

DOI:10.22144/ctu.jsi.2020.100

MÔ PHỎNG HỆ ĐẦU DÒ GAMMA TRIỆT COMPTON BẰNG PHƯƠNG PHÁP MONTE CARLO

Châu Thành Tài^{1*}, Võ Công Phát¹, Phạm Ngọc Sơn³, Trần Thiện Thanh^{1,2} và Châu Văn Tạo^{1,2}

¹Bộ môn Vật lý Hạt nhân, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²Phòng Thí nghiệm Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Viện Nghiên cứu Hạt nhân

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Châu Thành Tài (email: cttai@hcmus.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 04/03/2020

Ngày nhận bài sửa: 21/04/2020

Ngày duyệt đăng: 29/06/2020

Title:

Simulation for Compton suppression gamma-ray spectrometer by using Monte Carlo method

Từ khóa:

BGO, Geant 4, HPGe, hệ đầu dò triệt Compton, MCNP-CP, phân trùng phùng

Keywords:

Anti-coincidence, BGO, Compton suppression spectrometer, Geant 4, HPGe, MCNP-CP

ABSTRACT

In this study, two simulation toolkits including Geant 4 and MCNP-CP are used to investigate the configuration of the Compton suppression spectrometer at Nuclear Research Institute. The Compton suppression system consisting of 12 bismuth germanate (BGO) scintillation crystals surrounding one HPGe detector is used to reduce background from Compton scattering. The simulation results illustrate the good suitability between response functions for point source with each radioisotope such as Na-22, Co-60 and Cs-137. Moreover, the difference between the full-energy peak efficiency of two simulation toolkits is less than 1%. This research gives the initial results to optimize the configuration of Compton suppression system and to compare with experimental data in the future.

TÓM TẮT

Trong công trình này, chương trình mô phỏng Geant 4 và MCNP-CP được sử dụng để mô hình hóa hệ phổ kế triệt Compton tại Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt. Hệ phổ kế bao gồm 12 tinh thể nhấp nháy Bismuth Germanate (BGO) đặt xung quanh HPGe được sử dụng để giảm nhiễu tán xạ Compton. Kết quả mô phỏng cho thấy có sự phù hợp tốt của hàm đáp ứng của nguồn phóng xạ dạng điểm đối với các đồng vị Na-22, Co-60 và Cs-137. Hơn nữa, hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần được so sánh giữa hai chương trình với độ sai biệt dưới 1%. Nghiên cứu này là kết quả ban đầu trong việc tối ưu hóa cấu hình của hệ đo và so sánh với kết quả thực nghiệm trong tương lai.

Trích dẫn: Châu Thành Tài, Võ Công Phát, Phạm Ngọc Sơn, Trần Thiện Thanh và Châu Văn Tạo, 2020. Mô phỏng hệ đầu dò gamma triệt Compton bằng phương pháp Monte Carlo. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ. 56(Số chuyên đề: Khoa học tự nhiên)(1): 127-133.

1 GIỚI THIỆU

Đầu dò HPGe (high-purity germanium) là một hệ phổ kế gamma được sử dụng rộng rãi trong

nghiên cứu số liệu hạt nhân cũng như trong phân tích môi trường. Đối với quá trình ghi đo bức xạ, phổ kế gamma được sử dụng trong việc xác định thành phần của các đồng vị phóng xạ mà không cần phải phá

hủy mẫu. Đầu dò HPGe cho phép định tính và định lượng các đồng vị phát bức xạ gamma có các mức năng lượng khác nhau. Do đó, đầu dò HPGe được ứng dụng trong việc kiểm tra thực phẩm (Anderson *et al.*, 2008), phân tích kích hoạt neutron (Mauerhofer *et al.*, 1996; Landsberger and Biegalski, 2005) và phân tích mẫu môi trường (Harbottle and Cumming, 1994; Kapsimalis *et al.*, 2009). Giới hạn phát hiện của hệ phổ kế gamma HPGe được xác định bởi hai yếu tố: hiệu suất ghi nhận và thông lượng bức xạ. Để tăng hiệu suất ghi nhận, đầu dò cần kích thước tinh thể lớn kéo theo chi phí sẽ cao hơn. Vì vậy, việc giảm thông lượng bức xạ quan tâm. Bên cạnh thông lượng bức xạ đóng góp từ môi trường thì tán xạ Compton cũng là một trong các đóng góp chính vào thông lượng của hệ phổ kế gamma HPGe. Trong đó, hiện tượng tán xạ Compton là quá trình tán xạ của tia gamma với các electron trên lớp vỏ nguyên tử và các electron này khi bay ra khỏi nguyên tử nhận một phần năng lượng của gamma tới.

Phổ liên tục gây ra bởi tán xạ Compton làm cho việc phát hiện đỉnh quang điện của các tia gamma có xác suất phát thấp trở nên phức tạp và làm tăng độ bất định của phép đo hoạt độ. Do đó, việc giảm bờ Compton xuất hiện trên phổ từ quá trình tán xạ trở nên cần thiết. Kỹ thuật làm giảm bờ Compton được phát triển từ đầu những năm 1950 trong việc nghiên cứu hạt nhân và phân tích các số đếm thấp của mẫu môi trường (Al-Azmi, 2008). Nhiều hệ đầu dò triệt Compton có cấu tạo và thiết kế khác nhau được xây dựng và áp dụng trong nhiều nghiên cứu (Cho *et al.*, 2005; Stover and Lamaze, 2005). Tuy nhiên, khả năng giảm nền Compton phụ thuộc vào loại đầu dò, thiết kế điện tử và thời gian xử lý. Hệ phổ kế triệt Compton được quan tâm trong nghiên cứu này được cài đặt và thiết lập tại lò phản ứng hạt nhân ở Đà Lạt. Hệ đầu dò này bao gồm một đầu dò HPGe được bao quanh bởi 12 tinh thể bismuth germanate (BGO) sử dụng phương pháp phân trùng phùng để loại bỏ các tia gamma được ghi nhận đồng thời trong đầu dò HPGe và tinh thể BGO.

Trong nghiên cứu này, hai phần mềm mô phỏng sử dụng phương pháp Monte Carlo gồm Geant 4 (Agostinelli *et al.*, 2003) và MCNP-CP (Berlizov, 2006) được áp dụng để đánh giá việc đáp ứng phổ

gamma và khảo sát ảnh hưởng của cơ chế triệt Compton lên đỉnh năng lượng toàn phần cũng như bờ Compton đối với các nguồn phóng xạ dạng điểm. Từ đó, những kết quả ban đầu của hệ đo triệt Compton sẽ được tính toán và trình bày chi tiết.

2 HỆ ĐẦU DÒ TRIỆT COMPTON

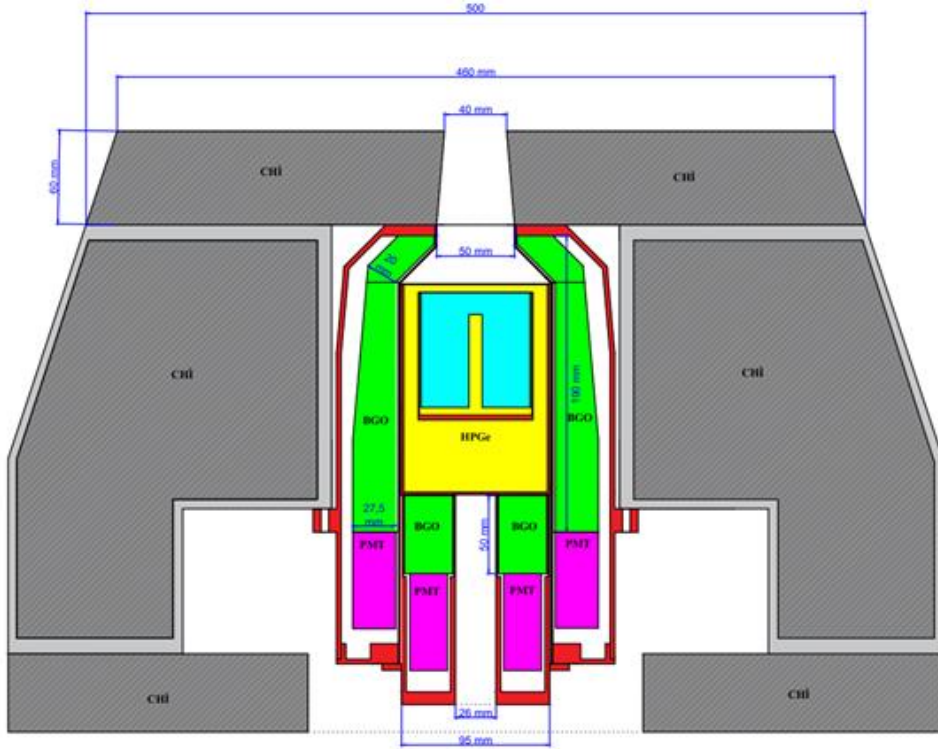
Hệ đầu dò triệt Compton gồm hai phần quan trọng là hệ các đầu dò và hệ điện tử. Trong đó, hệ các đầu dò có tác dụng phát hiện và ghi nhận các bức xạ gamma phát ra từ nguồn, còn hệ điện tử được dùng để xử lý các tín hiệu đã được ghi nhận bởi hệ đầu dò để quyết định xem tín hiệu đó được chấp nhận hay bị loại bỏ.

2.1 Cấu tạo hệ các đầu dò

Đầu dò HPGe (GR7023 Canberra loại n đồng trục) được sử dụng như đầu dò trung tâm với độ phân giải năng lượng là 2,36 keV và hiệu suất tương đối là 70%.

Xung quanh đầu dò HPGe là 12 đầu dò bảo vệ BGO được lắp đặt, trong đó 8 đầu dò BGO che chắn xung quanh và 4 đầu dò BGO che chắn phía sau. Các đầu dò BGO được bao bọc trong một lớp nhôm có bề dày 0,8 mm. Đường kính của đầu dò và đường kính vùng nhìn thấy của đầu dò HPGe là lần lượt là 95 mm và 50 mm. Tám đầu dò BGO có chiều dài tinh thể là 190 mm cùng với bề dày cho phần bao bọc xung quanh và phần nón phía trước đầu dò HPGe lần lượt là 27,5 mm và 20 mm. Dữ liệu từ một đầu dò BGO được đọc ra bởi một ống nhân quang điện Hamamatsu loại R1924. Bốn đầu dò BGO phía sau đầu dò HPGe có đường kính trong, đường kính ngoài và chiều dài tinh thể lần lượt là 26 mm, 95 mm và 50 mm. Dữ liệu từ 4 đầu dò BGO này cũng được đọc ra bởi các ống nhân quang điện Hamamatsu loại R1924 kích thước 1 inch (N.X. Hai *et al.*, 2013).

Cuối cùng, tất cả các đầu dò cùng với các ống nhân quang điện được đặt bên trong một lớp chì. Lớp chì ngoài vai trò ngăn chặn các bức xạ từ bên ngoài, nó còn đóng một vai trò như ống chuẩn trực với chiều dài 60 mm và đường kính tăng dần từ ngoài vào trong từ 40 mm đến 50 mm. Hình 1 thể hiện chi tiết cấu tạo của hệ đầu dò triệt Compton được cung cấp từ nhà sản xuất và hiện nay hệ đo được đặt tại Viện nghiên cứu hạt nhân.



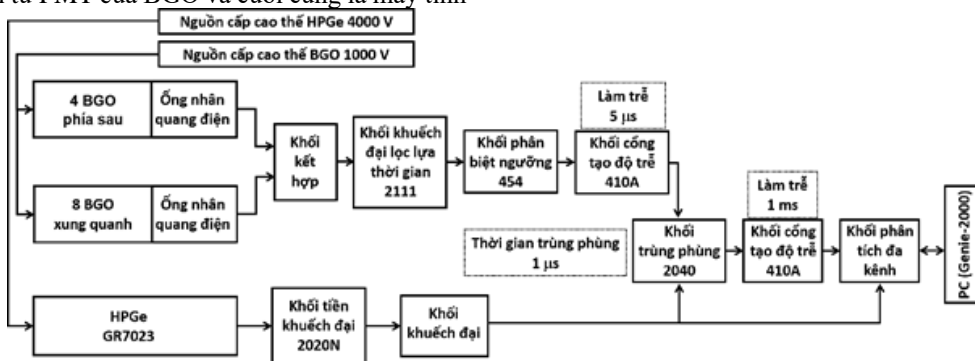
Hình 1: Thiết kế hệ đầu dò triệt Compton với đầu dò HPGe được đặt ở giữa, bao bọc xung quanh đầu dò này là các tinh thể BGO được kết nối với các ống nhân quang điện (PMT - Photomultiplier) và toàn bộ hệ đo được che chắn bởi lớp chì

2.2 Thiết lập hệ điện tử

Các thành phần trong hệ điện tử được sản xuất bởi Canberra ngoại trừ nguồn cao thế cho đầu dò BGO. Các thành phần bao gồm nguồn cấp cao thế cho đầu dò HPGe mẫu 3106D, nguồn cấp cao thế cho đầu dò BGO mẫu 714-1G, khối phân biệt ngưỡng 454, khối khuếch đại lọc lựa thời gian 2111, khối công tạo độ trễ 410A, khối tiền khuếch đại 2020N, khối khuếch đại 2025, khối phân tích đa kênh, khối trùng phùng 2040, khối kết hợp các tín hiệu đến từ PMT của BGO và cuối cùng là máy tính

với phần mềm xử lý Genie-2000. Hình 2 thể hiện sơ đồ hệ điện tử được dùng trong hệ đo triệt Compton.

Dựa trên Hình 2, đầu dò HPGe điện cực ngược và các đầu dò BGO được cấp cao thế lần lượt là -4000 V và 1000 V. Tín hiệu tương tự của đầu dò HPGe được truyền đến khối tiền khuếch đại trước khi đi đến khối khuếch đại 2025 để tạo ra tín hiệu số. Tiếp theo, tín hiệu số đi ra từ khối khuếch đại này đi đến đồng thời khối phân tích đa kênh và khối trùng phùng.

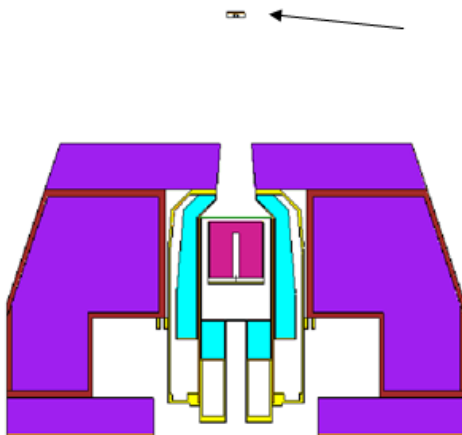


Hình 2: Sơ đồ hệ điện tử của hệ đo triệt Compton sử dụng phương pháp phân trùng phùng với thời gian trùng phùng 1 μs

Song song đó, tín hiệu tương tự đi ra từ các đầu dò BGO được truyền đến khối kết hợp tín hiệu. Tiếp theo, tín hiệu từ khối kết hợp được truyền đến khối khuếch đại lọc lựa thời gian 2111 và khối phân biệt ngưỡng 454 để tạo ra tín hiệu số. Tín hiệu số sau đó sẽ được làm trễ khoảng 5 μ s bởi khối công tạo độ trễ để đợi tín hiệu đến từ khối khuếch đại 2025. Tại khối trùng phùng, cửa sổ thời gian trùng phùng 1 μ s được thiết lập. Nếu trong khoảng thời gian trùng phùng này xuất hiện đồng thời tín hiệu số từ đầu dò BGO và đầu dò HPGe thì có nghĩa là tín hiệu đến từ đầu dò HPGe thể hiện cho tán xạ Compton.

Sau đó, xung tín hiệu từ khối trùng phùng sẽ được truyền tới công tạo độ trễ để được làm trễ khoảng 1 ms, điều này đảm bảo tín hiệu số từ khối trùng phùng gặp được tín hiệu số đến từ đầu dò HPGe để xác định việc ghi nhận hay loại bỏ tín hiệu từ đầu dò HPGe. Cuối cùng, thông tin từ đầu dò HPGe tại công phân tích đa kênh sẽ được truyền về máy tính và xử lý trên Genie-2000.

3 MÔ PHÒNG MONTE CARLO



Hình 3: Hình học mô phỏng bằng MCNP-CP

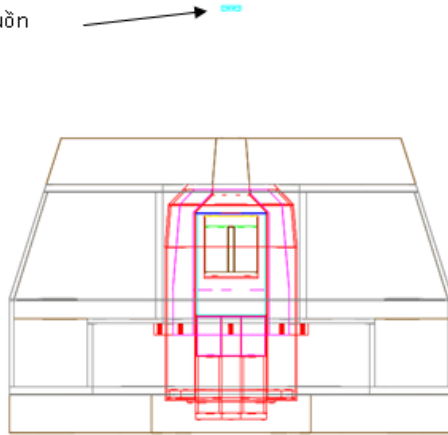
Trong việc tính toán vật lý cho các quá trình tương tác của bức xạ gamma bên trong vật chất, Geant 4 và MCNP-CP đều sử dụng số liệu hạt nhân ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) được cung cấp bởi Trung tâm dữ liệu hạt nhân quốc gia của phòng thí nghiệm quốc gia BrookHaven. Tuy nhiên, do chỉ quan tâm đến gamma có năng lượng cao nên các quá trình như huỳnh quang, Auger sẽ không được tính toán trong quá trình mô phỏng.

4 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để đánh giá kết quả mô phỏng (số đếm theo năng lượng) từ hai phần mềm Geant 4 và MCNP-CP cho

Trong nghiên cứu này, hai phần mềm mô phỏng sử dụng phương pháp Monte Carlo là Geant 4 (phiên bản 10.05.p01) và MCNP-CP được sử dụng. Trong đó, Geant 4 được phát triển bởi CERN và MCNP-CP được phát triển bởi Andrey Berlizov tại Viện nghiên cứu hạt nhân của Viện hàn lâm Khoa học quốc gia Ukraina. Để có thể mô phỏng đúng quá trình truyền qua của bức xạ gamma trong đầu dò, mô tả hình học của hệ đầu dò (bao gồm tất cả hình dạng, đối tượng và vật liệu) cần phải chính xác để giảm thiểu tối đa sai số trong quá trình mô phỏng.

Trong cả hai phần mềm Geant 4 và MCNP-CP, hình học của hệ đầu dò được mô tả theo mô hình hệ đo được cung cấp từ nhà sản xuất. Bên cạnh việc mô phỏng hệ đầu dò, hình học của nguồn cũng được quan tâm. Nguồn đặt đồng trục và cách mặt đầu dò HPGe một khoảng 26,5 cm với chiều cao, đường kính nguồn và bề dày cửa sổ lần lượt là 6,35 mm, 5,00 mm và 2,77 mm. Hình 3 và 4 mô tả hình học của hệ đầu dò triệt Compton và nguồn bởi các phần mềm Geant 4 và MCNP-CP.

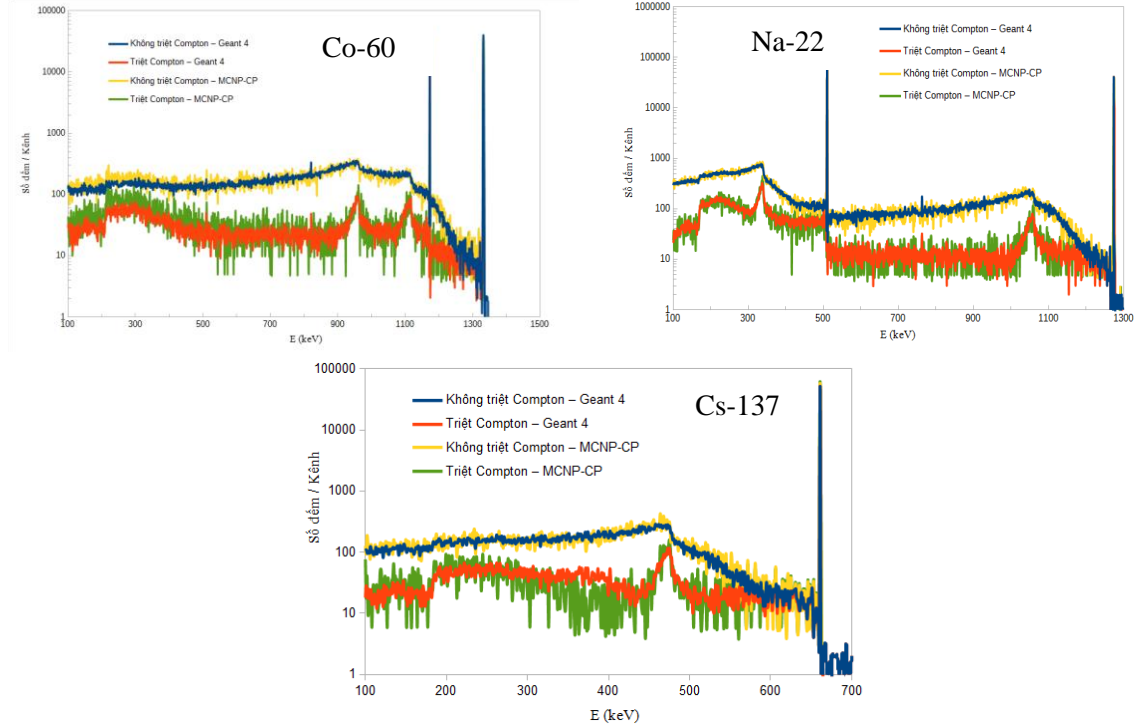


Hình 4: Hình học mô phỏng bằng Geant 4

hệ đo triệt Compton, các nguồn Co-60, Cs-137 và Na-22 được sử dụng với số hạt phát ra từ nguồn là 50 triệu hạt ở cả hai phần mềm. Bên cạnh đó, trong nghiên cứu này độ phân giải năng lượng sẽ không được sử dụng vào quá trình mô phỏng để góp phần đánh giá chính xác việc phân bố số đếm theo năng lượng. Thông qua đó, những vấn đề như đáp ứng phổ, đánh giá ảnh hưởng của cơ chế triệt Compton lên đỉnh năng lượng toàn phần cũng như bờ Compton ở hai phần mềm mô phỏng sẽ được giải quyết trong mục này.

4.1 Đáp ứng phổ gamma đối với hệ đo triệt Compton

Từ kết quả mô phỏng thu được ở hai phần mềm Geant 4 và MCNP-CP, phổ gamma của các nguồn



Hình 4: Phổ gamma lần lượt cho các nguồn Co-60, Na-22 và Cs-137 thu được từ mô phỏng Geant 4 và MCNP-CP theo cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton

Từ Hình 5, có thể thấy ở cả hai phần mềm, phổ gamma của Co-60 có số đếm tập trung ở hai vị trí năng lượng là 1173 keV và 1332 keV, ở phổ gamma của Na-22, số đếm tập trung nhiều tại vị trí năng lượng là 511 keV và 1274 keV và với phổ gamma của Cs-137, số đếm tập trung tại vị trí năng lượng 661 keV. Điều này là hoàn toàn phù hợp với xác suất phát gamma của mỗi nguồn. Như vậy cả hai phần mềm mô phỏng đều thể hiện chính xác dạng phổ của các nguồn.

Co-60, Cs-137 và Na-22 theo chế độ không triệt và triệt Compton được thể hiện trong Hình 5.

4.2 Đánh giá ảnh hưởng của cơ chế triệt Compton lên đỉnh năng lượng toàn phần

Như đã biết, khi bức xạ gamma để lại toàn bộ năng lượng trong đầu dò, bức xạ đó sẽ đóng góp vào số đếm của đỉnh năng lượng toàn phần. Thông qua số đếm này, các thông tin của đầu dò như hiệu suất có thể được xác định. Như vậy việc đánh giá số đếm của đỉnh năng lượng toàn phần ở cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton là cần thiết ở cả hai phần mềm. Tỷ lệ số đếm năng lượng toàn phần của cơ chế không triệt và triệt Compton ở từng mẫu với từng phần mềm được tính toán ở Bảng 1.

Bảng 1: Tỷ lệ số đếm năng lượng toàn phần của cơ chế không triệt và triệt Compton

Nguồn	Co-60		Cs-137	Na-22	
Năng lượng	1173 keV	1332 keV	661 keV	511 keV	1275 keV
MCNP-CP	1,003731	1,000944	1,000000	1,004226	1,000607
Geant 4	1,002863	1,001050	1,000000	1,002170	1,000540

Bảng 1 cho thấy rằng số đếm tại đỉnh năng lượng toàn phần không bị ảnh hưởng bởi cơ chế triệt Compton ở hai phần Geant 4 và MCNP-CP. Qua đó, sự khác biệt số đếm giữa hai đỉnh năng lượng toàn

phần tại cùng một mức năng lượng ở cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton tại hai phần mềm sẽ được khảo sát (Bảng 2).

Bảng 2: Tỷ lệ số đếm năng lượng toàn phần tại cùng một mức năng lượng giữa Geant 4 và MCNP-CP

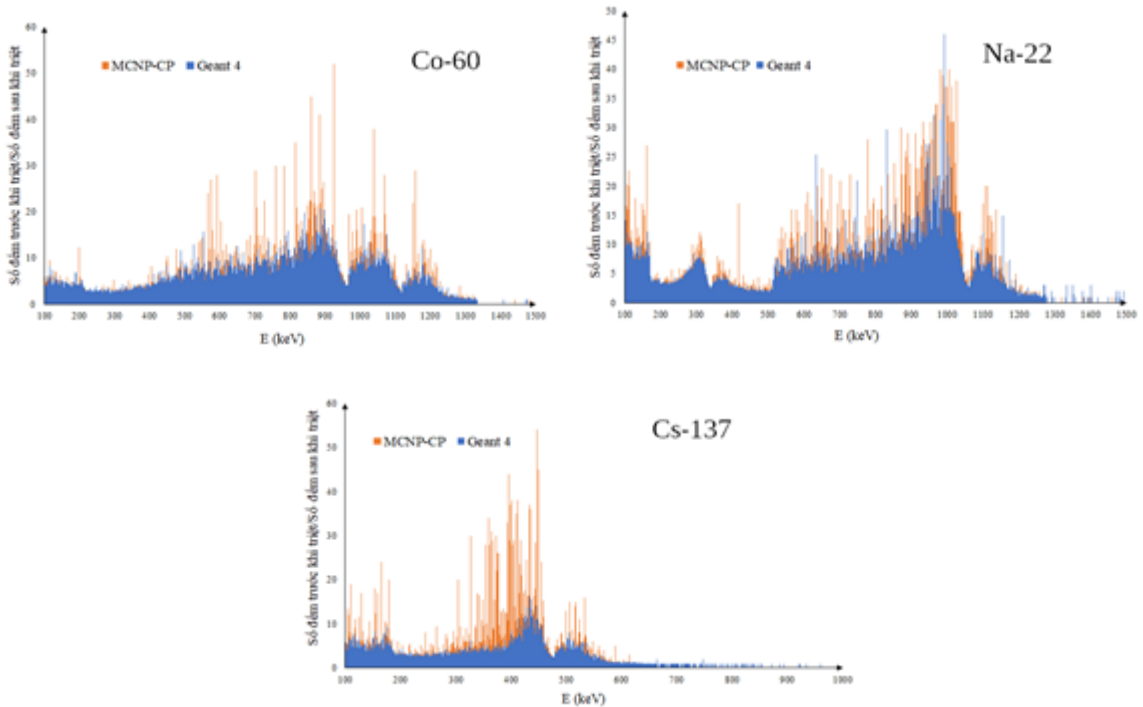
Nguồn	Co-60		Cs-137	Na-22	
Năng lượng	1173 keV	1332 keV	661 keV	551 keV	1275 keV
Triệt Compton	0,916824	0,923537	1,091677	1,009044	1,004309
Không triệt Compton	0,917617	0,923438	1,091677	1,011114	1,004242

Bảng 2 chỉ ra rằng có sự phù hợp tốt kết quả tính toán hiệu suất bằng hai phần mềm Geant 4 và MCNP-CP cho hai cơ chế không triệt và triệt Compton.

4.3 Đánh giá việc giảm bờ Compton phổ gamma giữa hai phần mềm Geant 4 và MCNP-CP

Từ Hình 5, có thể thấy giá trị cực đại của tỷ lệ số đếm ở cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton nằm trong khoảng từ 30 đến 40 ở cả hai phần mềm mô phỏng MCNP-CP và Geant 4. Tuy nhiên, tại vị

trí bờ Compton của từng đồng vị là Co-60, Na-22 và Cs-137, tỷ lệ này nằm trong khoảng từ 2 đến 4 (Bảng 3) và thấp hơn 10 lần so với giá trị cực đại. Từ đó, có thể thấy tại vị trí bờ Compton trên phổ, số đếm giảm không nhiều như những vị trí xung quanh và điều này làm xuất hiện bờ Compton như Hình 4. Nguyên nhân dẫn đến việc bờ Compton bị suy giảm ít là vì bức xạ gamma đến từ nguồn tán xạ không đàn hồi với điện tích, sau đó bay ngược lại với hướng của gamma tới và đi ra khỏi đầu dò mà không đi qua đầu dò BGO. Cho nên, đầu dò BGO không thể ghi nhận được và những gamma này không thể bị loại bỏ.



Hình 5: Biểu diễn tỷ lệ số đếm giữa cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton ở các mức năng lượng ở hai phần mềm MCNP-CP và Geant 4

Bảng 3: Tỷ lệ số đếm giữa cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton tại bờ Compton của mỗi đỉnh năng lượng toàn phần theo 2 phần mềm mô phỏng MCNP-CP và Geant 4

Nguồn	Co-60		Cs-137	Na-22	
Năng lượng tại bờ Compton	963 keV	1118 keV	431 keV	341 keV	1061 keV
MCNP-CP	3,9333	2,1053	2,0000	2,1176	1,6786
Geant 4	4,0986	2,2589	2,5313	2,2586	2,6462

Trong toàn bộ vùng Compton, có thể thấy rằng tỷ lệ số đếm theo các mức năng lượng giữa hai cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton ở cả 3 đồng vị dao động trong khoảng từ 2 đến 40 ở cả hai phần mềm mô phỏng. Hình 5 trình bày kết quả số đếm tại vùng Compton sau khi triệt bị giảm từ 50% đến 97,5% đối với cả hai phần mềm. Tuy nhiên số đếm bị giảm ở vùng Compton của hai phần mềm là khác nhau (Hình 5).

5 KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, cấu hình hệ đo triệt Compton đã được nghiên cứu bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo thông qua việc sử dụng phần mềm Geant 4 và MCNP-CP. Kết quả đã chỉ ra hiệu suất của đỉnh năng lượng toàn phần đối với từng nguồn bức xạ gamma ở cơ chế không triệt và cơ chế triệt Compton, là không có sự khác biệt. Điều này đã chỉ ra rằng quá trình triệt Compton không ảnh hưởng đến hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần. Bên cạnh đó, hiệu suất được tính toán bằng hai phần mềm có sự phù hợp tốt với độ sai biệt dưới 1%. Mặt khác, với chế độ triệt Compton, cũng có thể thấy rằng số đếm tại vùng Compton cũng đã giảm từ 50% đến 97.5% so với số đếm tại vùng này ở chế độ không triệt Compton. Tuy nhiên, tại vị trí bờ Compton thì tỷ lệ suy giảm chỉ khoảng từ 2 đến 4.

Kết quả nghiên cứu này chỉ là bước đánh giá ban đầu về hiệu quả của việc mô phỏng và sự phù hợp của các phần mềm mô phỏng trong việc mô hình hóa hệ đo triệt Compton. Trong tương lai, số liệu thực nghiệm sẽ được đo đạc tại Viện Nghiên cứu hạt nhân sẽ được dùng để tối ưu hóa cấu hình mô phỏng bằng chương trình Geant 4 và MCNP-CP.

LỜI CẢM ƠN

Xin gửi lời cảm ơn đến trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh. Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp trường mã số T2019-07.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Agostinelli, J. Allison, K. Amako, *et al.*, 2003. GEANT4-a simulation toolkit. Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research Section A. 506:250-303.

- Al-Azmi, 2008. Simplified slow anti-coincidence circuit for Compton suppression systems. Applied Radiation and Isotopes Vol 66: 1108-1116
- Anderson and W. C. Cunningham, 2008. Compton suppression spectrometry for analysis of short-lived neutron activation products in foods. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 276: 23-28.
- Berlizov, 2006. MCNP-CP: A Correlated Particle Radiation Source Extension of a General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code. ACS Symposium Series 945:183-194.
- Cho, Y. S. Chung and Y. J. Kim, 2005. Study on prompt gamma-ray spectrometer spectrometer using Compton suppression system. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B 229:499-507.
- Hai, P. D. Khang, N. N. Dien, V. H. Tan and N. D. Hoa, 2013. A simple configuration setup for compton suppression spectroscopy. *arXiv preprint arXiv:1306.4110*.
- Harbottle and J. B. Cumming, 1994. Performance and promise of the Compton suppression well counter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 353:503-507.
- Kapsimalis, S. Landsberger and N. Reguigui, 2009. Measurement of uranium in small quantities in phosphates by use of γ -ray spectrometry and the 1001 keV peak of Pa-234m. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 280:293-298.
- Landsberger and S. R. Biegalski, 2005. Use of coincident and non-coincident gamma-rays in Compton suppression neutron activation analysis. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 263(3):817-821.
- Mauerhofer, U. Tharun, H. O. Denschlag, R. Schmidt and J. V. Kratz, 1996. A Compton suppression spectrometer for neutron activation analysis. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 371:465-471.
- Stover and G. Lamaze, 2005. Compton Suppression for neutron activation analysis applications at the National Institute of Standards and Technology (NIST). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 241:223-227.