

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THỬ NGHIỆM HỆ ĐO TÁN XẠ NEUTRON TRÊN KÊNH NGANG SỐ 4, Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN Đà Lạt

TƯỜNG THỊ THU HƯỜNG, PHẠM NGỌC SƠN, TRẦN TUẤN ANH,
NGUYỄN DUY QUANG, PHAN BẢO QUỐC HIẾU

*Viện nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt
tuongthuong@yahoo.com*

Tóm tắt: Tán xạ neutron là một trong những kỹ thuật hàng đầu được sử dụng rộng rãi ở nhiều quốc gia trong việc khảo sát cũng như đánh giá tính chất và cấu trúc ở thang nguyên tử của các loại vật liệu. Ở Việt Nam, kỹ thuật tán xạ neutron hiện nay chưa được phát triển. Để nghiên cứu bước đầu cho việc phát triển một hệ đo neutron tán xạ đặt tại kênh ngang số 1 sắp sửa được khai thác ở lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, nhóm nghiên cứu đã nghiên cứu thiết kế thử nghiệm một hệ đo phân bố tán xạ neutron theo góc và đo thử nghiệm với dòng neutron phin lọc 148 keV trên kênh ngang số 4. Trong báo cáo này, nhóm nghiên cứu sẽ trình bày phương pháp đo và một số kết quả đo neutron tán xạ trên bia mẫu ^{181}Ta tại các góc 45° , 60° , 90° , 120° , và 135° . Các giá trị thực nghiệm được so sánh với kết quả tính toán mô phỏng sử dụng chương trình MCNP5.

Từ khóa: *tán xạ đàn hồi, phin lọc neutron, MCNP5*

DEVELOPMENT OF A FUNDAMENTAL MEASURING SYSTEM FOR NEUTRON SCATTERING AT CHANNEL No. 4, DALAT REACTOR

Abstract: Neutron scattering is one of the leading techniques that is widely used in many different scientific fields in the world. It can be applied for research and evaluation of structure characterization of materials on the atomic scale. The neutron scattering technique will be established in the RCNEST in the near future. In this work, we have designed and fabricated a system for measuring of the neutron scattering in the horizontal channel No. 4 at the Dalat research reactor. The experimental measurements were carried out on ^{181}Ta target at the 148 keV filtered neutron energy with angles of 45° , 60° , 90° , 120° and 135° , respectively. The obtained results were compared with the simulated values by MCNP5.

Keyword: *neutron scattering, filtered neutron, Dalat research reactor, MCNP5*

1. MỞ ĐẦU

Kỹ thuật neutron tán xạ ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định tính chất và cấu trúc vật liệu các dạng rắn, lỏng, khí, vật liệu nano, tinh thể, động lực học mạng tinh thể v.v. Có 4 kỹ thuật đo neutron là đo truyền qua, tán xạ không đàn hồi, tán xạ đàn hồi, và neutron echo-spin. Trong đó kỹ thuật tán xạ đàn hồi là kỹ thuật đo cường độ neutron tán xạ theo góc nhằm xác định tính chất và cấu trúc vật liệu đang phát triển mạnh mẽ. Ví dụ các hệ phổ kế nhiễu xạ, khuếch tán, phản xạ, tán xạ góc nhỏ (SANS) đang hoạt động hiệu quả tại JAEA (Nhật), Dubna (Nga), GEMS (Đức), ORNL (Mỹ) v.v, cũng dựa vào phương pháp này [1-15].

Trên thế giới, các hệ tán xạ neutron chủ yếu được thiết kế và lắp đặt trên các kênh neutron của lò phản ứng nghiên cứu như các hệ BIO-SANS, GP-SANS, IMAGINE tại lò HFIR, hay các hệ CORELLI, EQ-SANS, MAGREF dùng máy gia tốc SNS, ORNL, Mỹ, v.v [16]. Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt đã hoạt động nhiều năm qua nhưng chưa có hướng đo tán xạ neutron nào được nghiên cứu. Vì lợi ích từ các hướng nghiên cứu neutron tán xạ mang lại, đồng thời để bắt kịp xu thế, một hệ đo neutron tán xạ sẽ được thiết kế và lắp đặt trên kênh ngang số 1, lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt (DNRI). Trên cơ sở đó, nhóm nghiên cứu đã tiến hành phát triển một hệ đo tán xạ quy mô nhỏ chỉ một đầu dò để thử nghiệm trên kênh ngang số 4 nhằm đánh giá khả năng áp dụng của kỹ thuật này trên lò Đà Lạt. Báo cáo này trình bày các kết quả thực nghiệm đo phân bố góc của neutron tán xạ trên dòng neutron phin lọc 148 keV.

2. NỘI DUNG

2.1. Đối tượng và phương pháp

Hệ đo neutron tán xạ theo góc được thiết kế với những tiêu chí quan trọng như chuẩn trực dòng neutron đến, che chắn giảm nhiễu, thiết kế cấu hình đặt mẫu và đầu dò sao cho giá trị đo đạt tối ưu, xác lập các thông số phù hợp cho hệ điện tử, và đảm bảo an toàn bức xạ cho người làm việc. Do chuẩn trực dòng và che chắn giảm nhiễu rất quan trọng trong quá trình đo tán xạ nên mô phỏng là thực sự cần thiết. Kết quả đo thực nghiệm neutron tán xạ theo góc cũng được đánh giá và so sánh với kết quả mô phỏng.

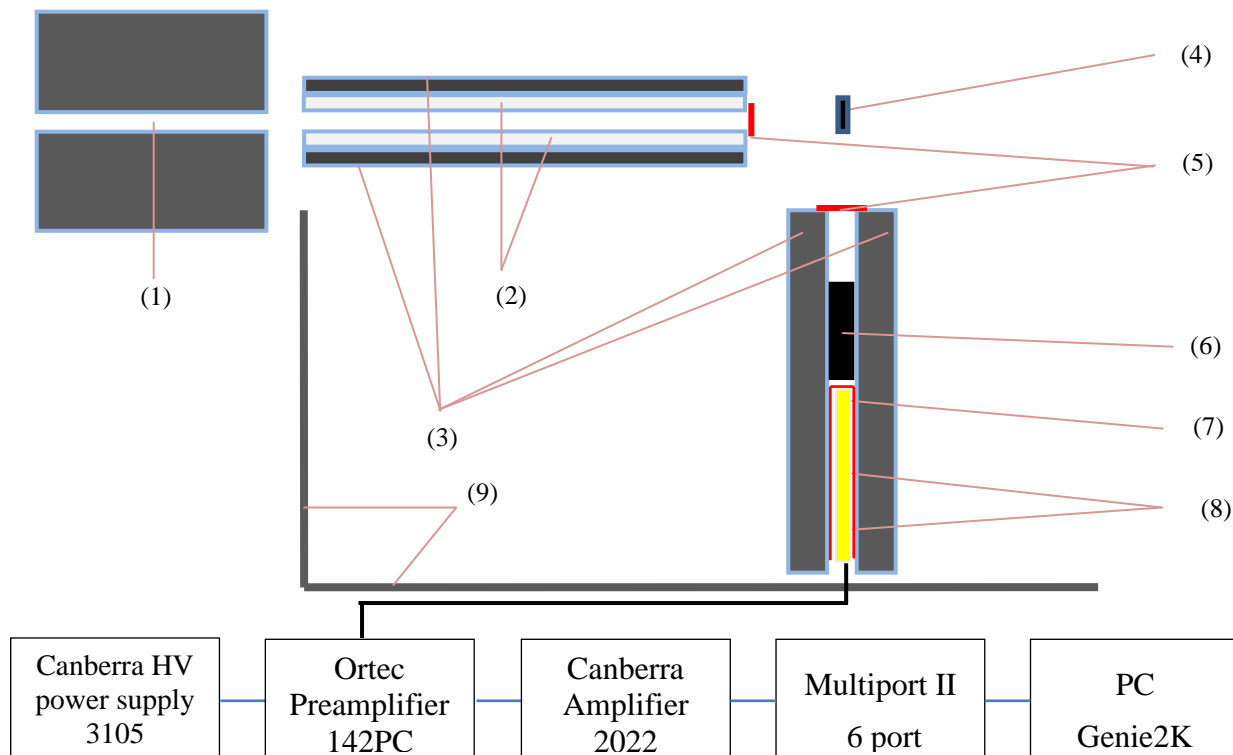
Mô phỏng

Với mục tiêu giảm nhiễu tối đa có thể, che chắn và chuẩn trực nhằm nhiệt hóa neutron nhanh và hấp thụ neutron nhiệt là việc làm cần thiết trước khi thiết lập cấu hình đo. Đầu tiên, mô phỏng về sự suy giảm thông lượng neutron 148 keV qua bề dày vật chất che chắn ban đầu là 3.9 cm, tính toán sự suy giảm thông lượng theo tỷ lệ khối lượng B₄C pha trong Paraffin được thực hiện để chọn ra tỷ lệ vật liệu che chắn hợp lý về hình học và về kinh tế. Sau đó, tiếp tục mô phỏng tính toán sự suy giảm thông lượng của neutron khi đi qua các kích thước bề dày che chắn khác nhau để lựa chọn bề dày của vật chất che chắn và chuẩn trực.

Chương trình mô phỏng thông lượng neutron đến đầu dò sau khi tán xạ trên mẫu ¹⁸¹Ta thực hiện dựa trên cấu hình thực tế: một nguồn neutron 148 keV phát đơn hướng đến mẫu ¹⁸¹Ta hình trụ có đường kính 1.5 cm, cao 2.5 cm từ khoảng cách 80 cm; Đầu dò ³He đặt theo các góc từ 30⁰ đến 150⁰, cách mẫu 30 cm; Thông lượng neutron đến đầu dò (F4) được thực hiện với số hạt gieo bằng E8.

Thiết lập cấu hình đo

Sau khi mô phỏng và tính toán, thiết kế hình học của hệ đo tán xạ mô tả như Hình 1



Hình 1. Sơ đồ thiết kế hệ đo tán xạ neutron đàn hồi theo góc.

(1) Khe chuẩn trực dẫn dòng neutron ra từ phin lọc; (2) Paraffin 100%; (3) Ống che chắn và chuẩn trực 50% B₄C + 50% Paraffin; (4) Mẫu trụ ¹⁸¹Ta; (5) Cadmi dày 2mm; (6) Paraffin pha B₄C để hấp thụ neutron tán xạ khi đo nhiễu; (7) Đầu dò ³He; (8) Cadmi lá cuộn đầu dò chắn neutron nhiệt; (9) Che chắn an toàn.

Phương pháp đo neutron tán xạ đàn hồi là phương pháp đo cường độ neutron tán xạ trên mẫu tại các góc khác nhau. Vì vậy, việc thiết kế cấu hình hệ đo là cần thiết sao cho đầu dò quay được các góc dễ dàng và chính xác. Dòng neutron phin lọc đơn năng 148 keV với thông lượng 3.9×10^6 n/cm²/s và cường độ đạt 95.8% [17] được sử dụng trong suốt quá trình đo đạc.

Hệ hoạt động với 02 cơ chế gồm đo phong và đo mẫu như sau:

- Đo mẫu: Dòng neutron phin lọc 148 keV đi ra từ khe chuẩn trực (1), sau đó tiếp tục được chuẩn trực với một ống chuẩn trực dài 80 cm bên trong là Paraffin (2) nhằm nhiệt hóa neutron nhanh và bên ngoài là lớp B₄C pha Paraffin (3) hấp thụ neutron nhiệt. Đầu ống được che một lớp Cadmi (5) dày 2mm nhằm hấp thụ neutron. Tiếp đến, neutron 148 keV ra khỏi ống chuẩn trực sẽ đến thẳng mẫu ¹⁸¹Ta (4), neutron tán xạ từ mẫu sẽ đi vào đầu dò ³He (7) để ghi nhận. Đầu dò được bọc trong 1 lớp Cadmi (8) đặt trong ống che chắn bằng vật liệu B₄C và Paraffin. Tín hiệu từ đầu dò được xử lý thông qua hệ điện tử và hiển thị phổ đo lên màn hình máy tính thông qua chương trình Genie2K.

- Đo phong: Để phép đo được chính xác hơn, khi đo phong, cấu hình giữ nguyên như khi đo mẫu, chỉ thêm một lớp che chắn B₄C pha Paraffin (6) dày 10 cm chắn trước đầu dò ngăn chặn neutron tán xạ đi đến đầu dò.

Hệ đo đã sử dụng các thiết bị của Ortec và Canberra, các thông số thiết lập như sau: HV = 1100V; Gain = 5; Shapping time = 2μs; LLD = 4.1%; ULD = 100%; chế độ đo biên độ đa kênh MCA được lựa chọn.

Do giới hạn về không gian của kênh ngang số 4 nên chỉ thiết lập được một số góc đo. Kết quả trình bày trong báo cáo này là kết quả đo neutron tán xạ đàn hồi và không đàn hồi qua mẫu ¹⁸¹Ta ở các góc 45⁰, 60⁰, 90⁰, 120⁰, và 135⁰.

Đặc trưng của ống đếm ³He khi đo neutron nhanh

Ống đếm tỷ lệ chứa khí He³ khi chiếu neutron có năng lượng E sẽ cho những xung mà biên độ của nó tỷ lệ với E+Q, phổ phân bố độ cao xung của neutron thường thể hiện các phản ứng sau:

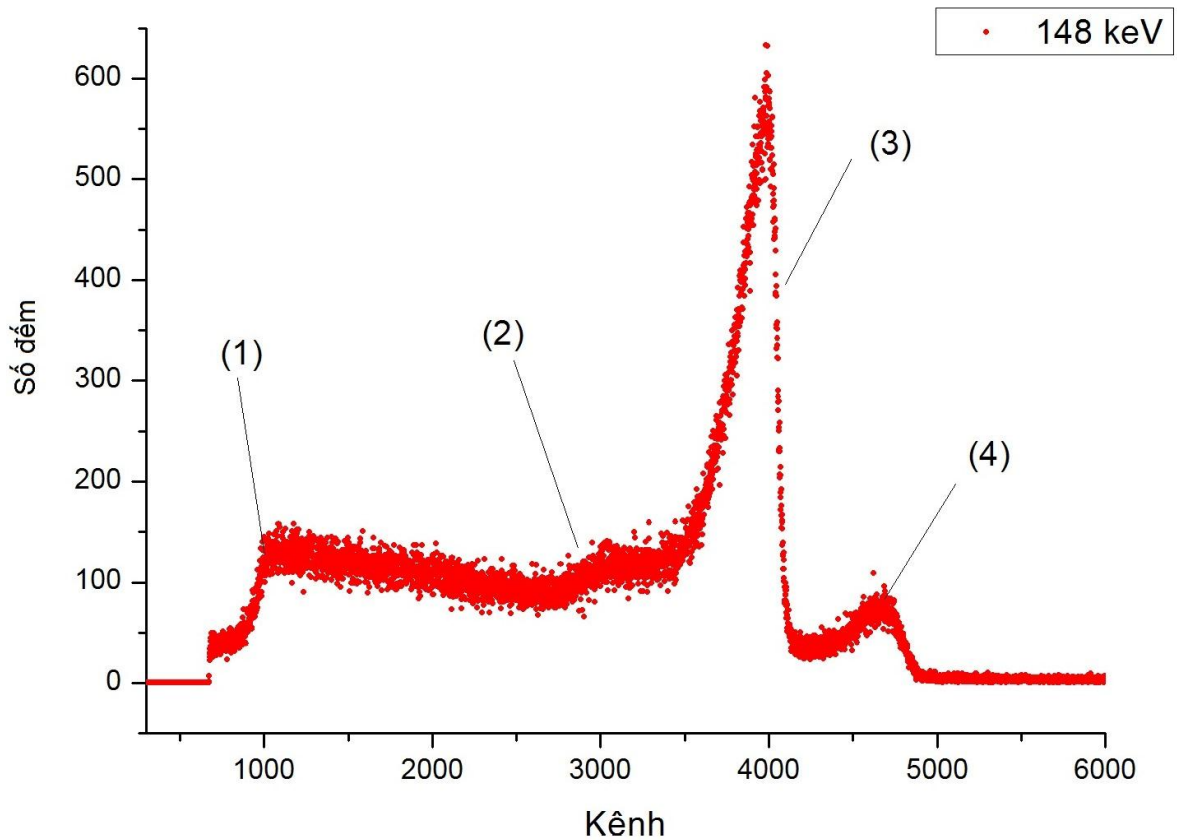
- a. ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^1\text{H} + {}^3\text{H} + 764 \text{ keV}$
- b. ³He recoil (tán xạ đàn hồi)
- c. ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^2\text{H} + {}^2\text{H} + 3.27 \text{ MeV}$
- d. Gamma

Với neutron năng lượng dưới 1 MeV thì phản ứng (b) không cần quan tâm, phản ứng (c) rất nhỏ do năng lượng ngưỡng cao và tiết diện phản ứng này là rất nhỏ [18]. Phản ứng (a) và (d) thường xảy ra khi đo phổ neutron trong vùng năng lượng dưới 1 MeV và đo với đầu dò kích thước nhỏ.

Do vậy, sử dụng dòng neutron phin lọc năng lượng 148keV chiếu đến ống đếm ³He áp suất 4 atm có kích thước nhỏ [19] như trong thí nghiệm này, phổ neutron sẽ thể hiện phản ứng (a) và (d) rõ ràng nhất.

Hiệu ứng tường (1) (2) sinh ra do phản ứng (a) khá rõ ràng như ta thấy ở Hình 2. Phản ứng (d) cũng hiển thị gamma trên phổ và có biên độ thấp hơn hiệu ứng tường. Tuy nhiên, trong quá trình thiết lập thông số hệ đo, ngưỡng thấp được đặt giá trị sao cho phần gamma này bị cắt bỏ.

Do cường độ của neutron tán xạ trên mẫu theo góc rất thấp và do đầu dò đang sử dụng kém nhạy với neutron nhanh nên thời gian đo neutron tán xạ sẽ phải tăng lên đáng kể.



Hình 2. Phổ neutron 148 keV đo với ống đếm ^3He kích thước nhỏ, áp suất 4 atm

- (1) Hiệu ứng tường của Triton; (2) Hiệu ứng tường của proton;
 (3) Vùng neutron trên nhiệt; (4) Vùng neutron 148 keV.

2.2. Kết quả

Mô phỏng che chắn chuẩn trực

Kết quả mô phỏng về sự suy giảm thông lượng neutron theo tỷ lệ khối lượng B_4C pha trong Paraffin (Pa) và về sự suy giảm thông lượng của neutron qua kích thước bề dày che chắn hiển thị qua Bảng 1 và 2.

Bảng 1. Sự suy giảm thông lượng neutron nhanh theo tỷ lệ khối lượng B_4C

% B_4C	Thông lượng neutron nhiệt (1meV-1eV)	Sai số (%)	Thông lượng neutron trên nhiệt (1eV-150keV)	Sai số (%)	Thông lượng tổng	Sai số (%)
0	1.00	0.12	1.00	0.10	1.00	0.08
10	0.11	0.41	0.96	0.10	0.75	0.10
20	0.05	0.63	0.94	0.10	0.72	0.10
30	0.03	0.88	0.93	0.10	0.71	0.10
40	0.01	1.18	0.93	0.10	0.71	0.10
50	0.01	1.53	0.95	0.10	0.72	0.10

Với bề dày 3.9 cm và 50% Pa + 50% B_4C , neutron nhiệt giảm khoảng 120 lần so với che chắn chỉ có Paraffin. Tuy nhiên, neutron năng lượng trên nhiệt và neutron nhanh chỉ giảm rất ít. Để giảm neutron trên nhiệt, kết quả mô phỏng khi tăng kích thước bề dày che chắn trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Sự suy giảm thông lượng của neutron qua kích thước bề dày che chắn

Bề dày che chắn (cm)	Thông lượng neutron nhiệt (1meV-1eV)	Sai số (%)	Thông lượng neutron trên nhiệt (1eV-150keV)	Sai số (%)	Thông lượng tổng	Sai số (%)
3.9 (Pa+B ₄ C)	1.00	1.53	1.00	0.10	1.00	0.10
6.2 (Pa+B ₄ C)	0.31	2.76	0.22	0.22	0.22	0.22
7.2 (Pa+B ₄ C)	0.16	3.78	0.11	0.31	0.11	0.31
3.9 (Pa+B ₄ C) + 3.0 (Pa)	0.16	3.70	0.11	0.31	0.11	0.31

Tăng kích thước che chắn từ 3.9 cm lên 6.2 cm, thông lượng neutron nhiệt giảm 3 lần và thông lượng neutron nhanh giảm hơn 4 lần.

Tăng kích thước che chắn từ 3.9 cm lên 7.2 cm, thông lượng neutron nhiệt giảm 6 lần và thông lượng neutron nhanh giảm 9 lần.

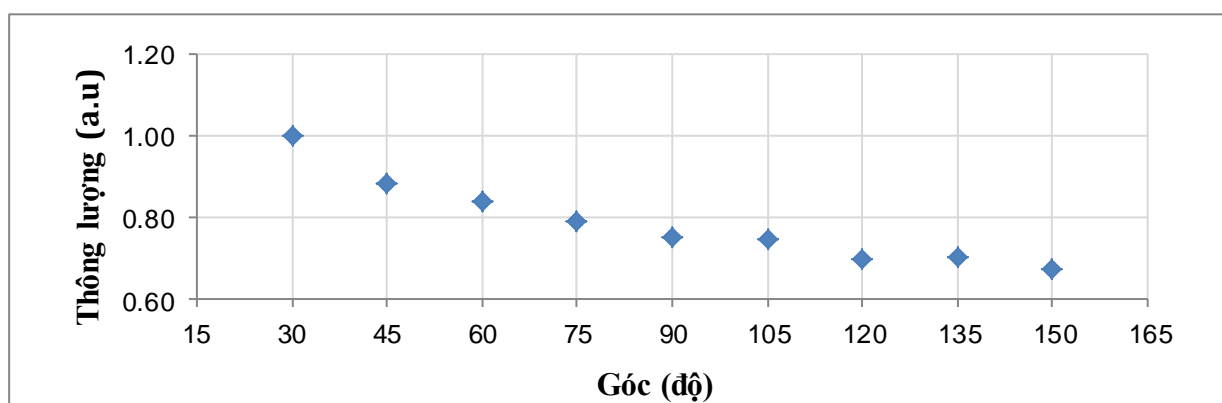
Để kiểm tra khả năng che chắn và tiết kiệm kinh phí, giữ nguyên bề dày của lớp che chắn bên trong là 3.9 cm (50% Paraffin + 50% B₄C), thêm một lớp 100% Paraffin dày 3 cm bao bọc bên ngoài. Kết quả đạt được tương tự như trường hợp chỉ sử dụng một lớp che chắn dày 7.2 cm có tỷ lệ 50% Paraffin + 50% B₄C.

Do kích thước ống nhựa giới hạn, 2 ống nhựa đổ Paraffin và B₄C sử dụng cho đo thực nghiệm có kích thước và tỷ lệ như sau:

- Ống thứ nhất dùng chuẩn trực và dẫn dòng neutron ra từ phin lọc dài 60 cm, đường kính 16.8 cm bên trong gồm 2 lớp: một ống Paraffin bán kính 3.9 cm bên trong; một ống Paraffin pha B₄C bán kính 2.4 cm với tỷ lệ khối lượng 1:1 bao bọc bên ngoài,
- Ống thứ 2 dùng che chắn giảm phong bọc bên ngoài đầu dò, dài 60 cm, đường kính 16.8 cm bên trong gồm 2 lớp tách biệt: một ống B₄C pha Paraffin với tỷ lệ khối lượng 1:1 bán kính 2.5 cm bên trong; một ống B₄C pha Paraffin với tỷ lệ khối lượng 1:9 bán kính 3.6 cm bao bọc bên ngoài.

Mô phỏng thông lượng neutron đến đầu dò ³He sau khi tán xạ trên mẫu ¹⁸¹Ta

Kết quả mô phỏng hiển thị như Hình 3.



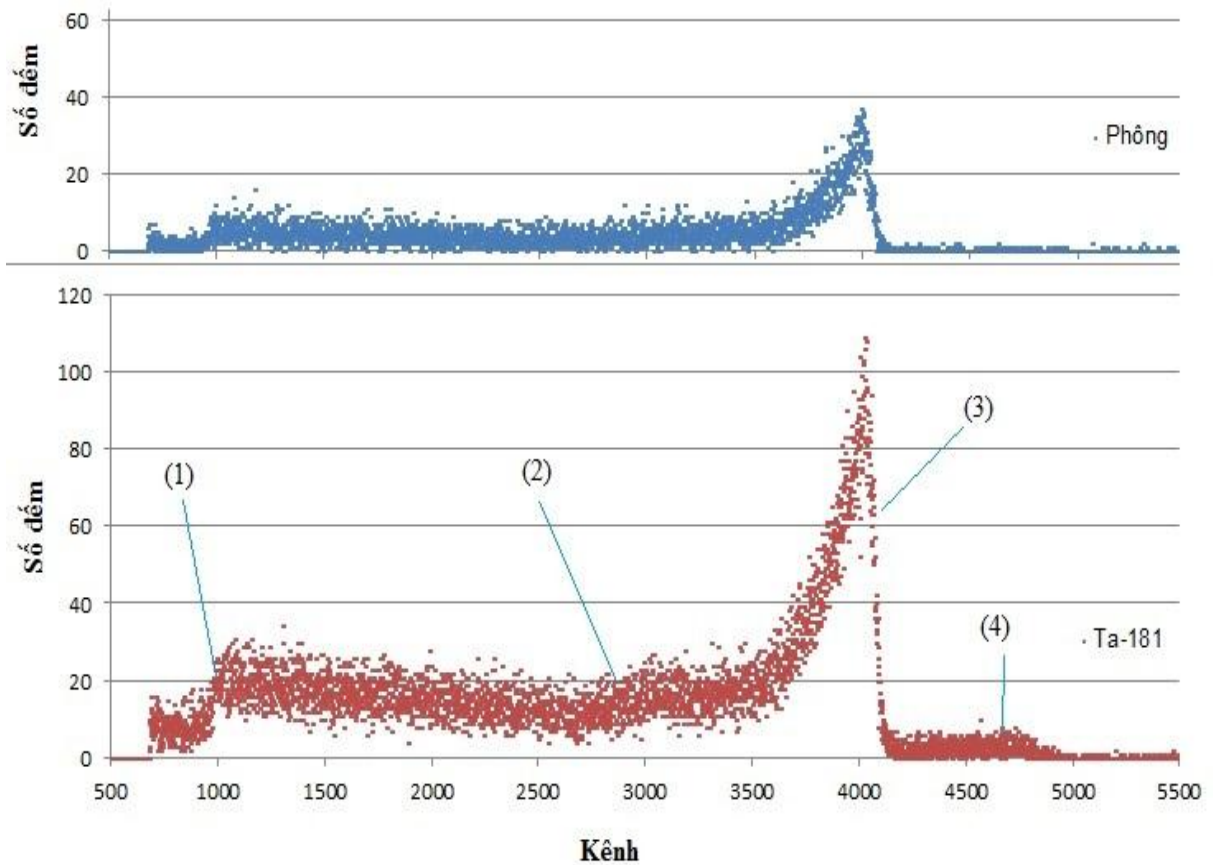
Hình 3. Đường phân bố neutron 148keV tán xạ trên mẫu Ta-181 theo góc

Theo như kết quả mô phỏng, thông lượng neutron tán xạ đến đầu dò ³He có giá trị giảm dần khi góc tán xạ tăng lên.

Phổ đo thực nghiệm

Khi thực hiện cấu hình đo như thiết kế, thời gian đo phổ và mẫu kéo dài trên 10h mỗi lần đo. Phổ độ cao xung của neutron tán xạ thể hiện vùng 148 keV chưa được rõ nét do

thống kê chưa đủ. Vùng neutron nhiệt xuất hiện rõ do đầu dò ^3He rất nhạy với neutron nhiệt. Vùng này xuất hiện bởi một phần do tán xạ từ mẫu, một phần do neutron nhanh tán xạ đàn hồi nhiều lần trong đầu dò, và một phần do phóng. Do vậy khi xử lý số liệu thực nghiệm, chỉ các giá trị trong vùng năng lượng 148 keV được quan tâm. Phổ độ cao xung của quá trình đo mẫu ^{181}Ta và đo phóng được so sánh như Hình 4.



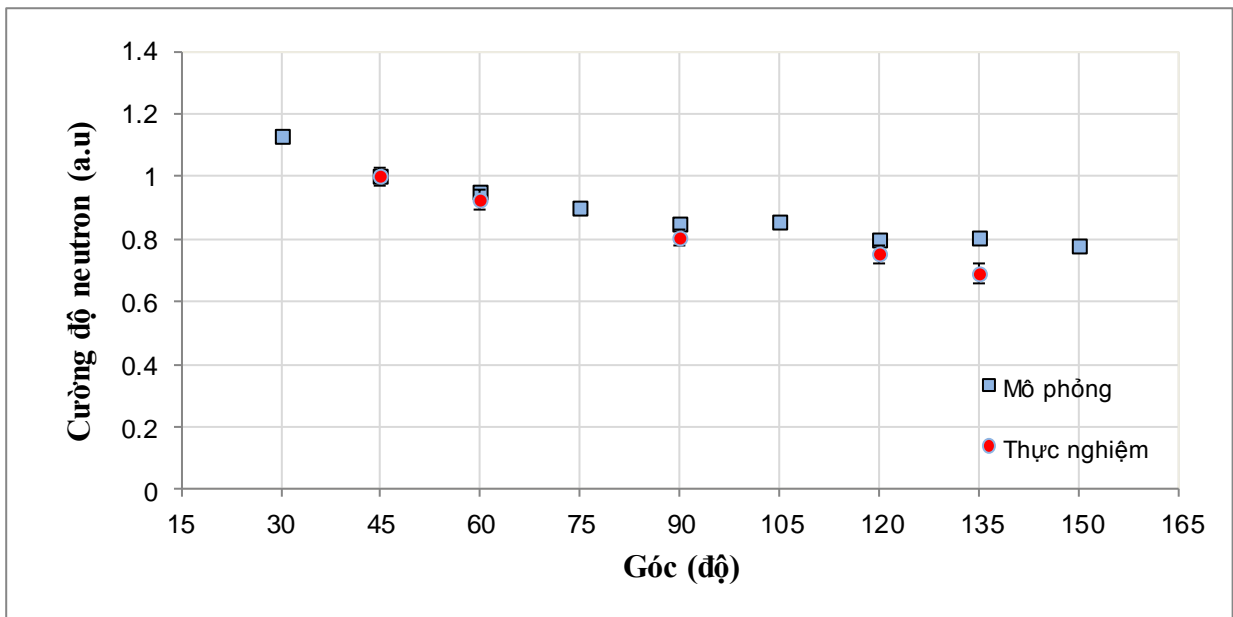
Hình 4. Phổ neutron đo trên dòng neutron 148 keV.
 (1) Hiệu ứng tường của Triton; (2) Hiệu ứng tường của proton;
 (3) Vùng neutron trên nhiệt; (4) Vùng neutron 148keV.

Khi đo mẫu, lớp Paraffin pha B_4C dày 10 cm che chắn trước đầu dò được lấy ra. Kết quả cho thấy neutron tán xạ 148 keV phát ra từ mẫu đã được ghi nhận.

Khi xử lý số liệu, tốc độ đếm (cps) của phổ tán xạ tại vùng năng lượng 148 keV được sử dụng để so sánh với mô phỏng. Bảng 3 hiển thị kết quả đo thực nghiệm và mô phỏng.

Bảng 3: Bảng kết quả đo thực nghiệm và mô phỏng.

Góc	Thực nghiệm		Mô phỏng		Độ lệch giữa thực nghiệm và mô phỏng (%)
	CPS tán xạ	Sai số	Thông lượng	Sai số	
45^0	1.00000	0.03094	1.00000	0.00024	0.00
60^0	0.92762	0.03087	0.95103	0.00024	2.34
90^0	0.80599	0.02794	0.85004	0.00026	4.41
120^0	0.75232	0.02909	0.79326	0.00027	4.09
135^0	0.69256	0.03119	0.79648	0.00026	10.39



Hình 5. So sánh hai đường phân bố neutron tán xạ giữa mô phỏng và thực nghiệm.

Ta thấy rằng dạng phân bố giữa mô phỏng và thực nghiệm đã gần như giống nhau. Tuy nhiên, góc thực nghiệm 135° lệch 10.39 % so với mô phỏng do che chắn gần tường lò chưa tốt.

2.3. Bàn luận

Hệ đo đã được thiết lập có hiệu chỉnh che chắn giảm phóng nhiều lần đã đạt được kết quả ban đầu. Tuy nhiên, kết quả này có đóng góp của nhiều sai số khác nhau như sai số hình học, hệ điện tử, chuẩn trực dòng neutron phin lọc, phòng chưa được che chắn tốt nhất, v.v. Trong đó sai số đóng góp từ cấu hình hình học và từ phần chuẩn trực dòng neutron phin lọc là đáng chú ý hơn cả.

Hiện tại neutron tán xạ hướng đến đầu dò trong một ống trụ có đường kính bằng với đường kính đầu dò là 2.5 cm, ống trụ này chưa được chuẩn trực để neutron tán xạ chỉ đến được đầu dò trong một khe hẹp, do vậy mà sai số góc đo cũng cần được hiệu chỉnh.

Kết quả trình bày trong báo cáo gồm neutron tán xạ đàn hồi và không đàn hồi, chưa hiệu chỉnh tán xạ nhiều lần trong mẫu và hiệu ứng tự che chắn. Dự kiến tiếp theo nhóm nghiên cứu sẽ hoàn thiện các phần trên.

3. KẾT LUẬN

Bước đầu phát triển hệ đo nên nhóm nghiên cứu còn gặp một số khó khăn do chưa có hệ di chuyển đầu dò tự động qua các góc nên phải di chuyển bằng tay. Cấu hình hình học chưa có độ chính xác cao khi phải đo đạc và thiết lập bằng các công cụ thô sơ. Tuy nhiên, bước đầu nhóm nghiên cứu đã đo đạc được neutron 148 keV tán xạ lên mẫu ^{181}Ta .

Hướng nghiên cứu tương lai sẽ thực hiện các việc tiếp theo gồm:

- Tạo hệ di chuyển đầu dò tự động nhằm nâng cao tính chính xác của cấu hình hình học và tăng thời gian đo để đạt thống kê,
- Tiếp tục thiết kế che chắn giảm phóng,
- Tách biệt được neutron tán xạ đàn hồi và không đàn hồi để nâng cao tính chính xác của kết quả đo.
- Hiệu chỉnh hiệu ứng tán xạ nhiều lần trong mẫu và hiệu ứng tự che chắn,
- Đo thêm một số dòng neutron có năng lượng khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Kuklin A I, A V Rogachev, D V Soloviov , O I Ivankov, Yu S Kovalev, P K Utrobin, S A Kutuzov, A G Soloviev , M I Rulev and V I Gordeliy. "Neutronographic investigations of supramolecular structures on upgraded smallangle spectrometer YuMO". IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 848 (2017),1, 012010.
- [2]. Bobrikov I.A., N.Yu. Samoylova, S.V. Sumnikov, O.Yu. Ivanshina, R.N. Vasin, A.I. Beskrovnyi, A.M. Balagurov "In-situ time-offlight neutron diffraction study of the structure evolution of electrode materials in commercial battery with $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ cathode" *Journal of Power Sources*, 372 (2017) 74-81.
- [3]. Golosova NO, DP Kozlenko, SE Kichanov, EV Lukin, H-P Liermann, KV Glazyrin, BN Savenko "Structural and magnetic properties of Cr_2O_3 at high pressure", *Journal of Alloys and Compounds*, 722, 1, 593-598 (2017).
- [4]. Dang NT, DP Kozlenko, SE Kichanov, SG Jabarov, AI Mammadov, RZ Mekhtieva, TL Phan, VG Smotrakov, VV Eremkin, BN Savenko "Revealing the Formation Mechanism and Effect of Pressure on the Magnetic Order of Multiferroic BiMn_2O_5 Through Neutron Powder Diffraction", *Journal of Electronic Materials*, 46, 6, 3373-3380 (2017).
- [5]. Kozlenko DP, NM Belozeroва, SS Ata-Allah, SE Kichanov, M Yehia, A Hashhash, EV Lukin, BN Savenko, "Neutron diffraction study of the pressure and temperature dependence of the crystal and magnetic structures of $\text{Zn}_{0.3}\text{Cu}_{0.7}\text{Fe}_{1.5}\text{Ga}_{0.5}\text{O}_4$ polycrystalline ferrite", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 449, 44-48 (2018).
- [6]. Dragolici A.C., M Balasoiu, O L Orelovich, L Ionascu, M Nicu, D V Soloviov, A I Kuklin, E I Lizunov, F Dragolici, "CEM V based special cementitious materials investigated by means of SANS method. Preliminary results", IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 848 012024(6) (2017).
- [7]. Shibaev A V and A I Kuklin and O E Philippova. Effect of polymer on the arrangement of mixed anionic/cationic wormlike surfactant micelles revealed by SANS. *Journal of Physics: Conference Series*, 848,1, 012006.
- [8]. Bokuchava Gizo, Yulia Gorshkova, Ricardo Fernandez, Gaspar Gonzalez, Giovanni Bruno, "Characterization of precipitation in 2000 series aluminium alloys using neutron diffraction, SANS and SEM methods", *Romanian Reports in Physics*, 2017.
- [9]. Ulbricht, A.; Heintze, C.; Bergner, F.; Eckerlebe, H.; "SANS investigation of a neutron-irradiated $\text{Fe}_{90}\text{at}\%\text{Cr}$ alloy", *Journal of Nuclear Materials*, 407 (2010), 29-33.
- [10]. Chumakov, A. P.; Grigoriev, S. V.; Grigoryeva, N. A.; Napolskii, K. S.; Eliseev, A. A.; Roslyakov, I. V.; Okorokov, A. I.; Eckerlebe, H., "Magnetic properties of cobalt nanowires: Study by polarized SANS", *Physica B-Condensed Matter*, 406 (2011), 2405 - 2408.
- [11]. Sharifi, P.; Eckerlebe, H.; Marlow, F., "SANS analysis of opal structures made by the capillary deposition method", *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14 (2012), 10324-10331.
- [12]. Calder S., An K., Boehler R., dela Cruz C., Frontzek M., Guthrie M., Haberl B., Huq A., Kimber S.A., Liu J., Molaison J.J., Neufeind J., Page K., dos Santos A.M., Taddei K.M., Tulk C.A., Tucker M.G., "A suite-level review of the neutron powder diffraction instruments at Oak Ridge National Laboratory", *Review of Scientific Instruments*, **89**,9, 092701 (2018).
- [13]. Feng Z., Wei Y., Liu R., Yan D., Wang Y.C., Luo J.L., Senyshyn A., dela Cruz C., Yi W., Mei J.W., Meng Z.Y., Shi Y., Li S., "Effect of Zn doping on the antiferromagnetism in kagome $\text{Cu}_4 -x\text{Zn}_x (\text{OH})_6 \text{FBr}$ ", *Physical Review B*, **98**, 15, 155127 (2018).
- [14]. Alaboalirat M., Qi L., Arrington K.J., Qian S., Keum J.K., Mei H., Littrell K.C., Sumpter B.G., Carrillo J.Y., Verduzco R., Matson J.B., "Amphiphilic Bottlebrush Block

Copolymers: Analysis of Aqueous Self-Assembly by Small-Angle Neutron Scattering and Surface Tension Measurements", *Macromolecules*, **52**, 2, 465–476 (2019).

[15]. He L., Li C.W., Hamilton W.A., Hong T., Tong X., Winn B., Crow L., Bailey K.M., Gallego N., "Anomalous neutron scattering 'halo' observed in highly oriented pyrolytic graphite", *Journal of Applied Crystallography*, **52**, 2, 296-303 (2019).

[16]. <https://www.ncnr.nist.gov/nsources.html>.

[17]. Tran Tuan Anh, Pham Ngoc Son, Vuong Huu Tan, Pham Dinh Khang, Phu Chi Hoa, "Characteristics of Filtered Neutron Beam Energy Spectra at Dreactor", *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 4, 96-102, 2014.

[18]. Tsutomu IJIMA , Takehiko MUKAIYAMA & Keisho SHIRAKATA, "Measurement of Fast Neutron Spectrum with Helium-3 Proportional Counter", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 8(4), p. 192-200, 1971.

[19]. Reuter stokes, *helium 3 detector 207 formation datasheet*.