

ĐÁP ỨNG CỦA ĐẦU DÒ HPGE ĐỐI VỚI CÁC ĐỒNG VỊ PHÓNG XẠ U-238, TH-232, K-40 VÀ MUON BẰNG PHẦN MỀM MÔ PHỎNG GEANT4

Nguyễn Thị Bích Hậu

Trường ĐH Công nghiệp Thực phẩm Tp.HCM

Ngày gửi bài: 26/1/2015 Ngày chấp nhận đăng: 03/1/2016

TÓM TẮT

Trong công trình này, chúng tôi sử dụng chương trình mô phỏng Geant4 để khảo sát đáp ứng của đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết HPGe cho một số đồng vị phóng xạ U-238, Th-232, K-40 và bức xạ vũ trụ muon. Buồng chì và đầu dò HPGe được mô phỏng với kích thước tham khảo từ nhà sản xuất. Nguồn phóng xạ có dạng nguồn khối hình hộp chữ nhật, phân bố đều, nguồn phát bức xạ là đẳng hướng có phân bố góc 4π , đặt cách bề mặt đầu dò 59,76 mm. Riêng bức xạ vũ trụ muon dạng tia, có năng lượng 450 MeV, hướng bắn vuông góc bề mặt đầu dò. Phổ năng lượng của từng đồng vị phóng xạ để lại trong đầu dò được khảo sát riêng biệt. Kết quả thu được phù hợp với lý thuyết tương tác của bức xạ gamma với đầu dò HPGe. Ngoài ra, ảnh hưởng của sự tự hấp thụ của môi trường cũng được đề cập trong bài báo.

Từ khóa: Geant4, HPGe GC2018, muon-450 MeV.

THE RESPONSE OF THE HPGE DETECTOR FOR A NUMBER OF RADIOACTIVE ISOTOPES OF U-238, TH-232, K-40 AND COSMIC-RAY MUONS BY GEANT4 SIMULATION

ABSTRACT

In this work, we study the response of the HPGe detector for a number of radioactive isotopes of U-238, Th-232, K-40 and cosmic-ray muons by Geant4 simulation toolkit. The size of detector HPGe and of lead chamber are referenced from Canberra Industries. Sources U-238, Th-232, K-40 which emitted gamma radiation with angular distributions of 4π , are parallelepiped sources, and they positioned inside a lead chamber, at a distance of 59,76 mm from detector. This cosmic-ray muons which have the beam with energy of 450 MeV, shooting direction is perpendicular to detector's surface. Energy spectrum of each radioisotope is studied separate survey and the results is correct with theory of interacting of gamma with detector HPGe. Beside, the effect of self-absorption of the matter is also mentioned in the results of this article.

Keywords: Geant4, HPGe GC2018, muon-450 MeV.

1. MỞ ĐẦU

Trong nghiên cứu hạt nhân hiện nay có nhiều quá trình tương tác không thể làm thí nghiệm để khảo sát hay tính toán trước, điển hình như trong phản ứng lò hạt nhân. Để nghiên cứu các sự cố xảy ra trong lò thì không thể xây dựng thí nghiệm thực tế để khảo sát, khi đó phương pháp mô phỏng với các phần mềm mô phỏng sẽ trở thành công cụ đắc lực được sử dụng để tiến hành nghiên cứu.

Phương pháp Monte Carlo (MC) [13] được sử dụng phổ biến trong mô phỏng với các phần mềm mô phỏng có độ tin cậy cao như GEANT4 [5,6], MCNP [3], ... trong nghiên cứu về các đầu dò. Trong công trình [1] tác giả sử dụng phương pháp MC và thuật toán di truyền nghiên cứu hiệu suất ghi của đầu dò bán dẫn HPGe. Trong công trình [12] tác giả R. Casanovas và các cộng sự cũng đã nghiên cứu phổ năng lượng và độ phân giải bằng phương pháp MC và đã đưa ra được phương trình độ phân giải đối với vật liệu bán dẫn có dạng: $FWHM = a + b \cdot \sqrt{E}$, trong đó E là năng lượng để lại trong đầu dò trong quá trình tương tác, FWHM là bề rộng ở một nửa giá trị cực đại, a và b là các hệ số tỉ lệ thu được từ thực nghiệm.

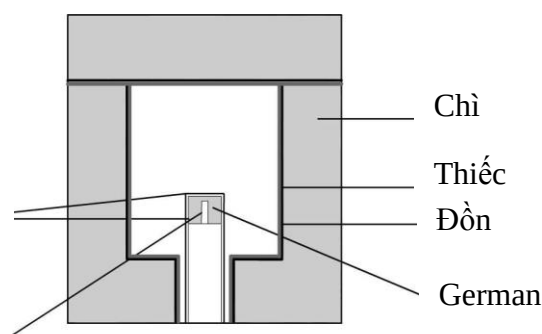
Geant4 (Geometry And Tracking) là một gói công cụ phần mềm, được nghiên cứu và phát triển bởi trung tâm nghiên cứu hạt nhân Châu Âu (CERN). Phần mềm này được dùng để mô phỏng tương tác của hạt vật chất với môi trường mà nó đi qua. Với ưu điểm nổi trội là chương trình mô phỏng sử dụng mã nguồn mở, độ tin cậy cao, Geant4 cung cấp tập hợp các quá trình vật lý đa dạng để mô phỏng tương tác của hạt với môi trường trên dải năng lượng rộng, do đó được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Ở Việt Nam, phần mềm Geant4 được một số trường đại học sử dụng, song mới chỉ ở mức độ làm quen với cách sử dụng chương trình. Việc nghiên cứu phổ năng lượng của các đồng vị phóng xạ cũng như khả năng ghi nhận của detector, phân tích phổ cho phép chúng ta xác định hoạt độ của đồng vị phóng xạ. Hoạt độ trong các mẫu môi trường phụ thuộc vào các tham số như hiệu suất ghi của đầu dò, độ phân giải năng lượng và đặc biệt là phong nền phóng xạ.

Trong các công trình [1,2,3,11], các tác giả cũng đã thực hiện khảo sát đáp ứng của đầu dò HPGe cho một số đồng vị phóng xạ và bức xạ vũ trụ muon bằng phần mềm mô phỏng Geant4 để nghiên cứu đáp ứng phổ gamma của đầu dò phong thấp HPGe cho một số đồng vị phóng xạ có trong môi trường như U-238, Th-232, K-40 và đã thu được kết quả khả quan. Tuy nhiên, tính toán hoạt độ khi tiến hành đo đặc do phong nền phóng xạ làm nhiễu phổ, gây sai lệch rất lớn cho kết quả đo. Vì vậy, việc khử phong nền là đòi hỏi cấp thiết để các kết quả thực nghiệm chính xác. Phong nền phóng xạ bị ảnh hưởng rất nhiều do các nguyên tố phóng xạ trong môi trường và bức xạ vũ trụ gây ra. Việc khử phong không phải đơn giản dễ thực hiện trong thực nghiệm và chỉ có thể phân tích ảnh hưởng của từng đồng vị trong phóng xạ môi trường bằng phương pháp mô phỏng, từ đó có thể đánh giá chính xác ảnh hưởng của phong nền. Vấn đề này sẽ được đề cập trong bài báo.

2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN

Đối tượng mô phỏng được thực hiện trên hệ phổ kế HPGe GC2018 thuộc Phòng thí nghiệm chuyên đề 2, bộ môn Vật lý Hạt nhân, trường Đại học Khoa học Tự Nhiên Tp. HCM [2,4,11]. Khi mô phỏng hệ phổ kế chúng tôi chỉ quan tâm đến cấu hình đầu dò, nguồn và buồng chì che chắn. Bởi vì trong quá trình mô phỏng các bộ phận đó là những đối tượng chính ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả tương tác của bức xạ với đầu dò.

Phần chính của đầu dò GC2018 là tinh thể Ge siêu tinh khiết (độ tạp chất vào khoảng 10^{10} nguyên tử/cm³) gồm tinh thể Ge đường kính ngoài 52 mm, chiều cao 49,5 mm. Bên trong tinh thể có một hốc hình trụ đường kính 7 mm, độ sâu của hốc là 35 mm. Hộp kín bằng nhôm có độ dày 2,7 mm (chỗ dày nhất) và 0,76 mm (chỗ mỏng nhất) để đảm bảo tránh được sự hấp thụ các photon năng lượng thấp. Khoảng cách không ở giữa mặt trên của tinh thể Ge với mặt dưới của vỏ nhôm là 5 mm để tránh va



Hình 1. Mặt cắt dọc hệ đầu dò HPGe.

chạm với bề mặt tinh thể Ge khi lắp ráp đầu dò. Đầu dò GC2018 được đặt trong buồng chì giảm phóng từ môi trường. Chì là loại vật liệu có Z cao, chính điều này đã giúp nó hấp thụ tia gamma trong môi trường và làm giảm phóng cho đầu dò. Tuy nhiên, tương tác của tia gamma với chì cũng tạo ra tia X có năng lượng trong khoảng 75 – 85 keV, các tia X này có thể được ghi nhận bởi đầu dò và làm cho phổ gamma bị nhiễu. Để hạn chế điều này, người ta đã lót bên trong buồng chì các lớp đồng và thiếc có bề dày tương ứng là 1,5 mm và 1,0 mm.

Nguồn sử dụng có dạng hình khối hình hộp chữ nhật đặc với chiều dài 100 mm, chiều rộng 100 mm và chiều cao 20 mm, được phân bố đều, gồm nguồn đơn năng (K-40 – 1,4602 MeV) và nguồn đa năng với nhiều mức năng lượng (U-238, Th-232) [9,10]. Năng lượng tới được phát ra đến đầu dò dưới góc 4π . Các mức năng lượng ở mỗi đồng vị của K-40, U-238 và Th-232 được tham khảo từ dữ liệu của phòng thí nghiệm quốc gia Henry Becquerel của Pháp.

Nguồn được khảo sát lần lượt trong hai trường hợp có môi trường là đất và không có đất. Môi trường đất được mô phỏng có khối lượng riêng $1,6 \text{ g/cm}^3$ gồm các thành phần với tỉ lệ theo % khối lượng: 2,2%H + 57,5%O + 8,5%Al + 26,2%Si + 5,6%Fe [2]. Riêng bức xạ vũ trụ muon [8] được khảo sát với năng lượng đơn 450 MeV và năng lượng đến đầu dò có dạng tia.

Năng lượng đầu dò ghi nhận được tác động độ phân giải theo quy luật [12]:

$$\text{FWHM} = a + b * \sqrt{E}$$

Bằng việc khảo sát thực nghiệm tương tác của bức xạ gamma phát ra từ nguồn Cs với đầu dò HPGe ở phòng thí nghiệm Bộ môn Vật lý hạt nhân – Trường Đại Học Khoa Học Tự nhiên Tp. HCM, các hệ số a và b được xác định với các giá trị tương ứng: $a = 0,6982239678.10^{-3}$ và $b = 0,902784899.10^{-3}$.

3. THỰC NGHIỆM

Từ những số liệu cấu tạo đầu dò HPGe của nhà sản xuất, tôi tiến hành xây dựng đầu dò bằng chương trình mô phỏng Geant4 với cấu tạo giống như đầu dò hiện có ở phòng thí nghiệm Bộ môn Vật lý hạt nhân – Trường Đại Học Khoa Học Tự nhiên Tp. HCM. Đồng thời, trên Geant4 tiến hành khai báo các tương tác vật lý giữa bức xạ gamma với vật chất, các thông số về kích thước, các mức năng lượng của nguồn phát bức xạ và các thông số về thành phần cấu tạo của môi trường đất chứa nguồn.

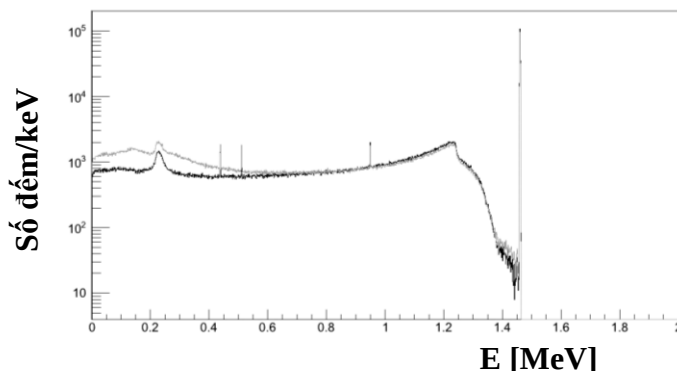
Sau khi hoàn thành việc xây dựng hệ đo, nguồn và thiết lập các điều kiện tương tác, tiếp tục tiến hành cho chạy chương trình lần lượt với từng nguồn phát bức xạ U-238, Th-232, K-40 và muon. Từng nguồn phóng xạ được khảo sát riêng cho trường hợp nguồn không có môi trường đất và nguồn khi có môi trường đất. Năng lượng tương tác để lại trong đầu dò được xuất ra ở giai đoạn này là kết quả ban đầu khi chưa tác động độ phân giải của đầu dò.

Từ các giá trị năng lượng thu thập được ban đầu, tiếp tục sử dụng chương trình hỗ trợ của Geant4 để tác động độ phân giải lên các kết quả trên. Năng lượng được xuất ra sau khi tác động độ phân giải chính là kết quả để sử dụng cho việc phân tích và vẽ phổ năng lượng bằng phần mềm hỗ trợ vẽ phổ của Geant4.

Từ phổ năng lượng vẽ được, tiến hành phân tích và tổng hợp các kết quả thu được để đề xuất hướng phát triển của các nghiên cứu tiếp theo.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Dạng phổ năng lượng của đồng vị K-40



Hình 2. Phổ năng lượng của đồng vị K-40.

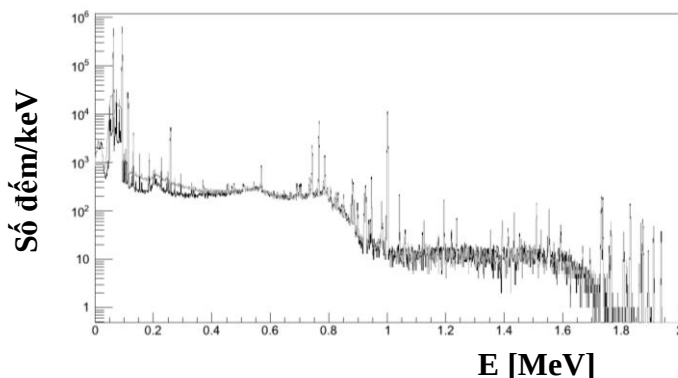
Đường màu nhạt: phổ năng lượng K-40 khi có môi trường đất.

Đường màu đậm: phổ năng lượng K-40 khi không có môi trường đất.

Hình 2 biểu diễn hai phổ năng lượng của đồng vị K-40 ứng với nguồn đơn năng 1,4602 MeV. Có thể thấy hai phổ này đều thể hiện rõ sự ảnh hưởng của các hiệu ứng quang điện, hiệu ứng tán xạ Compton và hiệu ứng tạo cặp ở các đỉnh năng lượng: Đỉnh năng lượng toàn phần 1,4602 MeV, đỉnh thoát đơn 0,949 MeV, thoát đôi 0,438 MeV, đỉnh 0,511 MeV và đỉnh tán xạ ngược. Miền Compton chiếm ưu thế chứng tỏ với năng lượng 1,4602 MeV tán xạ Compton ảnh hưởng mạnh lên phổ gamma. Đồng thời, ta thấy nền Compton của phổ khi có môi trường đất cao hơn nền Compton của phổ khi không có môi trường đất ở miền năng lượng nhỏ hơn 0,600 MeV. Nguyên nhân là do bức xạ gamma bị tán xạ trong môi trường đất, dẫn đến phong nền cao hơn khi xét tới có sự ảnh hưởng của môi trường đất trong mẫu.

Tại đỉnh năng lượng toàn phần 1,4602 MeV thì sự chênh lệch về phong nền Compton rất ít. Điều này chứng tỏ khi khảo sát đồng vị K-40, sự tự hấp thụ của môi trường đất ảnh hưởng không đáng kể. Vì vậy, môi trường đất ảnh hưởng không đáng kể đến việc xác định hoạt độ của đồng vị K-40.

4.2. Dạng phổ năng lượng của đồng vị U -238



Hình 3. Phổ năng lượng của đồng vị U-238

Đường màu nhạt: phổ năng lượng U-238 khi có môi trường đất.

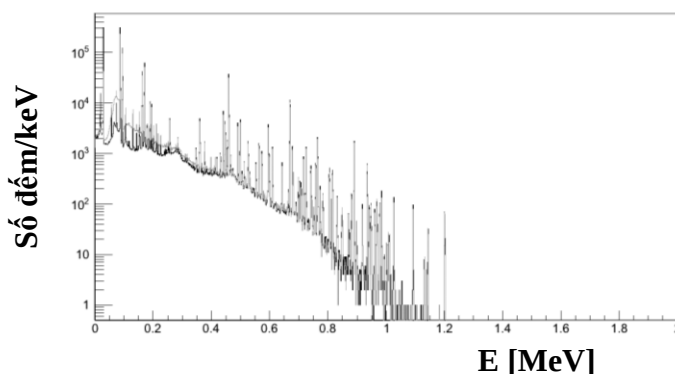
Đường màu đậm: phổ năng lượng U-238 khi không có môi trường đất.

Phổ năng lượng của đồng vị U-238 được biểu diễn trên hình 3, so với phổ năng lượng của đồng vị K-40 có dạng phức tạp hơn với nhiều đỉnh năng lượng và nền Compton rộng, bằng quan sát và tính toán có thể chọn ra những đỉnh đặc trưng: 0,0633 MeV; 0,25819 MeV; 0,76637 MeV; 1,001 MeV và 1,7654 MeV. Những đỉnh năng lượng này chủ yếu là năng lượng toàn phần trong dải năng lượng rộng của nguồn đa năng U-238. Các đỉnh năng lượng tạo bởi các hiệu ứng tạo cặp như đỉnh thoát đơn, thoát đôi, hay đỉnh tán xạ ngược không còn dễ dàng phát hiện như đối với phổ năng lượng của nguồn đơn năng K-40.

Ở miền năng lượng thấp hơn 0,500 MeV sự tự hấp thụ của đất ảnh hưởng đáng kể lên phổ năng lượng; bằng chứng là nền Compton của phổ năng lượng ứng với trường hợp có môi trường đất cao hơn nền Compton của phổ khi chưa có môi trường đất và dẫn đến nhiều đỉnh năng lượng bị che lấp trong nền Compton khi xét đến sự ảnh hưởng của môi trường. Điều này có thể thấy rõ ở phổ năng lượng trên hình 3 có các đỉnh năng lượng 0,0633 MeV và đỉnh 0,25819 MeV là các đỉnh bị ảnh hưởng mạnh của sự tự hấp thụ.

Hiện tượng trên có thể được giải thích là: tại một đỉnh năng lượng, trong trường hợp chưa có môi trường đất, nền Compton – do chính tán xạ Compton của các năng lượng cao hơn tương tác với vật chất tạo ra. Còn khi có môi trường đất thì ngoài sự đóng góp do tán xạ Compton của các năng lượng cao hơn còn có đóng góp của sự tự hấp thụ của môi trường, do đó nền Compton sẽ cao hơn và cao hơn đáng kể ở miền năng lượng dưới 0,500 MeV khi có môi trường đất. Khi năng lượng càng cao thì số đỉnh năng lượng cao hơn nó càng ít, dẫn đến sự ảnh hưởng của tán xạ Compton do năng lượng cao hơn gây ra ít hơn so với mức năng lượng nhỏ, đồng thời ở các mức năng lượng cao hơn 0,500 MeV sự tự hấp thụ của môi trường đất ảnh hưởng không đáng kể lên phổ năng lượng. Vì vậy, sự đóng góp của tán xạ Compton của các mức năng lượng cao hơn lên nền Compton là chủ yếu.

4.3. Dạng phổ năng lượng của đồng vị Th-232



Hình 4. **Phổ năng lượng của đồng vị Th-232.**

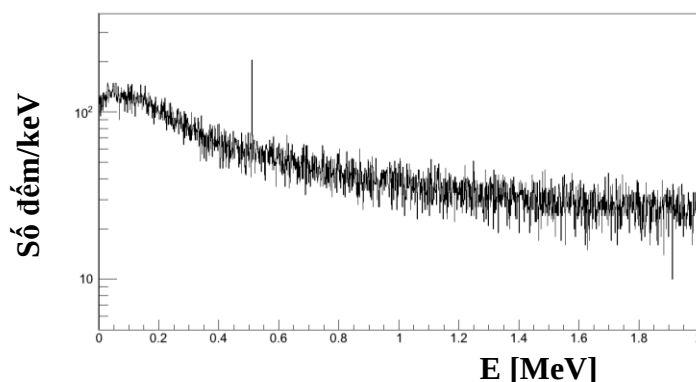
Đường màu nhạt: phổ năng lượng Th-232 khi có môi trường đất.

Đường màu đậm: phổ năng lượng Th-232 khi không có môi trường đất.

Với phổ năng lượng của nguồn đa năng Th-232 được biểu diễn trên hình 4 có dạng phức tạp với rất nhiều đỉnh năng lượng, có những đỉnh năng lượng toàn phần nhô rất cao trên nền Compton như: 0,1706 MeV; 0,4592 MeV; 0,6699 MeV; 0,8901 MeV; 0,9848 MeV; 1,201 MeV.

Trong miền năng lượng nhỏ hơn 0,500 MeV nền Compton khi có môi trường đất cao hơn nền Compton khi không có môi trường đất, khi đó một số đỉnh năng lượng bị sự tự hấp thụ của môi trường đất ảnh hưởng rất mạnh, gần như không còn thấy nhô lên trên phổ năng lượng, trong số đó có các đỉnh 0,1706 MeV và 0,4592 MeV.

4.4. Dạng phổ năng lượng của muon



Hình 5. *Phổ năng lượng của bức xạ vũ trụ muon*

Hình 5 cho thấy phổ năng lượng bức xạ vũ trụ muon với năng lượng tới 450 MeV để lại trong đầu dò, được xét trong vùng (0-2) MeV. Dạng phổ phong nền do muon gây ra là liên tục, có phong nền cao ở vùng năng lượng thấp, và giảm theo năng lượng. Trên phổ năng lượng để lại trong đầu dò của bức xạ vũ trụ muon có đỉnh 0,511 MeV trội lên rất rõ, đây là đỉnh hủy của các positron (sinh ra do sự tự phân hủy của hạt muon âm) với các electron.

5. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp mô phỏng trên phần mềm Geant4 đã phân tích được phổ năng lượng của từng đồng vị phóng xạ U-238, Th-232, K-40 có trong môi trường và bức xạ vũ trụ muon, đồng thời làm rõ ảnh hưởng của sự tự hấp thụ của môi trường đất lên phong nền phóng xạ, đây là điều mà các công trình trước đó chưa làm được.

Ưu điểm nổi trội của phương pháp đã sử dụng là việc nghiên cứu được từng đồng vị mà không bị ảnh hưởng bởi các đồng vị khác có mặt trong phóng xạ môi trường, điều này đối với thực nghiệm thuần túy hoàn toàn không thể thực hiện được.

Những kết quả khả quan thu được trên từng đồng vị phóng xạ làm nền tảng cho việc phân tích ảnh hưởng của phong nền phóng xạ môi trường lên phổ năng lượng của các đồng vị phóng xạ khác khi đo đạc trong thực nghiệm.

Kết quả đạt được trong công trình đang được ứng dụng cho nghiên cứu tiếp theo về mặt thực nghiệm, xây dựng hệ đo triệt phong nền vũ trụ và phong nền Compton khi có sự kết hợp các detector nhấp nháy và thiết bị trùng phùng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Võ Xuân Ân, (2008), *Nghiên cứu hiệu suất ghi của đầu dò bán dẫn siêu tinh khiết (HPGe) trong hệ phổ kế gamma bằng phương pháp Monte Carlo và thuật toán di truyền*, luận án tiến sĩ, Đại học Khoa học Tự Nhiên-Đại học Quốc Gia TP HCM.

- [2]. Trương Thị Hồng Loan, (2009), Áp dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo để nâng cao chất lượng hệ phổ kế gamma sử dụng đầu dò bán dẫn HPGe, luận án tiến sĩ, Đại học Khoa học Tự Nhiên-Đại học Quốc Gia TP HCM.
- [3]. Avneet Sood and Robin P. Gardner, (2004), A New Monte Carlo Assisted Approach to Detector Response Functions, Nucl. Instr. and Meth.
- [4]. Canberra Industries, Inc, (2004), Germanium Detectors – User’s Manual, Canberra Industries, Inc, USA.
- [5]. Geant4 Collaboration,(2009), Geant4 Users guide for application developers, Version geant4.9.3.
- [6]. Geant4 Collaboration, (2010), Physics Reference Manual, Version geant4.9.4.
- [7]. Gaisser, Thomas K. (1990), Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press, Cambridge.
- [8]. Grieder, P.K.F (2001), Cosmic Rays at Earth, Researcher’s Reference Manual and DataBook, Elsevier Science, Amsterdam.
- [9]. <http://laraweb.free.fr> - NUCLÉIDE-LARA on the web (with scheme)
- [10]. <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?refer=ap&matno=104>
- [11]. Loan T.T.H., Phuong D.N., Khanh T.A., Nhon M.V, (2007), “Monte-Carlo simulation of HPGe detector response function with using MCNP code, Communication in Physics”, 17(1), pp. 59-64.
- [12]. R. Casanovas, J.J. Morant, M. Salvado,(2012), “Energy and resolution calibration of NaI(Tl) and LaBr3(Ce) scintillators and validation of an EGS5 Monte Carlo user code for efficiency calculations”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.
- [13]. X-5 Monte Carlo Team, Monte Carlo, (2005), N – Particle Transport Code Verion 5, Volume 1, Los Alamos, LA-UR-03-1987, USA.