

Chuẩn hiệu suất cho đầu dò HPGe bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo

Lê Thị Ngọc Trang¹, Huỳnh Đình Chương¹, Trần Thiện Thanh^{1,2,*}

¹Phòng thí nghiệm Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM

²Bộ môn Vật lý Hạt nhân, Khoa Vật lý-Vật lý kỹ thuật, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM

Liên hệ

Trần Thiện Thanh, Phòng thí nghiệm Kỹ thuật Hạt nhân, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM

Bộ môn Vật lý Hạt nhân, Khoa Vật lý-Vật lý kỹ thuật, Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên, ĐHQG-HCM

Email: ttthan@hcmus.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 21-11-2018
- Ngày chấp nhận: 23-12-2018
- Ngày đăng: 29-03-2019

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v3i1.712>



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Trong bài báo này, phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo đã được sử dụng để chuẩn hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần (gọi tắt là hiệu suất đỉnh) cho một đầu dò HPGe đồng trục loại p. Các nguồn đồng vị phóng xạ chuẩn phát gamma gồm ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ¹⁰⁹Cd, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu, ²⁰⁷Pb, ²⁴¹Am đã được đo tại các vị trí khác nhau trên trục đối xứng của đầu dò với khoảng cách 5, 10, 15, 20, 25 cm. Bên cạnh đó, một mẫu dạng trụ chứa dung dịch chuẩn đa đồng vị phóng xạ cũng được đo tại bề mặt của đầu dò. Đường cong hiệu suất đỉnh thực nghiệm theo năng lượng của photon tới cho các hình học đo được xác định với sự hiệu chỉnh trùng phùng tổng. Một mô hình đầu dò HPGe dựa trên các thông số của nhà sản xuất cung cấp đã được xây dựng để tính toán trực tiếp hiệu suất đỉnh cho các hình học đo khác nhau bằng mô phỏng Monte Carlo với chương trình MCNP6. Tuy nhiên, các giá trị hiệu suất đỉnh mô phỏng này cho thấy có sự sai biệt khá lớn so với thực nghiệm. Sau đó, hiệu suất đỉnh đã được tính toán bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo với đường cong hiệu suất đỉnh cho nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm làm dữ liệu tham khảo. Một sự phù hợp tốt đã đạt được giữa các kết quả tính toán bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo và thực nghiệm. Sự so sánh giữa hiệu suất đỉnh thực nghiệm và tính toán có độ sai biệt tương đối nhỏ hơn 4% trong khoảng năng lượng 53-1770 keV.

Từ khoá: Chuyển hiệu suất, Đầu dò HPGe, Mô phỏng Monte Carlo

GIỚI THIỆU

Hiện nay, hệ phổ kế gamma phòng thấp với đầu dò bán dẫn Ge siêu tinh khiết (HPGe) được sử dụng phổ biến cho việc phân tích hàm lượng của các đồng vị phóng xạ phát gamma trong mẫu môi trường hoặc chất thải phóng xạ. Tuy nhiên, hiệu suất đỉnh năng lượng toàn phần (gọi tắt là hiệu suất đỉnh) của đầu dò ứng với các mức năng lượng quan tâm cho hình học đo mẫu cần phải được biết rõ. Quy trình chuẩn hiệu suất đỉnh bằng thực nghiệm¹ đòi hỏi phải có mẫu chuẩn chứa các đồng vị phóng xạ đã biết hàm lượng với kích thước hình học, mật độ khối lượng và thành phần hóa học giống với mẫu đo. Việc chuẩn bị các mẫu chuẩn như vậy gây tốn kém về thời gian, tiền bạc và phát sinh chất thải phóng xạ. Do đó, quy trình chuẩn hiệu suất thực nghiệm là khó để thực hiện đối với nhiều phòng thí nghiệm.

Quy trình chuẩn hiệu suất ứng dụng mô phỏng Monte Carlo là một giải pháp đơn giản và hiệu quả để khắc phục khó khăn này. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo cho phép tính toán hiệu suất đỉnh ứng với các mức năng lượng quan tâm, khi biết các đặc trưng chi tiết của đầu dò, mẫu đo và sự bố trí giữa chúng. Tuy nhiên, việc đảm bảo độ chính xác của kết quả tính toán hiệu suất đỉnh bằng mô phỏng Monte Carlo là

một yêu cầu cần thiết. Nhiều nghiên cứu²⁻¹¹ đã chỉ ra rằng các thông số của đầu dò được cung cấp bởi nhà sản xuất là không đủ chính xác, mà nó gây ra sự sai biệt khá lớn giữa các giá trị hiệu suất đỉnh thực nghiệm và mô phỏng Monte Carlo dựa trên các thông số này. Do đó, có hai phương thức đã được đề xuất để thực hiện việc tối ưu hóa mô hình của đầu dò HPGe quan tâm. Một là, thay đổi thông số bề dày lớp chết của đầu dò^{8,12} để đạt được sự phù hợp tốt giữa hiệu suất đỉnh thực nghiệm và mô phỏng Monte Carlo cho một vài hình học đo. Hai là, ứng dụng các kỹ thuật chụp ảnh tia X^{2,3,5,13} và quét gamma^{4,14,15} để xác định giá trị thực của các thông số đặc trưng của đầu dò. Thực tế cho thấy các quy trình tối ưu hóa mô hình đầu dò như vậy khá phức tạp và tốn nhiều thời gian. Bên cạnh đó, việc ứng dụng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo¹⁶⁻¹⁸ cũng là một cách thức để đạt được kết quả tính toán hiệu suất đỉnh tin cậy. Một vài nghiên cứu^{16,17} đã báo cáo rằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo là đơn giản hơn và cho kết quả tính hiệu suất đỉnh chính xác hơn so với phương pháp tối ưu hóa mô hình đầu dò.

Trong bài báo này, hiệu suất đỉnh trong khoảng năng lượng 53-1770 keV của đầu dò HPGe đồng trục loại p cho các phép đo nguồn điểm nằm tại các vị trí khác

Trích dẫn bài báo này: Thị Ngọc Trang, L, Đình Chương H, Thiện Thanh T. **Chuẩn hiệu suất cho đầu dò HPGe bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo.** *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.*; 3(1):9-17.

nhau trên trục đối xứng của đầu dò và phép đo mẫu dạng trụ nằm trên bề mặt đầu dò được xác định bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo. Đường cong hiệu suất đỉnh thực nghiệm cho phép đo nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm được sử dụng làm dữ liệu tham khảo để chuyển hiệu suất cho các hình học đo khác. Các mô phỏng Monte Carlo được thực hiện bằng chương trình MCNP6 với mô hình đầu dò xây dựng dựa trên các thông số nhà sản xuất cung cấp. Các kết quả tính toán được so sánh với thực nghiệm để đánh giá độ chính xác của phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo.

VẬT LIỆU-PHƯƠNG PHÁP

Điều kiện thực nghiệm

Một hệ phổ kế gamma phòng thấp với đầu dò HPGe GC3520 do hãng Canberra sản xuất được khảo sát trong nghiên cứu này. Trong đó, đầu dò HPGe GC3520 là loại đầu dò đồng trục loại p, với hiệu suất tương đối danh định là 35% và độ rộng đỉnh phổ tại một nửa chiều cao (FWHM) là 2,0 keV tại 1332 keV. Các thông số hình học của đầu dò theo nhà sản xuất cung cấp được trình bày trong **Bảng 1**. Những giá trị này được sử dụng để mô hình hóa đầu dò trong quá trình mô phỏng. Ngõ ra tiền khuếch đại của đầu dò được kết nối với bộ xử lý tín hiệu số Lynx, mà nó có chức năng khuếch đại tín hiệu và phân tích đa kênh. Sự hoạt động của hệ phổ kế và thu nhận phổ gamma được quản lý bằng phần mềm Genie 2000 phiên bản 3.3. Hệ số khuếch đại tín hiệu được điều chỉnh để ghi nhận được bức xạ gamma có năng lượng lên đến 2946 keV trong phổ tương ứng với 32768 kênh.

Đầu dò HPGe được đặt bên trong một buồng chì cấu hình 747 do hãng Canberra sản xuất để làm giảm ảnh hưởng của phóng xạ môi trường đến phổ gamma ghi nhận. Buồng chì này có dạng khối trụ với kích thước bên ngoài là đường kính 508 mm và chiều cao 635 mm; kích thước của không gian bên trong là đường kính 279 mm và chiều cao 406 mm. Vỏ của buồng chì có cấu tạo từ trong ra ngoài gồm: lớp đồng dày 1,6 mm, lớp thiếc dày 1 mm, lớp chì dày 100 mm và lớp thép không gỉ dày 9,5 mm. Đáy buồng chì có một lỗ rỗng với đường kính 121 mm để đặt bộ làm lạnh. Tinh thể của đầu dò HPGe được làm lạnh bằng nitơ lỏng ở nhiệt độ 77K.

Các nguồn đồng vị phóng xạ chuẩn phát gamma (thuộc loại D sản xuất bởi hãng Eckert&Ziegler¹⁹) gồm ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ¹⁰⁹Cd, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu, ²⁰⁷Bi, ²⁴¹Am được sử dụng trong nghiên cứu để cung cấp bức xạ gamma có năng lượng trong khoảng 53–1770 keV. Các nguồn này có dạng đĩa với đường kính ngoài 25,4 mm và bề dày 6,35

mm. Lớp vỏ nguồn được làm bằng vật liệu plastic có độ cứng cao. Các hợp chất chứa đồng vị phóng xạ được phủ lên bề mặt của hố ở giữa vỏ nguồn có đường kính 5 mm, nằm cách bề mặt 2,77 mm và được đậy kín bằng nút epoxy. Để thực hiện các phép đo thực nghiệm, nguồn phóng xạ được đặt trên một giá đỡ làm bằng vật liệu mica, sao cho vị trí của nguồn nằm trên trục đối xứng của đầu dò và khoảng cách từ nguồn đến cửa sổ đầu dò lần lượt là 5, 10, 15, 20 và 25 cm. Đồng thời, một mẫu chứa nhiều đồng vị phóng xạ gồm ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁸⁵Sr, ⁸⁸Y, ¹⁰⁹Cd, ¹¹³Sn, ^{123m}Te, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²⁴¹Am được tạo ra bằng cách pha loãng 0,25 ml của dung dịch phóng xạ chuẩn (loại 7503 sản xuất bởi hãng Eckert&Ziegler²⁰) trong 500 ml dung dịch axit HCl 2M. Lượng dung dịch (với mật độ khối lượng 1,03 g/cm³) sau khi pha loãng này được đựng bên trong một hộp dạng trụ với đường kính ngoài của hộp 67 mm, bề dày thành hộp 0,5 mm và đáy hộp 3,0 mm, sao cho chiều cao của dung dịch lấp đầy trong hộp là 143,5 mm để tạo thành mẫu tham khảo. Mẫu này cung cấp các bức xạ gamma có năng lượng trong khoảng 46–1836 keV và được đo trên bề mặt của sổ đầu dò.

Thời gian thực hiện các phép đo được điều chỉnh để số đếm thu nhận tại các đỉnh quan tâm đạt được giá trị tối thiểu 3×10^4 . Thời gian chết cho tất cả các phép đo là nhỏ hơn 2%. Chương trình Genie tự động xác định “real-time” để hiệu chỉnh cho sự mất tín hiệu trong quá trình đo bởi thời gian chết. Để phân tích dữ liệu, trước tiên phổ đạt được từ các phép đo nguồn phóng xạ được trừ cho phổ phòng, sau đó các phổ này được xử lý bằng chương trình Colegram để thu được số đếm của các đỉnh quan tâm. Hiệu suất đỉnh thực nghiệm và sai số tương đối được xác định bởi các công thức như sau:

$$\varepsilon(E) = \frac{N(E)}{A \cdot I_{\gamma}(E) \cdot t} \cdot \prod C_i \quad (1)$$

$$\delta_{\varepsilon} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_N^2 + \delta_I^2 + \delta_C^2} \quad (2)$$

Trong đó: $\varepsilon(E)$ là hiệu suất đỉnh của đầu dò ứng với năng lượng E; N(E) là số đếm tại đỉnh ứng với mức năng lượng E trên phổ gamma đã trừ phòng; A (Bq) là hoạt độ của nguồn phóng xạ tại thời điểm tham khảo; $I_{\gamma}(E)$ là xác suất phát bức xạ gamma có năng lượng E của đồng vị phóng xạ; t (giây) là thời gian thực hiện phép đo; $\prod C_i = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$ là tích của các hệ số hiệu chỉnh cho phép đo với C_1 là hệ số hiệu chỉnh cho sự phân rã của nguồn đồng vị phóng xạ từ thời điểm tham khảo đến thời điểm đo, C_2 là hệ số hiệu chỉnh cho sự phân rã của nguồn đồng vị phóng xạ trong thời gian đo, C_3 là hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng cho

Bảng 1: Thông số hình học của đầu dò HPGe GC3520 theo nhà sản xuất cung cấp

Thông số hình học	Giá trị (mm)
Đường kính tinh thể Ge	62,2
Chiều dài tinh thể Ge	50,1
Đường kính hố	7,5
Chiều sâu hố	23,0
Bề dày lớp chết bên ngoài	0,46
Bề dày lớp chết bên trong	0,0003
Bề dày cửa sổ Al	1,5
Bề dày cửa vỏ Al	1,5
Đường kính ngoài vỏ Al	75,0
Khoảng cách từ cửa sổ đến bề mặt tinh thể	5,0

phép đo. δ_E , δ_A , δ_N , δ_I , δ_C lần lượt là sai số tương đối của hiệu suất đỉnh, hoạt độ, số đếm tại đỉnh, xác suất phát gamma và các hệ số hiệu chỉnh.

Ảnh hưởng của hiệu ứng trùng phùng tổng suy giảm khi khoảng cách từ nguồn phóng xạ đến đầu dò tăng lên. Đối với phép đo nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm, hiệu ứng trùng phùng tổng được xem như không đáng kể¹³. Do đó, phép đo này được sử dụng làm dữ liệu tham khảo cho việc chuyển hiệu suất. Bên cạnh đó, hệ số hiệu chỉnh trùng phùng tổng cho phép đo nguồn điểm tại các khoảng cách còn lại và phép đo mẫu trụ được tính toán bằng chương trình ETNA²¹.

Mô phỏng Monte Carlo

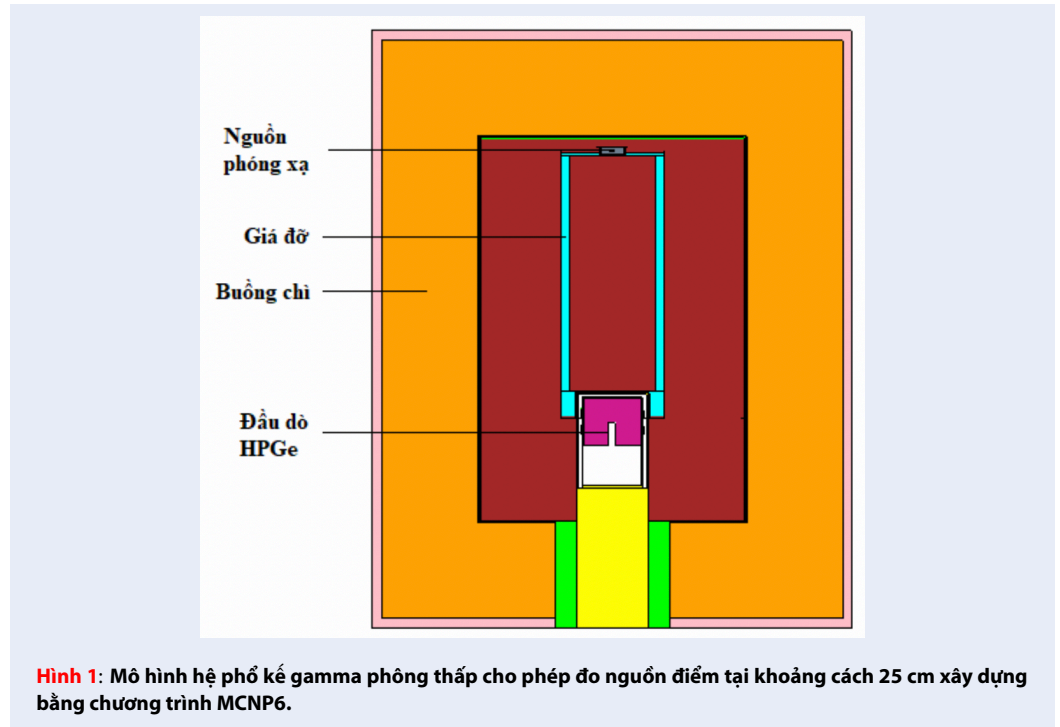
Chương trình MCNP6 được sử dụng để thực hiện các mô phỏng Monte Carlo cho sự vận chuyển của các hạt bức xạ bên trong mô hình hệ phổ kế gamma phòng thấp. **Hình 1** cho thấy sơ đồ của mô hình hệ phổ kế gamma phòng thấp cho phép đo nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm. Mô hình này gồm có các thành phần như: đầu dò HPGe, buồng chì, nguồn phóng xạ và giá đỡ. Các thông số hình học của từng thành phần như đã mô tả trong mục điều kiện thực nghiệm được sử dụng để xây dựng mô hình.

Với mục tiêu của nghiên cứu này, chúng tôi chỉ quan tâm đến các quá trình tương tác của bức xạ gamma/tia X với các vật liệu và sự ghi nhận của chúng bên trong đầu dò. Do đó, các nguồn phóng xạ được thiết lập với đặc trưng là chỉ phát bức xạ photon. Năng lượng của các bức xạ photon phát ra từ đồng vị phóng xạ quan tâm và xác suất phát tương ứng được tham khảo từ cơ sở dữ liệu của phòng thí nghiệm quốc gia Henri Becquerel – Pháp²². Các bức xạ photon được lấy mẫu ngẫu nhiên để chọn vị trí phát bên trong nguồn và hướng phát với xác suất đồng nhất. Đồng thời, các mô phỏng Monte Carlo được thực hiện với MODE P. Khi đó, các quá trình tương tác của bức xạ photon như quang điện, tán xạ Compton (tán xạ không kết

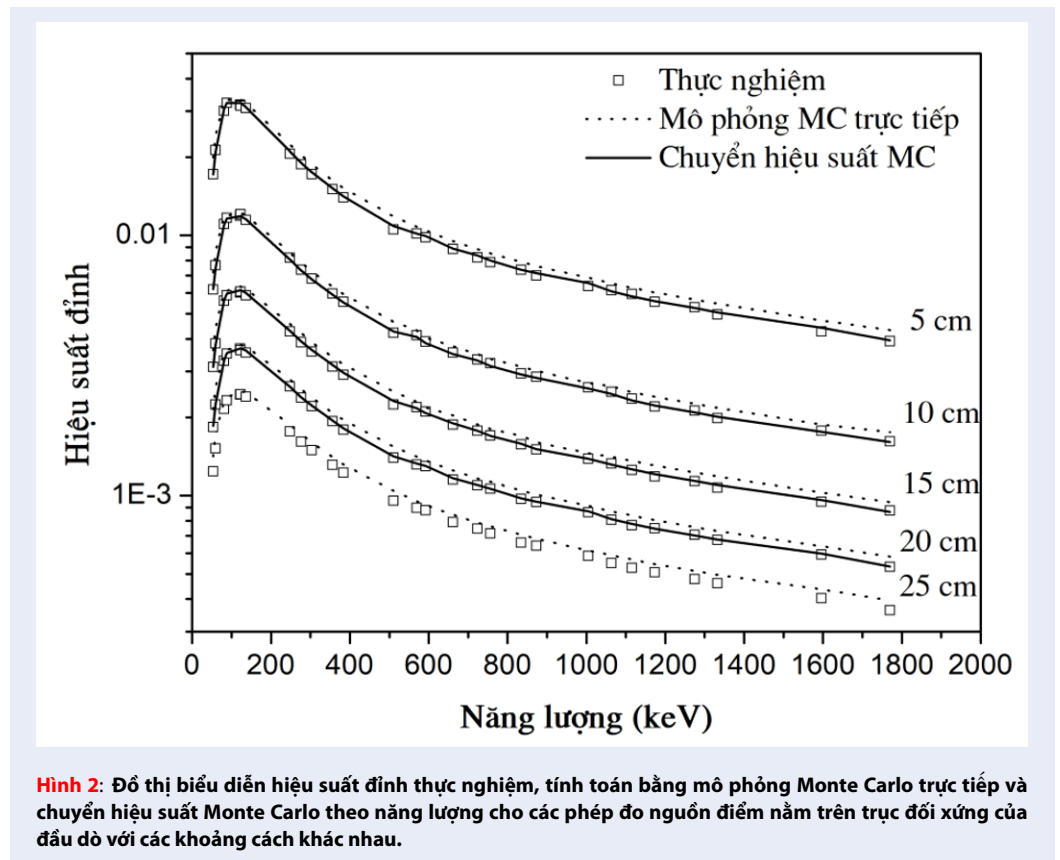
hợp), tán xạ Thomson (tán xạ kết hợp), tạo cặp và các quá trình phát huỳnh quang xảy ra theo sau quá trình quang điện đều được mô phỏng. Tuy nhiên, quá trình vận chuyển của electron được tạo ra do tương tác của photon với vật liệu không được mô phỏng. Thay vào đó, các bức xạ hãm tạo ra từ electron được mô phỏng theo mô hình xấp xỉ “Thick Target Bremsstrahlung”. Mô hình này giả thiết rằng electron được tạo ra di chuyển cùng hướng với photon tới và phát bức xạ hãm ngay tức thời.

Đánh giá F8 của chương trình MCNP6 được ứng dụng cho quá trình mô phỏng Monte Carlo để thu được kết quả phân bố năng lượng bỏ lại bên trong tinh thể đầu dò trên mỗi photon tới. Với đánh giá này, các photon khi tương tác với tinh thể đầu dò sẽ được chương trình ghi nhận vào các khe năng lượng tương ứng với năng lượng mà chúng để lại. Để có sự tương đồng với phổ thực nghiệm, các khe năng lượng trong mô phỏng được phân chia tương ứng với các kênh trong hệ phổ kế gamma thực tế. Năng lượng cực tiểu, cực đại và số kênh tương ứng của chúng dùng cho việc phân chia khe năng lượng của đánh giá F8 trong mô phỏng được xác định dựa trên đường chuẩn năng lượng theo số kênh đạt được từ thực nghiệm. Cụ thể, có 32765 khe được chia đều trong khoảng năng lượng từ 0,0765–2964,4 keV.

Ngoài ra, chương trình MCNP6 không mô phỏng các quá trình thu thập điện tích bên trong đầu dò và nhiễu điện tử, nên các tín hiệu ghi nhận không có sự thăng giáng thống kê. Do đó, các đỉnh trong phổ mô phỏng chỉ là các vạch mà không có dạng phân bố Gauss như trong phổ thực nghiệm. Để đạt được sự phù hợp giữa phổ mô phỏng và thực nghiệm, thẻ lệnh “FT8 GEB a b c” được sử dụng để tạo ra sự giãn nở dạng Gauss cho phổ mô phỏng. Trong đó a, b, c là các hệ số của phương trình đường chuẩn FWHM (MeV) theo năng lượng E (MeV) được xác định bằng cách làm khớp dữ



Hình 1: Mô hình hệ phổ kế gamma phòng thấp cho phép đo nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm xây dựng bằng chương trình MCNP6.



Hình 2: Đồ thị biểu diễn hiệu suất đỉnh thực nghiệm, tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo trực tiếp và chuyển hiệu suất Monte Carlo theo năng lượng cho các phép đo nguồn điểm nằm trên trục đối xứng của đầu dò với các khoảng cách khác nhau.

Bảng 2: Độ sai biệt tương đối giữa hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo trực tiếp và thực nghiệm cho các phép đo nguồn điểm nằm trên trục đối xứng của đầu dò với các khoảng cách khác nhau

Năng lượng (keV)	Độ sai biệt tương đối (%) ứng với các khoảng cách đo khác nhau					
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	Trung bình
53,16	15,88	16,32	16,03	17,14	14,02	15,88
59,54	13,77	13,29	14,65	16,23	13,69	14,32
81,00	10,07	7,60	8,84	8,66	6,92	8,42
88,03	2,53	1,82	3,88	3,36	2,53	2,83
122,06	4,82	2,90	5,53	3,49	3,02	3,95
247,93	8,61	4,85	6,94	6,09	5,98	6,49
356,01	7,95	6,21	8,74	7,92	7,09	7,58
591,76	6,34	3,55	3,84	5,40	4,65	4,76
661,66	7,40	5,97	8,54	8,30	7,10	7,46
723,30	7,87	4,88	5,92	6,13	5,60	6,08
834,84	7,03	6,21	7,97	7,69	7,28	7,24
1063,66	6,03	5,09	6,26	7,92	7,20	6,50
1115,54	5,53	6,19	8,56	8,99	7,71	7,40
1173,23	8,85	9,02	10,26	7,73	7,71	8,71
1274,54	7,17	6,40	8,22	7,24	7,64	7,33
1332,49	10,01	9,39	10,62	8,30	7,78	9,22
1596,48	10,20	5,60	8,44	7,82	8,25	8,06
1770,23	10,16	8,54	7,72	9,65	9,19	9,05

Chú thích: Độ sai biệt tương đối (RD) được tính như sau $RD(\%) = \frac{|\epsilon_m - \epsilon_{tr}|}{\epsilon_m} \cdot 100\%$, với ϵ_m và ϵ_{tr} lần lượt là hiệu suất đỉnh thực nghiệm và tính toán.

liệu thực nghiệm của phép đo nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm như sau:

$$FWHM = 0,000928 + 0,000638 \cdot \sqrt{E + 0,442260 \cdot E^2} \quad (3)$$

Số hạt chạy mô phỏng cho tất cả các hình học đo là 2×10^9 để đạt được sai số thống kê tương đối nhỏ hơn 0,05% cho xác suất ghi nhận tại khe tương ứng với đỉnh năng lượng toàn phần quan tâm.

Phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo

Trong phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo, hiệu suất đỉnh của hình học đo quan tâm và sai số tương đối được tính toán bằng các công thức sau:

$$\epsilon(E) = \epsilon^{tk}(E) \frac{\epsilon_{mp}(E)}{\epsilon_{mp}^{tk}(E)} \quad (4)$$

$$\delta_\epsilon = 100\% \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\epsilon^{tk}}^2}{\epsilon^2} + \delta_{\epsilon_{mp}}^2 + \delta_{\epsilon_{mp}^{tk}}^2} \quad (5)$$

Trong đó: ϵ là hiệu suất đỉnh của hình học đo quan tâm; ϵ^{tk} là hiệu suất đỉnh thực nghiệm của hình học tham khảo; ϵ_{mp} và ϵ_{mp}^{tk} lần lượt là hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo của hình học đo và hình học tham khảo. δ_ϵ là sai số tương đối của hiệu suất đỉnh cho hình học đo; $\delta_{\epsilon^{tk}}$ là sai số tương đối của hiệu suất đỉnh thực nghiệm cho hình học tham khảo; $\delta_{\epsilon_{mp}}$, $\delta_{\epsilon_{mp}^{tk}}$ lần lượt là sai số thống kê tương đối của hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo của hình học đo và hình học tham khảo.

Tỉ số giữa hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo của hình học đo và hình học tham khảo được gọi là hệ số chuyển hiệu suất. Giá trị của hệ số chuyển hiệu suất được cho rằng chỉ phụ thuộc vào năng lượng của bức xạ gamma tới và hình học đo (tức là vị trí tương đối giữa nguồn-đầu dò, kích thước, mật độ và thành phần hóa học của nguồn, các vật liệu che chắn giữa nguồn và đầu dò) mà không phụ thuộc vào hình học của đầu dò^{18,23}. Do đó, mô hình đầu dò với các thông số hình học do nhà sản xuất cung cấp có thể

Bảng 3: Độ sai biệt tương đối giữa hiệu suất đỉnh tính toán bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo và thực nghiệm cho các phép đo nguồn điểm nằm trên trục đối xứng của đầu dò với các khoảng cách khác nhau

Năng lượng (keV)	Độ sai biệt tương đối (%) ứng với các khoảng cách đo khác nhau				
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	Trung bình
53,16	0,11	0,27	0,03	0,98	0,35
59,54	1,52	1,94	0,76	0,60	1,21
81,00	1,76	0,52	0,62	0,46	0,84
88,03	0,00	0,70	1,31	0,80	0,70
122,06	1,44	0,42	2,13	0,15	1,03
247,93	2,15	1,38	0,58	0,22	1,09
356,01	0,80	0,83	1,54	0,77	0,98
591,76	1,27	1,38	1,11	0,38	1,04
661,66	0,23	1,10	1,30	1,08	0,93
723,30	1,95	0,88	0,11	0,31	0,81
834,84	0,09	0,85	0,79	0,53	0,56
1063,66	1,09	1,97	0,88	0,67	1,15
1115,54	2,11	1,50	0,70	1,09	1,35
1173,23	0,79	0,96	2,10	0,24	1,02
1274,54	0,56	1,28	0,41	0,50	0,69
1332,49	1,81	1,24	2,37	0,22	1,41
1596,48	3,30	1,01	1,65	1,07	1,76
1770,23	0,90	0,59	1,34	0,42	0,81

được sử dụng mà không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả tính toán.

Để ứng dụng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo, chúng tôi tiến hành phép đo thực nghiệm cho các nguồn điểm tại khoảng cách 25 cm và chọn đây là hình học tham khảo. Từ đó, hiệu suất đỉnh tham khảo (ϵ^{tk}) được xác định cho các mức năng lượng trong khoảng 53-1770 keV. Đồng thời, các mô phỏng Monte Carlo cũng được thực hiện để tính toán hiệu suất đỉnh của các mức năng lượng tương ứng với thực nghiệm cho hình học đo (ϵ_{mp}) và hình học tham khảo (ϵ_{mp}^{tk}). Hiệu suất đỉnh và sai số tương đối ứng với từng mức năng lượng cho hình học đo được tính toán theo công thức Equation (4) và Equation (5). Khi đó, ta thu được một đường cong hiệu suất đỉnh của hình học đo quan tâm bằng cách làm khớp các giá trị của hiệu suất đỉnh tính toán theo năng lượng.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 2 cho thấy sự so sánh giữa hiệu suất đỉnh thực nghiệm với hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng

Monte Carlo trực tiếp và phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo cho các phép đo nguồn điểm nằm trên trục đối xứng của đầu dò tại các khoảng cách 5, 10, 15, 20, 25 cm. Sai số tương đối của hiệu suất đỉnh thực nghiệm trong các phép đo này là khoảng 3-4%, mà nó chủ yếu đến từ sai số của hoạt độ nguồn phóng xạ. Có thể quan sát thấy rằng, hiệu suất đỉnh tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo trực tiếp lớn hơn so với thực nghiệm trong toàn bộ khoảng năng lượng quan tâm. Đặc biệt, độ sai biệt tương đối giữa các giá trị này là khá lớn ứng với các mức năng lượng thấp (53-81 keV) và cao (1173-1770 keV), như được trình bày trong **Bảng 2**. Các kết quả tương tự cũng đạt được cho phép đo mẫu trụ trên bề mặt đầu dò, như được trình bày trong các cột 2-5 của **Bảng 3**. Nguyên nhân của kết quả này có thể là do bề dày thực tế của lớp chết Li bên ngoài tinh thể lớn hơn so với giá trị do nhà sản xuất cung cấp được sử dụng trong mô phỏng Monte Carlo. Trong đó, lớp chết ở mặt trước tinh thể gây ra hiệu ứng che chắn và suy giảm thể tích vùng hoạt, mà sự gia tăng bề dày của nó dẫn đến sự suy giảm của hiệu

Bảng 4: Hiệu suất đỉnh thực nghiệm, tính toán bằng mô phỏng Monte Carlo trực tiếp và chuyển hiệu suất Monte Carlo cho phép đo mẫu trụ nằm trên bề mặt đầu dò

Năng lượng (keV)	Hiệu suất đỉnh thực nghiệm ($\times 10^{-2}$)	Sai số (%)	Mô phỏng Monte Carlo		Chuyển hiệu suất Monte Carlo	
			Hiệu suất đỉnh ($\times 10^{-2}$)	RD (%)	Hiệu suất đỉnh ($\times 10^{-2}$)	RD (%)
46,54	0,52	4,25	0,58	11,00	0,53	2,86
59,54	1,10	3,07	1,24	12,36	1,07	2,58
88,03	1,95	3,20	2,02	3,45	1,91	2,53
122,06	2,19	3,13	2,20	0,56	2,15	1,92
158,97	2,03	3,05	2,10	3,06	2,03	0,19
391,70	1,10	3,04	1,17	6,27	1,09	1,06
514,01	0,88	3,08	0,96	8,33	0,89	0,54
661,66	0,76	3,12	0,80	5,65	0,75	1,71
898,04	0,63	3,04	0,65	4,46	0,61	1,99
1173,23	0,51	3,02	0,55	7,89	0,52	1,54
1332,49	0,46	3,02	0,50	8,74	0,47	1,98
1836,07	0,37	3,04	0,40	7,22	0,36	3,84

suất đỉnh đặc biệt với các mức năng lượng thấp. Đồng thời, lớp chết ở mặt bên tinh thể gây ra hiệu ứng suy giảm thể tích vùng hoạt, mà sự gia tăng bề dày của nó dẫn đến sự suy giảm của hiệu suất đỉnh đặc biệt với các mức năng lượng cao.

Một sự phù hợp tốt giữa hiệu suất đỉnh tính toán và thực nghiệm đã đạt được sau khi ứng dụng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo. Độ sai biệt tương đối giữa hiệu suất đỉnh tính toán bằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo và thực nghiệm là nhỏ hơn 4% cho các phép đo nguồn điểm ở khoảng cách khác nhau (được trình bày trong **Bảng 3**) và phép đo mẫu trụ trên bề mặt đầu dò (được trình bày trong cột 7 của **Bảng 4**). Như vậy, việc ứng dụng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo đưa đến kết quả tính toán hiệu suất đỉnh chính xác và tin cậy kể cả khi sử dụng các thông số hình học đầu dò do nhà sản xuất cung cấp.

KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã ứng dụng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo để chuẩn hiệu suất đỉnh cho một đầu dò HPGe đồng trục loại p. Kết quả cho thấy có sự sai biệt khá lớn (lên đến 16%) giữa hiệu suất đỉnh được tính toán trực tiếp bằng mô phỏng Monte Carlo sử dụng các thông số hình học của đầu dò do nhà sản xuất cung cấp và thực nghiệm. Tuy nhiên, sau khi ứng dụng phương pháp chuyển hiệu

suất Monte Carlo đã đạt được sự phù hợp tốt giữa hiệu suất đỉnh tính toán và thực nghiệm, với độ sai biệt tương đối là nhỏ hơn 4% cho tất cả các trường hợp. Điều này chứng minh rằng phương pháp chuyển hiệu suất Monte Carlo là một công cụ đơn giản và tin cậy để ứng dụng trong các quy trình phân tích hàm lượng phóng xạ ở các phòng thí nghiệm.

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

MCNP6: Chương trình Monte-Carlo mô phỏng vận chuyển hạt phiên bản 6

HPGe: Germanium siêu tinh khiết

ETNA: Chương trình chuyển đổi hiệu suất ứng dụng trong đo lường đồng vị phóng xạ.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả cam kết không mâu thuẫn quyền lợi và nghĩa vụ của các thành viên.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Lê Thị Ngọc Trang tiến hành các thực nghiệm và mô phỏng phân tích và xử lý số liệu.

Huỳnh Đình Chương thiết kế chế tạo các thiết bị thực nghiệm và viết các tập tin mô phỏng.

Trần Thiện Thanh đánh giá số liệu, chỉnh sửa bài báo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số C2018-18-04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Vukanac I, Djurasević M, Kandić A, Novković D, Nadjerdj L, Milosević Z. Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency curve. *Appl Radiat Isot.* 2008;66(6-7):792–5. 18343144. Available from: [10.1016/j.apradiso.2008.02.039](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.02.039).
- Boson J, Agren G, Johansson G. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods A.* 2008;587(2-3):304–14. Available from: [10.1016/j.nima.2008.01.062](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.01.062).
- Budjás D, Heisel M, Maneschg W, Simgen H. Optimisation of the MC-model of a p-type Ge-spectrometer for the purpose of efficiency determination. *Appl Radiat Isot.* 2009;67(5):706–10. 19237288. Available from: [10.1016/j.apradiso.2009.01.015](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.01.015).
- Cabal FP, Lopez-Pino N, Bernal-Castillo JL, Martinez-Palenzuela Y, Aguilar-Mena J, D'Alessandro K, et al. Monte Carlo based geometrical model for efficiency calculation of an n-type HPGe detector. *Appl Radiat Isot.* 2010;68(12):2403–8. 20643556. Available from: [10.1016/j.apradiso.2010.06.018](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.06.018).
- Chuong HD, Thanh TT, Trang TN, Nguyen VH, Tao CV. Estimating thickness of the inner dead-layer of n-type HPGe detector. *Appl Radiat Isot.* 2016;116:174–7. 27552123. Available from: [10.1016/j.apradiso.2016.08.010](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.08.010).
- Gasparro J, Hult M, Johnston PN, Tagziria H. Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges. *Nuclear Instruments and Methods A.* 2008;594(2):196–201. Available from: [10.1016/j.nima.2008.06.022](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.022).
- Hurtado S, García-León M, García-Tenorio R. Monte Carlo simulation of the response of a germanium detector for low-level spectrometry measurements using GEANT4. *Appl Radiat Isot.* 2004;61(2-3):139–43. 15177335. Available from: [10.1016/j.apradiso.2004.03.035](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.03.035).
- Khan W, Zhang Q, He C, Saleh M. Monte Carlo simulation of the full energy peak efficiency of an HPGe detector. *Appl Radiat Isot.* 2018;131:67–70. 29173810. Available from: [10.1016/j.apradiso.2017.11.018](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.018).
- Peyres V, Garcia-Torano E. Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by a detailed Monte Carlo simulation. *Nuclear Instruments and Methods A.* 2007;580(1):296–8. Available from: [10.1016/j.nima.2007.05.160](https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.160).
- Rodenas J, Martinavarró A, Rius V. Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration. *Nuclear Instruments and Methods A.* 2000;450(1):88–97. Available from: [10.1016/S0168-9002\(00\)00253-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00253-9).
- Tzika F, Kontogeorgakos D, Vasilopoulou T, Stamatelatos IE. Application of the Monte Carlo method for the calibration of an in situ gamma spectrometer. *Appl Radiat Isot.* 2010;68(7-8):1441–4. 19945289. Available from: [10.1016/j.apradiso.2009.11.023](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.11.023).
- Huy NQ. The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for coaxial HPGe p-type detector. *Nucl Instrum Methods Phys Res A.* 2010;621(1-3):390–4. Available from: [10.1016/j.nima.2010.05.007](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.007).
- Dryak P, Kovar P. Experimental and MC determination of HPGe detector efficiency in the 40-2754 keV energy range for measuring point source geometry with the source-to-detector distance of 25 cm. *Appl Radiat Isot.* 2006;64(10-11):1346–9. 16564693. Available from: [10.1016/j.apradiso.2006.02.083](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.02.083).
- Haj-Heidari MT, Safari MJ, Afarideh H, Rouhi H. Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes. *Radiat Meas.* 2016;88:1–6. Available from: [10.1016/j.radmeas.2016.02.035](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.02.035).
- Maidana NL, Vanin VR, García-Alvarez JA, Hermida-López M, Brualla L. Experimental HPGe coaxial detector response and efficiency compared to Monte Carlo simulations. *Appl Radiat Isot.* 2016;108:64–74. 26704703. Available from: [10.1016/j.apradiso.2015.12.001](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.12.001).
- Liu L, Ma J, Didier F, Loic C, Zhang B. Monte Carlo efficiency transfer method for full energy peak efficiency calibration of three type HPGe detectors: A coaxial N-type, a coaxial P-type, and four BEGe detectors. *Nuclear Instruments and Methods A.* 2006;564(1):608–13. Available from: [10.1016/j.nima.2006.03.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.03.013).
- Vargas MJ, Díaz NC, Sánchez DP. Efficiency transfer in the calibration of a coaxial p-type HPGe detector using the Monte Carlo method. *Appl Radiat Isot.* 2003;58(6):707–12. 12798381. Available from: [10.1016/S0969-8043\(03\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00091-5).
- Moreira-Gómez Y, Cartas-Aguila HA, Alonso-Hernández CM, Bernal-Castillo JL, Guillén-Arruebarrena A. Application of the Monte Carlo efficiency transfer method to an HPGe detector with the purpose of environmental samples measurement. *Appl Radiat Isot.* 2015;97:59–62. 25544663. Available from: [10.1016/j.apradiso.2014.12.013](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.12.013).
- Eckert&Ziegler. Catalogue of reference and calibration sources; 2018. Available from: [https://www.ezag.com/fileadmin/user_upload/isotopes/isotopes/Isotrak/isotrak-product_literature/EZIPL/EZIP_catalogue_reference_and_calibration_sources.pdf\({\char"0111\relax}\char"0103\relax\ngnh{\char"1EA1\relax\char"0302\relax}p11/08/2018\)](https://www.ezag.com/fileadmin/user_upload/isotopes/isotopes/Isotrak/isotrak-product_literature/EZIPL/EZIP_catalogue_reference_and_calibration_sources.pdf({\char).
- Eckert&Ziegler. Mixed nuclide solutions; 2018. Available from: [http://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/standardized_solutions/calibrated_solutions/mixed_nuclide_solutions\({\char"0111\relax}\char"0103\relax\ngnh{\char"1EA1\relax\char"0302\relax}p11/08/2018\)](http://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/standardized_solutions/calibrated_solutions/mixed_nuclide_solutions({\char).
- Piton F, Lépy MC, Be MM, Plagnard J. Efficiency transfer and coincidence summing corrections for gamma-ray spectrometry. *Appl Radiat Isot.* 2000;52(3):791–5. 10724442. Available from: [10.1016/S0969-8043\(99\)00246-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00246-8).
- Becquerel LNH, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm (đăng nhập 11/08/2018); 2018.
- Vidmar T, Celik N, Díaz NC, Dlabac A, Ewa IO, González JAC, et al. Testing efficiency transfer codes for equivalence. *Appl Radiat Isot.* 2010;68(2):355–9. 19892558. Available from: [10.1016/j.apradiso.2009.10.012](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.10.012).

Efficiency calibration for HPGe detector by Monte Carlo efficiency transfer method

Le Thi Ngoc Trang¹, Huynh Dinh Chuong², Tran Thien Thanh^{1,2,*}

ABSTRACT

In this paper, the Monte Carlo efficiency transfer method was used to calibrate the full energy peak efficiency (FEPE) of a coaxial p-type HPGe detector. The gamma standard radioactive sources including ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ¹⁰⁹Cd, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu, ²⁰⁷Pb, ²⁴¹Am were measured at different positions on-center of detector with the distance of 5, 10, 15, 20, 25 cm. Besides, a cylindrical sample containing standard mixed nuclides solution was also measured at surface of the detector. The experimental FEPE curves as function of gamma energy for these geometries were determined with the coincidence-summing corrections. A HPGe detector model based on the specifications of manufacturer was built to directly calculate the FEPE for the geometries by Monte Carlo simulations with MCNP6 code. However, these simulated FEPEs show a quite high discrepancy from experimental FEPEs. Then, the FEPEs were calculated by the efficiency transfer method with the efficiency curve for point source at distance of 25 cm as the reference data. A good agreement was obtained between the calculated results by the Monte Carlo efficiency transfer method and experimental results. The comparisons between experimental and calculated FEPE showed that the relative deviations were mostly within $\pm 4\%$ in the energy range of 53-1770 keV.

Key words: Efficiency transfer, HPGe detector, Monte Carlo simulation

¹Nuclear Technique Laboratory,
University of Science, VNU-HCM

²Department of Nuclear Physics, Faculty
of Physics and Engineering Physics,
University of Science, VNU-HCM

Correspondence

Tran Thien Thanh, Nuclear Technique
Laboratory, University of Science,
VNU-HCM

Department of Nuclear Physics, Faculty
of Physics and Engineering Physics,
University of Science, VNU-HCM

Email: ttthanh@hcmus.edu.vn

History

- Received: 21-11-2018
- Accepted: 23-12-2018
- Published: 29-03-2019

DOI :

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v3i1.712>



Copyright

© VNU-HCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Thi Ngoc Trang L, Dinh Chuong H, Thien Thanh T. **Efficiency calibration for HPGe detector by Monte Carlo efficiency transfer method.** *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.*; 3(1):9-17.