

SO SÁNH PHỔ THÔNG LƯỢNG NEUTRON TỔNG CỘNG XÁC ĐỊNH BẰNG CÁC CHƯƠNG TRÌNH TÁCH PHỔ KHÁC NHAU

Nguyễn Ngọc Quỳnh^{*1}, Phạm Bảo Ngọc¹, Trần Thanh Hà¹, Hồ Quang Tuấn¹,
Bùi Đức Kỳ¹, Đặng Thị Mỹ Linh¹, Đặng Quốc Soái²

Cơ quan¹: Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân
Địa chỉ¹: 179, Hoàng Quốc Việt, q. Cầu Giấy, Hà Nội
Cơ quan²: Bệnh viện Ung bướu Hà Nội
Địa chỉ²: 42A Thanh Nhân, Hai Bà Trưng, Hà Nội
Email^{}: nnquynh.inst@gmail.com*

Tóm tắt: Báo cáo này trình bày kết quả tách phổ thông lượng neutron tổng cộng của các nguồn biến điệu khác nhau. Các chương trình tách phổ được sử dụng bao gồm: FRUIT, MAXED và GRAVEL. Phương pháp tách phổ của các chương trình này hoàn toàn khác nhau. Do đó, phổ thông lượng neutron tổng cộng và suất tương đương liều môi trường nhận được từ các chương trình được so sánh với nhau. Kết quả cho thấy, ba chương trình trên cho kết quả phù hợp với nhau.

Từ khóa: tách phổ neutron, phổ neutron biến điệu, FRUIT, MAXED, GRAVEL.

I. MỞ ĐẦU

Phổ thông lượng neutron là một trong những đại lượng vật lý cơ bản cần phải xác định. Từ đại lượng cơ bản này, các đặc trưng khác của trường bức xạ neutron có thể được xác định tùy vào mục đích sử dụng. Đối với mục đích an toàn bức xạ và hiệu chuẩn các thiết bị bức ghi đo bức xạ, tương đương liều môi trường, H*(10), hoàn toàn có thể được tính toán từ phổ thông lượng neutron và hệ số chuyển đổi thông lượng-liều thích hợp (ví dụ như ICRP 74 [1]). Tổ chức tiêu chuẩn hoá quốc tế (ISO) đã xuất bản tiêu chuẩn 8529 [2] về phổ neutron của các nguồn chuẩn. Các trường neutron mô phỏng thực tế được tiêu chuẩn hóa trong ISO-12789 [3].

Trong các thiết bị được sử dụng để xác định phổ neutron tại phòng thí nghiệm, hệ phổ kế Bonner (BSS) được sử dụng nhiều nhất [4]. Về nguyên lý, phổ neutron, φ , hàm đáp ứng, R , và số đọc, m , của thiết bị liên hệ với nhau bởi phương trình tích phân (1) hoặc phương trình (2):

$$\int \varphi(E) \cdot R(E) = m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot R_{ij} = m_i \quad (2)$$

trong đó, $\varphi(E)$ và φ_i là thông lượng neutron; $R(E)$ và R_{ij} là hàm đáp ứng của hệ BSS; m và m_i là số đọc của thiết bị.

Phương trình (2) là hệ phương trình không xác định, có số ẩn (phổ neutron tại các khoảng năng lượng) lớn hơn số phương trình (số đọc của thiết bị). Chính vì vậy, phổ neutron chỉ có thể được xác định khi có thêm các thông tin khác.

Các chương trình tách phổ neutron đã được phát triển rất nhiều với nhiều nguyên lý, phương pháp khác nhau. Trong đó, các chương trình tách phổ FRUIT [5], MAXED [6] và GRAVEL [7] đã được sử dụng thành công trong rất nhiều nghiên cứu trên thế giới. L.N. Thiem *et al.* [8] cũng đã áp dụng thành công các chương trình tách phổ này để xác định phổ neutron trực tiếp của nguồn ²⁴¹Am-

Be. Do đó, nghiên cứu này sử dụng các chương trình tách phổ trên để xác định phổ neutron tổng cộng của nguồn neutron biến điệu tại phòng chuẩn neutron, Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân.

II. NỘI DUNG

II.1. Đối tượng và phương pháp

a. Phòng chuẩn neutron và các trường neutron biến điệu

Phòng chuẩn neutron tại Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân (VKHKTHN) sử dụng nguồn neutron chuẩn $^{241}\text{Am-Be}$. Nguồn neutron có cường độ $1,299.10^7$ neutron/s và hệ số chuyển đổi thông lượng-tương đương liều môi trường $h^*(10)$ là 391 pSv.cm^2 [2]. Kích thước của phòng là $7\text{m} \times 7\text{m} \times 7\text{m}$.

Để tạo ra các trường neutron có dạng phổ khác nhau, các quả cầu làm chậm bằng polyethylene có được kính khác nhau được sử dụng. Trong nghiên cứu này, các quả cầu làm chậm được kính 20 cm và 30 cm được sử dụng. Các quả cầu làm chậm được bố trí sao cho khi nguồn neutron lên vị trí chiếu, các quả cầu làm chậm sẽ bao xung quanh nguồn.

Hệ cầu Bonner truyền thống được sử dụng để ghi nhận số đọc. Hệ thiết bị bao gồm các quả cầu làm chậm bằng polyethylene (mật độ $0,95 \text{ g/cm}^3$) với đường kính khác nhau (0,2,3,5,8,10 và 12 inch), đầu dò nhạy neutron nhiệt $^6\text{LiI(Eu)}$. Thiết bị có được điều khiển bởi máy tính bên ngoài phòng điều khiển.

b. Chương trình tách phổ FRUIT

Chương trình tách phổ FRUIT được phát triển bởi R. Bedogni [5]. Chương trình có giao diện đồ họa dễ sử dụng và trực quan. Phương pháp tách phổ neutron dựa trên mô hình phổ neutron tại 4 vùng năng lượng khác nhau: neutron nhiệt, neutron trên nhiệt, neutron nhanh và neutron năng lượng cao. Phổ neutron toàn dải năng lượng sẽ là kết hợp tuyến tính của 4 thành phần trên.

$$\varphi(E) = P_{th} \cdot \varphi_{th}(E) + P_{epi} \cdot \varphi_{epi}(E) + P_f \cdot \varphi_f(E) + P_h \cdot \varphi_h(E) \quad (3)$$

trong đó: $\varphi_{th}(E)$ là thành phần neutron nhiệt có phân bố Maxwell, $\varphi_{epi}(E)$ là thành phần neutron trên nhiệt, $\varphi_f(E)$ là thành phần neutron nhanh, $\varphi_h(E)$ là thành phần neutron năng lượng cao. Các hệ số P_{th} , P_{epi} , P_f và P_h là tỉ lệ của mỗi thành phần neutron.

Do phổ neutron có dạng như phương trình (1) nên phổ neutron tách được sẽ liên tục và tương đối trơn. Cũng vì lý do này mà chương trình FRUIT không cần phổ neutron dự đoán ban đầu. Tuy nhiên, việc lựa chọn các mô hình phù hợp là hết sức quan trọng.

c. Chương trình tách phổ MAXED

Chương trình tách phổ MAXED được phát triển bởi M. Reginatto [6]. Nguyên lý tách phổ thông lượng neutron dựa trên nguyên lý Entropy cực đại. Theo đó, phổ neutron φ được tìm sao cho entropy S đạt giá trị cực đại:

$$S = - \sum_i \left\{ \varphi_i \ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_i^{def}} \right) + \varphi_i^{def} - \varphi_i \right\} \quad (4)$$

trong đó, φ_i là thông lượng neutron tại khoảng năng lượng thứ i , φ_i^{def} là thông lượng neutron dự đoán ban đầu tại khoảng năng lượng thứ i .

Từ phương trình (2) ta thấy, chương trình MAXED yêu cầu phải có phổ neutron dự đoán ban đầu. Phổ neutron dự đoán này có thể lấy trong báo cáo TRS403 [9] của Cơ quan năng lượng nguyên tử quốc tế (IAEA) hoặc bằng các chương trình mô phỏng vận chuyển hạt.

d. Chương trình tách phổ GRAVEL

Khác với hai chương trình tách phổ ở trên, chương trình tách phổ GRAVEL sử dụng phương pháp lặp để tách phổ neutron. Phổ neutron φ_i^{J+1} tại khoảng năng lượng thứ I của lần lặp thứ J+1 được xác định bởi kết quả của lần lặp thứ J theo công thức (3):

$$\varphi_i^{J+1} = \varphi_i^J \cdot \exp \left(\frac{\sum_k W_{ik}^J \log \left(\frac{N_k}{\sum_{i'} R_{ki'} \cdot \varphi_{i'}^J} \right)}{\sum_k W_{ik}^J} \right) \quad (5)$$

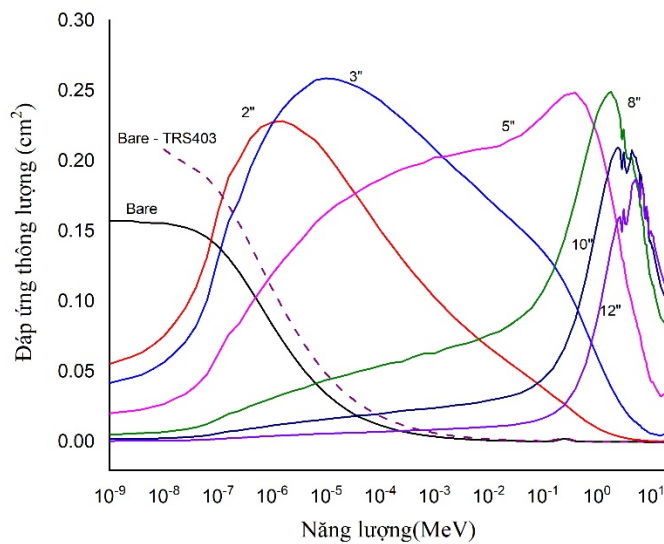
trong đó, N_k là số đọc của thiết bị, $R_{ki'}$ là ma trận đáp ứng và W_{ik}^J là hệ số được tính toán trong lần lặp thứ J

Giống như chương trình tách phổ MAXED, chương trình tách phổ GRAVEL cũng yêu cầu phải có phổ neutron dự đoán ban đầu. Ưu điểm của phương pháp xác định phổ theo công thức (3) đó là khi phổ neutron dự đoán không âm, phổ neutron nhận được cũng sẽ không âm.

e. Hàm đáp ứng và phổ thông lượng neutron dự đoán

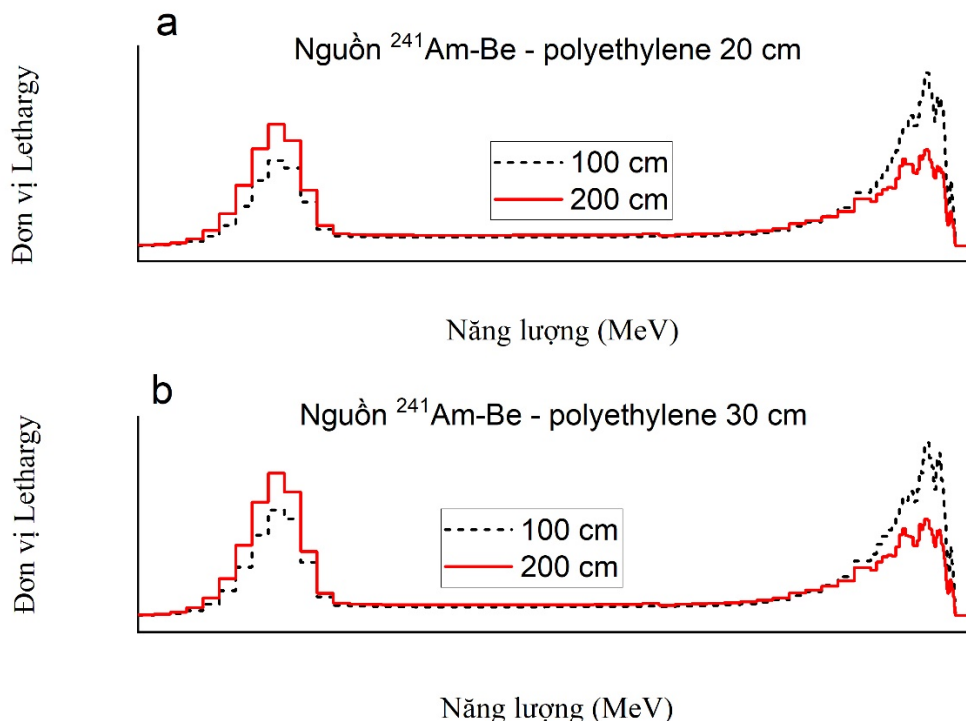
Chương trình MCNP phiên bản 6.1 [10] được sử dụng để mô phỏng hàm đáp ứng của hệ phổ kế cầu Bonner và phổ thông lượng neutron tổng cộng dự đoán ban đầu. Cơ sở dữ liệu tiết diện tương tác ENDF/B-VII.1 được đóng gói kèm chương trình MCNP 6.1. Tuy nhiên, tiết diện tương tác mới nhất, phiên bản ENDF/B-VIII.0 [11], đã được cập nhật và sử dụng trong mô phỏng. Đối với tương tác của neutron nhiệt với hydro trong polyethylene, bảng tiết diện “*h-poly.80t*” được sử dụng.

Hàm đáp ứng mô phỏng và hàm đáp ứng trong tài liệu TRS403 [9] của IAEA được so sánh với nhau. Đối với các quả cầu làm chậm 2,3,5,8,10 và 12, hai hàm đáp ứng phù hợp với nhau. Riêng đối với hàm đáp ứng của detector trần (quả 0 inch), hàm đáp ứng mô phỏng nhỏ hơn hàm đáp ứng của TRS403 tại vùng năng lượng nhiệt và trên nhiệt. Điều này cũng phù hợp với kết quả của nhiều công bố trên thế giới [12-13]. Sự khác nhau này có thể giải thích bằng sự thay đổi của tiết diện phản ứng $n(^6\text{Li}, t)\alpha$ qua các phiên bản tiết diện khác nhau. Hình 1 dưới đây thể hiện hàm đáp ứng của của hệ BSS mô phỏng được.



Hình 1: Hàm đáp ứng của hệ BSS mô phỏng bằng chương trình MCNP 6.1

Phổ thông lượng neutron của nguồn trần $^{241}\text{Am-Be}$ trần được lấy theo tiêu chuẩn ISO 8529-1. Vật liệu, kích thước của khối làm chậm polyethylene và tường bê tông của phòng chuẩn neutron được mô phỏng chính xác nhất có thể. Các yếu tố khác như sàn nhôm và các hệ giá đỡ trong phòng chuẩn không được khai báo trong mô phỏng. Tại mỗi vị trí, phổ neutron tổng cộng bao gồm hai thành phần: thành phần neutron trực tiếp và thành phần neutron tán xạ. Thành phần neutron trực tiếp của nguồn $^{241}\text{Am-Be}$ không có neutron nhiệt. Tuy nhiên, phổ neutron tán xạ có thêm đỉnh ở năng vùng năng lượng nhiệt. Hình 2 ở dưới đây thể hiện phổ neutron tổng cộng cách nguồn 100 cm và 200 cm khi sử dụng khối làm chậm đường kính 20 cm và 30 cm.



Hình 2: Phổ neutron tổng cộng mô phỏng
(a. Khối làm chậm đường kính 20 cm; b. Khối làm chậm đường kính 30 cm.)

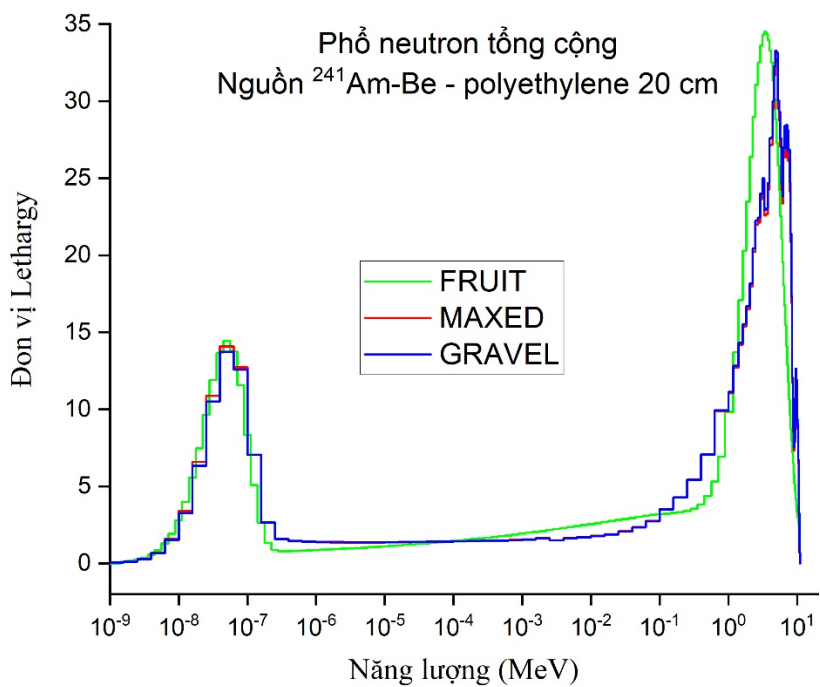
II.2. Kết quả

a. Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 20 cm

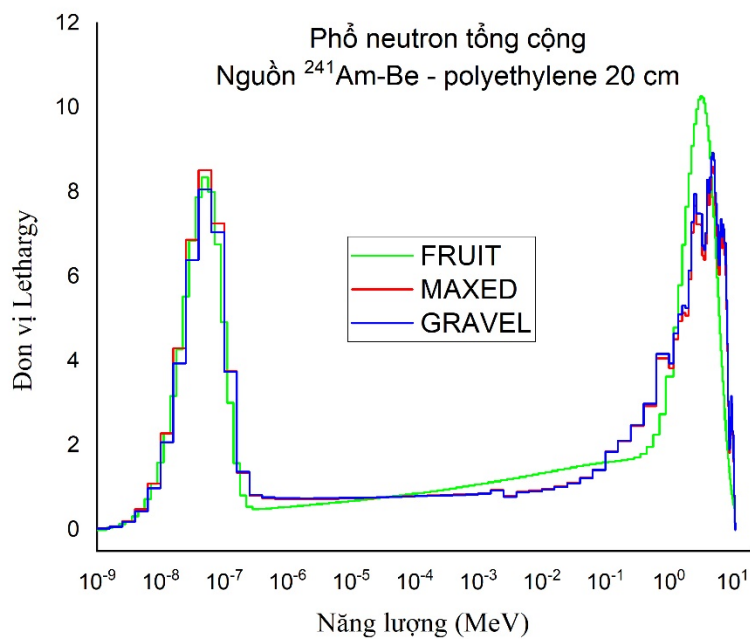
Phổ neutron tổng cộng tại các khoảng cách 80, 100, 150 và 200 cm lần lượt được tách phổ bởi 3 chương trình FRUIT, MAXED và GRAVEL. Phổ neutron tổng cộng tại các khoảng cách 100 cm và 200 cm được biểu diễn trên hình 3 và 4. Suất tương đương liều môi trường, $H^*(10)$, tại mỗi khoảng cách cũng được xác định và trình bày trong bảng 1.

Bảng 1: Suất tương đương liều môi trường tại các khoảng cách khác nhau của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 20 cm.

Khoảng cách (cm)	Suất tương đương liều môi trường $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)		
	FRUIT	MAXED	GRAVEL
80	131,1	129,0	132,1
100	87,5	86,6	87,8
150	43,3	42,6	43,1
200	28,2	28,1	28,9



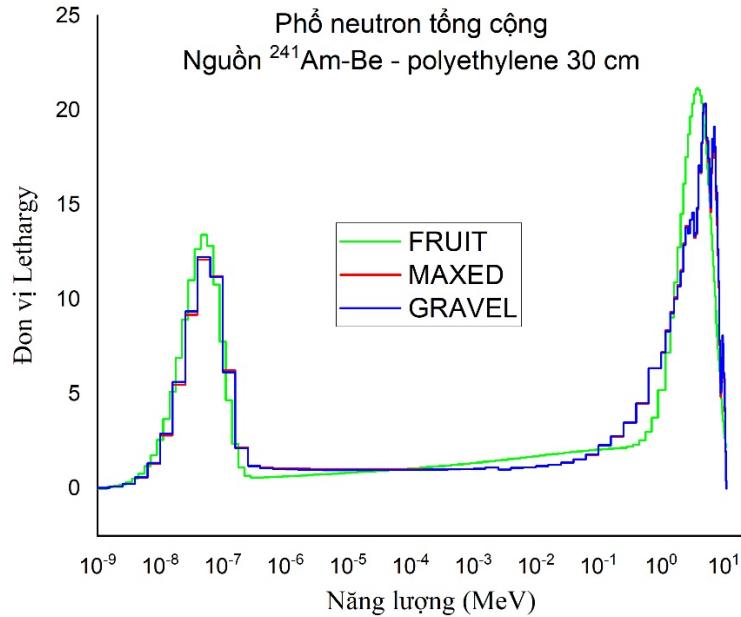
Hình 3: Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 20 tại khoảng cách 100 cm



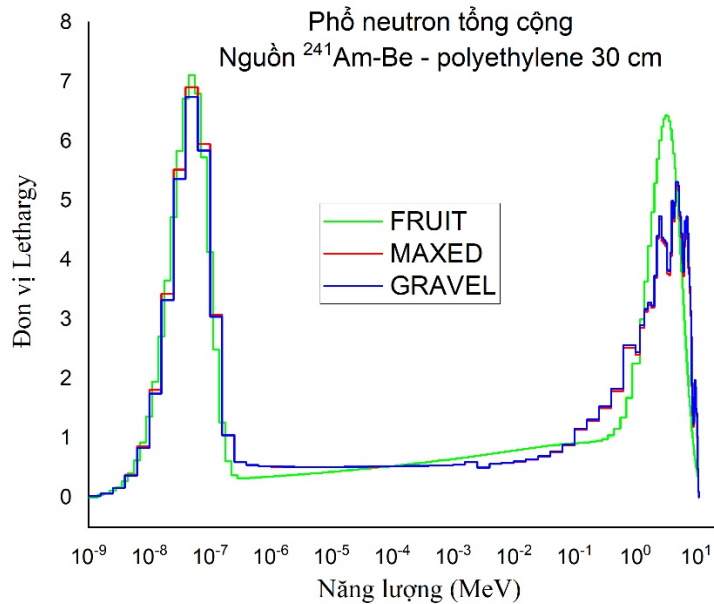
Hình 4: Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 20 tại khoảng cách 200 cm

b. Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 cm

Đối với nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 cm, phổ neutron tổng cộng tại các khoảng cách 100 cm và 200 cm được biểu diễn trên hình 5 và 6. Suất tương đương liều môi trường, $H^*(10)$, tại mỗi khoảng cách cũng được xác định và trình bày trong bảng 2.



Hình 5: Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 tại khoảng cách 100 cm



Hình 6: Phổ neutron tổng cộng của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 tại khoảng cách 200 cm

Bảng 2: Suất tương đương liều môi trường tại các khoảng cách khác nhau của nguồn làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 cm.

Khoảng cách (cm)	Suất tương đương liều môi trường $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)		
	FRUIT	MAXED	GRAVEL
80	81,9	84,3	83,9
100	53,9	55,1	55,4
150	27,3	26,8	27,5
200	17,7	17,4	17,7

II.3. Thảo luận

Tại cùng một khoảng cách, tỉ lệ thành phần neutron nhiệt khi được làm chậm bởi quả cầu đường kính 30 cm lớn hơn khi được làm chậm bởi quả cầu đường kính 20 cm. Đối với mỗi quả cầu làm chậm, tỉ lệ thành phần neutron nhanh giảm khi khoảng cách với nguồn tăng, còn thành phần neutron nhiệt lại tăng theo khoảng cách. Do đó, phổ thông lượng neutron của các nguồn làm chậm khác nhau có dạng phổ khác nhau. Các phổ neutron này có thể được dùng để hiệu chuẩn thiết bị đo neutron theo tiêu chuẩn ISO 12789. Các giá trị suất tương đương liều chuẩn sẽ tiếp tục được nghiên cứu.

Mặc dù có nguyên lý tách phổ hoàn toàn khác nhau nhưng chương trình MAXED và GRAVEL cho kết quả phổ neutron tổng cộng gần như giống nhau. Phổ neutron tổng cộng tách được từ hai chương trình này cho thấy phổ neutron tại vùng neutron nhanh có sự thăng giáng giống như phổ neutron trực tiếp của nguồn $^{241}\text{Am-Be}$ trần. Chương trình FRUIT sử dụng mô hình với các hàm giải tích (phương trình (3) ở trên) nên phổ neutron tách được có dạng một đỉnh tại vùng neutron nhanh. Tuy có sự khác nhau về phổ neutron nhanh, cả ba chương trình đều cho đỉnh neutron nhiệt phù hợp với nhau.

Đại lượng tương đương liều môi trường $H^*(10)$ tương ứng với mỗi phổ neutron được trình bày trong bảng 1 và bảng 2. Suất tương đương liều môi trường tính toán từ ba chương trình phù hợp với nhau. Sự sai khác giữa các kết quả $H^*(10)$ nhỏ hơn 3%. Cần nhấn mạnh thêm rằng ba chương trình tách phổ FRUIT, MAXED và GRAVEL có phương pháp tách phổ hoàn toàn khác nhau. Điều này chứng tỏ giá trị suất tương đương liều môi trường $H^*(10)$ tại các khoảng cách khác nhau khi sử dụng các nguồn làm chậm khác nhau được xác định một cách chính xác. Các giá trị này có thể được sử dụng để hiệu chuẩn các thiết bị ghi đo bức xạ neutron.

III. KẾT LUẬN

Do bản chất không xác định của nguyên lý tách phổ neutron mà các chương trình tách phổ đều phải sử dụng thêm các thông tin khác. Chương trình tách phổ FRUIT sử dụng thông tin về phân bố neutron tại các vùng năng lượng khác nhau. Chương trình MAXED và GRAVEL sử dụng phổ neutron dự đoán ban đầu do người sử dụng cung cấp nhưng với thuật toán hoàn toàn khác nhau. Ba chương trình tách phổ này áp dụng để xác định phổ neutron tổng cộng và suất tương đương liều môi trường tại phòng chuẩn neutron, Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân. Phổ neutron nhận được từ ba chương trình phù hợp với nhau tại vùng năng lượng nhiệt và sai lệch ít ở vùng năng lượng neutron nhanh. Tuy vậy, suất tương đương liều môi trường nhận được có sự sai lệch rất ít (<3%). Do đó, giá trị trung bình của suất liều neutron nhận được từ ba chương trình có thể được sử dụng để hiệu chuẩn các thiết bị ghi đo neutron.

LỜI CẢM ƠN: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn TS. Roberto Bedogni (phòng thí nghiệm INFN-LNF, Ý) đã cho phép sử dụng chương trình tách phổ FRUIT. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ (mã số 08/HĐ/ĐTCB).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ICRP, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Annals of the ICRP, vol. 21, 1991.
- [2] ISO 8529 standard series, *Reference neutron radiations*, ISO Std., 2008.
- [3] ISO 12789 standard series, *Reference radiation fields — Simulated workplace neutron fields*, ISO Std., 2008.
- [4] D.J. Thomas, A.V. Alevra, *Bonner sphere spectrometers—a critical review*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 476, issue 1-2, pp. 12-20, 2002
- [5] R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, and F. Fernández, *FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 580, no. 3, pp. 1301–1309, 2007.
- [6] M. Reginatto and P. Goldhagen, *MAXED, a computer code for maximum entropy deconvolution of multisphere neutron spectrometer data*, *Health Physics*, vol. 77, no. 5, pp. 579–583, 1999.
- [7] M. Matzke, *Unfolding of pulse height spectra: The HEPRO program system*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Tech. Rep., 1994.
- [8] T. N. Le, H.-N. Tran, Q. N. Nguyen, G. V. Trinh, and K. T. Nguyen, *Characterization of a neutron calibration field with $^{241}\text{Am-Be}$ source using bonner sphere spectrometer*, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 133, pp. 68–74, mar 2018.
- [9] International Atomic Energy Agency, *Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes*, IAEA, TRS.403, 2002.
- [10] Goorley, John T. *et al.*, *Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0*, LA-UR-13-22934 report, 2013
- [11] D.A. Brown, M.B. Chadwick et al., *NDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data*, *Nuclear Data Sheets*, vol. 148, pp. 1-142, 2018
- [12] A. W. Decker, S. R. McHale, M. P. Shannon, J. A. Clinton and J. W. McClory, *Novel Bonner Sphere Spectrometer Response Functions Using MCNP6*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 62, no. 4, pp. 1689-1694, . 2015
- [13] M.A.S. Lacerda, R. Méndez-Villafañe, A. Lorente, S. Ibañez, E. Gallego, H.R. Vega-Carrillo, *A new response matrix for a ^6LiI scintillator BSS system*, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, vol. 868, pp. 122-128, 2017

COMPARISION OF TOTAL NEUTRON SPECTRUM OBTAINED BY DIFFERENT UNFOLDING CODES

Abstract: This report presents total neutron spectrum of polyethylene-moderator ^{241}Am -Be sources that obtained by differents unfolding code: FRUIT, MAXED and GRAVEL. These three unfolding codes have unfolding method totally different. All total neutron spctrum and coresponding neutron ambient dose, $H^*(10)$, were compared. The results show that these 3 code give good agreements.

Keywords: *neutron unfolding, moderator neutron source, FRUIT, MAXED, GRAVEL*