phản ứng tán xạ đàn hồi của neutron nhanh lên hydro có thể được dùng để ghi đo neutron có năng lượng trên 50 keV (vì dưới năng lượng này tín hiệu xung rất yếu, và khó ghi nhận được). Ống đếm loại này thường sử dụng khí giàu hydro, ví dụ như metan. Ống đếm có kèm theo một lớp Cadmi để hấp thụ những neutron nhiệt, loại bỏ những xung giạt lùi của neutron trong phản ứng bắt neutron nhiệt của hydro. Cũng có thể dùng những chất nhấp nháy hữu cơ rắn hoặc lỏng chứa hàm lượng hydro cao như NE-45, NE-213, tuy nhiên phương pháp này thường cần thiết có thêm bộ phân biệt dạng xung để nhận diện xung bức xạ neutron phân biệt với gamma. Độ nhạy đối với neutron nhanh của ống đếm proton giạt lùi nhỏ hơn độ nhạy của ống đếm BF<sub>3</sub> đối với neutron nhiệt. Nguyên nhân là do tiết diện tán xạ của hydro lên neutron nhanh bé hơn tiết diện hấp thụ neutron nhiệt của <sup>10</sup>B, phân bố năng lượng của proton tán xạ bao gồm phần lớn là những proton năng lượng thấp. Đối với những neutron năng lượng cỡ 10 MeV thì tán xạ là đẳng hướng. Những xung này sẽ không được đếm vì có ít năng lượng được truyền trong quá trình va chạm. Thiết bị ghi đo proton giạt lùi có độ phân giải năng lượng cao, nhưng bù lại việc vận hành tương đối phức tạp, dải năng lượng đo ngắn, khoảng từ 50 keV đến 20 MeV.

### 1.4.3. Ghi đo neutron năng lượng trung bình

Phương pháp ghi nhận neutron theo hạt nhân giạt lùi không thể sử dụng được đối với neutron năng lượng trung bình  $0,55 \text{ eV} < E_n < 50 \text{ keV}$ . Do đó, người ta phải dựa trên một số phản ứng khác của neutron với hạt nhân vật chất như  $(n, \alpha)$  và  $(n, f)$ . Tuy nhiên, do tiết diện phản ứng hấp thụ và phân

hạch trong vùng năng lượng trung bình của neutron tương đối nhỏ, do đó hiệu suất khi sử dụng trực tiếp các ống đếm BF<sub>3</sub> và các buồng phân hạch đối với neutron trong dải năng lượng trung bình là tương đối nhỏ (so với trường hợp neutron chậm). Chính vì vậy, để ghi đo các neutron năng lượng trung bình bằng các ống đếm BF<sub>3</sub> hay buồng phân hạch, chúng ta trước tiên cũng cần làm chậm neutron đến năng lượng nhiệt bằng những chất làm chậm neutron. Để làm chậm neutron, người ta thường dùng các nguyên tố nhẹ như H, Be, các hợp chất cacbua hydro. Đối với những nguyên tố nhẹ, xác suất tán xạ neutron trong vùng năng lượng trung bình lớn hơn nhiều xác suất hấp thụ chúng. Đầu dò neutron thông thường được đặt trong một khối lớn bằng parafin hoặc trong một thùng chứa nước, đôi khi người ta dùng than chì tinh khiết làm chất làm chậm neutron. Những neutron rơi vào môi trường làm chậm sẽ va chạm đàn hồi nhiều lần với các hạt nhân của môi trường chất làm chậm. Khi tán xạ trên những proton tự do, trung bình mỗi lần neutron sẽ mất  $\frac{1}{2}$  năng lượng của chúng. Như vậy, sau 10 - 15 lần va chạm đàn hồi với proton, những neutron với năng lượng ban đầu là  $10^2 - 10^5$  eV sẽ trở thành neutron cân bằng nhiệt với môi trường làm chậm. Những neutron đã bị làm chậm có thể rơi vào đầu dò do quá trình khuếch tán, và ở đó chúng được ghi nhận với hiệu suất như trong trường hợp neutron nhiệt [7][8].

Khi tính toán kích thước của môi trường làm chậm, chúng ta cần xuất phát từ độ dài làm chậm, tức là quãng đường trung bình từ điểm neutron đi vào môi trường làm chậm cho tới điểm neutron trở thành neutron nhiệt. Độ dài làm chậm phụ thuộc vào năng lượng của neutron trong môi trường. Để tránh khỏi nhiễu của những neutron nhiệt, thì khối làm chậm được bảo vệ từ mọi phía bằng những tấm cadmi dày 0,4 - 1 mm, có khả năng hấp thụ hầu như tuyệt đối neutron với năng lượng dưới 0,5 eV. Chúng ta cần lưu ý rằng, người ta thường dùng các đầu dò neutron chậm đặt trong môi trường làm chậm để ghi nhận những neutron nhanh. Khi đó điều cần tính đến là khi năng lượng neutron càng lớn thì chiều dài làm chậm càng lớn (Ví dụ khi  $E_n = 2$  MeV, chiều dài làm chậm bằng cỡ 5,7 cm trong môi trường nước và bằng 18,7 cm trong môi trường than chì). Ưu điểm chính của phương pháp này so với phương pháp ghi nhận neutron nhanh theo hạt nhân giạt lùi là hiệu suất cao. Ngoài ra, đầu dò loại này có đặc tuyến biên độ xung rất tốt, do đó việc tính toán kết quả đo đặc dễ dàng hơn. Tuy vậy, chúng ta cũng nên biết rằng, khi



ghi nhận neutron nhanh bằng đầu dò neutron chậm, phải tính toán đến một khoảng thời gian trễ, kể từ khi neutron đi đến môi trường làm chậm cho đến khi xung tín hiệu xuất hiện trên ống đếm. Thời gian làm chậm neutron, và nhất là thời gian khuếch tán của chúng thường khá lớn và có thể lên đến hàng trăm  $\mu\text{s}$ .

Một cấu hình hệ phổ kế điển hình để ghi đo phổ năng lượng neutron bao gồm cả neutron nhiệt, neutron trung gian (trên nhiệt) và neutron nhanh là sự kết hợp giữa: đầu dò neutron nhiệt và các khối làm chậm. Để làm chậm neutron, người ta có thể sử dụng phản ứng tán xạ đàn hồi trên hạt nhân nhẹ như hydro trong polyethylene hoặc parafin là các chất làm chậm phổ biến.



Hình 1.10: Mô hình hệ phổ kế hình cầu BSS[8]

Hệ phổ kế phổ biến trên thế giới nói chung và ở Việt Nam hiện nay là hệ phổ kế hình cầu (Bonner Sphere Spectrometer - BSS). Mô hình hệ phổ kế hình cầu BSS được mô tả như hình 1.10. Đối với hệ BSS, chất làm chậm là các quả cầu làm bằng vật liệu polyethylen (PE) có đường kính khác nhau kết hợp với một đầu dò  $^3\text{He}$  hoặc  $\text{BF}_3$ . Vật liệu làm chậm neutron thường được sử dụng là PE dưới dạng hình cầu (gọi là hệ BSS) [8] hoặc hình trụ gọi là Bonner-cylinder spectrometer.

Ở Việt Nam, một phổ kế loại BSS đã được phát triển và ứng dụng trong hoạt động đo chuẩn liều neutron tại Viện Khoa học và kỹ thuật hạt nhân (Hà Nội). Các quả cầu Bonner được làm bằng vật liệu giàu hydro như PE được mô tả như ở hình 1.10. Những quả cầu này được gọi là bộ làm chậm neutron nhanh. Tùy thuộc vào đường kính quả cầu, các hàm đáp ứng của hệ đo tương ứng với mỗi quả cầu sẽ đạt một giá trị cực đại tại các vùng năng lượng neutron khác nhau. Khi kích thước quả cầu nhỏ, các neutron chậm được ghi đo trong khi các neutron nhanh thoát ra khỏi Bonner-Sphere trước khi đạt

năng lượng nhiệt. Mặt khác, các quả cầu kích thước lớn hơn thì hệ đo sẽ nhạy hơn với neutron năng lượng cao hơn trong khi đó thành phần neutron năng lượng thấp sẽ bị hấp thụ trước khi khuếch tán đến đầu dò. Vì vậy, việc tăng đường kính hình cầu được sử dụng nhằm mục đích để phát hiện neutron có năng lượng cao hơn.

Phổ kế loại Bonner hình trụ hoạt động tương tự như phổ kế BSS, ngoại trừ các lớp PE hình trụ là được sắp xếp lồng vào nhau trong khi các hình cầu PE được chế tạo độc lập. Một phổ kế Bonner hình trụ điển hình được mô tả trực quan như trong hình 1.11 (a) và sơ đồ ở hình 1.11(b)

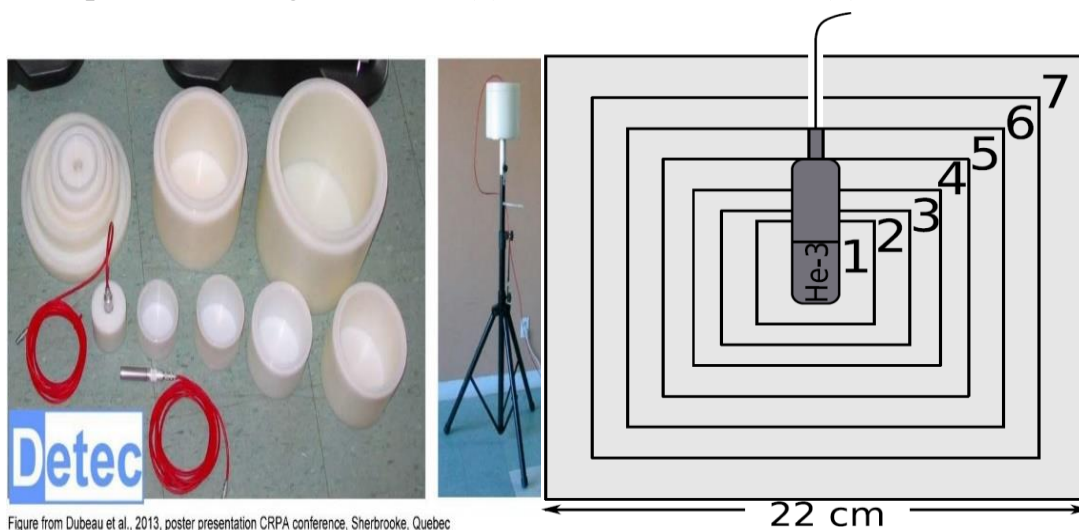


Figure from Dubeau et al., 2013, poster presentation CRPA conference, Sherbrooke, Quebec

Hình 1.11: Mô hình hệ phổ kế hình trụ NSS(a) và sơ đồ cấu tạo(b)[8]

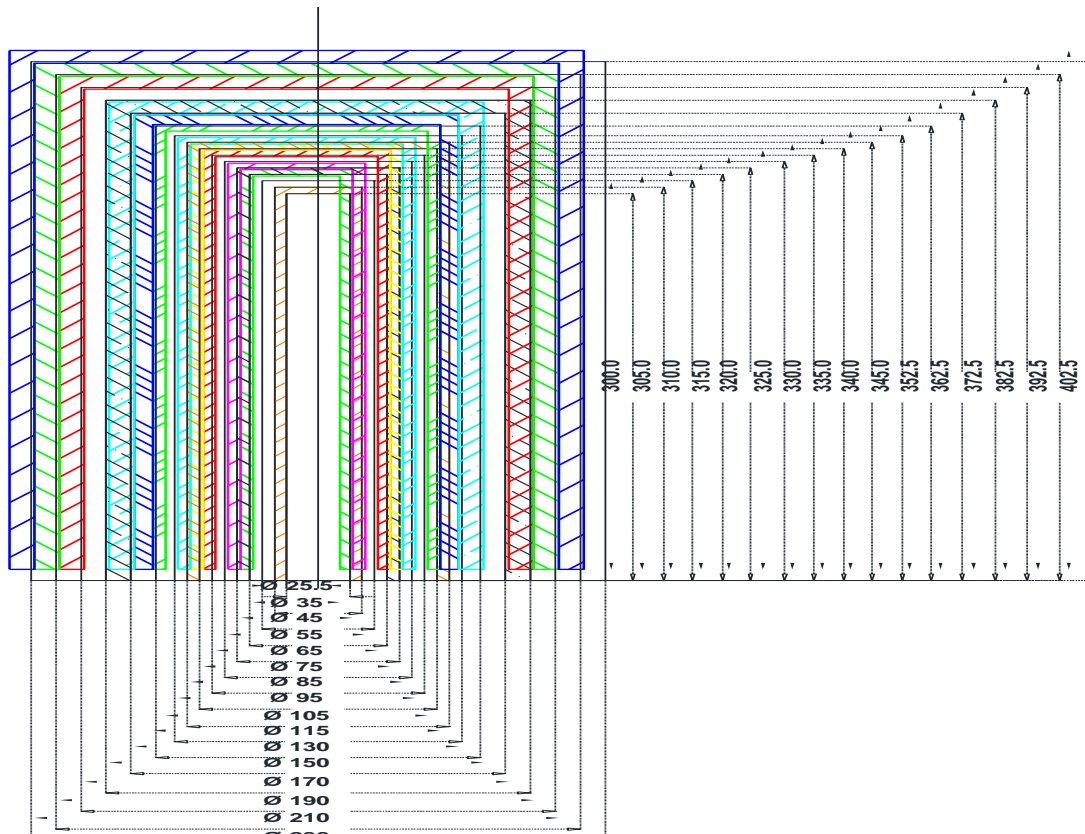
Tại Viện NCHN, cho đến hiện nay vẫn sử dụng liều kế và một số máy đo liều neutron chuyên dụng, việc đo phổ neutron trong lò phản ứng chủ yếu được thực hiện bằng phương pháp kích hoạt neutron thông qua các phản ứng  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, n')$  và  $(n, f)$  hoặc phương pháp xác định năng lượng bằng ống đếm tỉ lệ proton giạt lùi. Các phép đo phổ năng lượng neutron đối với nguồn neutron đồng vị như  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  chủ yếu mới được nghiên cứu bằng đầu dò nhấp nháy lỏng nhưng cũng mới ở giai đoạn phát triển các kỹ thuật phân biệt tín hiệu giữa neutron và gamma.

Trên cơ sở tổng quan tài liệu, yêu cầu thực tiễn và cơ sở thiết bị được hỗ trợ, mục tiêu của đề tài cần giải quyết trong luận văn này là đo thực nghiệm phổ năng lượng neutron và xác định suất liều tương đương đối với nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$  sử dụng hệ phổ kế Bonner-cylinder tại Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân, Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt.

## CHƯƠNG 2. ĐO THỰC NGHIỆM PHỔ NĂNG LƯỢNG NEUTRON BẰNG PHỔ KẾ BONNER-CYLINDER

### 2.1. HỆ LÀM CHẬM NEUTRON

Hình 2.1 mô tả chi tiết cấu hình của hệ làm chậm neutron sử dụng cho hệ phổ kế Bonner-cylinder. Hệ làm chậm neutron này được thiết kế trên nguyên tắc nhiệt hóa neutron (tương tự hệ BSS), gồm 15 khối hình trụ có thể xếp lồng vào nhau. Chất làm chậm neutron là vật liệu PE có khối lượng riêng  $\rho = 0,96 \text{ g/cm}^3$ . Đường kính của các khối hình trụ thay đổi từ 3,5 cm đến 23,0 cm. Ở tâm của các khối hình trụ PE có lắp đặt một đầu dò đo neutron loại  $^3\text{He}$  (Model: LND, INC 2528).



Hình 2.1: Mô hình hệ làm chậm neutron bằng PE

Trọng lượng của hệ đo khoảng 15 kg và chiều cao là 40,25 cm. Ma trận hàm đáp ứng của hệ đo được xác định từ tính toán mô phỏng bằng phương pháp Monte-Carlo. Cấu hình đo với 47 nhóm năng lượng tương ứng với dải đo liên tục từ  $10^{-9}$  MeV đến 13,0 MeV.

Chất làm chậm neutron được làm từ vật liệu PE có bề dày và đường kính khác nhau. Số liệu kích thước được ghi ở Bảng 2.1. Ống PE có kích thước nhỏ nhất có đường kính trong bằng đường kính ngoài của ống đếm  $^3\text{He}$  để có

thể đặt ống đếm  $^3\text{He}$  vào chính giữa các ống PE. Các ống PE khác được thiết kế sao cho đường kính trong ống phía ngoài bằng đường kính ngoài của ống phía trong. Chiều dài các ống PE được thiết kế đảm bảo bao phủ toàn bộ vùng nhạy của đầu dò  $^3\text{He}$ . Toàn bộ các ống PE và đầu dò được đặt trên một giá đỡ được làm bằng thép, có thể điều chỉnh độ cao. Giá đỡ toàn bộ hệ phổ kế có thể di chuyển được nhằm thực hiện được các phép đo ở các vị trí khác nhau so với nguồn neutron.

Bảng 2.1: Kích thước các lớp làm chậm PE hình trụ

STT	Ký hiệu lớp PE	Độ dày (mm)	Đường kính ngoài (mm)	Độ dày tổng (mm)
1	PE1	4.75	35	4.75
2	PE2	5.00	45	9.75
3	PE3	5.00	55	14.75
4	PE4	5.00	65	19.75
5	PE5	5.00	75	24.75
6	PE6	5.00	85	29.75
7	PE7	5.00	95	34.75
8	PE8	5.00	105	39.75
9	PE9	5.00	115	44.75
10	PE10	7.50	130	52.25
11	PE11	10.0	150	62.25
12	PE12	10.0	170	72.25
13	PE13	10.0	190	82.25
14	PE14	10.0	210	92.25
15	PE15	10.0	230	102.25



Hình 2.2: Các lớp làm chậm neutron bằng vật liệu PE



Hình 2.3: Hệ gồm 15 khối trụ PE được lắp ghép với đầu dò  $^3\text{He}$

## 2.2. MA TRẬN HÀM ĐÁP ỨNG VÀ CHƯƠNG TRÌNH GIẢI CUỘN

Mỗi một tổ hợp của đầu dò và các lớp chất làm chậm có một hàm đáp ứng (Response function) đặc trưng được xác định đối với một cấu trúc nhóm năng lượng neutron. Để có thể xác định được phổ neutron, cần sử dụng các hàm đáp ứng đã xác định của hệ Bonner-cylinder. Hàm đáp ứng này được định nghĩa là: số đếm ghi được của đầu dò  $^3\text{He}$  đối với một nhóm năng lượng  $E_i$  có thông lượng neutron là  $\Phi(E_i) = 1 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ . Đường kính của các khối hình trụ PE có giá trị trải dài từ 3,5 cm đến 23,0 cm để đáp ứng dải năng lượng từ neutron nhiệt cho đến neutron năng lượng 13 MeV. Hàm đáp ứng của hệ Bonner-cylinder có thể được xác định theo 2 cách: đo thực nghiệm từ các chùm neutron đơn năng hoặc tính toán từ các chương trình mô phỏng. Một hàm đáp ứng thứ  $i$  theo năng lượng  $E$ , ký hiệu là  $R_i(E)$  có mối liên hệ với số đếm thực nghiệm  $C_i$  từ đầu dò  $^3\text{He}$  và thông lượng neutron theo năng lượng  $\Phi(E)$  được biểu diễn theo phương trình (2.1) như sau:

$$C_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R_i(E) \cdot \Phi(E) dE ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.1)$$

Trong đó:  $C_i$  là tốc độ đếm ghi nhận được trong đầu dò ứng với tổ hợp khối hình trụ thứ  $i$ ;  $R_i(E)$  là hàm đáp ứng của đầu dò tương ứng với tổ hợp khối hình trụ thứ  $i$  phụ thuộc theo năng lượng  $E$  và  $\Phi(E)$  là thông lượng

neutron của nguồn neutron tại vị trí đo thực nghiệm; và  $n$  là số các khối hình trụ PE có độ dày khác nhau (trong nghiên cứu này  $n = 15$ ).

Phương trình ở trên có thể được viết lại dưới dạng một công thức lấy tổng theo các nhóm năng lượng ( $k = 1, \dots, M$ ) như sau:

$$C_i = \sum_{k=1}^M R_{ik} \Phi_k; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad k = 1, 2, 3, \dots, M; \quad (2.2)$$

Trong đó:  $R_{ik}$  là hàm đáp ứng thứ  $i$  tương ứng với nhóm năng lượng thứ  $k$ ;  $\Phi_k$  là thông lượng tích phân theo nhóm năng lượng thứ  $k$ ; và  $M$  là số nhóm năng lượng (trong nghiên cứu này,  $M = 47$ ).

Công thức (2.2) là dạng rút gọn của một hệ  $n$  phương trình với  $M$  biến số  $\Phi_k$ . Quá trình giải hệ phương trình này để tính  $\Phi_k$  từ một tập hợp các số đếm  $C_i$  được gọi là giải cuộn (Unfolding), khi đó giả thiết là  $R_{ik}$  là hàm đáp ứng đã được xác định và cung cấp kèm theo hệ phổ kế Bonner-cylinder. Trong hầu hết các trường hợp, số  $N$  phương trình nhỏ hơn số  $M$  biến số  $\Phi_k$  cần xác định tức là số nhóm năng lượng lớn hơn nhiều so với số lớp PE làm chậm dùng để ghi nhận tín hiệu, do đó hệ phương trình này có số phương trình ít hơn số ẩn số nên không thể giải bằng các phương pháp thông thường mà cần giải quyết bài toán này bằng một trong các phương pháp gần đúng. Có nhiều phương pháp gần đúng khác nhau để xác định được phổ năng lượng neutron  $\Phi(E)$ . Trong đó, hai phương pháp được sử dụng phổ biến là phương pháp entropy cực đại và phương pháp sử dụng thuật toán lặp bình phương tối thiểu.

Trong luận văn này sử dụng code MSANDB [9] để thực hiện việc giải cuộn (unfolding) từ số liệu đo thực nghiệm sử dụng hệ phổ kế Bonner-cylinder nhằm xác định phổ năng lượng  $\Phi(E)$  của các nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$ . Code MSANDB sử dụng thuật toán giải cuộn được gọi là lặp bình phương tối thiểu nhiều lần, trong đó yêu cầu có một phổ giả định ban đầu  $\Phi_0(E)$  cho bước lặp đầu tiên, phổ giả định này có thể sử dụng từ dữ liệu phổ chuẩn có sẵn trong code MSANDB. Phổ neutron ban đầu được sử dụng như một dạng thô của phổ neutron dự kiến, bao gồm 3 vùng năng lượng neutron nhiệt, neutron trên nhiệt và neutron nhanh. Code MSANDB được xây dựng để xác định phổ thông lượng neutron từ nhiều phép đo. Phương pháp giải cuộn MSANDB dựa trên việc điều chỉnh lặp đi lặp lại đối với phổ thử nghiệm để có kết quả gần đúng nhất.

Gọi  $i$  là chỉ số của phép đi thực nghiệm;  $j$  là chỉ số nhóm năng lượng;  $k$  là chỉ số vòng lặp;  $E_j$  là năng lượng nhóm  $j$ ;  $m$  là tổng số khoảng năng lượng;  $n$  là số phép đo thực nghiệm[10].

Giả sử ước tính của phổ thông lượng ban đầu được đưa ra là  $\{\phi_j^{[0]}; j = 1, 2, \dots, m\}$ . Sau đó mỗi lần lặp lại  $k$  tốc độ đếm được tính toán lại cho phương trình của phép đo có chỉ số thứ  $i$ .

Thông lượng tích phân tổng được tính từ phổ thông lượng tại vòng lặp  $k$  là:

$$A_i^{[k]} = \sum_{j=1}^m \sigma_{jk} \phi_j^{[k]} (E_{j+1} - E_j). \quad (2.3)$$

Tổng thông lượng được tính trên phổ thông lượng lặp  $k$  lần là:

$$\phi^{[k]} = \sum_{j=1}^m \phi_j^{[k]} (E_{j+1} - E_j). \quad (2.4)$$

Sử dụng công thức: 
$$\overline{\sigma_j^{[k]}} = \frac{A_j^{[k]}}{\phi^{[k]}}, \quad (2.5)$$

và công thức: 
$$\phi_j^{[k]} = \frac{A_j}{\sigma_j^{[k]}}. \quad (2.6)$$

Ta có tổng thông lượng dựa trên tất cả các phép đo tương ứng với mỗi bề dày lớp chất làm chậm sau  $k$  lần lặp được xác định bằng công thức:

$$\overline{\phi}^{[k]} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^{[k]} \phi_i^{[k]}}{\sum_{i=1}^n W_i^{[k]}}; \quad (2.7)$$

trong đó  $W_i^{[k]}$  là các hệ số trọng số bao gồm thông tin về độ không đảm bảo trong quá trình lặp đi lặp lại.

Tỷ lệ giữa thực nghiệm được đo lường với kết quả được tính toán mô phỏng

là: 
$$R_i^{[k]} = \frac{\phi_i^{[k]}}{\overline{\phi}^{[k]}} \cdot \frac{A_i}{A_j^{[k]}}. \quad (2.8)$$

Hệ số hiệu chỉnh lặp  $k$  cho khoảng năng lượng  $j$  là:

$$C_j^{[k]} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{[k]} \ln R_i^{[k]}}{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{[k]}}; \quad (2.9)$$

trong đó  $W_{ij}^{[k]}$  là một hàm trọng số làm mịn dựa trên các đường trung bình tuyến tính. Cuối cùng thu được phổ năng lượng gần đúng nhất tại vòng lặp thứ  $k+1$  như sau:

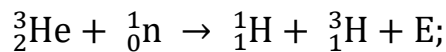
$$\phi_j^{[k+1]} = \phi_j^{[k]} \exp(C_j^{[k]}). \quad (2.10)$$

### 2.3. HỆ ĐO THỰC NGHIỆM

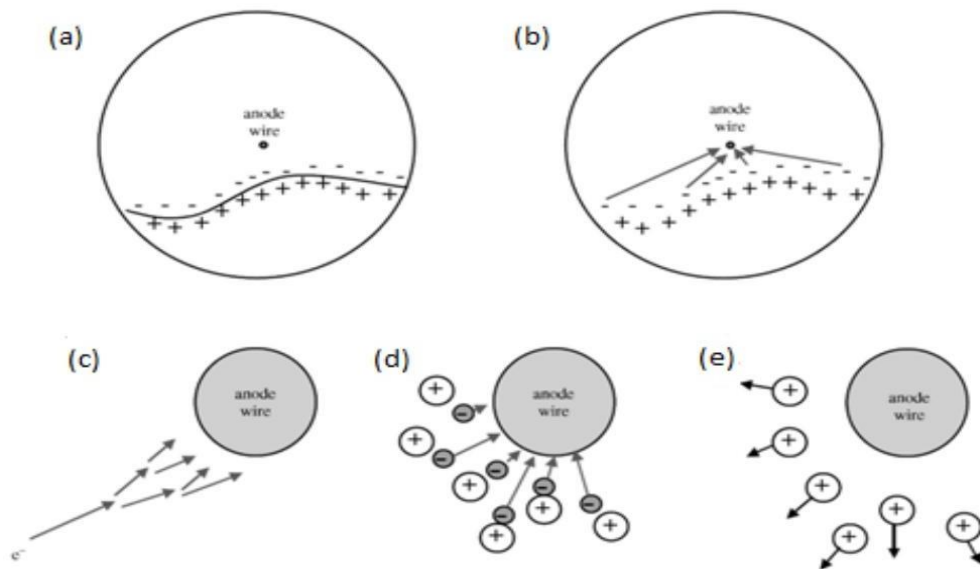
#### 2.3.1. Đầu dò neutron $^3\text{He}$

Đầu dò neutron  $^3\text{He}$  phần lớn nhạy với neutron nhiệt và thường được sử dụng với bộ làm chậm neutron. Do đó đầu dò neutron  $^3\text{He}$  rất phù hợp để đo các chất nền có hàm lượng hydro cao, chẳng hạn như nước và dầu, trong đó chất nền được đo đóng vai trò là chất điều hòa.

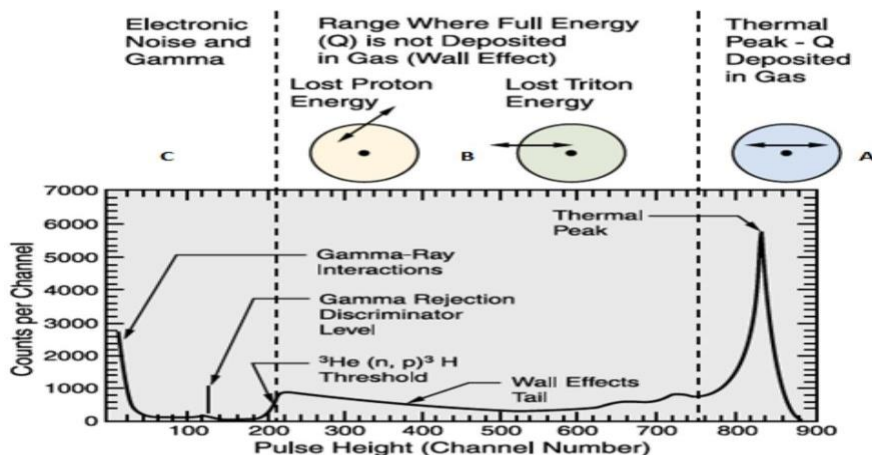
Ống đếm tỷ lệ  $^3\text{He}$  sử dụng phản ứng  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  để phát hiện các neutron nhiệt. Phản ứng xảy ra như sau:



Trong đó  $E = 764 \text{ keV}$ . Năng lượng của phản ứng này được giải phóng dưới dạng động năng của các hạt nhân con chuyển động theo hai hướng ngược chiều nhau.



Hình 2.4: Các bước tạo ra xung đầu ra của đầu dò neutron  $^3\text{He}$



Hình 2.5. Phổ độ cao xung của đầu dò  $^3\text{He}$ [6]



Hình 2.5 mô tả quá trình tạo xung đầu ra của đầu dò  $^3\text{He}$ . Các hạt mang điện được giải phóng (proton và triton) ion hóa các phân tử khí khi chúng chuyển động trong chất khí. Sau đó, các electron ion hóa này chuyển động vào trong cực dương (Hình 2.4b). Mỗi electron đến vùng nhân gây ra một đợt tuyết lở ion. Đây được gọi là hiện tượng nhân khí và có thể xảy ra do điện trường cao tồn tại trong vùng lân cận của cực dương (Hình 2.4c). Hàng nghìn electron được tạo ra và sau đó bị hút về phía cực dương (Hình 2.4d). Mặt khác, các ion dương di chuyển chậm hơn nhiều đến cực âm tạo ra hầu hết biên độ xung đầu ra (Hình 2.4e). Do sự tương tác của neutron nhiệt với khí  $^3\text{He}$  của bộ đếm tỷ lệ, máy phân tích đa kênh ghi lại tổng số đếm cho mỗi kênh trong phổ độ cao xung. Phổ độ cao xung có thể được chia thành ba vùng như được mô tả trong Hình 2.5.

Nhìn vào Hình 2.5, ta có thể chia phổ năng lượng ra thành ba vùng như sau:

- Vùng A là một đỉnh hẹp ở 764 keV được quan sát thấy khi năng lượng giải phóng được tích tụ hoàn toàn vào khí và do đó proton và triton hoàn toàn dừng lại. Vị trí của đỉnh năng lượng nhiệt này cho phép chuyển đổi số kênh thành giá trị năng lượng lắng đọng.

- Vùng B đại diện cho các hiệu ứng tường, nơi mà proton hoặc triton bị hấp thụ trong tường. Sự hấp thụ này làm phát sinh thêm hai đỉnh nữa trong vùng cao nguyên: một đỉnh triton ở 191 keV và một đỉnh proton 573 keV mà không thể phân giải được vì nó đã hợp nhất với đỉnh hẹp nhiệt ở vùng A.

- Vùng C hiển thị đỉnh do bức xạ gamma. Phần này của quang phổ không cần thiết và có thể bị loại bỏ bằng cách đặt bộ lọc mức độ thấp.

Vì điện tích thu được tỷ lệ thuận với số cặp ion và do đó là số lượng neutron tới, nên các đầu dò này được gọi là đầu dò tỷ lệ.

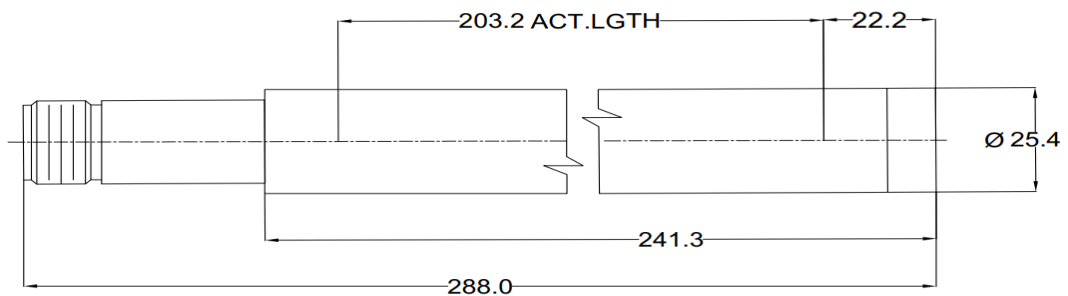
Trong hệ thống, chúng tôi thiết kế để ghi nhận phổ neutron sử dụng đầu dò có hiệu Model 2528, LND, INC với các thông số nêu trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2: Thông số đầu dò  $^3\text{He}$ [6]

Độ dài tối đa (mm)	288,04
Đường kính tối đa (mm)	25,4
Độ dài hiệu dụng (mm)	203,2
Đường kính hiệu dụng (mm)	24,38
Vật liệu	Thép không gỉ
Dải nhiệt độ vận hành	-50 <sup>0</sup> C đến 100 <sup>0</sup> C
Áp suất khí ở 21 <sup>0</sup> C (torr)	3040
Mật độ khí (g/cm <sup>3</sup> )	0,0004998
Thể tích hiệu dụng (cm <sup>3</sup> )	94,84
Cao thế (Volt)	1250
Độ nhạy neutron nhiệt (cps/nv)	28



(a)



(b)

Hình 2.6: Hình thực tế và bản vẽ chi tiết đầu dò  $^3\text{He}$ 

### 2.3.2. Nguồn phát neutron

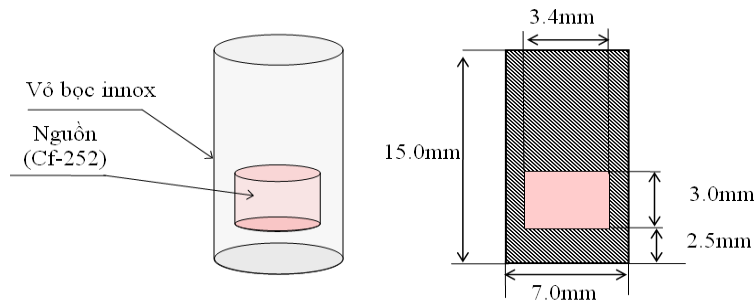
Tại Viện NCHN có hai nguồn phóng xạ phát ra neutron:

- Nguồn  $^{252}\text{Cf}$  là nguồn phát neutron với chu kỳ bán rã 2,65 năm. Đặc điểm của nguồn đang đặt tại Viện NCHN như sau:

+ Howitzer chứa nguồn là một thùng thép không rỉ dạng hình trụ dày 0,2 cm, cao 50 cm; đường kính ngoài 50 cm và đường kính trong 4,8 cm

(không gian giữa được lấp đầy bằng paraffin và B<sub>4</sub>C với tỉ lệ theo khối lượng 90% paraffin và 10% B<sub>4</sub>C); ở tâm container là không gian rỗng là nơi để nguồn neutron <sup>252</sup>Cf.

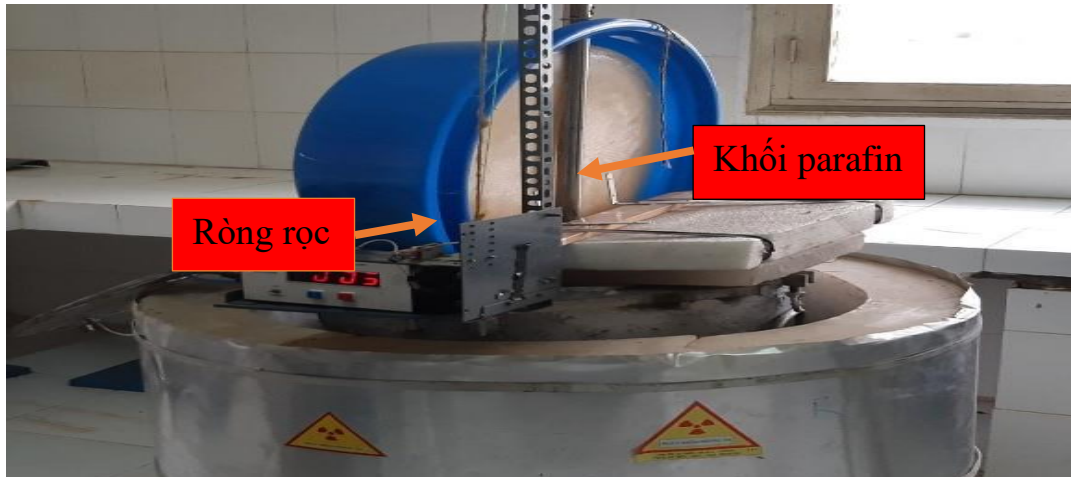
+ Thỏi nguồn <sup>252</sup>Cf (nhận năm 2011) có hoạt độ 429 MBq (11,6 mCi) tính từ ngày 19/5/2011 và cường độ là  $5,10^7 \pm 8\%$  (n/s); cường độ phát giảm còn  $2,82 \cdot 10^6$  n/s ngày 19/5/2022. Nguồn có khối lượng 21  $\mu$ g, đường kính 3,4 mm, dài 3mm (Hình 2.7).



Hình 2.7: Cấu tạo và kích thước nguồn <sup>252</sup>Cf.

- Nguồn <sup>241</sup>Am/Be: Nguồn này có chu kỳ bán rã 432 năm, được sản xuất vào năm 1964, độ phóng xạ của nguồn ban đầu là  $10^6$  n/s. Nguồn đặt ở tâm của container dạng hình trụ cao 12,6 mm và đường kính 5,8 mm; vỏ nguồn dạng hình trụ cao 15 mm và đường kính 7,8 mm làm bằng thép không gỉ (mặt trên và dưới dày 1,2 mm; thành trụ xung quanh dày 1mm). Nguồn có cường độ phát là  $5,6038 \cdot 10^6 \pm 6\%$  n/s năm 2001, và giảm còn  $5,4181 \cdot 10^6 \pm 6\%$  n/s năm 2022.

Dùng khối phản xạ parafin đặt phía sau nguồn để tăng thông lượng neutron. Năng lượng neutron trung bình 4,459 MeV, năng lượng phổ neutron bắt đầu từ 100 keV, kết thúc ở 12,6 MeV.



Hình 2.8: Nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại Viện NCHN

### 2.3.3. Mạch tiền khuếch đại

Tiền khuếch đại (PreAmp) có nhiệm vụ khuếch đại và biến đổi các dạng tín hiệu điện ở lối ra đầu dò thành điện áp. Do vậy bộ khuếch đại cơ bản thường là bộ khuếch đại điện thế [11]. Mặc khác nó cũng là tầng phối hợp trở kháng giữa đầu dò và cáp đồng trục ghép nối với khuếch đại cơ bản, vì khuếch đại cơ bản thường đặt xa với tiền khuếch đại. Thông thường trở kháng ra của đầu dò là cao trong lúc dây nối lại có trở kháng thấp.

Với mục đích nêu trên, tiền khuếch đại phải đảm bảo thực hiện các chức năng sau:

- Hình thành xung và biến đổi các dạng xung điện ở lối ra của đầu dò thành xung điện thế.
- Khuếch đại xung.
- Đảm bảo tối ưu tỉ số tín hiệu tạp âm S/N.
- Đảm bảo tốt việc phối hợp trở kháng.



Hình 2.9: Mạch tiền khuếch đại

### 2.3.4. Bộ chuyển đổi tương tự sang số

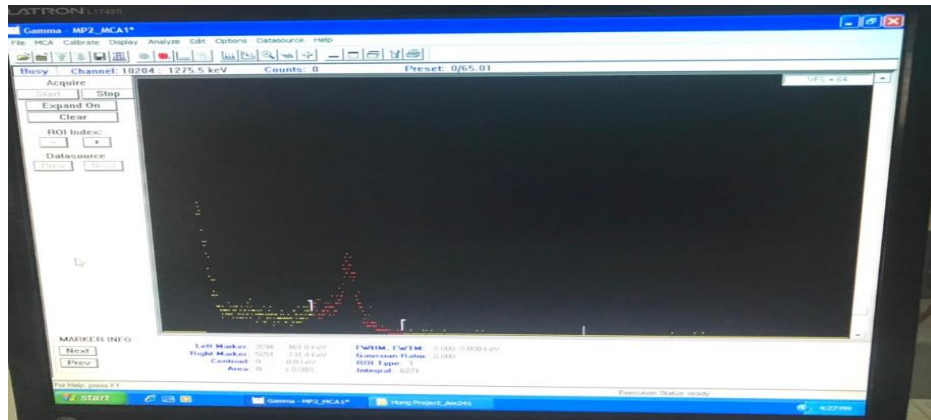
Bộ chuyển đổi tương tự sang số ADC (Analog to Digital Converter) lấy mức điện thế vào tương tự sau đó một thời gian sẽ sinh ra mã đầu ra dạng số biểu diễn đầu vào tương tự.



Hình 2.10. Bộ chuyển đổi tương tự sang số

### 2.3.5. Phần mềm điều hành ghi đo

Hệ thống xử lý số liệu bởi phần mềm Genie-2000 ghi lại tổng số đếm cho mỗi kênh của ADC và hiển thị phổ độ cao xung.



Hình 2.11: Màn hình hiển thị phần mềm ghi đo

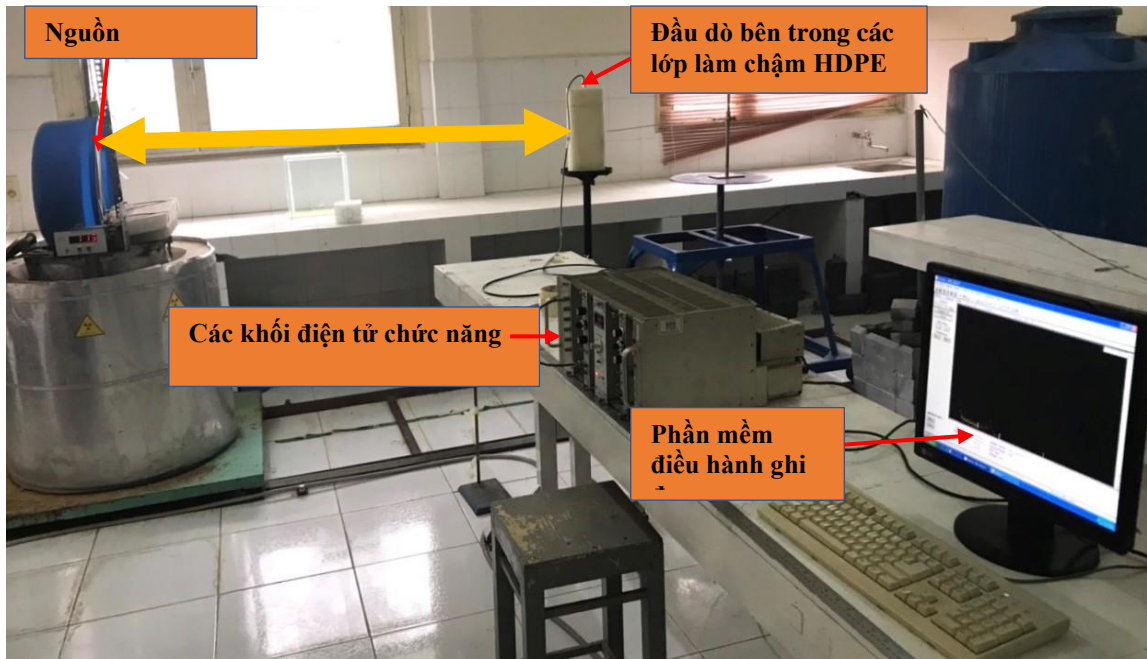
## 2.4. BỐ TRÍ HỆ ĐO THỰC NGHIỆM

### 2.4.1. Lắp đặt hệ thống đo

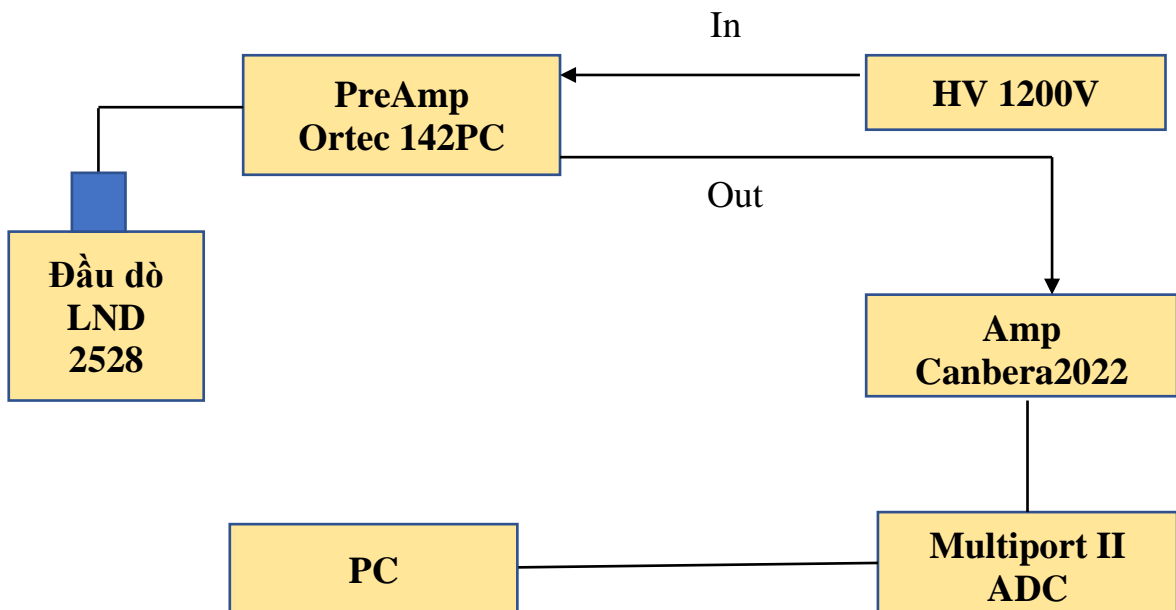
Một hệ phổ kế Bonner-cylinder đã được lắp đặt tại Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân để ghi đo phổ neutron. Ngoài một tổ hợp các lớp làm chậm neutron như đã mô tả trong Hình 2.1 và 2.2, hệ phổ kế được kết nối với một đầu dò  $^3\text{He}$  (Model: LND, INC 2528) và các khối điện tử chức năng bao gồm một tiền khuếch đại (model: PC142 Ortec), khối khuếch đại phổ (model: 2022 Canberra), khối phân tích đa kênh (model: MultiportII, Canberra), một khối

cao thế (model: 660 5KV Ortec) và phần mềm điều hành ghi đo, xử lý phổ (model: Genie-2000).

Hình 2.11 mô tả hệ phổ kế Bonner-cylinder đang hoạt động tại phòng thí nghiệm, được sử dụng trong luận văn để đo phổ neutron tại các vị trí khoảng cách khác nhau từ nguồn neutron  $^{241}\text{Am-241/Be}$  tại Viện NCHN.



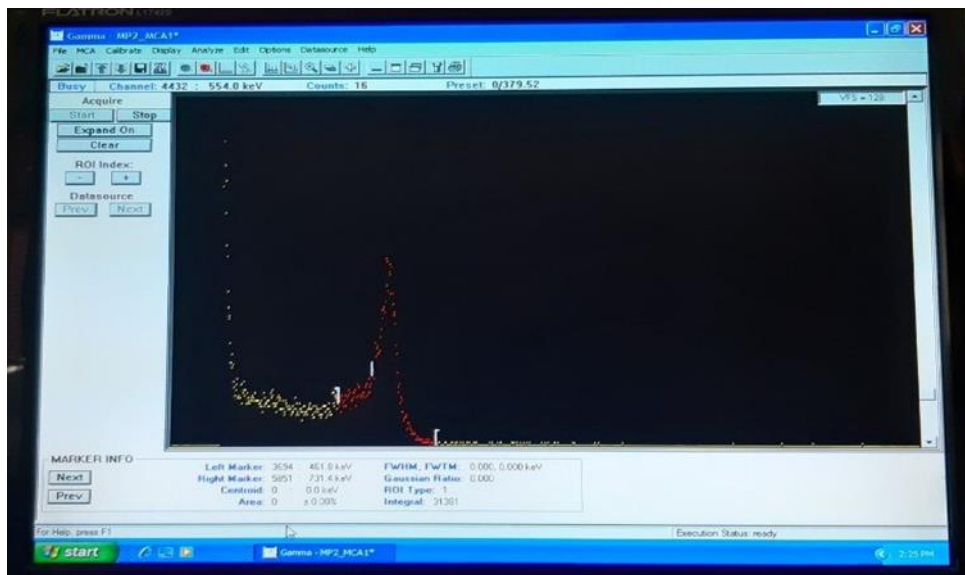
Hình 2.12: Hệ phổ kế Bonner-cylinder đang hoạt động ghi đo phổ neutron nguồn  $^{241}\text{Am/Be}$



Hình 2.13: Sơ đồ ghép nối các khối điện tử của hệ phổ kế

### 2.4.2. Đo phổ thực nghiệm

Các phép đo thực nghiệm đã được thực hiện tại các khoảng cách từ nguồn đến đầu dò ở các vị trí khác nhau: đối với nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  đo ở các khoảng cách là 200, 150, 120, 100 và 65 cm; đối với nguồn chuẩn  $^{252}\text{Cf}$  đo ở các khoảng cách 200, 100 và 60 cm như Hình 2.11. Đầu dò  $^3\text{He}$  được cấp cao thế 1200 V, ghép nối với tiền khuếch đại, tín hiệu từ tiền khuếch đại được khuếch đại sau đó qua khối MultiportII và được ghi nhận lưu vào máy tính bằng chương trình Genie-2000. Hình 2.12 mô tả sơ đồ ghép nối các khối điện tử của hệ phổ kế. Mỗi phép đo được thực hiện trong khoảng thời gian từ 600 đến 1000 giây để đảm bảo sai số thống kê nhỏ hơn 0,5%. Tại mỗi khoảng cách, các phép đo được thực hiện 16 lần tương ứng với tổ hợp tăng dần của 15 lớp PE khác nhau (từ PE1 đến PE15) và một lần đo trực tiếp với đầu dò  $^3\text{He}$  (không có ống PE làm chậm). Kết quả được ghi lại bởi phần mềm Genie-2000.

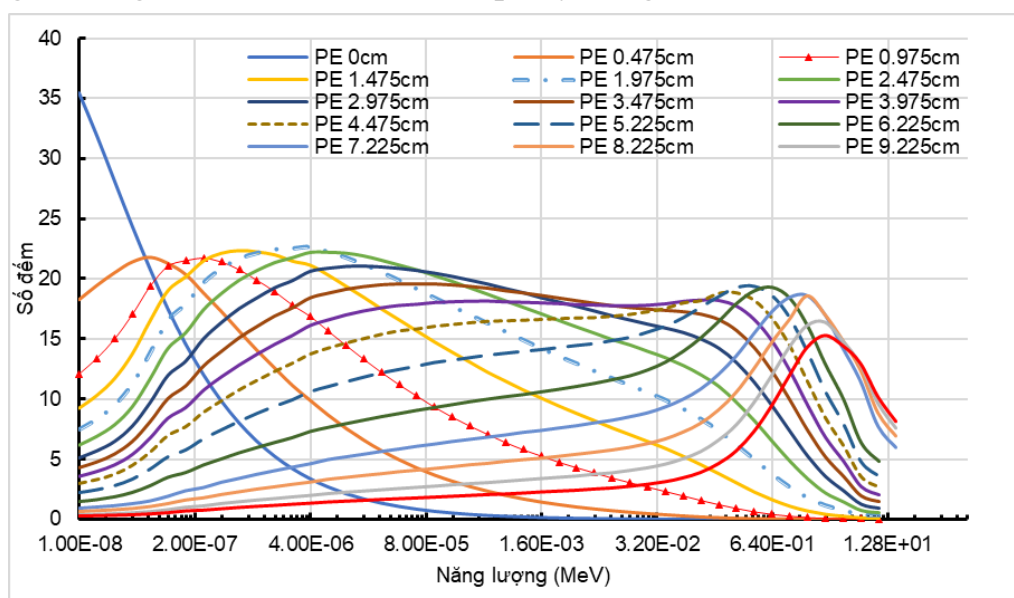


Hình 2.14: Phổ đo thực nghiệm từ phần mềm Genie-2000

Phổ đo thực nghiệm có thành phần gamma nhưng do biên độ xung tín hiệu từ bức xạ gamma đối với đầu dò  $^3\text{He}$  là thấp hơn nhiều so với biên độ xung tín hiệu từ phản ứng bắt neutron (tạo thành hạt proton và Triton trong đầu dò  $^3\text{He}$ ), cho nên bằng phương pháp cắt ngưỡng biên độ xung thì thành phần số đếm do gamma sẽ được loại trừ. Trong luận văn chọn vùng tích phân đỉnh phổ từ 191keV là vị trí cắt ngưỡng để loại trừ photon gamma như trong Hình 2.14.

### 2.4.3. Chuẩn bị file số liệu hàm đáp ứng

Trong luận văn này, chúng tôi tiếp nhận và sử dụng bảng số liệu các hàm đáp ứng cùng với hệ phổ kế Bonner-cylinder tại Phòng thí nghiệm Vật lý và Điện tử hạt nhân[12]. Các đường cong hàm đáp ứng như được mô tả trong Hình 2.15. Tuy nhiên để thực hiện việc tính toán giải cuộn số liệu đo thực nghiệm số liệu hàm đáp ứng cần thiết được chuẩn bị lại dưới dạng file-input theo định dạng (Formatted input file) phù hợp với chương trình MSANB. Cấu trúc format của file hàm đáp ứng đã được chuẩn bị bao gồm: một data-block về 47 nhóm năng lượng và tiếp theo là 16 data-block về số liệu hàm đáp ứng. Các data-block này tương ứng với 16 tổ hợp các lớp làm chậm neutron bởi đường kính ngoài của khối hình trụ lấp đầy bằng PE.



Hình 2.15: Hàm đáp ứng của hệ phổ kế Bonner-cylinder [12]

Từ Hình 2.15 ta thấy hàm đáp ứng của hệ đo thực nghiệm lớn nhất nằm trong vùng năng lượng nhiệt đối với trường hợp không có lớp chất làm chậm PE nào được lắp đặt (BARE data-block) và giảm dần khi năng lượng tăng. Ứng với mỗi độ dày PE khác nhau, ta có giá trị đáp ứng của dải năng lượng neutron khác nhau. Độ dày của lớp PE càng tăng thì giá trị đáp ứng cực đại, ứng với dải năng lượng quan tâm càng tăng. Đối với trường hợp PE1 (độ dày 0,475 cm) thì năng lượng quan tâm nằm trong khoảng  $10^{-8}$  MeV đến  $10^{-6}$  MeV, khi độ dày PE tăng đến 10,225 cm (PE15) thì dải năng lượng neutron quan tâm nằm trong khoảng từ 0,7 MeV đến 13 MeV. Cấu trúc của file input hàm đáp ứng được luận văn chuẩn bị theo format các data-block và được mô tả như sau:



48 \*\*\*47 ENERGY GROUPS\*\*\*

7.943E-09 1.259E-08 1.995E-08 3.162E-08 5.012E-08 7.944E-08 1.259E-07 1.995E-07  
 3.162E-07 5.012E-07 7.944E-07 1.259E-06 1.995E-06 3.162E-06 5.012E-06 7.944E-06  
 1.259E-05 1.995E-05 3.162E-05 5.012E-05 7.944E-05 1.259E-04 1.995E-04 3.162E-04  
 5.012E-04 7.944E-04 1.259E-03 1.995E-03 3.162E-03 5.012E-03 7.944E-03 1.259E-02  
 1.995E-02 3.162E-02 5.012E-02 7.944E-02 1.259E-01 1.995E-01 3.162E-01 5.012E-01  
 7.944E-01 1.259E+00 1.995E+00 3.162E+00 5.012E+00 7.944E+00 1.259E+01 1.995E+01

BARE\*\*\*\* BARE COUNTER \*\*\*

0.000E+00 0 0  
 3.860E+01 3.540E+01 3.190E+01 2.810E+01 2.430E+01 2.080E+01 1.750E+01 1.460E+01  
 1.200E+01 9.850E+00 8.020E+00 6.500E+00 5.250E+00 4.230E+00 3.380E+00 2.710E+00  
 2.150E+00 1.710E+00 1.360E+00 1.080E+00 8.590E-01 6.780E-01 5.380E-01 4.240E-01  
 3.350E-01 2.650E-01 2.080E-01 1.620E-01 1.260E-01 9.860E-02 7.670E-02 5.730E-02  
 4.340E-02 3.340E-02 2.470E-02 1.790E-02 1.320E-02 1.080E-02 1.640E-02 2.010E-02  
 2.260E-02 2.510E-02 2.390E-02 2.070E-02 1.720E-02 1.400E-02 1.210E-02

3.5 CM\*\* 3.5 CM \*\*\*\*\*

0.000E+00 0 0  
 1.670E+01 1.820E+01 1.940E+01 2.050E+01 2.140E+01 2.170E+01 2.120E+01 2.030E+01  
 1.880E+01 1.730E+01 1.560E+01 1.400E+01 1.260E+01 1.110E+01 9.890E+00 8.680E+00  
 7.580E+00 6.600E+00 5.730E+00 4.960E+00 4.280E+00 3.680E+00 3.180E+00 2.730E+00  
 2.350E+00 2.000E+00 1.700E+00 1.450E+00 1.240E+00 1.040E+00 8.790E-01 7.360E-01  
 6.060E-01 4.940E-01 3.980E-01 3.000E-01 2.180E-01 1.530E-01 1.050E-01 7.520E-02  
 5.520E-02 4.420E-02 3.550E-02 2.840E-02 2.260E-02 1.670E-02 1.440E-02

4.5 CM\*\* 4.5 CM \*\*\*\*\*

0.000E+00 0 0  
 1.080E+01 1.210E+01 1.340E+01 1.500E+01 1.700E+01 1.940E+01 2.100E+01 2.150E+01  
 2.170E+01 2.140E+01 2.070E+01 1.990E+01 1.890E+01 1.780E+01 1.690E+01 1.570E+01  
 1.450E+01 1.330E+01 1.220E+01 1.120E+01 1.030E+01 9.330E+00 8.500E+00 7.760E+00  
 7.070E+00 6.390E+00 5.800E+00 5.280E+00 4.760E+00 4.310E+00 3.880E+00 3.450E+00  
 3.070E+00 2.700E+00 2.330E+00 1.970E+00 1.590E+00 1.240E+00 9.270E-01 6.500E-01  
 4.410E-01 2.870E-01 1.820E-01 1.110E-01 7.320E-02 4.150E-02 3.280E-02

5.5 CM\*\* 5.5 CM \*\*\*\*\*

0.000E+00 0 0  
 8.240E+00 9.250E+00 1.030E+01 1.170E+01 1.380E+01 1.650E+01 1.900E+01 2.020E+01  
 2.150E+01 2.210E+01 2.240E+01 2.230E+01 2.200E+01 2.150E+01 2.120E+01 2.030E+01  
 1.940E+01 1.850E+01 1.750E+01 1.660E+01 1.570E+01 1.480E+01 1.390E+01 1.310E+01  
 1.220E+01 1.150E+01 1.080E+01 1.010E+01 9.440E+00 8.810E+00 8.220E+00 7.610E+00  
 7.050E+00 6.490E+00 5.910E+00 5.250E+00 4.550E+00 3.810E+00 3.040E+00 2.280E+00  
 1.640E+00 1.100E+00 7.050E-01 4.290E-01 2.750E-01 1.410E-01 1.040E-01

6.5 CM\*\* 6.5 CM \*\*\*\*\*

0.000E+00 0 0  
 6.680E+00 7.480E+00 8.360E+00 9.540E+00 1.130E+01 1.390E+01 1.660E+01 1.800E+01  
 1.970E+01 2.090E+01 2.170E+01 2.220E+01 2.250E+01 2.260E+01 2.270E+01 2.230E+01  
 2.180E+01 2.120E+01 2.060E+01 1.990E+01 1.920E+01 1.840E+01 1.770E+01 1.700E+01  
 1.630E+01 1.560E+01 1.490E+01 1.420E+01 1.360E+01 1.300E+01 1.230E+01 1.170E+01  
 1.110E+01 1.050E+01 9.920E+00 9.180E+00 8.330E+00 7.350E+00 6.180E+00 4.970E+00  
 3.740E+00 2.650E+00 1.770E+00 1.130E+00 7.220E-01 3.650E-01 2.790E-01

7.5 CM\*\* 7.5 CM \*\*\*\*\*

0.000E+00            0    0  
 5.510E+00 6.170E+00 6.910E+00 7.870E+00 9.380E+00 1.170E+01 1.420E+01 1.550E+01  
 1.740E+01 1.880E+01 1.990E+01 2.070E+01 2.140E+01 2.180E+01 2.220E+01 2.220E+01  
 2.210E+01 2.190E+01 2.160E+01 2.120E+01 2.080E+01 2.030E+01 1.980E+01 1.930E+01  
 1.870E+01 1.820E+01 1.760E+01 1.710E+01 1.650E+01 1.600E+01 1.550E+01 1.490E+01  
 1.450E+01 1.400E+01 1.340E+01 1.280E+01 1.200E+01 1.100E+01 9.700E+00 8.190E+00  
 6.470E+00 4.810E+00 3.350E+00 2.180E+00 1.450E+00 7.400E-01 5.510E-01  
 8.5 CM\*\* 8.5 CM \*\*\*\*\*  
 0.000E+00            0    0  
 4.580E+00 5.140E+00 5.730E+00 6.520E+00 7.790E+00 9.740E+00 1.200E+01 1.320E+01  
 1.500E+01 1.640E+01 1.760E+01 1.840E+01 1.930E+01 1.990E+01 2.070E+01 2.090E+01  
 2.110E+01 2.110E+01 2.100E+01 2.090E+01 2.070E+01 2.050E+01 2.020E+01 1.990E+01  
 1.960E+01 1.920E+01 1.890E+01 1.850E+01 1.810E+01 1.770E+01 1.740E+01 1.690E+01  
 1.660E+01 1.630E+01 1.590E+01 1.560E+01 1.500E+01 1.430E+01 1.300E+01 1.140E+01  
 9.440E+00 7.320E+00 5.260E+00 3.580E+00 2.420E+00 1.280E+00 9.540E-01  
 9.5 CM\*\* 9.5 CM \*\*\*\*\*  
 0.000E+00            0    0  
 3.810E+00 4.290E+00 4.760E+00 5.430E+00 6.480E+00 8.130E+00 1.000E+01 1.110E+01  
 1.280E+01 1.400E+01 1.510E+01 1.610E+01 1.690E+01 1.760E+01 1.850E+01 1.880E+01  
 1.920E+01 1.940E+01 1.960E+01 1.960E+01 1.960E+01 1.960E+01 1.950E+01 1.940E+01  
 1.930E+01 1.900E+01 1.890E+01 1.870E+01 1.840E+01 1.820E+01 1.800E+01 1.780E+01  
 1.760E+01 1.750E+01 1.740E+01 1.730E+01 1.710E+01 1.660E+01 1.570E+01 1.430E+01  
 1.230E+01 9.890E+00 7.360E+00 5.160E+00 3.570E+00 1.930E+00 1.460E+00  
 10.5 CM\* 10.5 CM \*\*\*\*\*  
 0.000E+00            0    0  
 3.160E+00 3.560E+00 3.970E+00 4.510E+00 5.380E+00 6.750E+00 8.390E+00 9.280E+00  
 1.070E+01 1.180E+01 1.280E+01 1.370E+01 1.450E+01 1.530E+01 1.610E+01 1.660E+01  
 1.700E+01 1.730E+01 1.760E+01 1.780E+01 1.790E+01 1.800E+01 1.810E+01 1.810E+01  
 1.810E+01 1.810E+01 1.800E+01 1.800E+01 1.790E+01 1.780E+01 1.780E+01 1.770E+01  
 1.770E+01 1.780E+01 1.790E+01 1.810E+01 1.820E+01 1.820E+01 1.770E+01 1.660E+01  
 1.480E+01 1.230E+01 9.430E+00 6.770E+00 4.830E+00 2.710E+00 2.020E+00  
 11.5 CM\* 11.5 CM \*\*\*\*\*  
 0.000E+00            0    0  
 2.630E+00 2.960E+00 3.290E+00 3.730E+00 4.470E+00 5.570E+00 6.960E+00 7.690E+00  
 8.900E+00 9.840E+00 1.080E+01 1.150E+01 1.230E+01 1.300E+01 1.370E+01 1.420E+01  
 1.470E+01 1.500E+01 1.540E+01 1.570E+01 1.580E+01 1.610E+01 1.620E+01 1.640E+01  
 1.650E+01 1.650E+01 1.660E+01 1.660E+01 1.670E+01 1.680E+01 1.680E+01 1.690E+01  
 1.710E+01 1.730E+01 1.760E+01 1.800E+01 1.820E+01 1.880E+01 1.880E+01 1.820E+01  
 1.670E+01 1.440E+01 1.140E+01 8.390E+00 6.110E+00 3.510E+00 2.660E+00  
 13.0 CM\* 13.0 CM \*\*\*\*\*  
 0.000E+00            0    0  
 1.970E+00 2.230E+00 2.470E+00 2.810E+00 3.350E+00 4.190E+00 5.200E+00 5.780E+00  
 6.700E+00 7.430E+00 8.150E+00 8.800E+00 9.400E+00 9.940E+00 1.060E+01 1.100E+01  
 1.140E+01 1.180E+01 1.220E+01 1.250E+01 1.270E+01 1.300E+01 1.320E+01 1.340E+01  
 1.360E+01 1.380E+01 1.400E+01 1.410E+01 1.430E+01 1.440E+01 1.460E+01 1.490E+01  
 1.510E+01 1.560E+01 1.610E+01 1.680E+01 1.760E+01 1.850E+01 1.930E+01 1.930E+01  
 1.860E+01 1.670E+01 1.380E+01 1.060E+01 7.940E+00 4.770E+00 3.600E+00  
 15.0 CM\* 15.0 CM \*\*\*\*\*

```

0.000E+00      0      0
1.340E+00 1.510E+00 1.670E+00 1.900E+00 2.270E+00 2.820E+00 3.520E+00 3.920E+00
4.540E+00 5.040E+00 5.550E+00 5.980E+00 6.400E+00 6.810E+00 7.310E+00 7.650E+00
7.960E+00 8.250E+00 8.540E+00 8.800E+00 9.070E+00 9.300E+00 9.540E+00 9.790E+00
1.000E+01 1.020E+01 1.040E+01 1.060E+01 1.080E+01 1.110E+01 1.130E+01 1.160E+01
1.190E+01 1.240E+01 1.310E+01 1.400E+01 1.510E+01 1.650E+01 1.790E+01 1.900E+01
1.930E+01 1.830E+01 1.600E+01 1.280E+01 9.990E+00 6.370E+00 4.840E+00
17.0 CM* 17.0 CM *****
0.000E+00      0      0
9.030E-01 1.010E+00 1.120E+00 1.290E+00 1.520E+00 1.900E+00 2.360E+00 2.620E+00
3.050E+00 3.380E+00 3.720E+00 4.020E+00 4.310E+00 4.590E+00 4.940E+00 5.170E+00
5.390E+00 5.620E+00 5.820E+00 6.050E+00 6.230E+00 6.450E+00 6.630E+00 6.810E+00
6.990E+00 7.210E+00 7.370E+00 7.570E+00 7.760E+00 8.000E+00 8.210E+00 8.500E+00
8.830E+00 9.310E+00 9.950E+00 1.080E+01 1.200E+01 1.350E+01 1.540E+01 1.720E+01
1.840E+01 1.860E+01 1.700E+01 1.430E+01 1.150E+01 7.720E+00 5.960E+00
19.0 CM* 19.0 CM *****
0.000E+00      0      0
5.980E-01 6.770E-01 7.510E-01 8.550E-01 1.020E+00 1.260E+00 1.570E+00 1.740E+00
2.020E+00 2.250E+00 2.470E+00 2.670E+00 2.870E+00 3.060E+00 3.290E+00 3.440E+00
3.600E+00 3.750E+00 3.920E+00 4.050E+00 4.190E+00 4.340E+00 4.500E+00 4.620E+00
4.790E+00 4.930E+00 5.050E+00 5.210E+00 5.370E+00 5.540E+00 5.730E+00 5.960E+00
6.260E+00 6.650E+00 7.220E+00 7.960E+00 9.050E+00 1.050E+01 1.250E+01 1.470E+01
1.660E+01 1.860E+01 1.700E+01 1.490E+01 1.240E+01 8.810E+00 6.900E+00
21.0 CM* 21.0 CM *****
0.000E+00      0      0
3.980E-01 4.490E-01 5.020E-01 5.660E-01 6.780E-01 8.340E-01 1.040E+00 1.150E+00
1.340E+00 1.490E+00 1.640E+00 1.760E+00 1.890E+00 2.010E+00 2.160E+00 2.280E+00
2.380E+00 2.490E+00 2.590E+00 2.690E+00 2.790E+00 2.900E+00 3.000E+00 3.080E+00
3.190E+00 3.310E+00 3.410E+00 3.520E+00 3.620E+00 3.780E+00 3.890E+00 4.090E+00
4.310E+00 4.610E+00 5.050E+00 5.650E+00 6.590E+00 7.850E+00 9.700E+00 1.200E+01
1.430E+01 1.610E+01 1.640E+01 1.490E+01 1.290E+01 9.650E+00 7.600E+00
23.0 CM* 23.0 CM *****
0.000E+00      0      0
2.670E-01 3.010E-01 3.320E-01 3.760E-01 4.410E-01 5.480E-01 6.910E-01 7.590E-01
8.740E-01 9.810E-01 1.070E+00 1.160E+00 1.250E+00 1.340E+00 1.430E+00 1.500E+00
1.570E+00 1.650E+00 1.710E+00 1.770E+00 1.840E+00 1.910E+00 1.980E+00 2.050E+00
2.100E+00 2.180E+00 2.270E+00 2.340E+00 2.410E+00 2.520E+00 2.600E+00 2.740E+00
2.910E+00 3.120E+00 3.440E+00 3.890E+00 4.620E+00 5.670E+00 7.270E+00 9.420E+00
1.190E+01 1.430E+01 1.530E+01 1.440E+01 1.300E+01 1.020E+01 8.130E+00

```

#### 2.4.4. Chuẩn bị Input-file số liệu thực nghiệm tốc độ đếm

Sau khi thực hiện đầy đủ các phép đo thực nghiệm đối với mỗi nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$  tại các vị trí khoảng cách khác nhau, số lượng phép đo tại mỗi vị trí là 16 phép đo tương ứng với lần lượt một phép đo trực tiếp (Bare detector-không có lắp đặt lớp làm chậm PE) và 15 phép đo tương ứng với 15 tổ hợp tăng dần các lớp làm chậm từ PE1 đến PE15. Như vậy luận văn

đã thực hiện tổng cộng 5 vị trí x 16 = 80 phép đo đối với nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và 3 vị trí x 16 = 48 phép đo đối với nguồn  $^{252}\text{Cf}$ . Kết quả thu được sau một phép đo đã trừ phông là một phổ thực nghiệm như được mô tả trong Hình 2.13. Số liệu thực nghiệm tốc độ đếm sau mỗi phép đo được xác định bằng tỉ số của tích phân đỉnh phổ thực nghiệm/thời gian đo. Tương ứng với một vị trí đo thực nghiệm, cần chuẩn bị một input-file ghi 16 giá trị kết quả tốc độ đếm, theo định dạng của chương trình MSANDB[9].

Một input-file tốc độ đếm thực nghiệm của hệ phổ kế Bonner-cylinder đo tại khoảng cách 100 cm từ nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  được mô tả như sau:

*BONNER-CYLINDER He-3 COUNTRATE DATA FROM Am241/Be  
NEUTRON SPECTRUM 100CM*

*Response - Count-rate - Uncertainty %*

BARE****	3.330E+02	0.220
3.5 CM**	3.000E+02	0.240
4.5 CM***	3.110E+02	0.230
5.5 CM***	3.590E+02	0.220
6.5 CM***	4.170E+02	0.200
7.5 CM***	4.900e+02	0.180
8.5 CM***	5.610e+02	0.170
9.5 CM***	6.390e+02	0.160
10.5 CM**	7.000e+02	0.150
11.5 CM**	7.610e+02	0.150
13.0 CM**	8.220e+02	0.140
15.0 CM**	8.660e+02	0.140
17.0 CM**	8.810e+02	0.140
19.0 CM**	8.570e+02	0.140
21.0 CM**	8.130e+02	0.140
23.0 CM**	7.540e+02	0.150

## CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. KẾT QUẢ ĐO THỰC NGHIỆM

Luận văn đã thực hiện đầy đủ các nội dung đo thực nghiệm như đã đặt vấn đề trong bản đề cương và theo yêu cầu của bài toán thực tiễn tại phòng thí nghiệm là đo và xác định phổ năng lượng neutron, tính toán suất liều tương đương tại 5 vị trí khoảng cách khác nhau đối với nguồn chuẩn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ . Ngoài ra luận văn cũng đã mở rộng thêm nội dung đo thực nghiệm và tính toán như trên đối với 3 vị trí khoảng cách từ nguồn chuẩn  $^{252}\text{Cf}$ .

#### 3.1.1. Kết quả đo đối với nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$

Đối với nguồn chuẩn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  luận văn đo thực phổ thực nghiệm ở các khoảng cách là 200, 150, 120, 100 và 65 cm. Mỗi phép đo được thực hiện trong khoảng thời gian từ 300 đến 1200 giây để đảm bảo sai số thống kê nhỏ hơn 0,5 %. Các kết quả tốc độ đếm thu được từ phổ thực nghiệm được trình bày trong các Bảng 3.1 đến Bảng 3.5.

Bảng 3.1: Kết quả đo nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại khoảng cách 200 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	1006	133571	1500	5500	12/10/22	133	0.27
2	PE1	4.75	1037	121464	1500	5500	12/10/22	117	0.29
3	PE2	9.75	1135	138986	1500	5500	12/10/22	122	0.27
4	PE3	14.75	1130	155233	1500	5500	12/10/22	137	0.25
5	PE4	19.75	1024	158872	1500	5500	12/10/22	155	0.25
6	PE5	24.75	1093	191810	1500	5500	12/10/22	175	0.23
7	PE6	29.75	1068	209181	1500	5500	13/10/22	196	0.22
8	PE7	34.75	1135	247096	1500	5500	13/10/22	218	0.20
9	PE8	39.75	1084	252509	1500	5500	13/10/22	233	0.20
10	PE9	44.75	1021	250724	1500	5500	13/10/22	246	0.20
11	PE10	52.25	1011	260957	1500	5500	13/10/22	258	0.20
12	PE11	62.25	1609	425827	1500	5500	13/10/22	265	0.15
13	PE12	72.25	1082	280922	1500	5500	13/10/22	260	0.19
14	PE13	82.25	1287	322884	1500	5500	13/10/22	251	0.18
15	PE14	92.25	1200	276928	1500	5500	13/10/22	231	0.19
16	PE15	102.25	1200	257209	1500	5500	13/10/22	214	0.20

Bảng 3.2: Kết quả đo nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại khoảng cách 150 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	956	181446	1500	5500	13/10/22	190	0.23
2	PE1	4.75	900	152014	1500	5500	13/10/22	169	0.26
3	PE2	9.75	900	161814	1500	5500	13/10/22	180	0.25
4	PE3	14.75	900	181158	1500	5500	13/10/22	201	0.23
5	PE4	19.75	900	206247	1500	5500	13/10/22	229	0.22
6	PE5	24.75	900	239385	1500	5500	13/10/22	266	0.20
7	PE6	29.75	900	270625	1500	5500	13/10/22	301	0.19
8	PE7	34.75	900	302273	1500	5500	13/10/22	336	0.18
9	PE8	39.75	900	317432	1500	5500	14/10/22	353	0.18
10	PE9	44.75	900	339932	1500	5500	14/10/22	378	0.17
11	PE10	52.25	900	360586	1500	5500	14/10/22	401	0.17
12	PE11	62.25	900	381473	1500	5500	14/10/22	424	0.16
13	PE12	72.25	900	366965	1500	5500	14/10/22	408	0.17
14	PE13	82.25	900	346222	1500	5500	14/10/22	385	0.17
15	PE14	92.25	900	332371	1500	5500	14/10/22	369	0.17
16	PE15	102.25	900	318071	1500	5500	14/10/22	353	0.18

Bảng 3.3: Kết quả đo nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại khoảng cách 120 cm

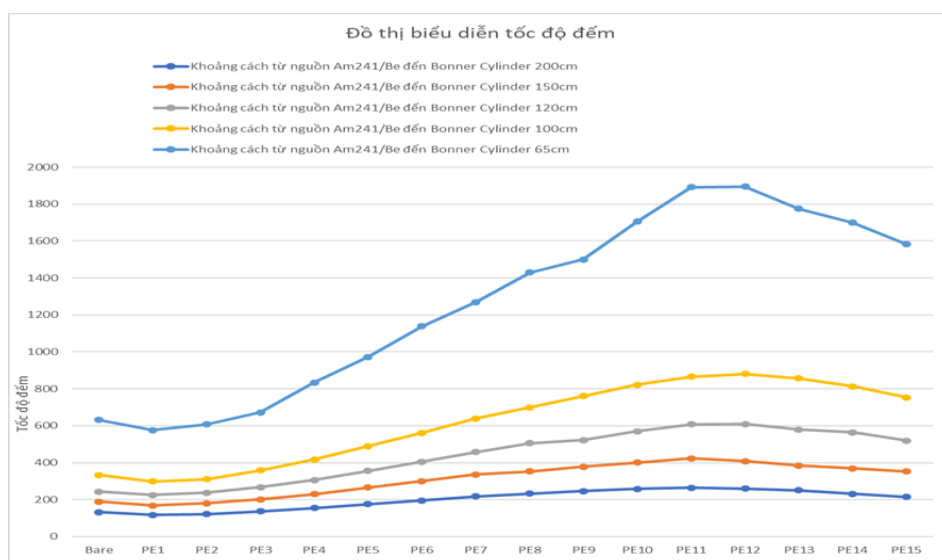
S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	900	218677	1500	5500	15/10/22	243	0.21
2	PE1	4.75	900	202915	1500	5500	15/10/22	225	0.22
3	PE2	9.75	900	213424	1500	5500	15/10/22	237	0.22
4	PE3	14.75	900	240128	1500	5500	15/10/22	267	0.20
5	PE4	19.75	900	275045	1500	5500	15/10/22	306	0.19
6	PE5	24.75	900	320131	1500	5500	15/10/22	356	0.18
7	PE6	29.75	900	364978	1500	5500	15/10/22	406	0.17
8	PE7	34.75	900	411656	1500	5500	15/10/22	457	0.16
9	PE8	39.75	900	455071	1500	5500	15/10/22	506	0.15
10	PE9	44.75	900	470562	1500	5500	16/10/22	523	0.15
11	PE10	52.25	900	512533	1500	5500	16/10/22	569	0.14
12	PE11	62.25	900	547201	1500	5500	16/10/22	608	0.14
13	PE12	72.25	900	547715	1500	5500	16/10/22	609	0.14
14	PE13	82.25	900	520904	1500	5500	16/10/22	579	0.14
15	PE14	92.25	900	508196	1500	5500	16/10/22	565	0.14
16	PE15	102.25	900	467227	1500	5500	16/10/22	519	0.15

Bảng 3.4: Kết quả đo nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại khoảng cách 100 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	606	201664	1500	5500	16/10/22	333	0.22
2	PE1	4.75	600	179701	1500	5500	16/10/22	300	0.24
3	PE2	9.75	600	186805	1500	5500	16/10/22	311	0.23
4	PE3	14.75	600	215212	1500	5500	16/10/22	359	0.22
5	PE4	19.75	600	250201	1500	5500	16/10/22	417	0.20
6	PE5	24.75	600	293892	1500	5500	16/10/22	490	0.18
7	PE6	29.75	600	336639	1500	5500	16/10/22	561	0.17
8	PE7	34.75	600	383207	1500	5500	16/10/22	639	0.16
9	PE8	39.75	600	419721	1500	5500	16/10/22	700	0.15
10	PE9	44.75	600	456306	1500	5500	16/10/22	761	0.15
11	PE10	52.25	600	493003	1500	5500	16/10/22	822	0.14
12	PE11	62.25	600	519437	1500	5500	16/10/22	866	0.14
13	PE12	72.25	600	528371	1500	5500	16/10/22	881	0.14
14	PE13	82.25	600	514050	1500	5500	16/10/22	857	0.14
15	PE14	92.25	600	487755	1500	5500	16/10/22	813	0.14
16	PE15	102.25	600	452265	1500	5500	16/10/22	754	0.15

Bảng 3.5: Kết quả đo nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại khoảng cách 65 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	500	315651	1500	5500	20/10/22	631	0.18
2	PE1	4.75	300	172749	1500	5500	20/10/22	576	0.24
3	PE2	9.75	300	182509	1500	5500	20/10/22	608	0.23
4	PE3	14.75	300	201513	1500	5500	20/10/22	672	0.22
5	PE4	19.75	300	250239	1500	5500	21/10/22	834	0.20
6	PE5	24.75	300	291717	1500	5500	21/10/22	972	0.19
7	PE6	29.75	300	341725	1500	5500	21/10/22	1139	0.17
8	PE7	34.75	300	380734	1500	5500	21/10/22	1269	0.16
9	PE8	39.75	300	428764	1500	5500	21/10/22	1429	0.15
10	PE9	44.75	300	449903	1500	5500	21/10/22	1500	0.15
11	PE10	52.25	300	511663	1500	5500	21/10/22	1706	0.14
12	PE11	62.25	300	567460	1500	5500	21/10/22	1892	0.13
13	PE12	72.25	300	568195	1500	5500	21/10/22	1894	0.13
14	PE13	82.25	300	532165	1500	5500	21/10/22	1774	0.14
15	PE14	92.25	300	509621	1500	5500	21/10/22	1699	0.14
16	PE15	102.25	300	474899	1500	5500	21/10/22	1583	0.15



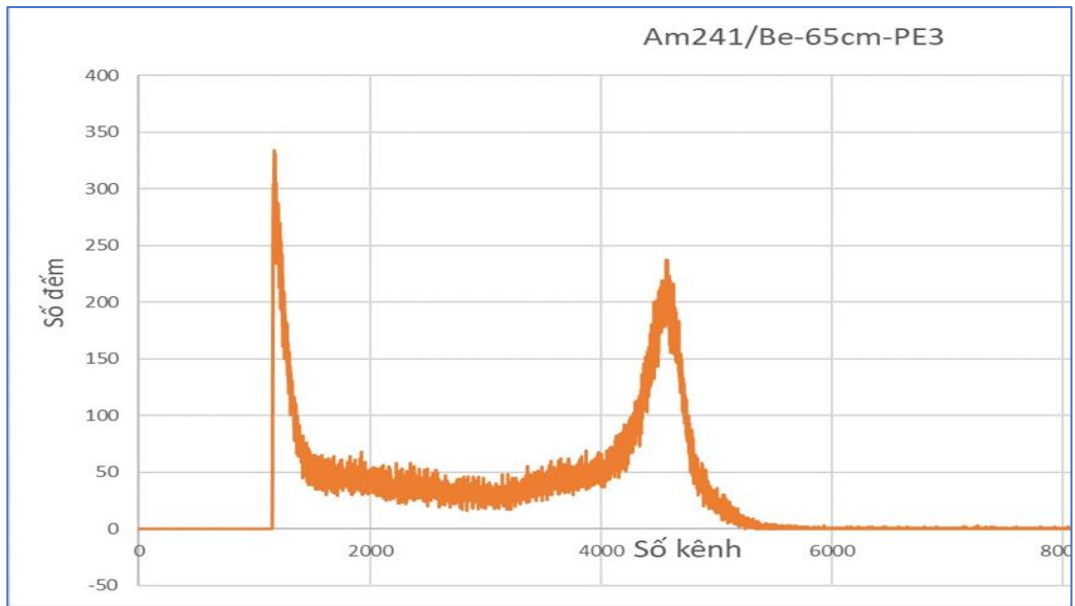
Hình 3.1. Đồ thị biểu diễn tốc độ đếm thực nghiệm tại các khoảng cách khác nhau từ của nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$

Trong quá trình tương tác của neutron với hệ phổ kế Bonner-cylinder bao gồm đầu dò  $^3\text{He}$  và tổ hợp các lớp chất làm chậm bằng vật liệu PE, neutron có thể trải qua một trong các trường hợp sau:

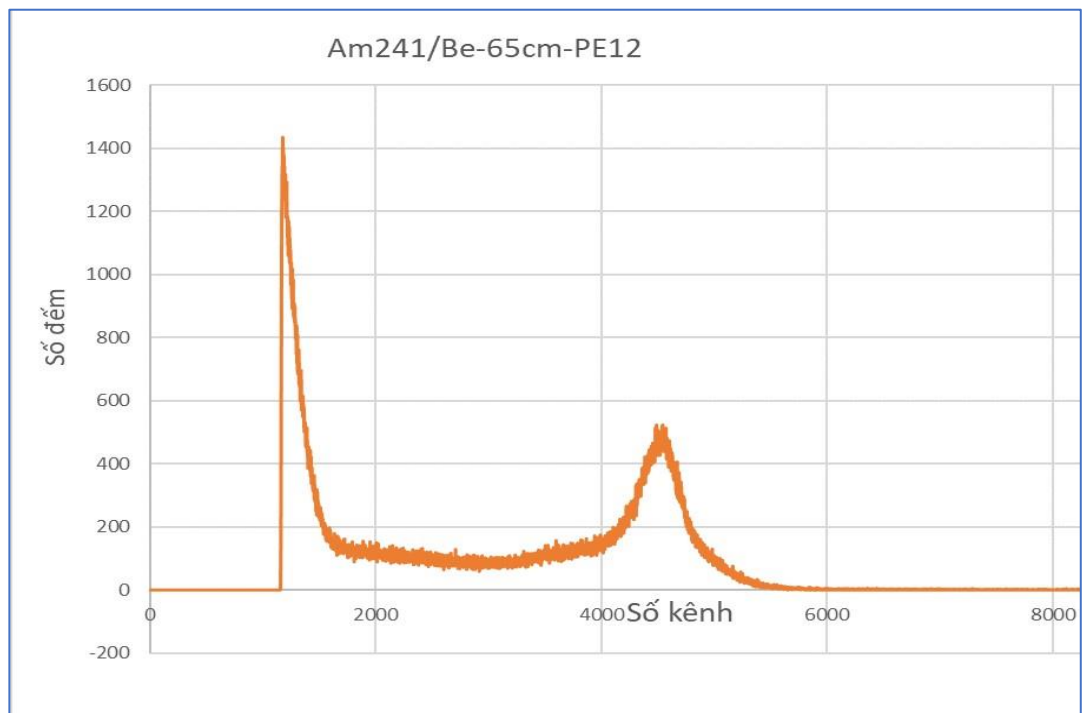
- Thoát ra khỏi khối chất làm chậm.
- Bị hấp thụ trong chất làm chậm nhưng không đến được đầu dò  $^3\text{He}$  đo neutron nhiệt đặt ở tâm của khối hình trụ Bonner-cylinder bằng vật liệu PE.
- Bị bắt bởi đầu dò  $^3\text{He}$  đo neutron nhiệt thông qua phản ứng bắt neutron nhiệt:  $n_{\text{th}} + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + \text{p} + 764 \text{ keV}$ .

Từ Hình 3.1 cho thấy tốc độ đếm xung càng tăng khi khoảng cách từ nguồn đến đầu dò càng nhỏ. Số neutron nhiệt được ghi nhận bởi đầu dò lớn do tiết diện phản ứng cao của neutron nhiệt với  $^3\text{He}$ , nên tốc độ đếm xung ở lớp trần PE0 lớn hơn ở các lớp PE1, PE2,..PEN. Khi tăng bề dày khối làm chậm lên thì tốc độ đếm xung càng tăng. Phổ đo thực nghiệm được mô tả như trong các Hình 3.2 và 3.3.





Hình 3.2: Phổ đo thực nghiệm với nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  ở khoảng cách 65 cm với tổ hợp các lớp chất làm chậm PE1+PE2+ PE3



Hình 3.3: Phổ đo thực nghiệm với nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  ở khoảng cách 65 cm với tổ hợp các lớp chất làm chậm PE1+PE2+.....+PE12

### 3.1.2. Kết quả đo đối với nguồn $^{252}\text{Cf}$

Đối với nguồn chuẩn neutron  $^{252}\text{Cf}$  luận văn đo thực phổ thực nghiệm ở các khoảng cách là 200, 100 và 60 cm. Mỗi phép đo được thực hiện trong khoảng thời gian từ 600 đến 1000 giây để đảm bảo sai số thống kê nhỏ hơn

0,7 %. Các kết quả tốc độ đếm thu được từ phổ thực nghiệm được trình bày trong các Bảng 3.6 đến Bảng 3.8.

Bảng 3.6: Kết quả đo nguồn  $^{252}\text{Cf}$  tại khoảng cách 200 cm

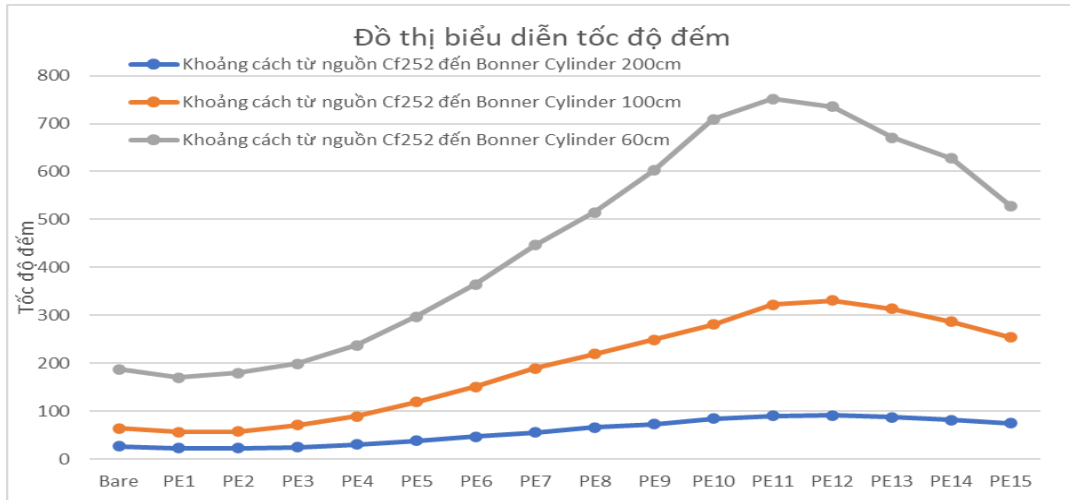
S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	1000	26939	1500	5500	27/10/22	27	0.61
2	PE1	4.75	1000	22864	1500	5500	27/10/22	23	0.66
3	PE2	9.75	1000	22452	1500	5500	27/10/22	22	0.67
4	PE3	14.75	1000	24992	1500	5500	27/10/22	25	0.63
5	PE4	19.75	1000	30419	1500	5500	27/10/22	30	0.57
6	PE5	24.75	1000	38432	1500	5500	27/10/22	38	0.51
7	PE6	29.75	1000	47076	1500	5500	27/10/22	47	0.46
8	PE7	34.75	10128	564160	1500	5500	27/10/22	56	0.13
9	PE8	39.75	1000	65511	1500	5500	27/10/22	66	0.39
10	PE9	44.75	1000	72626	1500	5500	27/10/22	73	0.37
11	PE10	52.25	1000	84026	1500	5500	27/10/22	84	0.34
12	PE11	62.25	1000	89537	1500	5500	27/10/22	90	0.33
13	PE12	72.25	1000	90870	1500	5500	27/10/22	91	0.33
14	PE13	82.25	1000	86910	1500	5500	27/10/22	87	0.34
15	PE14	92.25	1000	81740	1500	5500	27/10/22	82	0.35
16	PE15	102.25	1000	74292	1500	5500	27/10/22	74	0.37

Bảng 3.7: Kết quả đo nguồn  $^{252}\text{Cf}$  ở khoảng cách 100 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	1000	64426	1500	5500	26/10/22	64	0.39
2	PE1	4.75	1000	56074	1500	5500	26/10/22	56	0.42
3	PE2	9.75	1000	57285	1500	5500	26/10/22	57	0.42
4	PE3	14.75	1000	70313	1500	5500	26/10/22	70	0.38
5	PE4	19.75	1000	88709	1500	5500	26/10/22	89	0.34
6	PE5	24.75	1000	118993	1500	5500	26/10/22	119	0.29
7	PE6	29.75	1000	151021	1500	5500	26/10/22	151	0.26
8	PE7	34.75	1000	189144	1500	5500	26/10/22	189	0.23
9	PE8	39.75	1000	218697	1500	5500	26/10/22	219	0.21
10	PE9	44.75	1000	248677	1500	5500	26/10/22	249	0.20
11	PE10	52.25	1000	280772	1500	5500	26/10/22	281	0.19
12	PE11	62.25	1000	321921	1500	5500	26/10/22	322	0.18
13	PE12	72.25	1000	331073	1500	5500	26/10/22	331	0.17
14	PE13	82.25	1000	313506	1500	5500	26/10/22	314	0.18
15	PE14	92.25	1000	286313	1500	5500	26/10/22	286	0.19
16	PE15	102.25	1000	253355	1500	5500	27/10/22	253	0.20

Bảng 3.8: Kết quả đo nguồn  $^{252}\text{Cf}$  ở khoảng cách 60 cm

S TT	Ký hiệu lớp PE ngoài cùng	Độ dày PE tích lũy (mm)	Thời gian đo (s)	Số đếm đỉnh 764 keV	Kênh trái	Kênh phải	Ngày đo	Tốc độ đếm (cps)	Sai số (%)
1	PE0	0	910	170690	1500	5500	27/10/22	188	0.24
2	PE1	4.75	800	136054	1500	5500	27/10/22	170	0.27
3	PE2	9.75	800	143392	1500	5500	27/10/22	179	0.26
4	PE3	14.75	800	158807	1500	5500	27/10/22	199	0.25
5	PE4	19.75	1000	237694	1500	5500	27/10/22	238	0.21
6	PE5	24.75	1000	297307	1500	5500	27/10/22	297	0.18
7	PE6	29.75	800	291544	1500	5500	27/10/22	364	0.19
8	PE7	34.75	800	356732	1500	5500	27/10/22	446	0.17
9	PE8	39.75	800	412081	1500	5500	27/10/22	515	0.16
10	PE9	44.75	800	481946	1500	5500	27/10/22	602	0.14
11	PE10	52.25	800	567446	1500	5500	27/10/22	709	0.13
12	PE11	62.25	800	600928	1500	5500	27/10/22	751	0.13
13	PE12	72.25	800	587993	1500	5500	27/10/22	735	0.13
14	PE13	82.25	800	536736	1500	5500	27/10/22	671	0.14
15	PE14	92.25	800	501639	1500	5500	27/10/22	627	0.14
16	PE15	102.25	800	421630	1500	5500	27/10/22	527	0.15



Hình 3.4. Đồ thị biểu diễn tốc độ đếm thực nghiệm tại các khoảng cách khác nhau của nguồn neutron  $^{252}\text{Cf}$

Kết quả ở bảng số liệu từ 3.1 đến 3.8 ta thấy: sai số thực nghiệm được xác định là sai số của tích phân đỉnh phổ và có tích chất là sai số thống kê (hay còn gọi là sai số ngẫu nhiên). Sai số này sẽ giảm theo thời gian đo. Trong quá trình thực nghiệm Luận văn đã chọn thời gian đo đủ dài để đạt được sai số thực nghiệm nhỏ hơn 0,5% đối với nguồn  $^{241}\text{Am/Be}$  và nhỏ hơn 0,7% đối với nguồn  $^{252}\text{Cf}$  để đảm bảo các kết quả thực nghiệm có độ tin cậy tốt, cũng như đáp ứng yêu cầu của phòng thí nghiệm VLHN tại Viện NCHN.

### 3.2. KẾT QUẢ XÁC ĐỊNH PHÂN BỐ PHỔ THÔNG LƯỢNG NEUTRON THEO NĂNG LƯỢNG

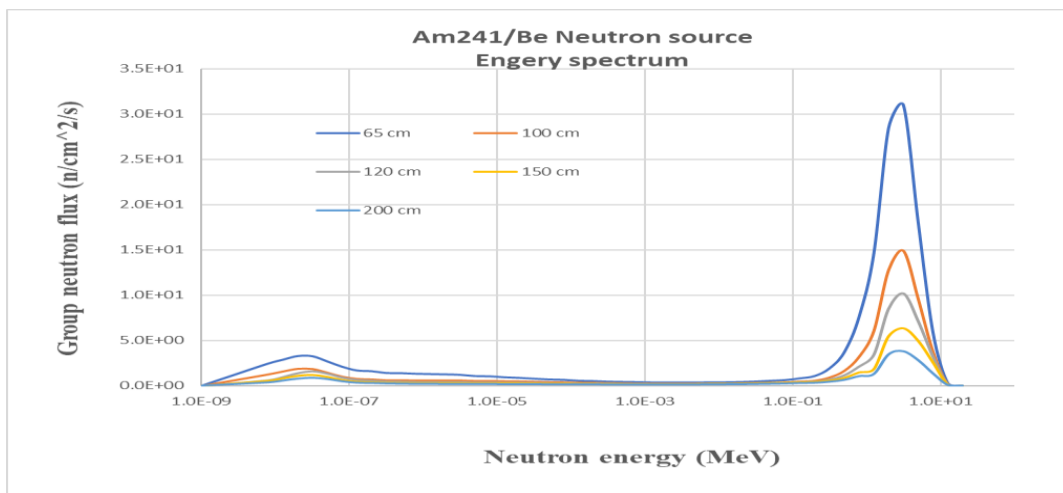
Luận văn đã sử dụng chương trình MSANDB để giải hệ phương trình từ số liệu thực nghiệm để thu nhận được kết quả về phổ phân bố thông lượng neutron theo năng lượng của các nguồn chuẩn neutron  $^{241}\text{Am/Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$ . Các Input-file về số liệu đo thực nghiệm tốc độ đếm đối với nguồn chuẩn neutron và Input-file về hàm đáp ứng của hệ phổ kế Bonner-cylinder đã được cung cấp cho chương trình MSANDB thi hành việc giải cuộn số liệu thực nghiệm và kết quả thu được như sau:

#### 3.2.1. Kết quả xác định phổ năng lượng nguồn neutron $^{241}\text{Am/Be}$

Kết quả tích phân theo các vùng neutron nhiệt, trên nhiệt và neutron nhanh được trình bày trong Bảng 3.9.

Bảng 3.9: Kết quả phổ thông lượng neutron của nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ 

Neutron	Năng lượng	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 65 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 100 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 120 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 150 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 200 cm
Neutron nhiệt	0-0,5 eV	22,727	11,785	8,940	6,839	4,841
Neutron trên nhiệt	0,5 eV-300 keV	21,537	12,195	9,286	7,808	5,041
Neutron nhanh	300 keV-13 MeV	111,515	52,992	36,571	24,266	14,971

Hình 3.5: Kết quả phổ thông lượng neutron phân bố theo năng lượng của nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  tại các khoảng cách khác nhau

Từ Hình 3.5 cho thấy, có hai đỉnh trong phổ năng lượng: một đỉnh đại diện cho vùng neutron năng lượng nhiệt từ neutron nhanh được làm chậm do tán xạ với các vật liệu che chắn bức xạ xung quanh nguồn neutron, và một đỉnh ở vùng năng lượng cao đại diện cho thành phần neutron nhanh bức xạ trực tiếp từ nguồn neutron  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ .

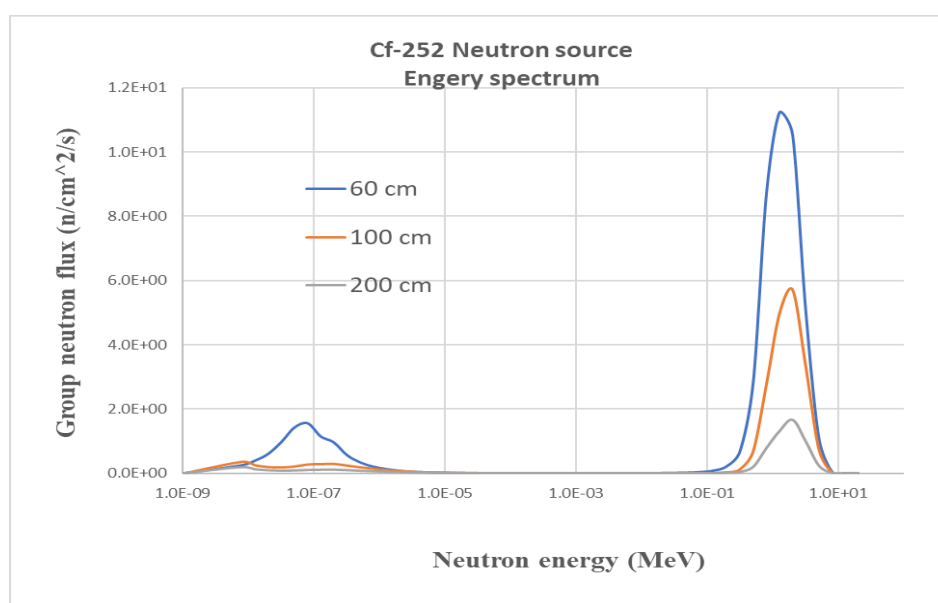
### 3.2.2. Kết quả xác định phổ năng lượng neutron từ nguồn chuẩn $^{252}\text{Cf}$

Các Input-file về số liệu đo thực nghiệm tốc độ đếm đối với nguồn chuẩn neutron  $^{252}\text{Cf}$  và Input-file về hàm đáp ứng của hệ phổ kế Bonner-cylinder cũng đã được cung cấp cho chương trình MSANDB thi hành việc giải cuộn số liệu thực nghiệm và kết quả được trình bày như trong Hình 3.6. Kết quả tích

phân theo các vùng neutron nhiệt, trên nhiệt và neutron nhanh được trình bày trong Bảng 3.10.

Bảng 3.10: Kết quả phổ thông lượng neutron của nguồn  $^{252}\text{Cf}$

Neutron	Năng lượng	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 60 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 100 cm	Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> /s) tại 200 cm
Neutron nhiệt	0-0,5 eV	8,250	2,537	1,032
Neutron trên nhiệt	0,5 eV-300 keV	1,758	0,766	0,290
Neutron nhanh	300 keV-13 MeV	40,259	18,428	5,213



Hình 3.6: Kết quả phổ thông lượng neutron phân bố theo năng lượng của nguồn  $^{252}\text{Cf}$  tại các khoảng cách khác nhau

### 3.3. KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ SUẤT LIỀU NEUTRON

Từ kết quả phổ phân bố thông lượng theo năng lượng đã được giải cuộn, giá trị tương đương liều môi trường H(10) tại vị trí đo cách nguồn neutron ở các khoảng cách khác nhau đã được tính toán thông qua bảng chuyển đổi thông lượng sang suất tương đương liều môi trường theo tiêu chuẩn ICRP74 [13]. Kết quả tính toán suất liều và so sánh với số liệu đo thực nghiệm thực hiện bởi nhân viên an toàn bức xạ sử dụng một máy đo liều chuyên dụng model: ALOKA TPS-451 được trình bày ở Bảng 3.11 và 3.12.

Bảng 3.11: Kết quả suất liều neutron của nguồn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  ở các khoảng cách khác nhau

Nguồn $^{241}\text{Am}/\text{Be}$	Năng lượng	Suất liều neutron ( $\mu\text{Sv/h}$ )				
		65 cm	100 cm	120 cm	150 cm	200 cm
Neutron nhiệt	0 - 0,5 eV	0,947	0,488	0,378	0,286	0,203
Neutron trên nhiệt	0,5 eV - 300 keV	3,585	1,890	1,479	1,297	0,918
Neutron nhanh	300 keV - 13 MeV	163,842	77,789	53,566	35,371	21,758
Máy đo liều ALOKA TPS-451	0 - 13 MeV	166,91	76,91	53,72	35,94	22,66

Bảng 3.12: Kết quả suất liều neutron của nguồn  $^{252}\text{Cf}$  ở các khoảng cách khác nhau

Nguồn $^{252}\text{Cf}$	Năng lượng	Suất liều neutron ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
		60 cm	100 cm	200 cm
Neutron nhiệt	0 - 0,5 eV	0,365	0,107	0,043
Neutron trên nhiệt	0,5 eV - 300 keV	0,824	0,177	0,056
Neutron nhanh	300 keV - 13 MeV	58,606	27,274	7,710
Máy đo liều ALOKA TPS-451	0 - 13 MeV	64,71	25,04	8,93

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. KẾT LUẬN

Với sự nỗ lực, cố gắng của bản thân cùng sự hướng dẫn khoa học của các giáo viên hướng dẫn và sự hỗ trợ của các nghiên cứu viên tại Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân, luận văn đã được thực hiện và hoàn thành đầy đủ các mục tiêu đề ra theo đúng tiến độ, thời gian thực hiện từ tháng 9 năm 2022 đến tháng 4 năm 2023. Các kết quả cụ thể đã đạt được bao gồm:

- Đã nghiên cứu tổng quan về phương pháp đo phổ neutron, các cơ chế tương tác của neutron với vật chất, các phương pháp ghi đo neutron.

- Luận văn đã tìm hiểu về thiết kế và vận hành, sử dụng hệ phổ kế neutron Bonner-cylinder tại Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân. Hệ bao gồm 15 lớp chất làm chậm bằng vật liệu PE có dạng hình trụ có đường kính khác nhau, và đã sử dụng bộ số liệu đã có sẵn về ma trận hàm đáp ứng của hệ phổ kế này.

- Đã đo phổ thực nghiệm của hai nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$ , xác định được thông lượng neutron phân bố theo năng lượng bằng cách sử dụng chương trình MSANDB để giải cuộn (unfolding) các kết quả đo phổ thực nghiệm.

- Từ kết quả phổ năng lượng, luận văn đã xác định được suất liều neutron tương đương bằng cách sử dụng bảng hệ số chuyển đổi thông lượng-suất liều neutron tương đương theo tiêu chuẩn ICRP74. Kết quả suất liều tương đương cũng đã được so sánh cho thấy có sự phù hợp tốt với số liệu đo độc lập bằng máy đo liều chuyên dụng model: ALOKA TPS-451.

Kết quả của luận văn có ý nghĩa về khoa học và thực tiễn trong lĩnh vực đo thực nghiệm và xác định phổ năng lượng neutron của nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$  tại Viện NCHN. Thông qua việc nghiên cứu giải quyết bài toán này, đề tài luận văn đã xác định được suất liều neutron (nhiệt, trên nhiệt, nhanh) tại các vị trí khác nhau từ các nguồn chuẩn  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$  và  $^{252}\text{Cf}$ , số liệu này có ý nghĩa trong việc nghiên cứu và đào tạo về ghi đo liều bức xạ neutron.

### 2. KIẾN NGHỊ

Luận văn kiến nghị tiếp tục nghiên cứu mở rộng bài toán ghi đo phổ năng lượng neutron và xác định liều neutron tương đương đối với các nguồn neutron khác. Tiếp tục nghiên cứu áp dụng các phương pháp giải cuộn (unfolding) khác như phương pháp Monte-Carlo hay phương pháp trí tuệ



nhân tạo (Artificial Intelligence-AI) là một phương pháp mới đang nhận được nhiều quan tâm.

**DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. ICRP, 2010, *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*, ICRP Publication 116.
2. Felix Mathew, 2019, *Measurement of neutron fluence spectra using a passive nested neutron spectrometer with gold foils*, Master of Science in Medical Radiation Physics, McGill University, Montreal.
3. Nguyễn An Sơn, 2016, *Cơ sở vật lý hạt nhân*, NXB Đại học QG TP Hồ Chí Minh.
4. Lê Thị Mộng Thuần, 2011, *Đo phân bố suất liều neutron đối với Howitzer nước dùng nguồn đồng vị*, Luận văn Thạc sĩ Vật lý, Trường Đại học Sư phạm TP. Hồ Chí Minh.
5. Mai Xuân Trung, 2013, *Giáo trình đo liều bức xạ*, trường ĐH Đà Lạt.
6. Andrea R., Correlatore P., Bedogni DR., 2011, *Feasibility study of a neutron spectrometer for complex fields*, Politecnico Di Milano.
7. Lise Verbraeken, 2015, *Neutron spectrometry using a simplified Bonner Sphere system*, Graduation project Engineering Physics.
8. Le Ngoc Thiem, 2018, *Characterization of neutron calibration fields of radionuclide sources using Bonner Sphere Spectrometer*, Dissertation for the Doctor Degree of Physics, Vietnam Atomic Energy Institute.
9. M. Matzke, 1987, *Metrology File NMF-90*, NEA Databank.
10. D.W. Wootan F. Schmittroth, 1981, *Comparison of SAND-II and ferret*, Operated by Westinghouse Hanford Company.
11. Nguyễn Đức Hòa, 2012, *Giáo trình điện tử hạt nhân*, NXB Giáo dục Việt Nam.
12. Phạm Thị Ngân, 2023, *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo và xác định số liệu hàm đáp ứng hệ phổ kế neutron Bonner-cylinder*, Luận văn Thạc sĩ Vật lý, Viện hàn lâm khoa học và công nghệ Việt Nam.
13. International Commission on Radiological Protection, 1996, *Conversion coefficients for use in radiological protection against external exposure*, ICRP Publication 74, Volume 26, No.3/4, Pergamon.

