

NGHIÊN CỨU MIỀN NĂNG LƯỢNG THẤP CỦA HỆ PHỔ KẾ GAMMA BẰNG CHƯƠNG TRÌNH MÁY TÍNH MCNP4C2

VÕ XUÂN AN

Khoa Công nghệ Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: voxuanan@iuh.edu.vn

DOIs: <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v67i01.5034>

Tóm tắt. MCNP4C2 (Monte Carlo N-Particle, version 4C2) là một trong những chương trình máy tính đáng tin cậy, ứng dụng phương pháp Monte Carlo để mô phỏng quá trình vận chuyển của neutron, photon và electron trong môi trường vật chất. Đối với việc mô phỏng phổ gamma, các kết quả nghiên cứu trong những năm gần đây của nhiều tác giả cho thấy có một sự phù hợp tốt giữa tính toán MCNP4C2 với thực nghiệm ở miền năng lượng cao (trên 300 keV). Tuy nhiên, ở miền năng lượng thấp (dưới 300 keV) thì kết quả của MCNP4C2 có sự khác biệt so với thực nghiệm. Trong công trình này một số nguyên nhân từ việc lựa chọn các thông số đầu vào và sự ảnh hưởng của bố trí thí nghiệm được nêu ra để giải thích cho sự khác biệt giữa thực nghiệm và tính toán của miền năng lượng thấp này.

Từ khoá. Detector HPGe, Phổ gamma, Miền năng lượng thấp, Chương trình máy tính MCNP4C2.

1 MỞ ĐẦU

Phương pháp Monte Carlo là công cụ toán học mạnh cho phép mô phỏng các quá trình tương tác phức tạp của gamma với vật chất. Bài toán mô phỏng phổ gamma đã được thực hiện trong hơn nửa thế kỷ qua, kể từ công bố của Zerby và Moran (1961) đối với detector nhấp nháy [1], Wainio và Knoll (1966) đối với detector bán dẫn Si(Li) và Ge(Li) [2], cho đến những năm gần đây công bố của Ewa và cộng sự (2001), Saegusa (2008), Conti và cộng sự (2013), Sarangapani và cộng sự (2017), Uyar và cộng sự (2022) đối với detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe [3-7]. Hiện nay detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe bùng chò phòng thấp đang được sử dụng rộng rãi trong phân tích phổ gamma để xác định hoạt độ phóng xạ trong các mẫu môi trường, mẫu địa chất, mẫu thực phẩm với nhiều ưu điểm vượt trội do có độ phân giải cao. Năm 2005, nhóm nghiên cứu của chúng tôi đã mô hình hoá hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe GC1518 của hãng Canberra Industries, Inc. đặt tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh bằng chương trình máy tính MCNP4C2 [8]. Kết quả cho thấy rằng phổ gamma mô phỏng phù hợp tốt với phổ gamma thực nghiệm. Tuy nhiên số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma vẫn còn có sự khác biệt đáng kể giữa mô phỏng và thực nghiệm. Thực nghiệm lớn hơn mô phỏng lên đến 8,3% đối với phổ gamma ^{137}Cs và 13,1% đối với phổ gamma ^{60}Co khi khoảng cách nguồn - detector 15 cm. Trong công trình này chúng tôi tiếp tục nghiên cứu, tìm kiếm nguyên nhân để giải thích cho sự khác biệt này theo hướng đánh giá các yếu tố ảnh hưởng mạnh đến số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV cũng dựa trên cơ sở chương trình máy tính MCNP4C2 kết hợp so sánh với thực nghiệm.

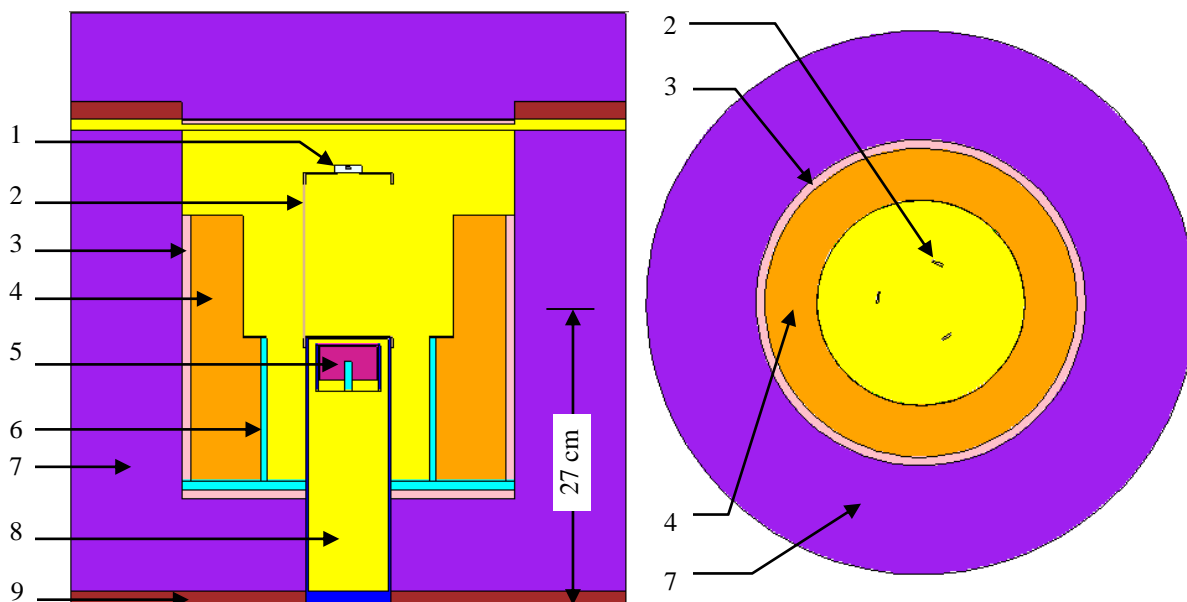
2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Hệ phổ kế gamma

Hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe kiểu GC1518 của hãng Canberra, Hoa kỳ đặt tại Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh hiện vẫn còn đang hoạt động ổn định sau gần 30 năm qua kể từ khi đưa vào sử dụng năm 1996. Để thu thập phổ gamma mô phỏng, cấu trúc tổng quát buồng đo của hệ phổ kế gồm buồng chì che chắn phòng môi trường, nguồn phát tia gamma, detector được mô tả trong một input chuẩn của chương trình máy tính MCNP4C2. Mặt cắt đứng (bên trái) và mặt cắt ngang ở độ cao 27 cm (bên phải) của buồng đo vẽ bằng chương trình MCNP4C2 được trình bày trong Hình 1. Số liệu đầu vào về cấu trúc hình học và thành phần vật liệu của buồng đo đã được trình bày chi tiết trong công trình [8]. Công trình [9] cho thấy có sự ảnh hưởng của lớp germanium bất hoạt lên hiệu suất detector và đã xác định bề dày lớp germanium bất hoạt năm 2005 bằng 1,16 mm. Khi đó hiệu suất detector tính toán bằng chương trình MCNP4C2 phù hợp với thực nghiệm tốt hơn so với trường hợp sử dụng bề dày lớp germanium bất

NGHIÊN CỨU MIỀN NĂNG LƯỢNG THẤP...

hoạt năm 1996 bằng 0,35 mm do nhà sản xuất cung cấp. Tuy nhiên sự khác biệt số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV giữa phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP4C2 và thực nghiệm cũng chưa cải thiện đáng kể so với công trình [8]. Trong các công trình [8, 9] hai nguồn chuẩn dạng điểm phát tia gamma ^{60}Co với hai vạch năng lượng 1173 keV và 1332 keV và ^{137}Cs với một vạch năng lượng 662 keV được sử dụng. Đây là các nguồn phóng xạ chuẩn do hãng Eckert & Ziegler, Co. cung cấp với cấu trúc hình học gồm một viên chất phóng xạ hình trụ đặt trong hộp kín hình đĩa tròn làm bằng nhựa cứng epoxy [10].



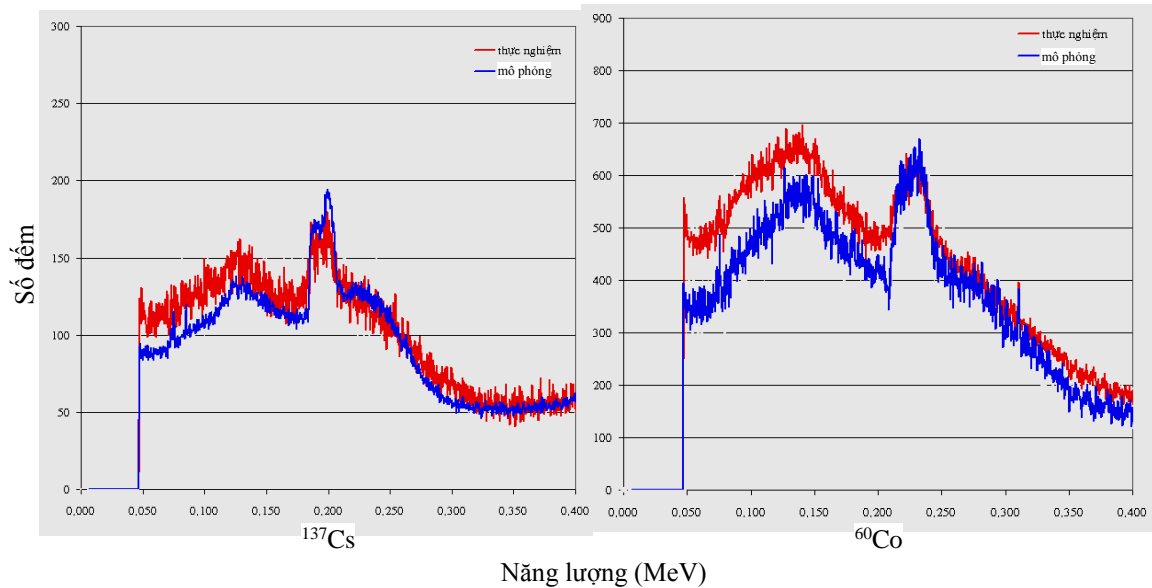
Hình 1. Mặt cắt đứng (bên trái) và mặt cắt ngang tại độ cao 27cm (bên phải) của buồng đo vẽ bằng chương trình MCNP4C2.

1. Nguồn phóng xạ; 2. Giá đỡ nguồn; 3. Thiếc; 4. Paraffin; 5. Tinh thể germanium siêu tinh khiết; 6. Đồng; 7. Chì; 8. Detector; 9. Sắt.

Kết quả so sánh phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP4C2 với phổ gamma thực nghiệm đối với các nguồn ^{137}Cs và ^{60}Co ở khoảng cách nguồn - detector 15 cm được trình bày trong Bảng 1 và Hình 2. Cột cuối cùng trong Bảng 1 là độ khác biệt về số đếm tổng giữa thực nghiệm và tính toán ở miền năng lượng dưới 300 keV, đối với phổ gamma ^{137}Cs là 8,31% và phổ gamma ^{60}Co là 13,1%.

Bảng 1. Độ khác biệt về số đếm tổng giữa thực nghiệm và tính toán ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co .

Nguồn phóng xạ	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
^{137}Cs	$1,29 \cdot 10^5$	$1,18 \cdot 10^5$	8,31
^{60}Co	$5,64 \cdot 10^5$	$4,90 \cdot 10^5$	13,1



Hình 2. So sánh phổ gamma mô phỏng và thực nghiệm đối với các nguồn ^{137}Cs (bên trái) và ^{60}Co (bên phải) ở khoảng cách nguồn - detector 15 cm theo công trình [8].

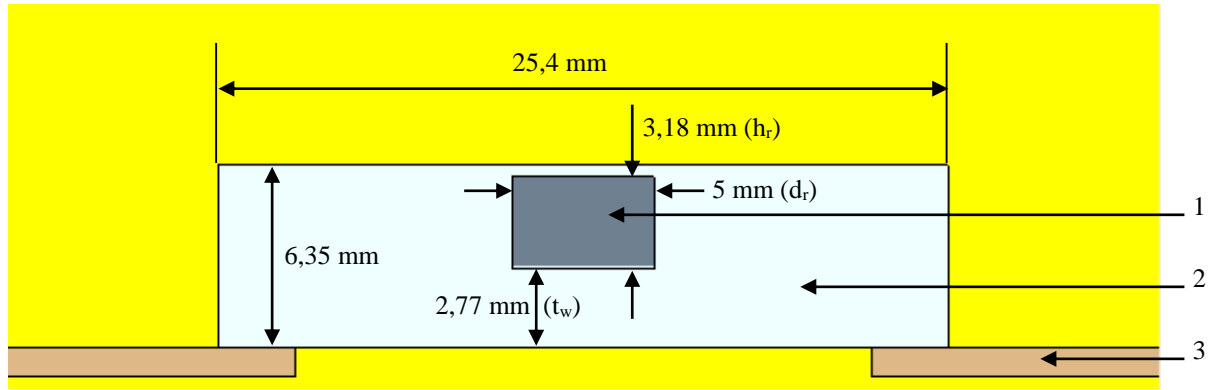
2.2 Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng

Để đánh giá các yếu tố có thể ảnh hưởng đến miền năng lượng thấp, các loại vật liệu có bậc số nguyên tử thấp bên trong buồng đo gây tán xạ gamma được quan tâm bao gồm lớp nylon che kín toàn bộ bề mặt bên trong buồng đo để phòng ngừa vẩy bắn phóng xạ, giấy bồi làm giá đỡ nguồn, lớp paraffin để hấp thụ neutron, nhựa cứng epoxy làm đế giữ viên chất phóng xạ của nguồn. Bằng cách thay đổi bề dày của các lớp vật liệu này, kết quả tính toán bằng chương trình MCNP4C2 cho thấy rằng độ khác biệt về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV đều không vượt quá 1% đối với cả hai phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co . Trong khi đó vật liệu chế tạo nguồn phóng xạ ảnh hưởng đáng kể đến số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV. Điều này có thể giải thích được là do thành phần hoá học của nhựa epoxy bao gồm các nguyên tố nhẹ như C, H, O và tiếp xúc trực tiếp với viên chất phóng xạ ở khoảng cách không đáng kể so với các thành phần vật liệu khác tham gia. Do đó sự thay đổi về kích thước hình học của nguồn phóng xạ sẽ ảnh hưởng đến số đếm tổng này.

Như vậy có thể nói rằng sự khác biệt giữa thực nghiệm và tính toán về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV là do ảnh hưởng của cấu trúc hình học và thành phần vật liệu chế tạo nguồn phóng xạ. Thực vậy, trong các công trình [8, 9] do thiếu thông tin về các thông số kích thước hình học của nguồn phóng xạ nên đường kính và chiều cao của nguồn phóng xạ được đo đạc trực tiếp, còn bề dày cửa sổ t_w , chiều cao h_r và đường kính d_r của viên chất phóng xạ được chọn bằng 1 mm để xây dựng mô hình mô phỏng được trình bày trong cột 2 Bảng 2. Trong công trình này các số liệu nói trên do chính hãng Eckert & Ziegler, Co. cung cấp được sử dụng như trình bày trong cột 3 Bảng 2 và Hình 2.

Bảng 2. Kích thước hình học của các nguồn phóng xạ ^{137}Cs và ^{60}Co tính bằng đơn vị mm.

	Theo công trình [8], [9]	Theo Eckert & Ziegler, Co. [10]
Bề dày cửa sổ t_w	1	2,77
Chiều cao viên chất phóng xạ h_r	1	3,18
Đường kính viên chất phóng xạ d_r	1	5
Đường kính hộp nhựa cứng epoxy	25,4	25,4
Chiều cao hộp nhựa cứng epoxy	6,35	6,35



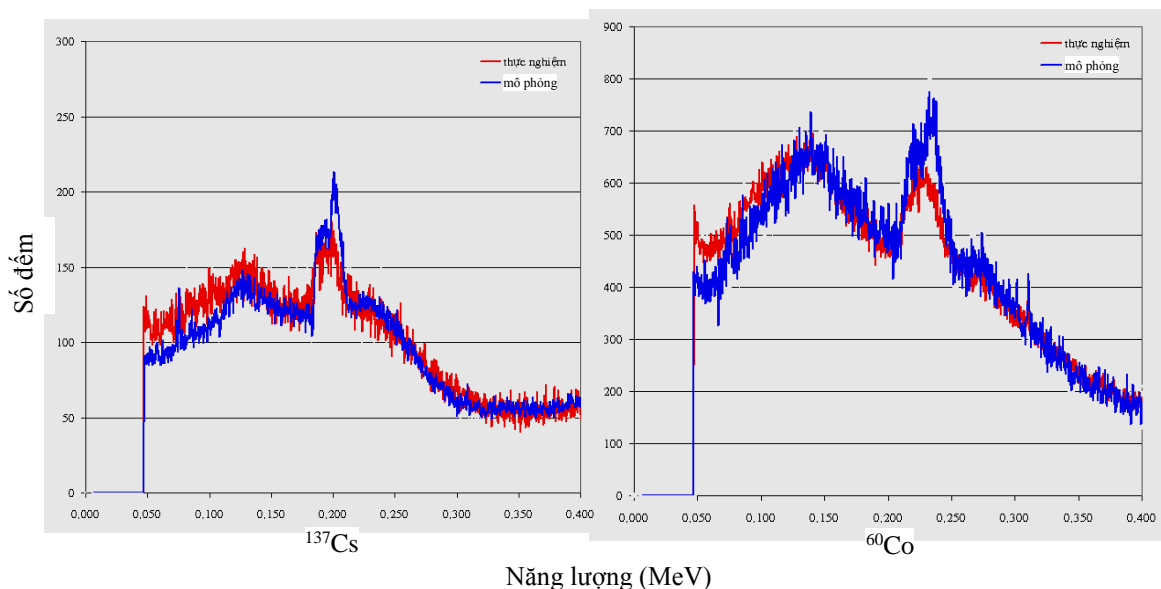
Hình 3. Mặt cắt đứng của nguồn phóng xạ vẽ bằng chương trình MCNP4C2. Cấu trúc và kích thước hình học do hãng Eckert & Ziegler, Co. cung cấp [10].

1. Viên chất phóng xạ; 2. Đế nhựa epoxy; 3. Giá đỡ nguồn.

Kết quả so sánh phổ gamma mô phỏng bằng chương trình MCNP4C2 với phổ gamma thực nghiệm đối với các nguồn ^{137}Cs và ^{60}Co ở khoảng cách nguồn - detector 15 cm được trình bày trong Bảng 3 và Hình 4. Cột cuối cùng trong Bảng 3 cho thấy độ khác biệt về số đếm tổng giữa thực nghiệm và tính toán ở miền năng lượng dưới 300 keV, đối với phổ gamma ^{137}Cs là 4,19% và phổ gamma ^{60}Co là 0,36% là những giá trị có thể chấp nhận được khi sai số thông kê về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma thực nghiệm bằng 0,3%. Số liệu thực nghiệm của phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co trong các công trình [8, 9] được sử dụng lại để so sánh.

Bảng 3. Độ khác biệt về số đếm tổng giữa thực nghiệm và tính toán ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co . Kích thước hình học nguồn phóng xạ do hãng Eckert & Ziegler, Co. cung cấp.

Nguồn phóng xạ	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
^{137}Cs	$1,29 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$	4,19
^{60}Co	$5,64 \cdot 10^5$	$5,66 \cdot 10^5$	0,36



Hình 4. So sánh phổ gamma mô phỏng và thực nghiệm đối với các nguồn ^{137}Cs (bên trái) và ^{60}Co (bên phải) ở khoảng cách nguồn - detector 15 cm.

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để thấy rõ ảnh hưởng của cấu trúc hình học và thành phần vật liệu chế tạo nguồn phóng xạ lên số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV, các thông số kích thước hình học được quan tâm bao gồm bề dày cửa sổ t_w bức xạ gamma truyền qua trước khi đạt đến detector, chiều cao h_r và đường kính d_r viên chất phóng xạ.

3.1 Ảnh hưởng của bề dày cửa sổ t_w

Có 5 giá trị bề dày cửa sổ t_w được chọn trong khoảng 0 - 2,77 mm làm số liệu đầu vào để mô phỏng phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co , chiều cao viên chất phóng xạ $h_r = 3,18$ mm và đường kính viên chất phóng xạ $d_r = 5$ mm, giá trị các thông số vật lý còn lại của hệ phổ kế được giữ cố định. Kết quả tính toán bằng chương trình MCNP4C2 về sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co vào bề dày cửa sổ t_w được trình bày ở cột 3 trong Bảng 3 và Bảng 4 tương ứng. Bảng 3 và Bảng 4 cho thấy rằng càng ra xa giá trị danh định $t_w = 2,77$ mm do nhà sản xuất cung cấp thì độ khác biệt về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV đều tăng đối với phổ gamma ^{137}Cs bằng 36% và phổ gamma ^{60}Co bằng 85%.

Bảng 3. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs vào bề dày cửa sổ t_w .

Bề dày cửa sổ t_w (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
2,77	1,289.10 ⁵	1,235.10 ⁵	4,19
1,77		1,224.10 ⁵	4,99
1,27		1,220.10 ⁵	5,34
0,77		1,216.10 ⁵	5,68
0,00		1,204.10 ⁵	6,55
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 36%			

Bảng 4. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{60}Co vào bề dày cửa sổ t_w .

Bề dày cửa sổ t_w (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
2,77	5,642.10 ⁵	5,662.10 ⁵	0,36
1,77		5,611.10 ⁵	0,53
1,27		5,598.10 ⁵	0,77
0,77		5,556.10 ⁵	1,52
0,00		5,505.10 ⁵	2,43
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 85%			

3.2 Ảnh hưởng của chiều cao h_r

Tương tự, có 5 giá trị chiều cao viên chất phóng xạ h_r được chọn trong khoảng 1 - 3,18 mm làm số liệu đầu vào để mô phỏng phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co , đường kính viên chất phóng xạ $d_r = 5$ mm và bề dày cửa sổ $t_w = 2,77$ mm, giá trị các thông số vật lý còn lại của hệ phổ kế được giữ cố định. Kết quả tính toán bằng chương trình MCNP4C2 về sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co vào chiều cao viên chất phóng xạ h_r được trình bày ở cột 3 trong Bảng 5 và Bảng 6 tương ứng. Bảng 5 và Bảng 6 cho thấy rằng càng ra xa giá trị danh định $h_r = 3,18$ mm do nhà sản xuất cung cấp thì độ khác biệt về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV đều tăng đối với phổ gamma ^{137}Cs bằng 12% và phổ gamma ^{60}Co bằng 94%.

Bảng 5. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs vào chiều cao viên chất phóng xạ h_r .

Chiều cao h_r (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
3,18	1,289.10 ⁵	1,235.10 ⁵	4,19
2,18		1,232.10 ⁵	4,44
1,68		1,229.10 ⁵	4,62
1,18		1,227.10 ⁵	4,77
1,00		1,226.10 ⁵	4,78
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 12%			

Bảng 6. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{60}Co vào chiều cao viên chất phóng xạ h_r .

Chiều cao h_r (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
3,18	5,642.10 ⁵	5,662.10 ⁵	0,36
2,18		5,520.10 ⁵	2,16
1,68		5,431.10 ⁵	3,73
1,18		5,338.10 ⁵	5,38
1,00		5,291.10 ⁵	6,22
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 94%			

3.3 Ảnh hưởng của đường kính d_r

Tương tự như hai trường hợp trên, có 5 giá trị đường kính viên chất phóng xạ d_r được chọn trong khoảng 1 - 5 mm làm số liệu đầu vào để mô phỏng phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co , chiều cao viên chất phóng xạ $h_r = 3,18$ mm và bề dày cửa sổ $t_w = 2,77$ mm, giá trị các thông số vật lý còn lại của hệ phổ kế được giữ cố định. Kết quả tính toán bằng chương trình MCNP4C2 về sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co vào đường kính viên chất phóng xạ d_r được trình bày ở cột 3 trong Bảng 7 và Bảng 8 tương ứng. Bảng 7 và Bảng 8 cho thấy rằng càng ra xa giá trị danh định $d_r = 5$ mm do nhà sản xuất cung cấp thì độ khác biệt về số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV đều tăng đối với phổ gamma ^{137}Cs bằng 7% và phổ gamma ^{60}Co bằng 96%.

Bảng 7. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs vào đường kính viên chất phóng xạ d_r .

Đường kính d_r (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
5,00	1,289.10 ⁵	1,2350.10 ⁵	4,19
4,00		1,2309.10 ⁵	4,50
3,00		1,2293.10 ⁵	4,63
2,00		1,2304.10 ⁵	4,55
1,00		1,2311.10 ⁵	4,49
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 7%			

Bảng 8. Sự phụ thuộc của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{60}Co vào đường kính viên chất phóng xạ d_r .

Đường kính d_r (mm)	Số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV		Độ khác biệt (%)
	Thực nghiệm	Tính toán	
5,00	5,642.10 ⁵	5,662.10 ⁵	0,36
4,00		5,558.10 ⁵	1,47
3,00		5,471.10 ⁵	3,03
2,00		5,344.10 ⁵	5,27
1,00		5,222.10 ⁵	7,44
So với giá trị danh định, độ khác biệt tăng 96%			

Kết quả tính toán bằng chương trình MCNP4C2 được trình bày ở cột 3 trong các Bảng 3 - 8 cho thấy rằng có sự phụ thuộc mạnh của số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co vào các thông số kích thước hình học nguồn phóng xạ. Do đó, trong nghiên cứu hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết HPGe, không những kích thước hình học và thành phần vật liệu của hệ phổ kế ảnh hưởng đến phổ gamma mô phỏng trên toàn dải năng lượng đối với hiệu suất detector [11] mà còn kích thước hình học và thành phần vật liệu của nguồn phóng xạ cũng ảnh hưởng đáng kể lên kết quả phổ gamma mô phỏng, đặc biệt đối với số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV.

4 KẾT LUẬN

Công trình này sử dụng chương trình máy tính MCNP4C2 dựa trên nền tảng phương pháp Monte Carlo để nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc hình học và thành phần vật liệu chế tạo nguồn phóng xạ lên số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng ảnh hưởng này là đáng kể, kích thước hình học nguồn phóng xạ càng xa giá trị danh định thì độ khác biệt số đếm tổng của miền năng lượng thấp dưới 300 keV càng tăng. Có sự phù hợp tốt giữa thực nghiệm và tính toán MCNP4C2 kể cả số đếm tổng ở miền năng lượng dưới 300 keV trong phổ gamma ^{137}Cs và ^{60}Co , đã cải thiện đáng kể độ khác biệt giảm từ 8,31% xuống 4,19% đối với phổ gamma ^{137}Cs và giảm từ 13,1% xuống 0,36% đối với phổ gamma ^{60}Co khi sử dụng giá trị danh định do nhà sản xuất cung cấp. Qua đó, cũng có thể khẳng định thêm rằng chương trình máy tính MCNP4C2 là công cụ mô phỏng đáng tin cậy để thực hiện những nghiên cứu tiếp theo.

PHỤ LỤC

Một input chuẩn của chương trình máy tính MCNP4C2

Problem - Study on the low energy area of the gamma spectrometer using the MCNP4C2 code

c Cell cards

```

1 6 -8.94 -1 -23 21 imp:p,e=1
2 1 -5.35 (-55 -64 22)#1#34 imp:p=1 imp:e=0 $ cell detector
3 3 -0.00129 (1 -2 -22 21)#1 imp:p,e=1
4 2 -2.6989 (2 -3 -24 21):(-3 -21 20) imp:p,e=1
5 3 -0.00129 (-4 -25 57):(3 -4 -57 20):(-4 -20 16) imp:p,e=1
6 2 -2.6989 (-5 -26 25):(4 -5 -25 16):(-5 -16 15) imp:p,e=1
11 3 -0.00129((-94 -31 30):(-11 -30 26):(5 -9 -26 19)) &
#45#46#48#49 imp:p,e=1
12 6 -8.94 9 -10 -26 19 imp:p,e=1
13 7 -0.88 (11 -12 -30 26):(10 -12 -26 19) imp:p,e=1
14 8 -7.28 12 -94 -30 19 imp:p,e=1
15 9 -11.34 (13 -14 -31 17):(5 -14 -17 16) imp:p,e=1
16 3 -0.00129 (-94 -32 31):(94 -14 -34 31) imp:p,e=1
17 8 -7.28 -94 -33 32 imp:p,e=1
18 6 -8.94 -94 -34 33 imp:p,e=1
19 10 -7.86 94 -14 -35 34 imp:p,e=1
20 9 -11.34 (-14 -36 35):(-94 -35 34) imp:p,e=1

```

NGHIÊN CỨU MIỀN NĂNG LƯỢNG THẤP...

21 10 -7.86 5 -14 -16 15 imp:p,e=1
22 8 -7.28 5 -94 -18 95 imp:p,e=1
23 6 -8.94 5 -94 -19 18 imp:p,e=1
24 0 14:36:-15 imp:p,e=0
34 15 -2.31 (1 -54 -23 22):(-54 -56 23) imp:p,e=1 \$ dien cuc cay ion B
35 17 -5.05 (-55 -24 64):(55 -2 -24 22) imp:p,e=1 \$ dien cuc khuech tan Li
36 18 -1.435 -3 -81 24 imp:p,e=1 \$ cua so IR mylar
45 11 -1.879 -76 -79 78 imp:p,e=1 \$ nguon Cs
46 13 -1.15 (-77 -80 78)#45 imp:p,e=1 \$ holder epoxy
47 20 -1.11 -3 -57 81 imp:p,e=1 \$ cua so IR kapton
48 14 -0.8 (5 -82 -84 85):(5 -82 -85 26 86 -87) &
:(5 -82 -85 26 88 -89):(5 -82 -85 26 90 -91) &
:(5 -82 -26 83) imp:p,e=1
49 14 -0.8 -78 92 93 -5 imp:p,e=1
50 4 -0.33615 (94 -13 -31 95):(5 -13 -95 17) imp:p,e=1

c Surface cards

1 cz 0.35
2 cz 2.7
3 cz 2.93
4 cz 3.66
5 cz 3.81
9 cz 7.35
10 cz 7.95
11 cz 9.45
12 cz 14.2
13 cz 15.2
14 cz 25.0
15 pz 0.0
16 pz 1.6
17 pz 9.8
18 pz 10.8
19 pz 11.6
20 pz 19.715
21 pz 19.815
22 pz 20.815
23 pz 22.515
24 pz 24.015
25 pz 24.55
26 pz 24.7
30 pz 35.8
31 pz 43.6
32 pz 44.1
33 pz 44.5
34 pz 44.6
35 pz 46.2
36 pz 54.2
54 cz 0.3503 \$ dien cuc khuech tan Li
55 cz 2.584 \$ dien cuc khuech tan Li
56 pz 22.5153 \$ dien cuc loi B
57 pz 24.026 \$ cua so IR
64 pz 23.899 \$ dien cuc cua so Li
76 cz 0.05 \$ hinh hoc nguon Cs (2)
77 cz 1.27 \$ hinh hoc nguon Cs (2)
78 pz 39.7 \$ hinh hoc nguon Cs (2)
79 pz 39.8 \$ hinh hoc nguon Cs (2)
80 pz 40.34 \$ hinh hoc nguon Cs (2)
81 pz 24.016 \$ split mylar and kapton
82 cz 4.01 \$ mat tru ngoai gia do nguon

83 pz 23.7 \$ mat day duoi gia do nguon
 84 pz 39.7001 \$ mat day tren gia do nguon
 85 pz 38.7 \$ mat day tren gia do nguon lower
 86 py 0.0 \$ 0 degree
 87 p 0.27 1 0 0 \$ 15 degree
 88 p 1.73 1 0 0 \$ 120 degree
 89 p 1 1 0 0 \$ 135 degree
 90 p -1.73 1 0 0 \$ 240 degree
 91 p -3.73 1 0 0 \$ 255 degree
 92 pz 39.6 \$ mat day duoi vanh khan
 93 cz 1.0 \$ ban kinh trong vanh khan
 94 cz 15.0 \$ mat tru nylon trong
 95 pz 10.0 \$ mat day nylon tren

c Data cards

mode p

m1 32000 -1.0 \$ Ge

m2 13000 -1.0 \$ Al

m3 7000 -0.755 8000 -0.232 18000 -0.013 \$ Atmosphere

m4 1000 -0.14372 6000 -0.85628 \$ PE

m6 29000 -1.0 \$ Cu

m7 1000 -0.1549 6000 -0.8451 \$ Paraffin C9H20

m8 50000 -1.0 \$ Sn

m9 82000 -1.0 \$ Pb

m10 26000 -1.0 \$ Fe

m11 55000 -1.0 \$ Cs

m13 1000 -0.06 6000 -0.721 8000 -0.219 \$ Epoxy

m14 1000 -0.062 6000 -0.444 8000 -0.494 \$ Cellulose

m15 5000 -1.0 \$ B

m17 32000 -0.9 3000 -0.1 \$ Ge Li

m18 1000 -0.053 6000 -0.526 8000 -0.421 \$ Mylar C10H12O6

m20 1000 -0.028 6000 -0.720 7000 -0.077 8000 -0.175 \$ Kapton C22H10N2O4

sdef cel=45 pos=0 0 0 axs=0 0 1 ext=d1 rad=d2 erg=0.66166 par=2 wgt=10

fi8 geb 0.00071 0.00075 0.46493

si1 h 39.7 39.8

sp1 d -21 0

si2 h 0.0 0.05

sp2 -21 1

f8:p 2

e8 0 .0001 .005471 8190i 1.942341

phys:p

phys:e

cut:p 2j 0 0

cut:e

nps 900000000

ctme 90

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] C.D. Zerby and H.S. Moran, "Calculation of the pulse-height response of NaI(Tl) scintillation counters," *Nuclear Instruments and Methods* (1961), 115-124.

[2] K.M. Wainio and G.F. Knoll, "Calculated gamma ray response characteristics of semiconductor detectors," *Nuclear Instruments and Methods* (1966), 213-223.

[3] I.B. Ewa, D. Bodizs, S. Czifrus and Z. Molnar, "Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector," *Applied Radiation and Isotopes* (2001), 103-108.

[4] J. Saegusa, "CREPT-MCNP code for efficiency calibration of HPGe detectors with the representative point method," *Applied Radiation and Isotopes* (2008), 774-779.

[5] C.C. Conti, I.P. Salinas and H. Zylberberg, "A detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP5," *Progress in Nuclear Energy* (2013), 35-40.

- [6] R. Sarangapani, M.T. Jose, T.K. Srinivasan and B. Venkatraman, "Determination of efficiency of an aged HPGe detector for gaseous sources by self absorption correction and point source methods," *Journal of Instrumentation* (2017), T07006.
- [7] E. Uyar and H.B. Mustafa, "Characterisation of two p-type HPGe detectors by measurements and Monte Carlo simulations," *Measurement* (2022), 112092.
- [8] N.Q. Huy, Đ.Q. Bình và V.X. Ân, "Bước đầu mô hình hoá hệ phổ kế gamma dùng detector bán dẫn siêu tinh khiết sử dụng chương trình MCNP," *Tạp chí phát triển Khoa học & Công nghệ, Đại học Quốc gia TP HCM* (2005), 17-25.
- [9] N.Q. Huy, Đ.Q. Bình và V.X. Ân, "Nghiên cứu sự tăng bề dày lớp germanium bất hoạt trong detector bán dẫn siêu tinh khiết bằng chương trình MCNP," *Tạp chí phát triển Khoa học & Công nghệ, Đại học Quốc gia TP HCM* (2005), 35-43.
- [10] An Eckert & Ziegler, Co., "Reference & Calibration Sources," *An Eckert & Ziegler, Co.* (2023), 33-42.
- [11] N.Q. Huy, D.Q. Binh and V.X. An, "Study on the increase of inactive germanium layer in a high purity germanium detector after a long time operation applying MCNP code," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A* (2007), 384-388.

STUDY ON THE LOW ENERGY AREA OF THE GAMMA SPECTROMETRY USING THE MCNP4C2 CODE

VO XUAN AN

Faculty of Electronic Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

**Corresponding author: voxuanan@iuh.edu.vn*

Abstract. The MCNP4C2 (Monte Carlo N-Particle, version 4C2) code is one of simulation tools that are reliable, use the Monte Carlo method to simulate the transport of neutron, photon and electron in matter. In recent years, there were many scientific paper proving the remarkable agreement between experimental and calculation gamma spectra at the high energy area (greater than 300 keV). However, at the low energy area (less than 300 keV), the MCNP4C2 code based calculation and the experimental results were still different. In this work, some reasons from selecting the input parameters and setting up the experiment as well were presented to explain the difference between experimental and calculation gamma spectra at the low energy area.

Keywords. HPGe detector, Gamma spectra, Low energy area, MCNP4C2 code.

Ngày gửi bài: 18/05/2023

Ngày chấp nhận đăng: 08/09/2023