

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Huỳnh Ngọc Anh Trí

**NGHIÊN CỨU HIỆU SUẤT GHI VÀ KHẢ NĂNG PHÂN BIỆT
NƠTRON/GAMMA CHO ĐẦU DÒ NHÁP NHÁY SỬ DỤNG PHẦN
MỀM GEANT4**

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

Hà Nội - 2023

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Huỳnh Ngọc Anh Trí

**NGHIÊN CỨU HIỆU SUẤT GHI VÀ KHẢ NĂNG PHÂN BIỆT
NƠTRON/GAMMA CHO ĐẦU DÒ NHẤP NHÁY SỬ DỤNG PHẦN
MỀM GEANT4**

Chuyên ngành: Vật lí nguyên tử và hạt nhân

Mã số: 8440106

LUẬN VĂN THẠC SĨ VẬT LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

TS. Nguyễn Ngọc Anh

TS. Phan Văn Chuân

Hà Nội - 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của **TS. NGUYỄN NGỌC ANH** và **TS. PHAN VĂN CHUÂN**. Các số liệu và kết quả trong luận văn là hoàn toàn trung thực và chưa từng công bố trong bất kỳ công trình nào khác được thực hiện tại Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt. Nếu như không đúng như đã nêu trên, tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm về đề tài của mình.

Hà Nội, 17 tháng 4 năm 2023

Huyền Ngọc Anh Trí

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thiện luận văn, em đã nhận được sự động viên, khuyến khích và tạo điều kiện giúp đỡ nhiệt tình của các cấp lãnh đạo, thầy cô giáo, anh chị em, bạn bè, đồng nghiệp và gia đình.

Đặc biệt, với lòng biết ơn tôn trọng sâu sắc, em xin chân thành cảm ơn TS. Nguyễn Ngọc Anh và TS. Phan Văn Chuân đã tin tưởng giao đề tài và tận tình hướng dẫn cũng như tạo mọi điều kiện thuận lợi giúp em hoàn thành luận văn này.

Em xin chân thành cảm ơn quý Thầy, Cô giáo, các Khoa, Phòng của Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã tận tình giảng dạy và tạo điều kiện để em hoàn thành chương trình thạc sỹ.

Em xin chân thành cảm ơn quý Thầy, Cô giáo của Viện Nghiên cứu và Ứng dụng Công nghệ Nha Trang đã nhiệt tình và tạo điều kiện thuận lợi để giúp em hoàn thành khóa học.

Xin cảm ơn các anh, chị đang công tác tại Trung tâm Vật lý và Điện tử hạt nhân của Viện Nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt đã cùng tôi trao đổi kiến thức, hỗ trợ trong suốt quá trình làm luận văn.

Trong quá trình làm luận văn không thể tránh khỏi những hạn chế, thiếu sót, em rất mong được sự góp ý và chỉ dẫn của quý thầy cô và bạn bè để luận văn hoàn thiện hơn.

Chân thành cảm ơn!

Hà Nội, 17 tháng 4 năm 2023

Huỳnh Ngọc Anh Trí

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN

LỜI CẢM ƠN

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	3
1.1 Tương tác của gamma trong đầu dò nhấp nháy	3
1.2 Tương tác của neutron với đầu dò	4
1.3 Các đầu dò nhấp nháy đo neutron	5
1.4 Quá trình hình thành xung neutron/gamma trong đầu dò nhấp nháy	6
1.5 Phân biệt dạng xung neutron /gamma cho đầu dò nhấp nháy	8
1.5.1 Các phương pháp phân biệt dạng xung dựa vào điểm cắt không.	8
1.5.2 Phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa vào thời gian vượt ngưỡng	9
1.5.3 Phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa vào độ dốc xung	10
1.5.4 Phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa vào diện tích đuôi xung	10
1.6 Đánh giá hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma	11
1.7 Phần mềm mô phỏng Geant4	12
1.7.1 Giới thiệu chung	12
1.7.2 Cấu trúc chương trình Geant4	13
CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	15
2.1 Mô hình đầu dò nhấp nháy EJ-301	15
2.1.1 Mô hình chung	15
2.1.2 Mô hình đầu nhấp nháy	17
2.1.3 Mô hình ống dẫn sáng	19

2.1.4 Mô hình ống nhân quang	20
2.2 Xây dựng mô hình đầu dò nhấp nháy trong Geant4	24
2.2.1 Mô tả vật liệu	24
2.2.2 Xây dựng mô hình tinh thể nhấp nháy	27
2.2.3 Xây dựng mô hình ống dẫn sáng	29
2.2.4 Xây dựng mô hình Ống nhân quang và hàm đáp ứng	31
2.3 Mô phỏng xung notron và gamma từ đầu dò EJ-301	32
2.4 Mô phỏng các tương tác của gamma với chất nhấp nháy EJ301	34
2.5 Mô phỏng các tương tác của notron với chất nhấp nháy EJ-301	36
2.6 Mô phỏng hiệu suất ghi và phổ thu trên đầu dò nhấp nháy EJ-301	37
2.7 Mô phỏng đáp ứng của đầu dò EJ-301 với bức xạ notron và gamma	42
2.8 Đánh giá khả năng phân biệt dạng xung notron/gamma	43
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	44
3.1 Xung mô phỏng từ đầu dò EJ-301	44
3.2 Hiệu suất ghi của các đầu dò EJ-301	44
3.3 Hàm đáp ứng phổ notron/gamma trên các đầu dò EJ-301	48
3.3.1 Hàm đáp ứng phổ trên các nguồn gamma	48
3.3.2 Hàm đáp ứng phổ trên các nguồn notron	50
3.4 Khả năng phân biệt notron/gamma trên các đầu dò EJ-301	53
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐỀ TÀI	62
TÀI LIỆU THAM KHẢO	64
PHỤ LỤC	66

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
EJ-301	EJ-301	Đầu dò neutron sử dụng chất nhấp nháy EJ301
Geant4	Geant4	Chương trình mô phỏng hình học và quá trình chuyển động (GEometry ANd Tracking)
GPS	Geant4 General Particle Source	Nguồn hạt chung Geant4
NIST	National Institute of Standards and Technology	Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia
PMT	PhotoMultiplier Tube	Ống nhân quang điện
PSD	Pulse Shape Discrimination	Phân liệt dạng xung

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 3.1 Giá trị hiệu suất ghi của các đầu dò theo ngưỡng năng lượng	46
Bảng 3.2 FoM của các đầu dò Det 1 – Det 8 khi đo trên nguồn Cf-252.....	59
Bảng 3.3 Kết quả tính FoM của các đầu dò với các ngưỡng năng lượng khác nhau.....	61

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Cấu tạo cơ bản của một hệ đo bức xạ sử dụng tinh thể nhấp nháy.....	6
Hình 1.2 Sơ đồ tương đương của detector: sơ đồ tương đương (a), sơ đồ rút gọn (b).....	7
Hình 1.3 Minh họa cho dạng xung với các tỷ số B/A khác nhau.....	8
Hình 1.4 Xung neutron và gamma trước và sau tầng hình thành xung $(CR)^2 - RC$	9
Hình 1.5 Giải đồ phân biệt xung neutron-gamma dựa vào thời gian tăng.....	9
Hình 1.6 Sự khác biệt của độ dốc của sườn giảm của xung gây bởi neutron và gamma.....	10
Hình 1.7 Minh họa phương pháp phân biệt dựa trên diện tích đuôi xung.....	11
Hình 1.8 Phổ phân bố tham số PSD neutron/gamma và tính FoM.....	11
Hình 2.1 Mô hình mô phỏng xung của đầu dò nhấp nháy EJ-301.....	15
Hình 2.2 Mô hình đầu dò EJ-301 được xây dựng trong Geant4.....	16
Hình 2.3 Các mô hình cell nhấp nháy.....	19
Hình 2.4 Mô hình ống dẫn sáng cho các đầu dò: (a) Det 1 và Det 2, (b) Det 3 và Det 4, (c) Det 5 và Det 6, (d) Det 7 và Det 8.....	20
Hình 2.5 Mô hình hàm truyền PMT.....	21
Hình 2.6 Mô hình hàm truyền tiền khuếch đại.....	21
Hình 2.7 Đáp ứng đơn photon đối với PMT [25].....	22
Hình 2.8 Hàm đáp ứng của PMT R9420.....	22
Hình 2.9 Hàm đáp ứng tổng gồm PMT và tiền khuếch đại.....	24
Hình 2.10 Mô hình đầu dò Det 5 trong Geant4.....	31
Hình 2.11 Một số xung gamma được mô phỏng trên đầu dò Det 1.....	33
Hình 2.12 Các tham số PSD từ các xung neutron và gamma mô phỏng trên đầu dò Det 8.....	34
Hình 2.13 Dạng phổ mô phỏng trên các nguồn gamma: (a) Na-22, (b) Cs-137 và (c) Co-60.....	36

Hình 2.14 Phổ thu được khi mô phỏng nguồn neutron đơn năng 1000 keVee.....	37
Hình 2.15 Mô hình mô phỏng hiệu suất ghi nhận gamma.....	39
Hình 2.16 Các đường chuẩn năng lượng của đầu dò EJ-301.....	41
Hình 2.17 Mô phỏng một số xung: (a) Xung gamma, (b) Xung neutron.....	43
Hình 3.1 So sánh xung gamma mô phỏng với thực nghiệm trên mô hình Det2 với đầu dò EJ-301 thực nghiệm.....	44
Hình 3.2 Hiệu suất ghi của các đầu dò theo ngưỡng năng lượng bức xạ.....	45
Hình 3.3 Hiệu suất ghi của các đầu dò trong khoảng 30 keVee ÷ 2000 keVee..	46
Hình 3.4 Đáp ứng phổ của các đầu dò Det 1 – Det 8 trên các nguồn gamma đơn năng.....	50
Hình 3.5 Đáp ứng phổ của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 trên các nguồn neutron đơn năng.....	52
Hình 3.6 So sánh phổ Cf-252 giữa mô phỏng Geant4 và thực nghiệm trên đầu dò Det 2.....	53
Hình 3.7 Phân bố tham số PSD theo biên độ xung của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Cf-252.....	55
Hình 3.8 Thống kê theo tham số PSD của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Cf-252.....	57
Hình 3.9 (a)-(h) trình bày kết quả thống kê tham số PSD khi mô phỏng với nguồn Co-60, tương ứng cho các đầu dò Det 1 ÷ Det 8.....	57
Hình 3.9 Thống kê tham số PSD theo biên độ xung của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Co-60.....	59
Hình 3.10 Khả năng phân biệt neutron/gamma trên các đầu dò EJ-301.....	60

MỞ ĐẦU

Cùng với proton, neutron là một trong hai hạt “cơ bản” cấu thành hạt nhân của nguyên tử. Khác với proton, neutron không mang điện, do đó nó có khả năng đâm xuyên rất mạnh trong vật chất. Đặc trưng này khiến cho neutron có rất nhiều ứng dụng trong cả lĩnh vực nghiên cứu cơ bản lẫn nghiên cứu ứng dụng. Ví dụ, neutron được sử dụng để bắn phá các hạt nhân để tìm hiểu về cấu trúc của chúng. Để có thể khai thác được tối đa các ứng dụng của neutron, ta cần có các hệ đo neutron có chất lượng tốt.

Hệ đo neutron được hiểu là một tổ hợp gồm đầu đo neutron và các cấu kiện điện tử đi cùng với nó. Hệ đo neutron đơn giản có thể phát hiện sự có mặt của neutron và số lượng neutron [1]. Các hệ đo cao cấp hơn có thể ghi nhận được cả phân bố số lượng neutron theo năng lượng, hay còn gọi là phổ neutron. Một trong các loại đầu dò được sử dụng trong ghi đo neutron là đầu dò nhấp nháy. Đầu dò nhấp nháy có rất nhiều ưu điểm, như hiệu suất ghi cao, bền cơ học, dễ kết nối với các mạch điện tử xử lý tín hiệu.

Mặc dù vậy, đầu dò nhấp nháy cũng có những điểm yếu nhất định khi sử dụng để đo neutron. Một trong số đó là các đầu dò nhấp nháy cùng có độ nhạy rất cao với gamma. Tất cả các nguồn neutron đều phát kèm theo các bức xạ gamma, chính vì vậy sự nhạy với gamma của các tinh thể nhấp nháy khiến cho các hệ đo này ghi nhận rất nhiều tín hiệu gây bởi gamma trong khi mục đích chính là đo neutron.

Để khắc phục điểm yếu này của các đầu dò nhấp nháy, người ta đã nghiên cứu và phát hiện ra rằng tín hiệu mà đầu dò nhấp nháy tạo ra gây bởi neutron có sự khác biệt về hình dạng so với tín hiệu gây bởi gamma. Sử dụng các kỹ thuật so sánh dạng xung sẽ giúp loại bỏ các sự kiện gây bởi gamma trong phổ đo neutron. Trong một số trường hợp, việc sử dụng hợp lý kỹ thuật phân biệt dạng xung còn cho phép biến một hệ đo neutron trở thành một hệ đo đồng thời neutron/gamma. Tuy nhiên, cho tới hiện nay, chưa có phương pháp phân biệt dạng xung nào có thể phân biệt neutron/gamma với độ chính xác tuyệt đối. Độ hiệu quả của các phương pháp phân biệt dạng xung cũng phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố bên ngoài.

Một số nghiên cứu đã nhận thấy rằng kích thước của tinh thể nhấp nháy có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả của phương pháp phân biệt dạng xung [2]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này không nhiều, và chưa thiết lập được một hệ thống cơ sở để có thể áp dụng vào thiết kế và xây dựng cấu hình tối ưu cho các đầu dò nhấp nháy.

Chế tạo một số lượng lớn đầu dò nhấp nháy để đo thực nghiệm và tìm ra mối quan hệ giữa kích thước của đầu dò nhấp nháy với độ hiệu quả của phương pháp phân biệt dạng xung là vô cùng tốn kém, thậm chí có thể nói là bất khả thi đặc biệt trong điều kiện nghiên cứu ở Việt Nam. Nhờ sự phát triển của công nghệ máy tính, nghiên cứu nói trên có thể được thực hiện dựa trên kỹ thuật mô phỏng. Phần mềm Geant4 [3] là một công cụ mã nguồn mở, có tính linh hoạt rất cao và do đó cho phép xây dựng các mô hình đầu dò nhấp nháy với các kích thước khác nhau để tìm ra mối tương quan giữa kích thước tinh thể với hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma.

Mục tiêu của đề tài “*Nghiên cứu hiệu suất ghi và khả năng phân biệt neutron/gamma cho đầu dò nhấp nháy sử dụng phần mềm geant4*” là xác định được hiệu suất ghi và đánh giá khả năng phân biệt neutron/gamma ứng với các cấu hình (kích thước) đầu dò nhấp nháy khác nhau sử dụng phần mềm Geant4. Luận văn được bố cục thành 3 chương:

Chương 1 trình bày một số kiến thức căn bản về tương tác của neutron và gamma với vật chất, các phương pháp phân biệt dạng xung, cách đánh giá hiệu quả phân biệt dạng xung được sử dụng trong luận văn, và sơ lược về phần mềm Geant4.

Chương 2 trình bày chi tiết các cấu hình mô phỏng, các tham số và mô hình được sử dụng để mô phỏng.

Chương 3 trình bày kết quả thu được và thảo luận.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

1.1 Tương tác của gamma trong đầu dò nhấp nháy

Tương tác của gamma trong đầu dò nhấp nháy cũng tương tự như tương tác của chúng trong môi trường vật chất thông thường. Ba quá trình tương tác chính của gamma với môi trường vật chất là hiệu ứng quang điện, tán xạ Compton, và tạo cặp [1].

Hiệu ứng quang điện xảy ra khi gamma tương tác với một electron trên lớp vỏ của nguyên tử và truyền toàn bộ năng lượng của nó cho electron. Electron nhận được năng lượng từ gamma sẽ thoát ra khỏi trạng thái liên kết với nguyên tử và trở thành một electron tự do. Động năng của electron tự do này bằng hiệu của năng lượng gamma với năng lượng liên kết của electron với nguyên tử. Xác suất xảy ra hiệu ứng quang điện rất cao với các gamma năng lượng thấp, nhưng giảm rất nhanh khi năng lượng gamma tăng dần.

Tán xạ Compton là hiện tượng mà gamma tương tác với một electron trong môi trường vật chất và truyền một phần năng lượng của nó cho electron đó. Gamma sau tương tác bị suy giảm năng lượng và thay đổi hướng bay so với hướng bay ban đầu. Tán xạ Compton có xác suất xảy ra giảm dần theo năng lượng của gamma.

Khác với hiệu ứng quang điện và tán xạ Compton, hiện tượng tạo cặp không phải là kết quả của quá trình tương tác giữa gamma với electron mà là do quá trình tương tác giữa gamma với toàn bộ nguyên tử. Cụ thể, gamma đi vào trường Coulomb gây bởi hạt nhân nguyên tử sẽ bị “chuyển đổi” thành một cặp electron – positron. Positron có quãng chạy trong vật chất rất ngắn, nó nhanh chóng gặp một electron trong môi trường vật chất và tương tác với nó để tạo thành một cặp gamma có năng lượng 511 keV có hướng bay tạo với nhau một góc 180 độ. Điều kiện để xảy ra hiện tượng tạo cặp là gamma tới phải có năng lượng lớn hơn 1022 keV [1].

Nhìn chung, kết quả của cả ba quá trình tương tác đều là sự mất mát một phần hoặc toàn bộ năng lượng của gamma trong môi trường vật chất mà nó đi vào. Phần năng lượng để lại trong môi trường vật chất mà nó đi vào chính là cơ sở để phát hiện và xác định năng lượng của gamma trong các đầu đo gamma. Đối với các tinh thể nhấp nháy, năng lượng gamma để lại sẽ tỷ lệ với một lượng nhấp sáng mà tinh thể nhấp nháy tạo ra, thu thập các nhấp sáng

này và chuyển chúng thành tín hiệu điện là nguyên lý của hoạt động các đầu đo gamma sử dụng tinh thể nhấp nháy.

1.2 Tương tác của neutron với đầu dò

Khác với gamma, neutron là một nucleon, không mang điện do đó đối tượng tương tác chính của neutron khi đi vào môi trường vật chất không phải là các electron trên lớp vỏ nguyên tử, hay các nguyên tử, mà là hạt nhân của các nguyên tử trong môi trường vật chất [1]. Có rất nhiều quá trình có thể xảy ra khi neutron tương tác với hạt nhân nguyên tử. Trong đó một số quá trình chính bao gồm tán xạ đàn hồi, tán xạ không đàn hồi, phản ứng bắt hay còn gọi là kích hoạt hạt nhân, và các phản ứng tạo ra hạt nhân mới.

Tán xạ đàn hồi là khi neutron truyền một phần năng lượng của nó cho hạt nhân. Hạt nhân sau tương tác vẫn ở nguyên trạng thái cơ bản và có động năng gây bởi năng lượng mà nó nhận được. Đối với tán xạ đàn hồi, tổng động năng trước và sau phản ứng được bảo toàn.

Tán xạ không đàn hồi cũng gần tương tự như tán xạ đàn hồi, tuy nhiên điểm khác biệt nằm ở chỗ hạt nhân sau phản ứng không ở trạng thái cơ bản mà chuyển sang trạng thái kích thích. Do vậy, trong tán xạ không đàn hồi, năng lượng mà neutron truyền cho hạt nhân sẽ được sử dụng để chuyển hạt nhân lên trạng thái kích thích và cung cấp cho nó một động năng. Tổng động năng của hệ không bảo toàn trong tán xạ không đàn hồi.

Kích hoạt hạt nhân là quá trình mà neutron đi vào trong hạt nhân và bị “giam giữ” trong đó để tạo thành một hạt nhân mới gọi là hạt nhân hợp phần. Hạt nhân hợp phần có số khối nhiều hơn số khối của hạt nhân trước phản ứng 1 đơn vị. Hạt nhân hợp phần được tạo thành sẽ ở trạng thái kích thích có năng lượng bằng tổng năng lượng cần để tách rời một neutron khỏi hạt nhân hợp phần và năng lượng của neutron tới. Hạt nhân hợp phần ở trạng thái kích thích sẽ nhanh chóng phát ra các gamma để chuyển về trạng thái cơ bản. Chính vì vậy, sản phẩm của quá trình kích hoạt hạt nhân là các gamma.

Một kiểu tương tác nữa là các phản ứng tạo ra hạt nhân mới. Khái niệm “mới” ở đây được hiểu là so với hạt nhân trước phản ứng. Quá trình này là quá trình có ngưỡng, trong đó năng lượng của neutron tới phải thỏa mãn một điều kiện nhất định thì phản ứng mới có thể xảy ra. Khi có đủ năng lượng, số kênh phản ứng có thể được tạo ra tương ứng với một neutron tới là rất đa dạng.

Một số ví dụ về phản ứng tạo ra các hạt nhân mới có thể kể tới là ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^3\text{H}$ và ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$.

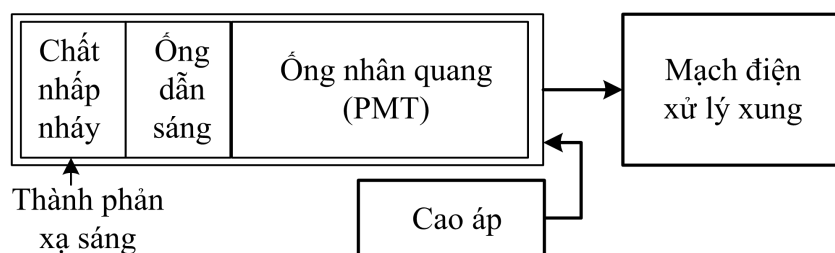
Nhìn chung neutron tương tác với môi trường vật chất theo cách thức phức tạp hơn so với gamma, do đo việc ghi đo neutron cũng trở nên phức tạp hơn. Một vấn đề nữa đối với neutron là khả năng đâm xuyên mạnh, làm cho hiệu suất ghi của các đầu dò neutron nhìn chung là thấp.

1.3 Các đầu dò nhấp nháy đo neutron

Cấu tạo cơ bản của một đầu dò nhấp nháy đo neutron bao gồm một phần tinh thể nhấp nháy kết nối với ống nhân quang điện. Tiếp giáp giữa ống nhân quang với tinh thể nhấp nháy là một lớp kính tia cực tím. Tín hiệu ra từ ống nhân quang sẽ được đưa tới tiền khuếch đại (TKĐ). Để ống nhân quang hoạt động, cần cung cấp cho ống nhân quang một cao thế, ngoài ra cũng cần cung cấp nguồn cho khối TKĐ [1, 4].

Nguyên lý hoạt động của đầu dò nhấp nháy đo neutron có thể được tóm gọn lại như sau: Neutron tương tác với chất nhấp nháy sẽ tạo ra các chớp sáng, các chớp sáng này được thu góp thông qua các gương phản xạ bao bọc xung quanh tinh thể nhấp nháy và truyền tới bản cực đầu tiên của ống nhân quang. Ánh sáng đi vào bản cực của ống nhân quang sẽ làm bật ra các electron do hiện tượng hấp thụ quang điện, số electron bật ra tỷ lệ với cường độ sáng đi tới bản cực. Các electron này sau đó được gia tốc để bắn phá các bản cực tiếp theo, trong quá trình này số electron ngày càng tăng lên. Dòng điện khi ra khỏi ống nhân quang cao hơn rất nhiều dòng điện gốc gây bởi các chớp sáng của tinh thể nhấp nháy [1]. Dòng điện ra khỏi ống nhân quang tiếp tục đi vào TKĐ để hình thành xung tín hiệu. TKĐ giúp hình thành xung có dạng phù hợp để phân tích đồng thời loại bỏ một số thành phần nhiễu, đặc biệt là các nhiễu tần số cao [4].

Tín hiệu từ lối ra của TKĐ đại tiếp tục được đưa vào các khối khuếch đại để tạo dạng xung cho phù hợp với các bộ phân tích biên độ. Đối với hệ đo neutron, tín hiệu có thể được đưa qua một bộ phân tích dạng xung phục vụ phân biệt xung neutron /gamma trước khi được tiến hành phân tích biên độ.



Hình 1.1 Cấu tạo cơ bản của một hệ đo bức xạ sử dụng tinh thể nhấp nháy.

Trong phần tiếp theo, chúng ta sẽ cùng tìm hiểu về quá trình hình thành xung trong đầu dò nhấp nháy.

1.4 Quá trình hình thành xung neutron/gamma trong đầu dò nhấp nháy

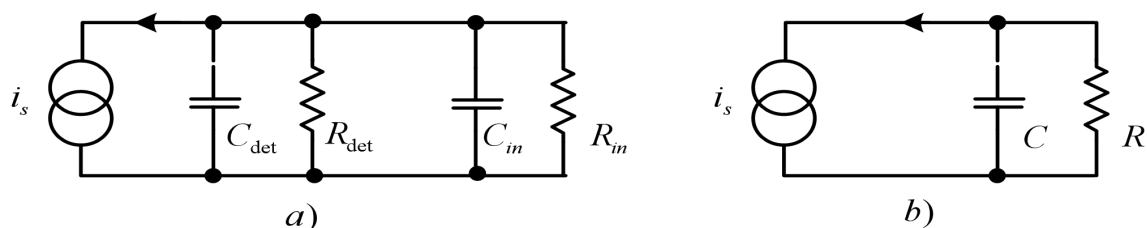
Xung hình thành trong chất nhấp nháy là sự chồng chập của thành phần phân rã nhanh và chậm của chất nhấp nháy. Mỗi thành phần phân rã theo quy luật hàm mũ tương ứng với thời hằng phân rã nhanh và chậm được biểu diễn theo biểu thức (1.1) [1].

$$I(t) = Ae^{-t/\tau_f} + Be^{-t/\tau_s} \quad (1.1)$$

Trong đó: τ_f , τ_s lần lượt là thời hằng phân rã nhanh và chậm của chất nhấp nháy; A , B lần lượt là cường độ nhấp nháy của phân rã nhanh và chậm tại thời điểm ban đầu ($t = 0$).

Từ biểu thức (1.1) có thể thấy thành phần phân rã chậm chiếm tỉ lệ càng nhiều thì phần đuôi xung giảm càng chậm. Khi chất nhấp nháy tương tác với neutron thành phần phân rã chậm chiếm tỉ lệ nhiều hơn so với gamma, do đó xung do neutron tạo ra có phần đuôi giảm chậm hơn. Để khảo sát dạng xung trong chất nhấp nháy được thuận lợi, tỉ số B/A được sử dụng như là tỉ lệ giữa thành phần phân rã chậm và nhanh của một chất nhấp nháy.

Dạng xung hình thành sau PMT không những phụ thuộc vào các tham số của chất nhấp nháy mà còn phụ thuộc cả vào các tham số của PMT và mạch kết nối sau nó. Sơ đồ tương đương cho detector gồm PMT kết nối với TKĐ được mô tả trên Hình 1.2 [5].



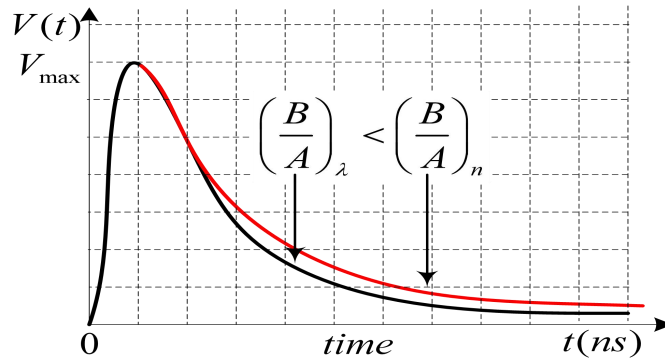
Hình 1.2 Sơ đồ tương đương của detector:
sơ đồ tương đương (a), sơ đồ rút gọn (b).

Trong đó: nguồn dòng i_s biểu diễn dòng điện trên anode của PMT, tụ điện C_{det} biểu diễn tụ điện tương đương của PMT. R_{det} là điện trở tương đương của PMT và điện trở kết nối cao áp của nó. C_{in}, R_{in} tương ứng là tụ điện lối vào và điện trở lối vào của mạch TKĐ. Sơ đồ tương đương Hình 1.2(a) có thể biểu diễn bằng sơ đồ tương đương đơn giản hơn như Hình 1.2(b). Trong đó C là tụ điện tương đương của C_{det} và C_{in} , R là điện trở tương đương của R_{det} và R_{in} . Mạch tương đương Hình 1.2 (b) có thời hằng $\tau_1 = RC$ cùng với thời hằng của chất nhấp nháy sẽ quyết định dạng xung được hình thành.

Thông qua các tính toán, ta có thể viết gần đúng tín hiệu lối ra của đầu dò nhấp nháy dưới dạng (1.2).

$$V(t) = A \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_f}} + \frac{B}{A} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right) \quad (1.2)$$

Trong đó τ_1, τ_f, τ_s là các hằng số đặc trưng cho loại chất nhấp nháy. Dạng của tín hiệu thay đổi phụ thuộc vào tỷ số B/A . Xung gây bởi neutron có tỷ số B/A khác với xung gây bởi gamma, do đó ta có thể dựa vào đặc trưng này để thiết lập các kỹ thuật phân biệt neutron/gamma dựa trên dạng xung.



Hình 1.3 Minh họa cho dạng xung với các tỷ số B/A khác nhau.

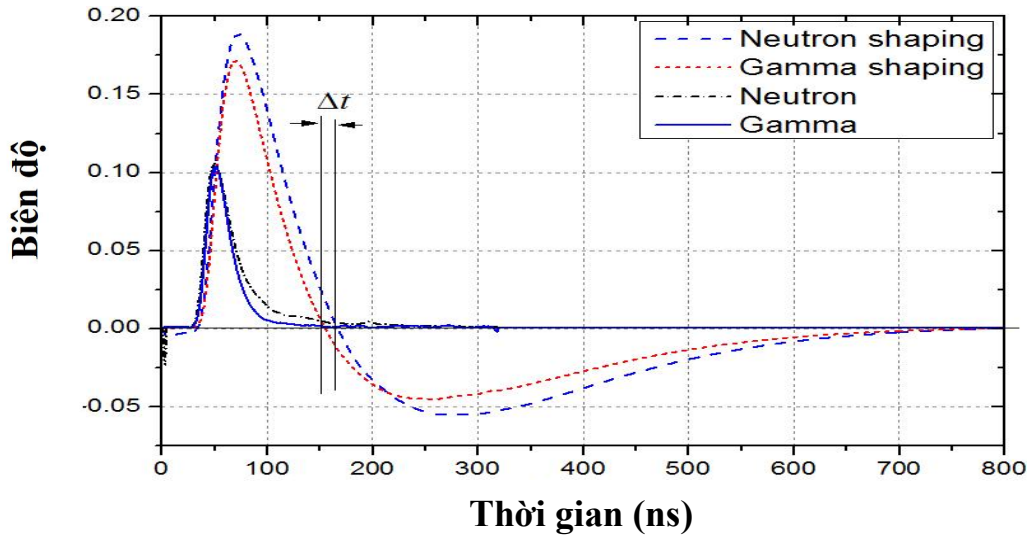
1.5 Phân biệt dạng xung neutron /gamma cho đầu dò nhấp nháy

Dạng xung lồi ra của đầu dò nhấp nháy tương ứng với các sự kiện gây bởi neutron và gamma là khác nhau [1,8]. Do đó ta có thể dựa trên sự khác nhau này để phát hiện sự kiện đó gây bởi neutron hay gamma. Tuy nhiên, về lý thuyết là như vậy, nhưng trên thực tế sự khác biệt về dạng xung là khá nhỏ do đó ta cần có những kỹ thuật chuyên biệt để phân biệt dạng xung.

1.5.1 Các phương pháp phân biệt dạng xung dựa vào điểm cắt không.

Để thực hiện kỹ thuật phân biệt dạng xung dựa vào điểm cắt không. Trước hết ta phải biến đổi xung lồi ra của đầu dò thành dạng xung lưỡng cực. Cách đơn giản và hiệu quả để thực hiện điều này là đưa tín hiệu lồi ra của đầu dò nhấp nháy vào một mạch vi tích phân $(CR)^2$ -RC [4, 7, 9]. Hình 1.4 minh họa cho dạng xung trước và sau khi đi qua bộ tạo dạng xung $(CR)^2$ -RC. Ta có thể thấy xung gamma có tỷ số B/A nhỏ hơn xung neutron, điều này khiến cho xung lưỡng cực tạo thành của các sự kiện ứng với gamma sẽ đi qua ngưỡng không trước xung hình thành từ các xung lồi vào gây bởi neutron.

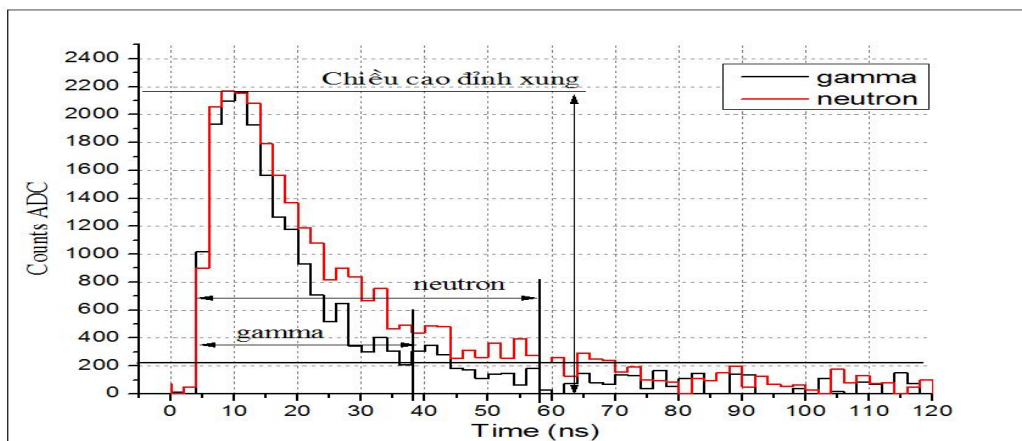
Một trong số các ưu điểm của phương pháp cắt không nằm ở việc hình thành xung lưỡng cực từ xung gốc. Quá trình hình thành xung lưỡng cực không chỉ tạo lại dạng xung mà còn khuếch đại biên độ và loại bỏ đáng kể thành phần nhiễu trong tín hiệu. Điều này có thể được thấy rõ trong Hình 1.4. Biên độ của xung được tăng lên gần gấp đôi, và tín hiệu xung lưỡng cực trong hơn rất nhiều so với tín hiệu xung gốc ban đầu (do thành phần nhiễu đã bị loại bỏ).



Hình 1.4 Xung notron và gamma trước và sau tăng hình thành xung $(CR)^2 - RC$.

1.5.2 Phương pháp phân biệt dạng xung notron/gamma dựa vào thời gian vượt ngưỡng

Như đã phân tích ở mục 1.4, xung gây bởi gamma có thời gian rã ngắn hơn so với xung gây bởi notron. Nếu ta đặt một ngưỡng cắt thích hợp thì thời điểm xung gamma giảm xuống dưới ngưỡng này sẽ sớm hơn thời gian xung notron giảm xuống dưới ngưỡng cắt này [9]. Nhìn chung phương pháp này cũng dựa trên nguyên lý tương tự như phương pháp cắt không. Điều khác biệt nằm ở chỗ phương pháp này không tiến hành tạo lại dạng xung mà tiến hành trực tiếp với xung gốc. Hình 1.5 minh họa cho các mô tả ở trên.

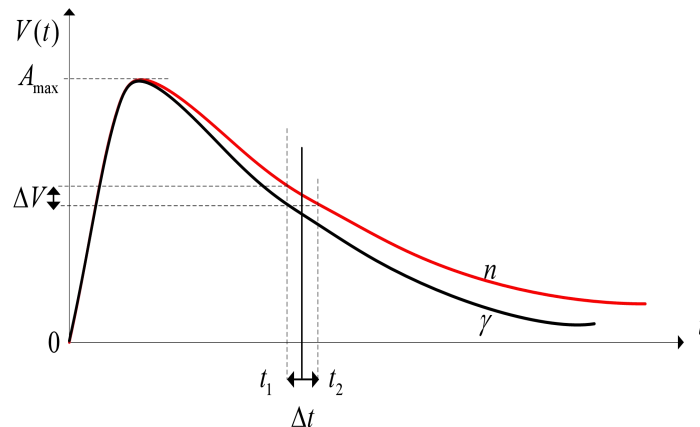


Hình 1.5 Giải đồ phân biệt xung notron/gamma dựa vào thời gian tăng.

Việc sử dụng trực tiếp xung gốc khiến cho phương pháp phân biệt dựa trên thời gian vượt ngưỡng chịu ảnh hưởng nhiều của nhiễu. Tuy nhiên đây là một phương pháp đơn giản, không cần các mạch xử lý phức tạp.

1.5.3 Phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa vào độ dốc xung

Sườn sau của các xung gây bởi neutron và gamma có độ dốc khác nhau, chính vì vậy ta có thể dựa vào đặc trưng này để phân biệt xung neutron và gamma [9]. Hình 1.6 minh họa cho sự khác biệt về độ dốc sườn giảm của xung gây bởi neutron và gamma.

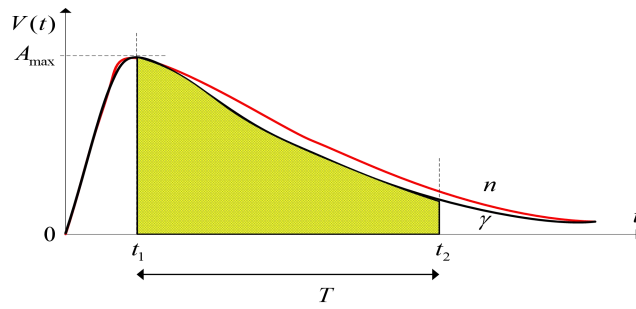


Hình 1.6 Sự khác biệt của độ dốc của sườn giảm của xung gây bởi neutron và gamma.

Độ dốc sườn xung tại thời điểm t có thể được xác định bằng cách lấy đạo hàm của biên độ xung theo thời gian tại thời điểm t . Trong thực tế, việc lấy đạo hàm này được thực hiện đơn giản bằng cách lấy thương của chênh lệch biên độ ΔV giữa hai mốc thời gian t_1 và t_2 cách nhau một khoảng Δt . Độ dốc của xung ứng với sự kiện gây bởi gamma sẽ cao hơn so với độ dốc của xung gây bởi neutron.

1.5.4 Phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa vào diện tích đuôi xung

Hình 1.7 minh họa cho phương pháp phân biệt dựa trên diện tích đuôi xung. Các xung gây bởi gamma có diện tích phần đuôi xung nhỏ hơn các xung gây bởi neutron [2, 5, 7, 10]. Thay vì tính đạo hàm như phương pháp phân biệt dựa trên độ dốc xung, phương pháp dựa vào diện tích tiến hành tích phân biên độ xung trong khoảng thời gian từ t_1 đến t_2 . Việc tính diện tích trên một khoảng thời gian lớn có lợi thế về khả năng giảm nhiễu so với phương pháp sử dụng độ dốc xung.

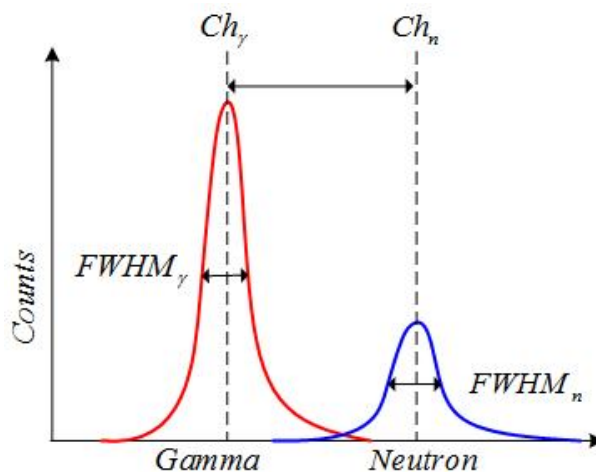


Hình 1.7 Minh họa phương pháp phân biệt dựa trên diện tích đuôi xung.

So với các phương pháp sử dụng các đặc trưng như cắt không, cắt ngưỡng, độ dốc đuôi xung, phương pháp sử dụng diện tích đuôi xung là một phương pháp đơn giản nhưng tin cậy, ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu.

1.6 Đánh giá hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma

Khi áp dụng các phương pháp phân biệt dạng xung vào một xung cụ thể, ta sẽ thu được giá trị tham số đặc trưng. Giá trị tham số đặc trưng này sẽ dùng để xác định xung gây bởi neutron hay gamma [1, 2, 5, 6, 7, 9, 11]. Mặc dù vậy, không có phương pháp phân biệt dạng xung nào có độ chính xác tuyệt đối, do đó ta chỉ có thể ước lượng xung gây bởi gamma hay neutron dựa trên giá trị của tham số đặc trưng.



Hình 1.8 Phổ phân bố tham số PSD neutron/gamma và tính FoM.

Khi đếm thống kê số sự kiện xảy ra theo tham số đặc trưng ta thu được phổ phân bố tham số đặc trưng của phương pháp phân biệt dạng xung. Dạng của phổ này được minh họa trong Hình 1.8. Thông thường nhất ta sẽ quan sát được 2 phân bố gauss, một phân bố gauss cấu thành các sự kiện gây bởi gamma có tâm nằm ở kênh Ch_γ và độ phân giải $FWHM_\gamma$, và một phân bố gauss

cấu thành từ các sự kiện gây bởi neutron có tâm nằm ở kênh Ch_n và độ phân giải $FWHM_n$. Hình 1.8 cho thấy, ta có thể chia giá trị tham số đặc trưng thành 3 vùng, vùng xác suất cao là xung gây bởi gamma, vùng xác suất cao là xung gây bởi neutron, và vùng nằm giữa hai phần bố gauss (vùng giao nhau của hai phần bố) có xác suất gây bởi gamma và neutron tương đương nhau. Các xung có tham số trong vùng này làm các xung không xác định được loại bức xạ.

Để đánh giá một cách định lượng chất lượng phân biệt dạng xung, tham số phân biệt dạng xung của mỗi xung được tính toán; bằng cách thống kê các tham số phân biệt dạng xung sẽ thu được phân bố tham số phân biệt dạng xung gồm hai đỉnh dạng hình gauss. Đại lượng chỉ số phẩm chất (Figure of Merits: FoM) được sử dụng để đánh giá hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma, được định nghĩa như phương trình (1.3) [1, 5,11].

$$FoM = \frac{|ch_n - ch_\gamma|}{FWHM_n + FWHM_\gamma} \quad (1.3)$$

Trong đó: ch_n, ch_γ lần lượt là đỉnh phân bố tham số phân biệt dạng xung của neutron và gamma; $FWHM_n, FWHM_\gamma$ lần lượt là độ rộng nửa chiều cao của phân bố tham số phân biệt dạng xung của neutron và gamma.

Trong công thức tính FoM, ta có thể thấy khoảng cách giữa hai đỉnh của hai phân bố càng lớn thì chỉ số FoM càng lớn, tổng độ phân giải của hai phân bố càng nhỏ thì chỉ số FoM càng lớn. Như vậy FoM càng lớn thì chất lượng của phương pháp phân biệt dạng xung càng tốt.

1.7 Phần mềm mô phỏng Geant4

1.7.1 Giới thiệu chung

Geant4 là một chương trình mô phỏng vận chuyển hạt tiên tiến cho nghiên cứu vật lý hạt nhân, vật lý y khoa và các lĩnh vực liên quan đến bức xạ. Được phát triển bởi CERN, Geant4 đã trở thành một công cụ quan trọng cho việc mô phỏng và nghiên cứu các hiện tượng liên quan đến bức xạ, từ tia X đến các phản ứng hạt nhân phức tạp [3].

Với thiết kế modul và khả năng mở rộng cao, Geant4 cho phép các nhà khoa học tùy chỉnh mô hình mô phỏng của họ để phù hợp với các ứng dụng cụ thể. Nó cũng được tích hợp với các ngôn ngữ lập trình phổ biến như C++,

Python và Java, cho phép người dùng dễ dàng tạo và thực hiện các mô hình phức tạp.

Geant4 sử dụng các thư viện dữ liệu đi kèm để cung cấp thông tin về các quá trình tương tác giữa bức xạ và vật chất, bao gồm cả các quá trình ion hóa, rơi vào các sự kiện hạt nhân, kết thúc của các con tốc độ cao và nhiều hơn nữa [3, 12]. Những thông tin này cho phép các nhà khoa học xác định hiệu quả và độ chính xác của các mô hình mô phỏng của họ.

Geant4 đã được sử dụng rộng rãi trong cộng đồng khoa học và công nghiệp, từ các nghiên cứu cơ bản về vật lý hạt nhân đến các ứng dụng y khoa phức tạp như điều trị ung thư bằng proton. Chương trình cũng có thể được sử dụng để phân tích dữ liệu bức xạ và đảm bảo an toàn trong các hoạt động liên quan đến bức xạ.

Tuy nhiên, vì tính phức tạp của nó, Geant4 đòi hỏi người dùng có trình độ kỹ thuật cao để cài đặt và sử dụng. Ngoài ra, để đạt được độ chính xác cao, cần phải sử dụng các thư viện dữ liệu và các mô hình mô phỏng phức tạp hơn. Do đó, cần có sự đầu tư thời gian và công sức để sử dụng Geant4 hiệu quả.

1.7.2 Cấu trúc chương trình Geant4

Một chương trình Geant4 bao gồm các thành phần cơ bản sau:

Thư viện số liệu tiết diện của các quá trình tương tác xảy ra trong bài toán mô phỏng [3, 13].

Hàm chính (Main): Hàm này là hàm chính của chương trình, nơi chương trình bắt đầu thực thi [3, 13]. Nó tạo ra các đối tượng cần thiết cho mô phỏng dựa trên các modul khác và sau đó chạy trình điều khiển chương trình mô phỏng.

Xây dựng đầu dò (Detector Construction): Thành phần này có thể hiểu như là một modul dùng để mô tả các cấu hình hình học, loại vật liệu sử dụng trong bài toán mô phỏng [3, 13]. Đây là thành phần của chương trình chịu trách nhiệm tạo ra các đối tượng vật lý, như các thước đo, vật liệu, hình dạng và các vật thể khác, để mô phỏng các thí nghiệm hoặc ứng dụng cụ thể.

Danh sách vật lý (Physics List): Đây là thành phần cung cấp thông tin về các quá trình vật lý trong mô hình mô phỏng, bao gồm các quá trình tương

tác giữa bức xạ và vật chất, các quá trình sinh ra hạt, quá trình hấp thụ năng lượng và nhiều hơn nữa.

Hành động khởi tạo chính (Primary Generator Action): Đây là thành phần tạo ra các sự kiện ban đầu trong mô phỏng, bao gồm các loại hạt, phân bố năng lượng và hướng bay của các hạt [3, 13].

Hành động theo dõi quá trình (Run Action): Đây là thành phần chịu trách nhiệm theo dõi quá trình mô phỏng và lưu trữ dữ liệu kết quả của các sự kiện [3, 13].

Hành động tại mỗi sự kiện (Event Action): Đây là thành phần được gọi mỗi khi một sự kiện được thực thi trong quá trình mô phỏng [3, 13]. Nó thực hiện tính toán và thu thập các thông tin về các sự kiện và lưu trữ chúng cho đến khi quá trình mô phỏng kết thúc.

Biểu diễn (Visualization): Đây là thành phần cho phép người dùng trực quan hóa kết quả của mô phỏng, giúp họ hiểu và phân tích dữ liệu dễ dàng hơn [3, 13].

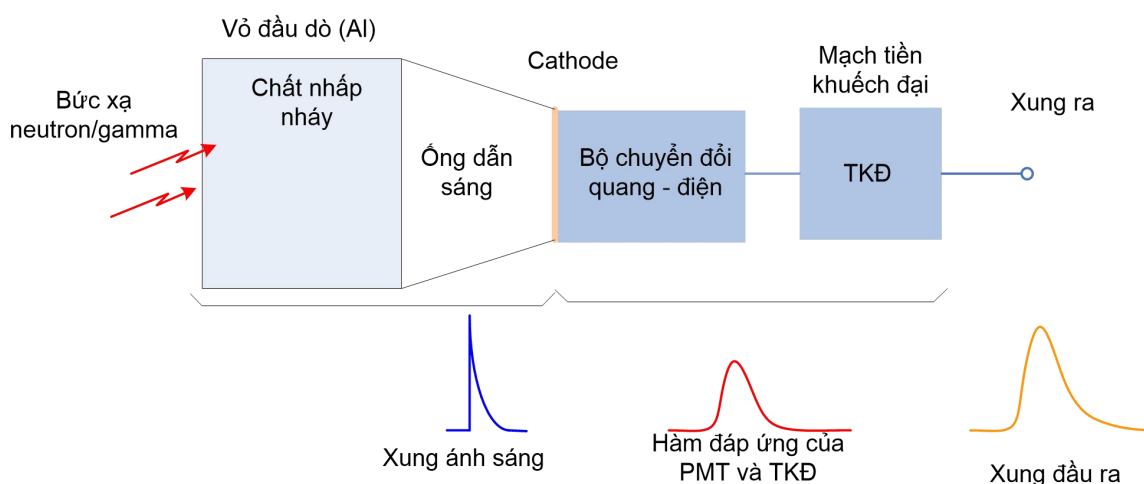
Các thành phần này là các thành phần cơ bản của một chương trình Geant4. Tuy nhiên, người dùng có thể tùy chỉnh và thêm các thành phần khác để phù hợp với nhu cầu của họ.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Mô hình đầu dò nhấp nháy EJ-301

2.1.1 Mô hình chung

Cấu trúc chung của một đầu dò nhấp nháy ghi đo bức xạ neutron/gamma được trình bày trên Hình 2.1. Theo tính chất của tín hiệu có thể xem như đầu dò gồm hai phần: Phần hình thành xung ánh sáng và hình thành xung điện. Phần hình thành xung ánh sáng gồm khối tính thể nhấp nháy (thể tích chứa chất nhấp nháy EJ-301; gọi tắt là Cell nhấp nháy) và ống dẫn sáng (ODS). Phần hình thành xung điện gồm bộ chuyển đổi quang – điện (thường sử dụng PMT hoặc SiPM) và TKĐ.



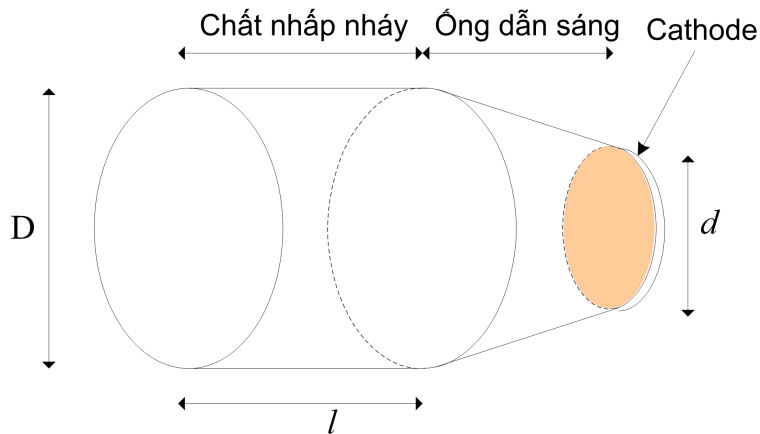
Hình 2.1 Mô hình mô phỏng xung của đầu dò nhấp nháy EJ-301.

Cơ chế hình thành một xung khi một bức xạ được ghi nhận bởi đầu dò có thể mô tả như sau:

Khi bức xạ đi vào thể tích nhấp nháy (Cell EJ-301), nếu tương tác với chất nhấp nháy xảy ra, các photon ánh sáng được tạo ra trong chất nhấp nháy. Các photon hoặc được truyền trực tiếp đến ống dẫn sáng, hoặc phản xạ, khúc xạ trên các mặt biên của Cell nhấp nháy trước khi đi đến ống dẫn sáng. Các photon có thể xảy ra hiện tượng phản xạ, khúc xạ trên ống dẫn sáng trước khi đi đến cửa sổ nhạy quang của thiết bị chuyển đổi quang – điện [1, 4]. Tại cathode, mỗi photon nhận được, các quang điện tử được tạo ra và nhân lên qua các dinode; cuối cùng các quang điện tử được thu gom tại anode, hình thành nên xung điện. Về nguyên tắc, số quang điện tử nhận được tại anode tỉ

lệ với số photon nhận được tại cathode. Mặt khác, số photon nhận được tại cathode tỉ lệ với năng lượng kích thích chất nhấp nháy (năng lượng để lại trong chất nhấp nháy khi bức xạ tương tác với nó). Do đó, số quang điện tử thu được thể hiện năng lượng bức xạ để lại trong Cell nhấp nháy.

Các xung từ PMT có biên độ khá nhỏ và có hình dạng không phù hợp cho việc xử lý và ghi nhận, do đó các TKĐ được sử dụng cho mục đích khuếch đại biên độ đồng thời hình thành xung có hình dạng phù hợp cho các khối xử lý tiếp theo như phân biệt xung neutron/gamma, ghi nhận phổ biên độ. Về mặt toán học, khối chuyển đổi quang - điện kết hợp với TKĐ có thể được mô tả bằng một hàm đáp ứng chung $F_R(p)$. Xung đầu ra của đầu dò là $F_O(p)$ là kết quả của tích chập hàm ánh sáng với hàm đáp ứng $F_R(p)$.



Hình 2.2 Mô hình đầu dò EJ-301 được xây dựng trong Geant4.

Để xây dựng mô hình đầu dò nhấp nháy trong Geant4, các khối hình học gồm: Cell nhấp nháy, ống dẫn sáng và cathode cần được xây dựng. Mô hình chung của các đầu dò kích thước cell nhấp nháy khác nhau được mô tả như Hình 2.2. Phần chuyển đổi quang - điện và TKĐ sẽ được thực hiện bởi hàm tích chập thông qua hàm đáp ứng của của nó đối với xung từ cathode. Các đầu dò có kích thước tinh thể được xác định bởi tham số D (đường kính của cell nhấp nháy) và l (chiều cao của cell nhấp nháy hình trụ). Ống dẫn sáng có kích thước được xác định bởi D (đường kính mặt lớn) và d (đường kính mặt nhỏ). Cửa sổ nhạy quang, được thiết kế dạng hình tròn đường kính được xác định bởi tham số d . Tham số d được mô phỏng với các kích thước cửa sổ dẫn quang của một số PMT thông dụng hiện nay.

2.1.2 Mô hình đầu nhấp nháy

Đầu nhấp nháy chứa chất nhấp nháy EJ-301, là vùng để ghi nhận các bức xạ neutron/gamma. Khi một bức xạ tương tác với chất nhấp nháy, các photon được sinh ra và lan truyền trong chất nhấp nháy [1, 3, 4, 13]. Để đánh giá hiệu quả phân biệt neutron/gamma, 08 mô hình đầu nhấp nháy được xây dựng có kích thước được mô tả như Hình 2.3. Đầu nhấp nháy EJ-301 được thiết kế gồm ba thành phần: lớp vỏ, khối nhấp nháy và cửa sổ dẫn quang. Lớp vỏ được thiết kế có dạng hình trụ rỗng, sử dụng vật liệu nhôm (Al) với bề dày 1,5 mm. Bên trong đầu nhấp nháy được lấp đầy bằng chất nhấp nháy lỏng EJ-301 với thể tích khác nhau trên các đầu nhấp nháy khác nhau. Cửa sổ dẫn sáng được sử dụng chất liệu thủy tinh với các kích thước phù hợp để ghép với đầu nhấp nháy. Dựa trên các kích thước phổ biến của PMT, 8 đầu dò có kích thước khác nhau được thiết kế gồm:

Đầu dò 1 – Det 1: đường kính khối nhấp nháy: 34 mm, chiều dài: 25 mm.

Đầu dò 2 – Det 2: đường kính khối nhấp nháy: 34 mm, chiều dài: 50 mm.

Đầu dò 3 – Det 3: đường kính khối nhấp nháy: 50 mm, chiều dài: 50 mm.

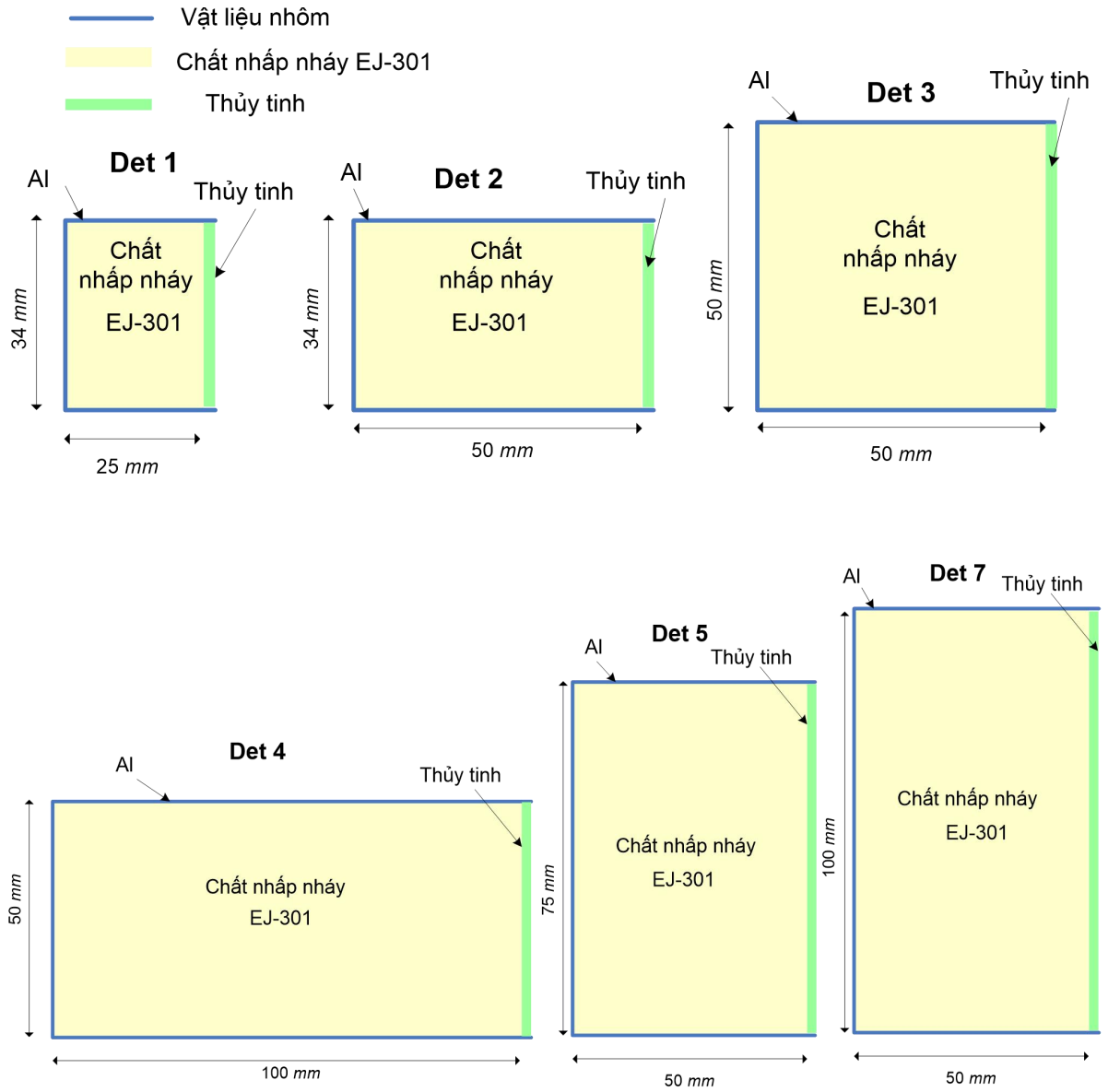
Đầu dò 4 – Det 4: đường kính khối nhấp nháy: 50 mm, chiều dài: 100 mm.

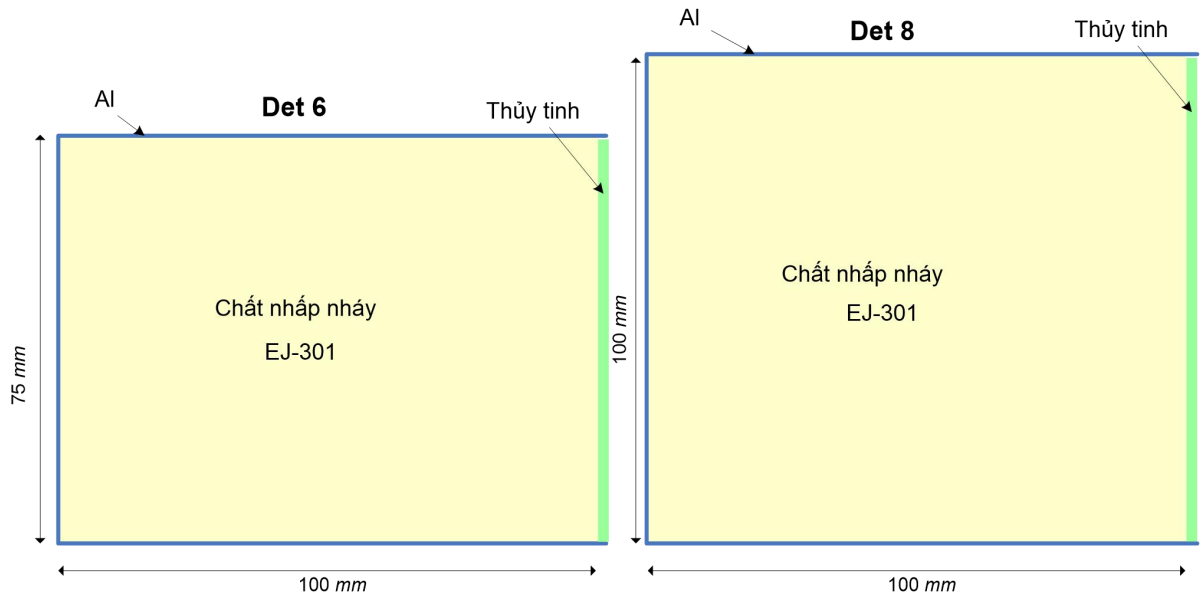
Đầu dò 5 – Det 5: đường kính khối nhấp nháy: 75 mm, chiều dài: 50 mm.

Đầu dò 6 – Det 6: đường kính khối nhấp nháy: 75 mm, chiều dài: 100 mm.

Đầu dò 7 – Det 7: đường kính khối nhấp nháy: 100 mm, chiều dài: 50 mm

Đầu dò 8 – Det 8: đường kính khối nhấp nháy: 100 mm, chiều dài: 100 mm





Hình 2.3 Các mô hình cell nhấp nháy.

2.1.3 Mô hình ống dẫn sáng

Ống dẫn sáng được thiết kế để dẫn các photon sinh ra từ chất nhấp nháy đến cathode của PMT. Một đầu của ống dẫn sáng ghép nối với cửa sổ của đầu nhấp nháy, đầu còn lại ghép nối với cửa sổ của ống nhân quang. Do đó, kích thước của ống dẫn sáng được thiết kế phù hợp với kích thước của đầu nhấp nháy và ống nhân quang điện. Dựa trên kích thước thông dụng của PMT hiện nay, hai đường kính của mô hình PMT là 34 mm và 50,8 mm được sử dụng trong các mô hình ống dẫn sáng này. Để đơn giản việc tính toán, tất cả các ống dẫn sáng được xây dựng có chiều dài 50 mm. Với kích thước đường kính của đầu thứ nhất cùng với đường kính của khối nhấp nháy và đường kính thứ hai cùng kích thước với cửa sổ của PMT. Bốn kiểu ống dẫn sáng được thiết kế có hình dạng và kích thước như Hình 2.4.

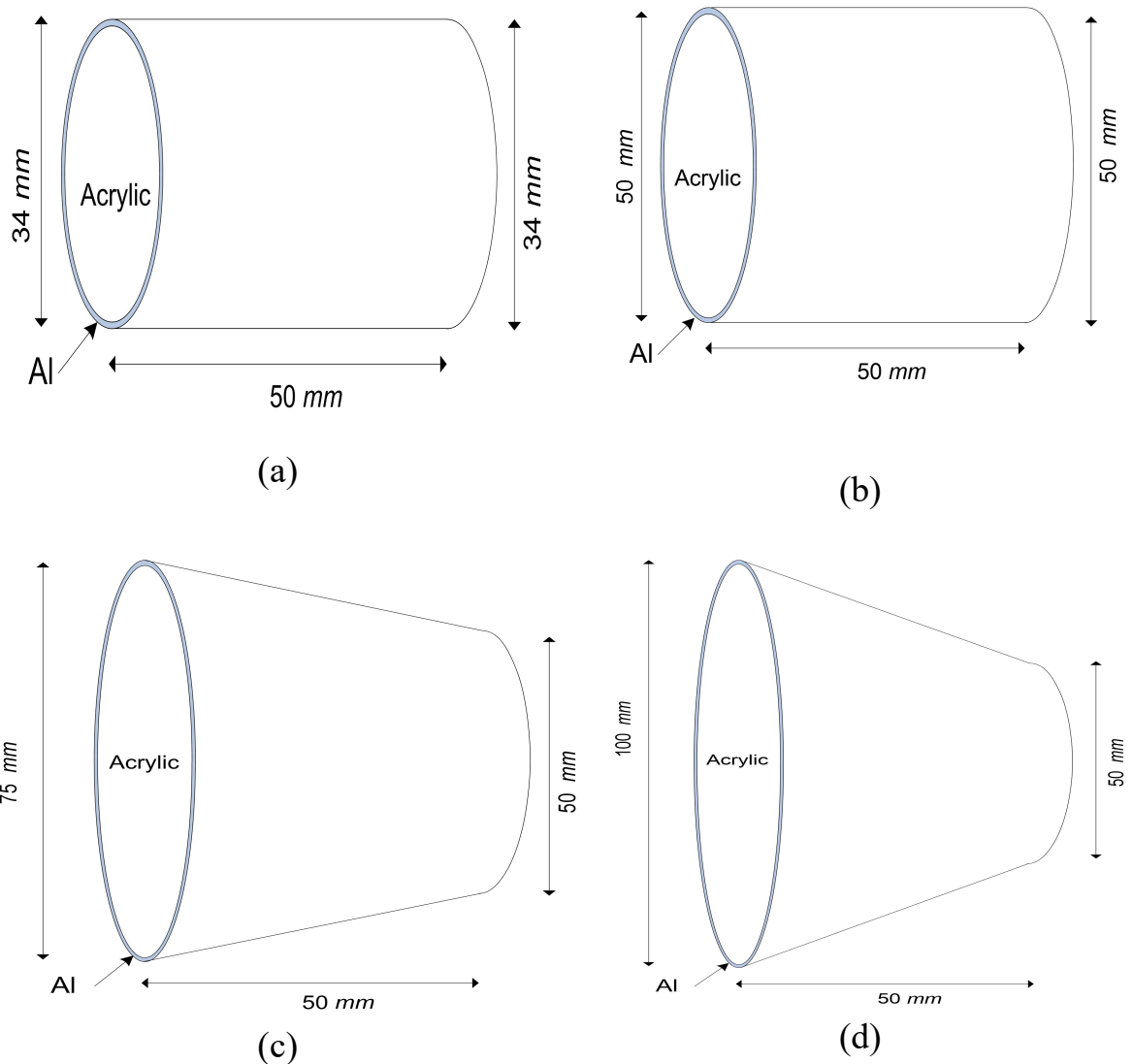
Loại 1 – sử dụng cho các đầu nhấp nháy có đường kính 34 mm (Det 1 và Det 2) ghép nối với PMT có đường kính 34 mm.

Loại 2 - sử dụng cho các đầu nhấp nháy có đường kính 50 mm (Det 3 và Det 4) ghép nối với PMT có đường kính 50,8 mm.

Loại 3 - sử dụng cho các đầu nhấp nháy có đường kính 75 mm (Det 5 và Det 6) ghép nối với PMT có đường kính 50,8 mm.

Loại 4 - sử dụng cho các đầu nhấp nháy có đường kính 100 mm (Det 7 và Det 8) ghép nối với PMT có đường kính 50,8 mm.

Vật liệu thủy tinh hữu cơ (Acrylic) được sử dụng trong ống dẫn sáng, tất cả các bề mặt trên ống dẫn sáng được đánh bóng. Lớp vỏ được làm bằng vật liệu nhôm, dày 1,5 mm bao xung quanh mặt bên của hình trụ/ hình nón cụt. Hai mặt đáy của hình trụ/ nón cụt được để hở để ghép nối với cửa sổ nhấp nháy và PMT.



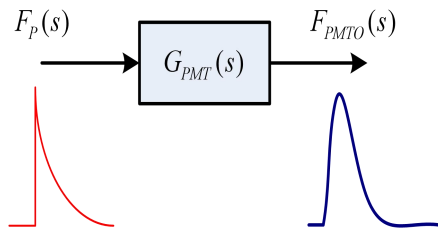
Hình 2.4 Mô hình ống dẫn sáng cho các đầu dò: (a) Det 1 và Det 2, (b) Det 3 và Det 4, (c) Det 5 và Det 6, (d) Det 7 và Det 8.

2.1.4 Mô hình ống nhân quang

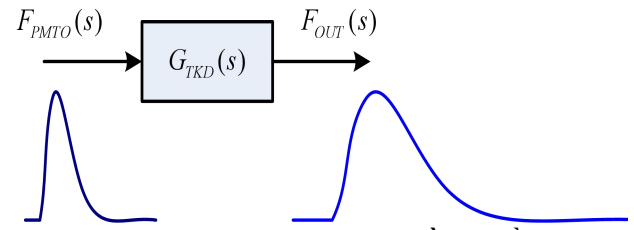
Ống nhân quang có vai trò chuyển đổi các nhấp sáng nhận được ở cathode thành tín hiệu điện ở anode. Mỗi photon được hấp thụ bởi cathode, sẽ

sinh ra một số quang điện tử; các quang điện tử được gia tốc để đập đến dynode tiếp theo và sinh ra nhiều quang điện tử hơn nữa; qua các tầng dynode tiếp theo, các quang điện tử tiếp tục được nhân lên; tại anode, số quang điện tử được nhân lên nhiều lần so với quang điện tử được sinh ra tại cathode, được mô tả bằng hệ số nhân quang. Hệ số nhân quang thường nằm trong khoảng 10^5 đến 10^6 lần, tùy thuộc vào số tầng dynode và loại PMT. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng ống nhân quang Hamamatsu R9420 có hệ số khuếch đại quang $5,5 \cdot 10^5$ [14].

Trong mô hình được xây dựng, PMT có thể được mô tả bằng một đối tượng có hàm truyền $G_{PMT}(s)$, mà đầu ra là tích của hàm truyền với tín hiệu đầu vào được biểu diễn như Hình 2.5 và Hình 2.6. .

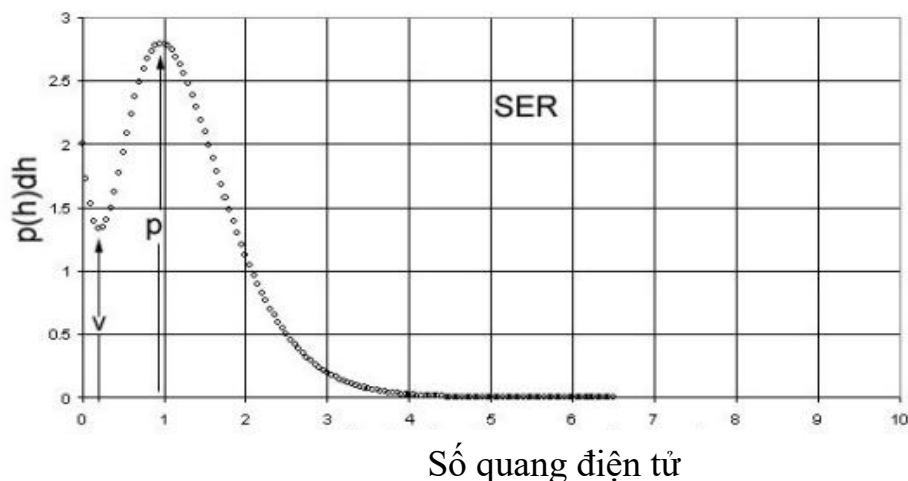


Hình 2.5 Mô hình hàm truyền PMT.



Hình 2.6 Mô hình hàm truyền TIỀN KHUẾCH ĐẠİ.

Đáp ứng của PMT được mô tả như một hàm dạng hình Gaussian [15], là kết quả đáp ứng đo được của từng photon đơn lẻ đối với PMT. Đáp ứng đầu ra của đơn photon điểm hình có dạng như được trình bày trên Hình 2.7 [16]. Phân bố này là kết quả của các quá trình vật lý xảy ra trong PMT khi cathode nhận được một photon và sinh ra quang điện tử.



Hình 2.7 Đáp ứng đơn photon đối với PMT [16].

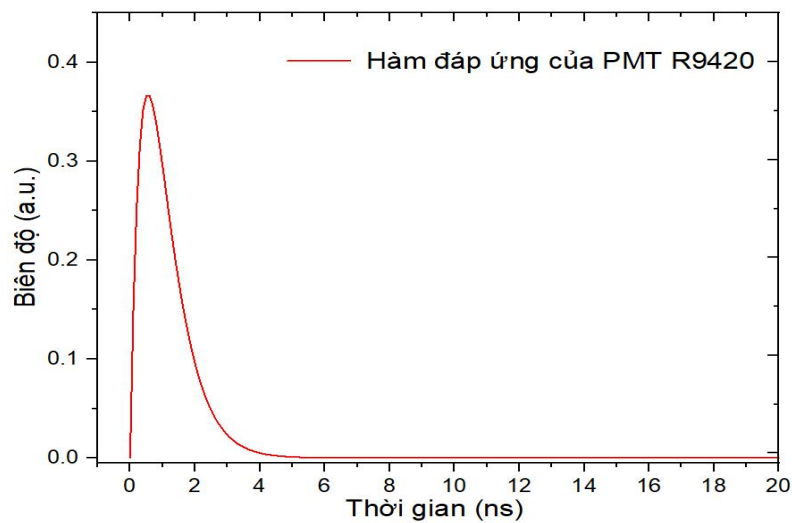
Với các PMT thông dụng, hàm đáp ứng được mô tả bởi công thức (2.1) [16] như sau:

$$V \sim \frac{t}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (2.1)$$

Trong đó: V là hàm phân bố biên độ đầu ra của PMT đối với các photon đơn lẻ theo thời gian t ; τ là thời hằng đáp ứng của PMT, phụ thuộc vào từng loại PMT.

Đối với PMT Hamamatsu R9420, thời hằng $\tau = 0,55$ ns [14], hàm đáp ứng có thể viết dưới dạng (2.2) như sau:

$$V_{PMT} \sim \frac{t}{0.55} e^{-t/0.55} \quad (2.2)$$



Hình 2.8 Hàm đáp ứng của PMT R9420.

Hàm đáp ứng của tiền khuếch đại

Mô hình mạch tiền khuếch đại được mô tả gồm hai khối chính: khối khuếch đại và lọc nhiễu điện tử tần số cao. Khối khuếch đại có thể được biểu diễn bằng hệ nhân A. Bộ lọc nhiễu tần số cao có thể sử dụng một mô hình bộ lọc Sallen-key thông thấp và một bộ lọc RC lõi ra; được mô tả bằng hàm truyền dạng (2.3).

$$V_{TKD}(s) = \frac{A_1}{\tau_{sl}^2 s^2 + \tau_{sl}(3 - A_1)s + 1} \cdot \frac{1}{1 + \tau_1 s} \quad (2.3)$$

Trong đó, τ_{sl} là thời hằng của mạch lọc Sallen-key thông thấp; A_1 là hệ số khuyết đại của mạch lọc Sallen-key; τ_1 là thời hằng bộ lọc RC đầu ra.

Nếu A_1 được thiết kế 1.59; τ_{sl} được thiết kế 7,05 ns; τ_1 được thiết kế 10 ns. ,

Khi đó, hàm đáp ứng của tổng của mạch tiền khuếch đại được viết trong miền tần số phức như sau:

$$V_{TKD}(s) = \frac{0,0032}{s^3 + 0,3s^2 + 0,04s + 0,002} \quad (2.4)$$

Hàm đáp ứng đầu ra của mô hình đầu dò gồm đáp ứng của PMT và của mạch TKĐ, được tính là tích chập của hàm đáp ứng PMT với đáp ứng của TKĐ:

$$V_P = V_{PMT}(t) \otimes V_{TKD}(t) \quad (2.5)$$

Tích chập của $V_{PMT}(t)$ và $V_{TKD}(t)$ được tính thông qua hàm truyền trong biến đổi Laplace.

Hàm truyền của $V_{PMT}(t)$ trong miền tần số phức (s) được viết thành (2.6)

$$V_{PMT}(s) = \frac{1}{(1 + 0,55s)^2} \quad (2.6)$$

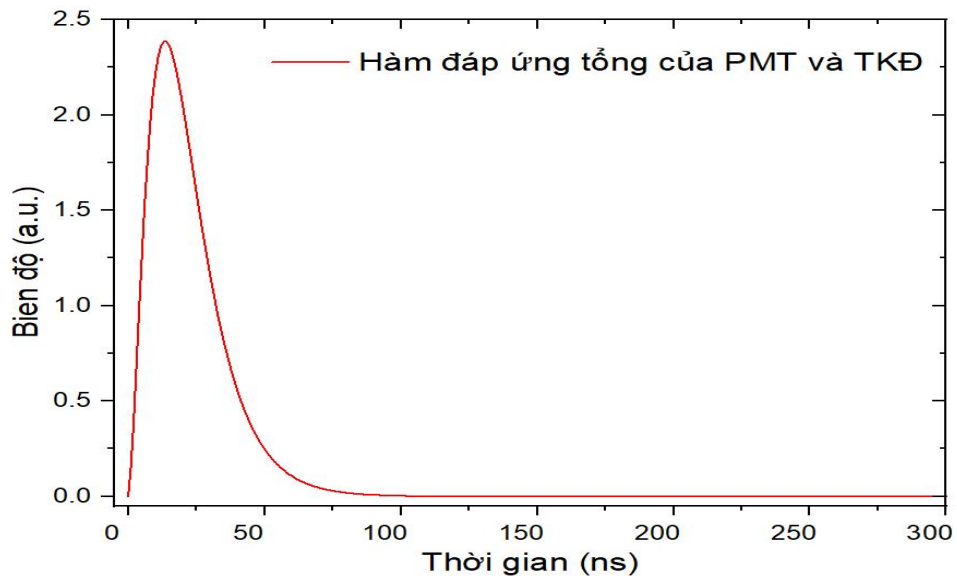
Trong đó: $s = \sigma + j\omega$ là biến phức; σ , ω tương ứng là phần thực và phần ảo của số phức; j là đơn vị ảo.

Khi đó, đáp ứng chung của TMT và TKĐ được tính bởi (2.7)

$$V_P(t) = V_{PMT}(t) \otimes V_{TKD}(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{(1 + 0,55s)^2} \cdot \frac{0,0032}{s^3 + 0,3s^2 + 0,04s + 0,002} \right] \quad (2.7)$$

$$V_P(t) = 0,0032((-55,42 - 6,47j)e^{-(0,1+0,1j)t} - (55,42 - 6,47j)e^{-(0,1-0,1j)t} + 111,979e^{-0,1t} - e^{-1,818t}(1,13 + 0,649t)).$$

Hàm đáp ứng tổng V_p , gồm hàm đáp ứng của PMT và hàm đáp ứng của tiền khuếch đại có dạng như trên Hình 2.9.



Hình 2.9 Hàm đáp ứng tổng gồm PMT và TKĐ.

2.2 Xây dựng mô hình đầu dò nhấp nháy trong Geant4

Đầu dò nhấp nháy EJ-301 được xây dựng trong Geant4 gồm 4 thành phần chính: đầu ghi, ống dẫn sáng và PMT. Mỗi đầu dò có kích thước nhấp nháy và ống dẫn sáng khác nhau được xây dựng trên một chương trình riêng biệt. Vật liệu và hình học của các thành phần của đầu ghi EJ-301 được khai báo trong lớp *EJ301DetectorConstruction()* của chương trình mô phỏng Geant4. Lớp này được xây dựng khác nhau cho 8 mô hình đầu ghi.

2.2.1 Mô tả vật liệu

Tất cả các vật liệu sử dụng trong mô hình đầu dò cần được khai báo dựa trên một trong ba kiểu định nghĩa: định nghĩa hợp chất theo các thành phần hóa học, định nghĩa vật liệu theo phần trăm thành phần khối lượng, vật liệu định nghĩa từ cơ sở dữ liệu NIST (National Institute of Standards and Technology) [24].

Các định nghĩa hợp chất dựa trên thành phần hóa học được khai báo trong lớp chuẩn *G4Element()* và *G4Material()*.

Môi trường đặt đầu dò: môi trường xung quanh nơi đặt đầu dò là không khí được định nghĩa thông qua thư viện chuẩn NIST.

```
// world mat
```

```

G4NistManager* nist = G4NistManager::Instance();
world_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
G4double energy[2] = {1.239841939*eV/0.2, 1.239841939*eV/0.9};
G4double rindexWorld[2] = {1.0, 1.0};
G4MaterialPropertiesTable *mptWorld = new G4MaterialPropertiesTable();
mptWorld->AddProperty("RINDEX", energy, rindexWorld, 2);
world_mat->SetMaterialPropertiesTable(mptWorld);

```

Vật liệu nhấp nháy EJ-301 có thể khai báo thông qua nguyên tố hydro và cacbon với đoạn mã như sau:

```

// Định nghĩa các nguyên tố cho vật liệu EJ-301 xylen (C8H10)
a = 1.00794*g / mole;
elHydrogen = new G4Element("Hydrogen", symbol = "H", z = 1., a);
a = 12.0107*g / mole;
elCarbon = new G4Element("Carbon", symbol = "C", z = 6., a);
density = 0.874*g / cm3;
EJ301 = new G4Material("Cell_EJ_301", density, ncomp = 2);
EJ301->AddElement(elHydrogen, fracMass = 9.2*perCent);
EJ301->AddElement(elCarbon, fracMass = 90.8*perCent);

```

Cửa sổ của đầu nhấp nháy

Vật liệu sử dụng làm cửa sổ của tất cả các cell nhấp nháy được làm bằng thủy tinh có thành phần chính là SiO₂ được định nghĩa như sau:

```

a = 28.0855*g / mole;
elSilicium = new G4Element("Silicium", symbol = "Si", z = 14., a);
a = 15.9994*g / mole;
elOxygen = new G4Element("Oxygen", symbol = "O", z = 8., a);
density = 2.648*g / cm3;
Quartz = new G4Material("Glass", density, ncomp = 2);

```

```
Quartz->AddElement(elOxygen, 2);
```

```
Quartz->AddElement(elSilicium, 1);
```

Vỏ đầu dò nhấp nháy: vỏ của các cell nhấp nháy và ống dẫn sáng được thiết kế sử dụng vật liệu nhôm (Al). Vật liệu làm vỏ đầu dò được định nghĩa bởi đoạn mã như sau:

```
a = 26.9815*g / mole;
```

```
elAluminium = new G4Element("Aluminium", symbol = "Al", z = 13., a);
```

```
density = 2.6989*g / cm3;
```

```
det_shell_mat = new G4Material("Container NE213", density, ncomp = 1);
```

```
det_shell_mat->AddElement(elAluminium, fracMass = 100.*perCent);
```

Vật liệu sử dụng làm cathode trên PMT có thành phần chính là K_2CsSb , được định nghĩa thông qua các nguyên tố Sb, Cs và K như đoạn mã như sau:

```
a = 121.76*g / mole;
```

```
G4Element* Sb = new G4Element("Antimony", symbol = "Sb", z = 51.,  
a);
```

```
// Cs
```

```
a = 132.905*g / mole;
```

```
G4Element* Cs = new G4Element("Cesium", symbol = "Cs", z = 55., a);
```

```
// K
```

```
a = 39.0983*g / mole;
```

```
G4Element* K = new G4Element("Potassium", symbol = "K", z = 19., a);
```

```
// Photocathode Material
```

```
// (Bialkali K2CsSb, Density, Thickness=25.*nm?)
```

```
density = 2.00*g / cm3;
```

```
K2CsSb = new G4Material("K2CsSb", density, ncomp = 3);
```

```
K2CsSb->AddElement(K, 2);
```

```
K2CsSb->AddElement(Cs, 1);
```

```
K2CsSb->AddElement(Sb, 1);
```

2.2.2 Xây dựng mô hình tinh thể nhấp nháy

Các đầu nhấp nháy EJ-301 được xây dựng gồm vỏ đầu nhấp nháy, khối nhấp nháy và cửa sổ ghép quang. Tất cả 08 đầu nhấp nháy của Det 1 ÷ Det 8 được xây dựng đều có dạng hình trụ đặc. Khối nhấp nháy bên trong có dạng hình trụ đặc được làm bằng vật liệu EJ-301. Lớp vỏ bên ngoài được là bằng vật liệu nhôm có dạng là một hình trụ rỗng, với một đầu bịt kín.

Vỏ đầu nhấp nháy có dạng hình trụ rỗng với một đáy bằng vật liệu nhôm, được đặt tên “cell_contain”. Vỏ đầu nhấp nháy được xây dựng trong chương trình bằng đoạn mã sau:

```
// Container

G4ThreeVector contain_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, 0.*cm);

// contain được đặt ở chính giữa t

G4Tubs* Cell_solid = new G4Tubs("cell_contain",

    ScintRadius, ContainerRadius, ContainerHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);

G4LogicalVolume* logiccontain =

    new G4LogicalVolume(Cell_solid, //its solid

                        det_shell_mat, //its

G4VPhysicalVolume* physiContain = new G4PVPlacement(0,

//no rotation

    contain_pos, //at position

    logiccontain, //its logical volume

    "cell_contain", //its name

    logicWorld, //its mother volume

    false, //no boolean operation

    0); //copy number

//checkOverlaps); //overlaps checking
```

Mặt trước của vỏ đầu nhấp nháy:

```
G4ThreeVector front_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, -
(ContainerHalfLength + 0.5*ContainerThickness)); //ContainerThickness = 1
mm
```

```
G4Tubs* Front_contain_solid =
    new G4Tubs("Front_contain",
    0, ContainerRadius, 0.5*ContainerThickness, StartPhi, DeltaPhi);
```

```
G4LogicalVolume* logicFront_contain =
    new G4LogicalVolume(Front_contain_solid, //its solid
    det_shell_mat, //its material
    "Front_contain"); //its name
```

```
G4VPhysicalVolume* physiFront_contain = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
    front_pos, //at position
    logicFront_contain, //its logical volume
    "Front_contain", //its name
    logicWorld, //its mother volume
    false, //no boolean operation
    0); //copy number
```

Khôi nhập nháy:

```
G4ThreeVector cell_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, 0.*cm);
```

```
G4Tubs* solidcell_EJ301 =
    new G4Tubs("cell_EJ301", //its name
    0, ScintRadius, ScintHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
```

```
G4LogicalVolume* logiccell_EJ301 =
    new G4LogicalVolume(solidcell_EJ301, //its solid
    EJ301, //its material Ej-301
    "cell_EJ301"); //its name
```

```
//-----
G4VPhysicalVolume* physiCrystalCellEJ301 =
new G4PVPlacement(0,          //no rotation
cell_pos,                    //at position
logiccell_EJ301,            //its logical volume
"cell_EJ301",                //its name
logicWorld,                  //its mother volume
false,                       //no boolean operation
0);                           //copy number
```

Định nghĩa cửa sổ ghép quang:

```
G4Tubs* solidQuartz = new G4Tubs("Win_Quartz", 0, PMTWindowRadius,
PMTWindowHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
G4LogicalVolume* logicBack = new G4LogicalVolume(solidQuartz, Quartz,
"Win_Quartz");
G4VPhysicalVolume* physiPMTWindow = new G4PVPlacement(0,
back_pos, logicBack, "Win_Quartz", logicWorld, false, 0, checkOverlaps);
```

2.2.3 Xây dựng mô hình ống dẫn sáng

Mô hình ống dẫn sáng được xây dựng gồm hai phần, vật liệu dẫn sáng và vỏ bọc xung quanh chắn sáng. Vật liệu dẫn sáng được sử dụng thủy tinh hữu cơ, vỏ bọc ống dẫn sáng sử dụng vật liệu nhôm.

Khai báo vật liệu dẫn sáng:

```
// Ống dẫn sáng (acrylic)
fH = new G4Element("H", "H", z=1., a=1.01*g/mole);
fC = new G4Element("C", "C", z=6., a=12.01*g/mole);
fGlass = new G4Material("Glass", density=1.032*g/cm3,2);
fGlass->AddElement(fC,91.533*perCent);
fGlass->AddElement(fH,8.467*perCent);
```

Định nghĩa hình học của khối dẫn sáng

```
G4Cons* WinContai = new G4Cons("Win_Container",ScintRadius,
ContainerRadius,CathodeRadius,CathodeRadius+ContainerThickness,
PMTWindowHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
```

```
G4LogicalVolume* logicContai = new G4LogicalVolume(WinContai,
//its solid
```

```
det_shell_mat, //its material Glass
```

```
"Win_Container"); //its name
```

```
G4VPhysicalVolume* physiWindowContai = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
```

```
back_pos, //at position
```

```
logicContai, //its logical volume
```

```
"Win_Container", //its name
```

```
logicWorld, //its mother volume
```

```
false, //no boolean operation
```

```
0);
```

Trong đó: một mặt trụ của ống dẫn sáng có đường kính (*ScintRadius*), bằng với đường kính của khối nhấp nháy; mặt còn lại của hình trụ có đường kính bằng với đường kính của của sổ PMT (*CathodeRadius*).

Định nghĩa hình học của vỏ ống dẫn sáng:

```
G4Cons* WinContai = new G4Cons("Win_Container",ScintRadius,
ContainerRadius,CathodeRadius,CathodeRadius+ContainerThickness,
PMTWindowHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
```

```
G4LogicalVolume* logicContai = new G4LogicalVolume(WinContai,
//its solid
```

```
det_shell_mat, //its material Glass
```

```
"Win_Container"); //its name
```

```
G4VPhysicalVolume* physiWindowContai = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
```

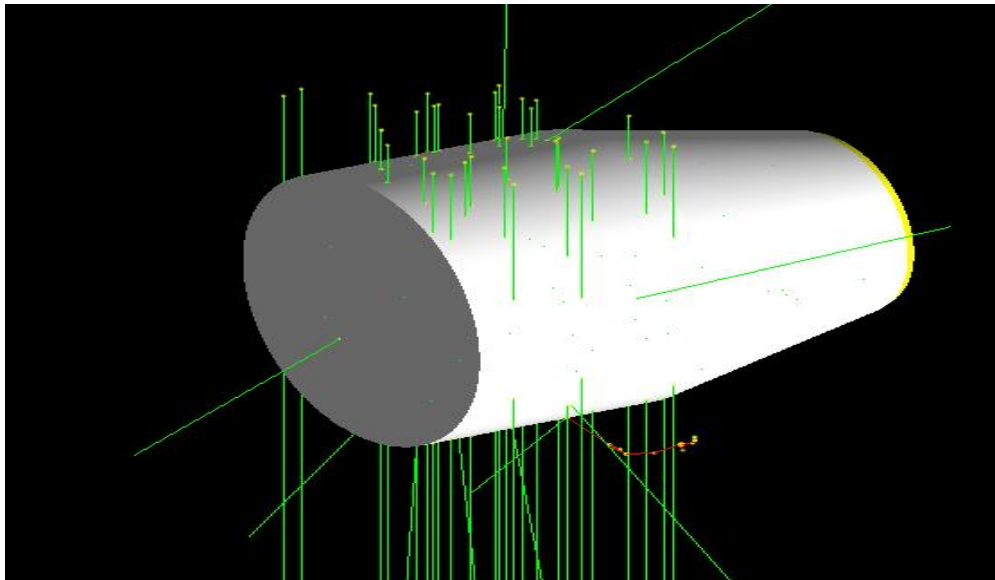
```
back_pos, //at position
```



```

logicContai,           //its logical volume
"Win_Container",      //its name
logicWorld,           //its mother volume
false,                //no boolean operation
0);

```



Hình 2.10 Mô hình đầu dò Det 5 trong Geant4.

2.2.4 Xây dựng mô hình Ống nhân quang và hàm đáp ứng

Mô hình Cathode của PMT được xây dựng là một khối đặc có dạng hình trụ với hai loại đường kính: 34 mm và 50 mm. Đoạn mã định nghĩa cathode của PMT được khai báo như sau:

```

G4Tubs* solidCathode = new G4Tubs("Cathode", 0.*cm, CathodeRadius,
    CathodeHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);

```

```

// K2CsSb

```

```

G4LogicalVolume* logicCathode = new G4LogicalVolume(solidCathode,
    K2CsSb, "logicCathode");

```

```

G4ThreeVector positionCathode = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm,
    ScintHalfLength + 2*PMTWindowHalfLength + CathodeHalfLength);

```

```
G4VPhysicalVolume* physCathode = new G4PVPlacement(0,
positionCathode, logicCathode,
```

```
"logicCathode", logicWorld, false, 0);
```

Trong đó: *CathodeRadius* là đường kính của cathode, là 34 mm hoặc 50 mm; *CathodeHalfLength* là bề dày của cathode, được đặt cố định là 1 mm.

Cathode được mô phỏng như một vật hấp thụ toàn bộ các photon nhấp nháy nhận được (hiệu suất hấp thụ 100%) mà không phản xạ, tán xạ hoặc truyền qua. Đặc tính bề mặt của cathode của PMT được định nghĩa như đoạn mã sau:

```
G4OpticalSurface* OpCryPMTWinSurface = new
```

```
G4OpticalSurface("CryPMTWinSurface"); // tên bề mặt
```

```
OpCryPMTWinSurface->SetType(dielectric_dielectric);
```

```
OpCryPMTWinSurface->SetModel(glisur);
```

```
OpCryPMTWinSurface->SetFinish(polished); // bề mặt được đánh bóng
```

```
G4LogicalBorderSurface* CryPMTWinSurface =
```

```
new G4LogicalBorderSurface("CryPMTWinSurface",
```

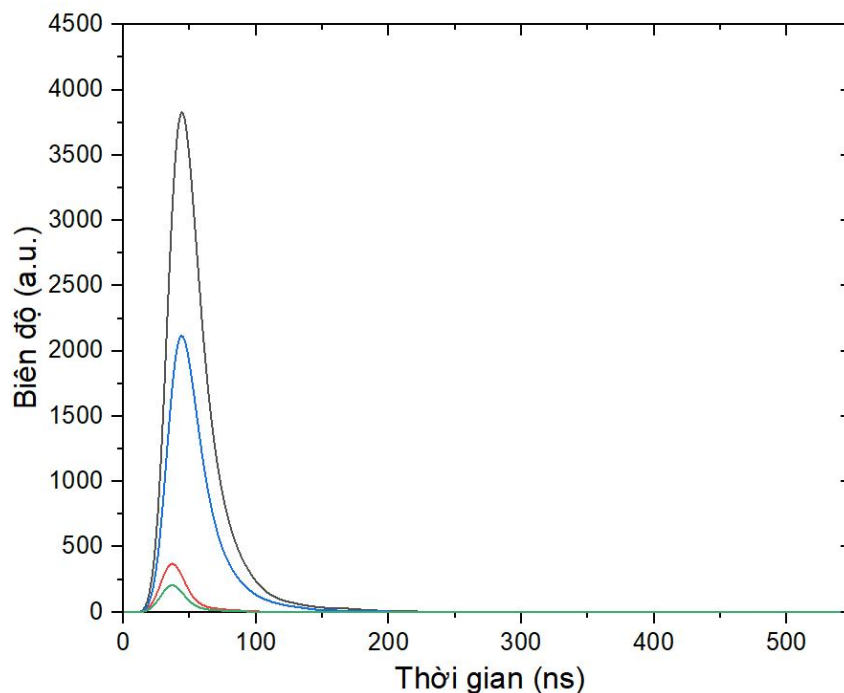
```
physiCrystalCelleJ301, physiPMTWindow, OpCryPMTWinSurface);
```

2.3 Mô phỏng xung neutron và gamma từ đầu dò EJ-301

Khi bức xạ đi vào và tương tác với các phần tử chất nhấp nháy của đầu dò, một phần năng lượng của bức xạ để lại trong chất nhấp nháy. Do cơ chế tương tác chủ yếu là tán xạ đàn hồi, nên gamma tán xạ đàn hồi với các điện tử tạo ra các điện tử giật lùi. Trong khi neutron tán xạ đàn hồi với các proton tạo ra các proton giật lùi. Các điện tử giật lùi và proton giật lùi chuyển động đã kích thích các nguyên tử dọc theo quỹ đạo chuyển động của chúng và mất dần năng lượng. Các nguyên tử được điện tử và proton giật lùi kích thích sau khoảng thời gian sẽ giải phóng ra các photon. Nếu xét khoảng thời gian Δt rất nhỏ số photon sinh ra biểu diễn biến độ hiện tại. Do số lượng photon sinh ra trong gian Δt thay đổi theo thời gian, nên biên độ của xung thay đổi theo thời gian. Nhìn chung, tổng số lượng photon sinh ra trong chất nhấp nháy tỉ lệ với phần năng lượng mà bức xạ để lại trong chất nhấp nháy. Mà chiều cao của xung cũng tỉ lệ với tổng số photon được sinh ra. Bên cạnh đó, tốc độ phát photon phụ thuộc vào mỗi loại tương tác khác nhau (do cơ chế khác nhau).

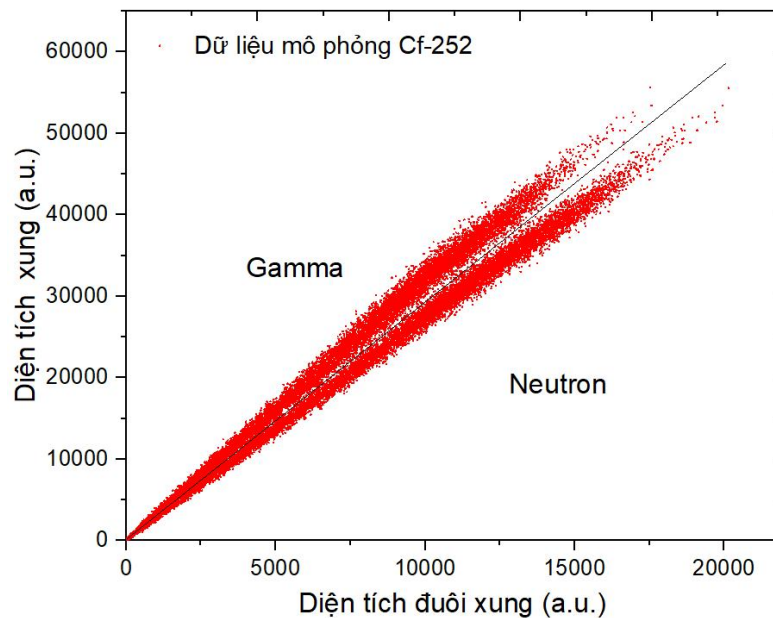
Nên hình dạng xung phụ thuộc vào loại bức xạ đến đầu dò. Hình dạng xung khác nhau là cơ sở cho việc phân biệt loại bức xạ đến đầu dò. Do đó, tham số mô phỏng hình dạng xung cho loại bức xạ cần được mô phỏng cho mô hình đầu dò EJ-301. Các tham số liên quan đến thời hằng phân rã của các nháy sáng trong Geant4 được khai báo trong lớp “*DetectorConstruction*” của đầu dò. Thời gian phân rã photon của chất nhấp nháy EJ-301 gồm hai thành phần chính: thành phần phân rã nhanh $\sim 3,2$ ns và thành phần phân rã chậm $\sim 32,4$ ns. Các thông số thời gian phân rã nhanh và chậm được thiết lập thông qua thuộc tính *AddConstProperty*(“FASTTIMECONSTANT”, $3.2*ns$) và qua thuộc tính *AddConstProperty* (“SLOWTIMECONSTANT”, $32,3*ns$) trong lớp *EJ301DetectorConstruction*().

Biên độ của xung mô phỏng phụ thuộc vào số photon sinh ra khi mỗi MeV năng lượng điện tử được tiêu tán trong chất nhấp nháy. Tham số này được thiết lập thông qua thuộc tính *ConstProperty*, *Scintillationyield*, 12000/MeV trong lớp *EJ301DetectorConstruction*(). Tỷ lệ thành phần phân rã chậm so với thành phần phân rã nhanh của bức xạ neutron và gamma khác nhau, tỷ lệ này đã được thiết lập thông qua thuộc tính *SetScintillationExcitationRatio*(x) trong lớp *PhysicsList*().



Hình 2.11 Một số xung gamma có biên độ khác nhau được mô phỏng trên đầu dò Det 1.

Hình 2.11 mô tả một số xung gamma đầu ra sau tiền khuếch đại được mô phỏng trên đầu dò Det 1. Các xung mô cho thấy có biên độ khác nhau, tỉ lệ với năng lượng bức xạ để lại trong đầu nhấp nháy, nhưng các xung có hình dạng tương đồng nhau.



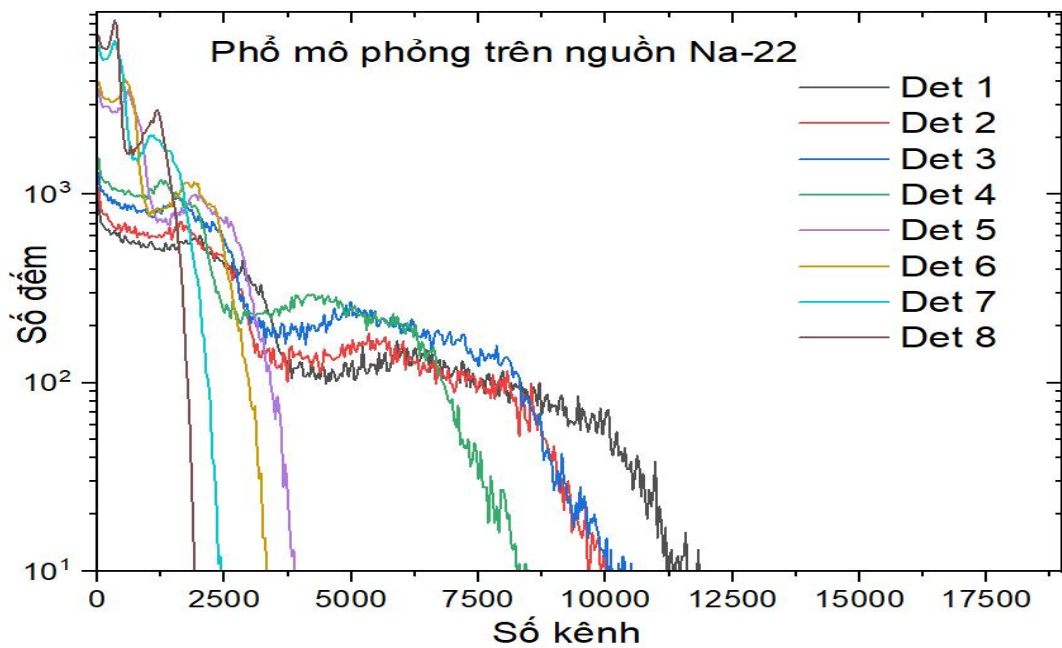
Hình 2.12 Các tham số PSD từ các xung neutron và gamma mô phỏng trên đầu dò Det 8.

Trên Hình 2.12 là kết quả mô phỏng các xung neutron và gamma trên mô hình đầu dò Det 8 với nguồn Cf-252. Mô phỏng nguồn Cf-252 được thiết lập thông qua file mã nguồn với hướng bắn và các thành phần năng lượng của gamma và neutron được tham khảo từ [17]. Trên đồ thị biểu diễn diện tích xung (trục đứng) theo diện tích phần đuôi xung (trục nằm ngang). Phân bố các điểm PSD của các xung neutron/gamma cho thấy có sự tích biệt tương đối giữa hai khu vực; đặc điểm này là do các xung neutron có hằng số phân rã chậm nhiều hơn so với các xung gamma, dẫn tới diện tích phần đuôi xung nếu so sánh với các xung gamma có cùng diện tích là lớn hơn. Đặc điểm này được sử dụng trong phương pháp so sánh diện tích xung để đánh giá khả năng phân biệt neutron/gamma trong nghiên cứu này.

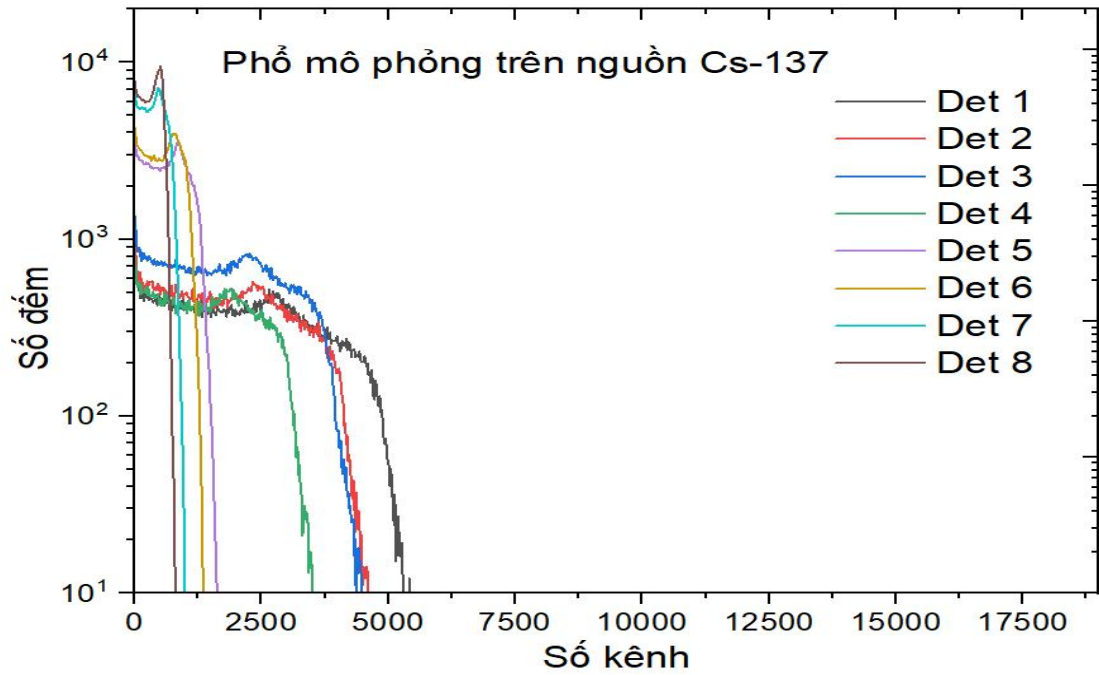
2.4 Mô phỏng các tương tác của gamma với chất nhấp nháy EJ301

Ba tương tác chính của gamma với nhấp nháy EJ-301 gồm hiệu ứng quang điện, tán xạ Compton và tạo cặp được khai báo trong lớp PhysicsList(). Hiệu ứng quang điện được cài đặt thông qua lớp G4PhotoElectricEffect(); tán

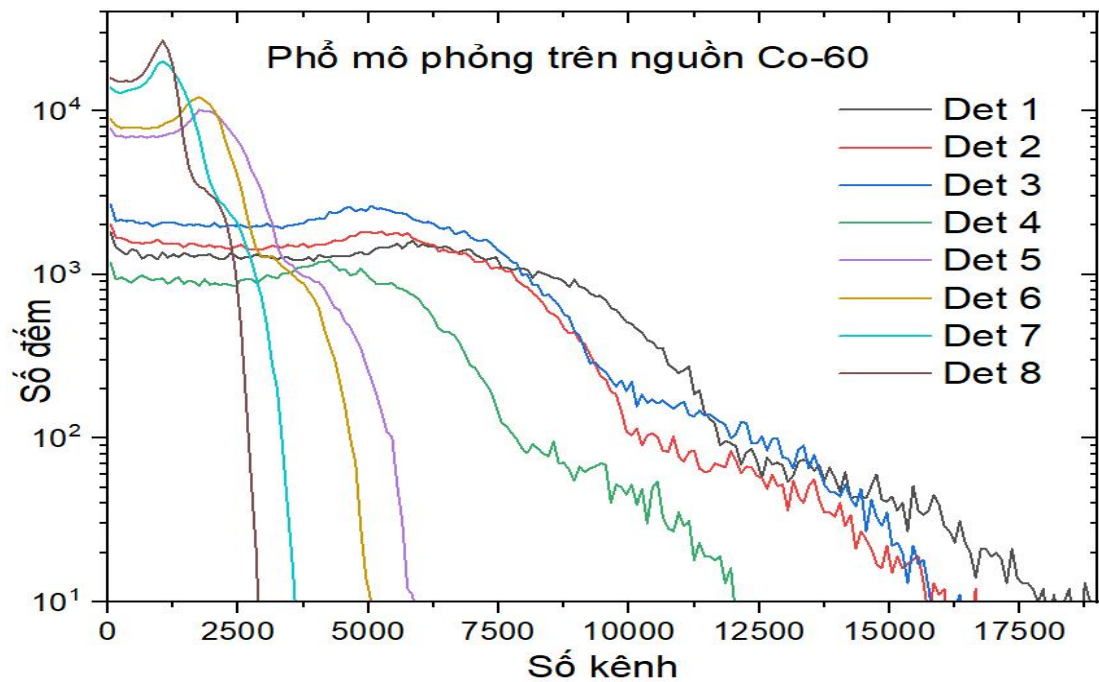
xạ Compton được cài đặt thông qua lớp `G4ComptonScattering()`; và quá trình tạo cặp được cài đặt thông qua lớp `G4GammaConversion()`. Tiết diện của ba tương tác chính này được chương trình tính toán dựa vào các thành phần nguyên tố cấu thành chất nhấp nháy EJ-301 đã được khai báo trong lớp `EJ301DetectorConstruction()`. Hình 2.13 mô tả phổ gamma khi mô phỏng ghi nhận biên độ trên các nguồn Na-22, Cs-137 và Co-60. Do thành phần nguyên tố của chất nhấp nháy EJ-301 gồm hydro và cacbon, nên các phổ thu được trên mô phỏng cũng thể hiện chủ yếu là các cạnh Compton; là đặc trưng cho các bức xạ đơn năng trên nguồn gamma.



(a)



(b)



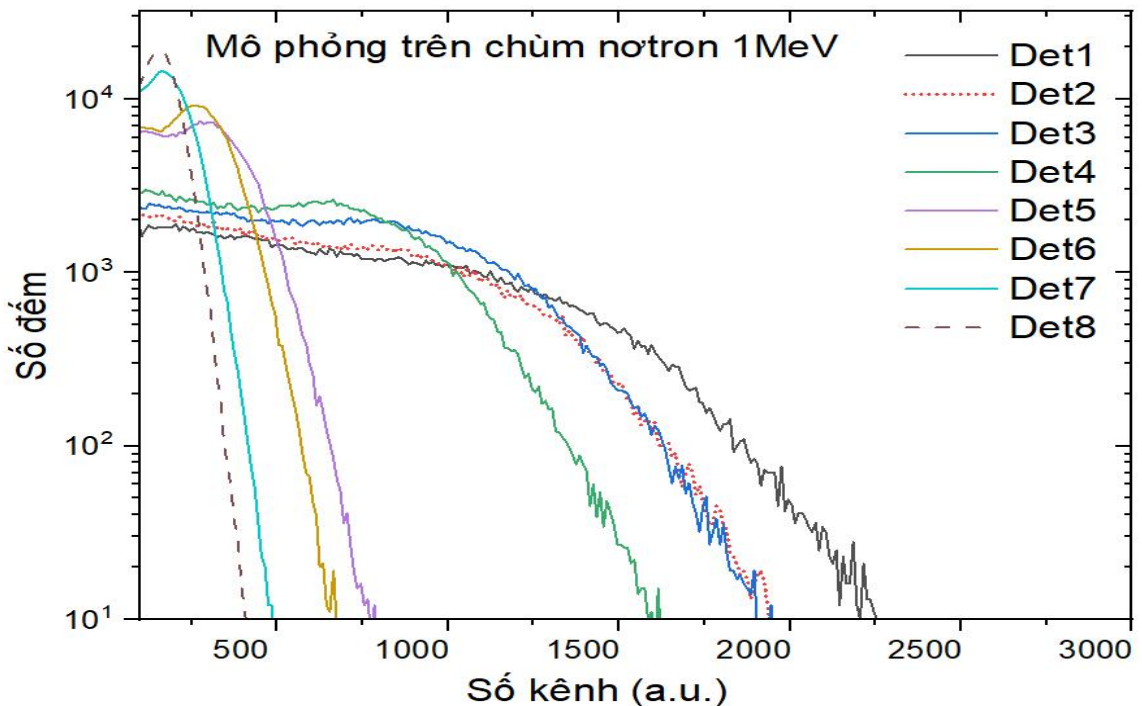
(c)

Hình 2.13 Dạng phổ mô phỏng trên các nguồn gamma: (a) Na-22, (b) Cs-137 và (c) Co-60.

2.5 Mô phỏng các tương tác của neutron với chất nhấp nháy EJ-301

Các tương tác của neutron với chất nhấp nháy EJ-301 được khai báo trong lớp `NeutronHPphysics()` thông qua các lớp `PhysicsList()`. Hai tương tác

chủ yếu của neutron nhanh với chất nhấp nháy gồm tán xạ đàn hồi và tán xạ không đàn hồi. Tán xạ đàn hồi là tương tác chính, được khai báo thông qua lớp `G4HadronElasticProcess()`; trong khi tán xạ không đàn hồi, được khai báo thông qua lớp `G4NeutronInelasticProcess()`. Bên cạnh đó, phản ứng bắt neutron, được khai báo thông qua lớp `G4HadronCaptureProcess()`; và phản ứng phân rã trong quá trình hấp thụ neutron, được khai báo thông qua lớp quá trình hấp thụ neutron, `G4HadronFissionProcess()`. Hình 2.14 mô tả phổ thu được khi mô phỏng với nguồn neutron đơn năng 1000 keV. Phổ thu được trên Hình 2.14 cho thấy một hình dạng chữ nhật với cạnh Compton cho thấy tỉ lệ trong tán xạ Compton chiếm tỉ trọng lớn.



Hình 2.14 Phổ thu được khi mô phỏng nguồn neutron đơn năng 1000 keV.

2.6 Mô phỏng hiệu suất ghi và phổ thu trên đầu dò nhấp nháy EJ-301

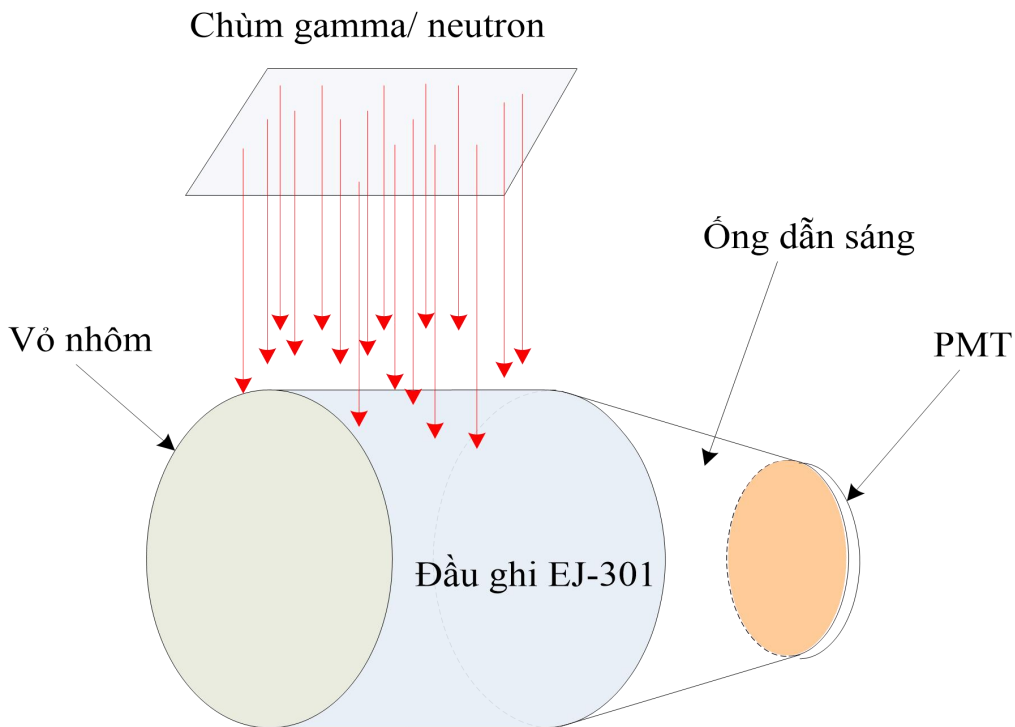
Khi bức xạ neutron/gamma đi vào đầu nhấp nháy EJ-301, các khả năng sau có thể xảy ra. Bức xạ neutron/gamma đi qua đầu nhấp nháy EJ-301 mà không có tương tác nào với các nguyên tử trong chất nhấp nháy; bức xạ neutron/gamma tương tác và để lại một phần năng lượng trong đầu nhấp nháy và thoát ra ngoài; và khả năng thứ ba, bức xạ neutron/gamma để lại toàn bộ năng lượng trong đầu nhấp nháy trong quá trình tương tác với các nguyên tử

trong đầu dò. Xác suất xảy ra tương tác giữa bức xạ neutron/gamma (tiết diện phản ứng) phụ thuộc vào năng lượng và thành phần nguyên tố có trong Cell nhấp nháy. Geant4 sử dụng thư viện số liệu số liệu tiết diện chuẩn, đã được xây dựng cho các nguyên tố và loại bức xạ để tính toán xác suất tương tác của neutron/gamma cho cell nhấp nháy.

Hiệu suất ghi nội của một đầu dò được tính là tỉ số giữa các sự kiện được ghi nhận và tổng số sự kiện đi vào thể tích ghi nhận của đầu dò. Đối với hệ đo lý tưởng, tất các tương tác giữa bức xạ neutron/gamma với đầu dò đều được tính là một sự kiện ghi nhận. Tuy nhiên, trên thực tế, các đầu dò chỉ có thể ghi nhận được các sự kiện có biên độ vượt qua một ngưỡng (gọi là ngưỡng phát hiện). Do đó, hiệu suất ghi được của đầu dò còn phụ thuộc vào mức ngưỡng được thiết lập trên hệ đo. Hiệu suất ghi nội của đầu dò được tính toán bằng biểu thức (2.8) [1].

$$\epsilon_t = \frac{\text{Số sự kiện ghi được}}{\text{Số sự kiện đi vào đầu dò}} \quad (2.8)$$

Để đánh giá hiệu suất ghi gamma trên các đầu dò EJ-301, các nguồn gamma được đặt bên hông của đầu ghi nhấp nháy, như biểu diễn trên Hình 2.15. Các chùm gamma được giả sử có dạng song song và được chiếu theo chiều nằm ngang với đầu dò. Mô hình này nhằm đánh mô phỏng hiệu suất ghi đối với gamma phát ra cùng với nguồn neutron; khi các nguồn đặt tương đối xa đầu dò (trên thực tế, khoảng cách $\sim 1\text{m}$).



Hình 2.15 Mô hình mô phỏng hiệu suất ghi nhận gamma.

Các nguồn chuẩn gamma được khai báo trong các file mở rộng dưới dạng nguồn GPS (General Particle Source) và được quản lý thông qua lớp *G4GeneralParticleSource()* và lớp *EJ301PrimaryGeneratorAction()*. Một nguồn gamma dạng phẳng, phát ra chùm gamma song song chiếu đến đầu ghi EJ-301. Để giảm thời gian mô phỏng, một nguồn gamma dạng phẳng có diện tích bằng diện tích hình chiếu theo phương ngang của cell nhấp nháy tương ứng với các đầu dò Det 1 – Det 8 được sử dụng. Hiệu suất ghi nội được tính dựa vào số sự kiện ghi nhận được và số sự kiện từ nguồn đi vào đầu dò.

Hiệu suất ghi neutron của đầu dò EJ-301 được đánh giá qua nguồn phát chùm neutron. Nguồn neutron cũng được khai báo dưới dạng nguồn GPS được quản lý thông qua lớp *G4GeneralParticleSource()*, *EJ301PrimaryGeneratorAction()*.

Một nguồn phát neutron dạng chùm song song được mô phỏng để chiếu theo phương ngang của đầu dò nhấp nháy. Chùm neutron được mô phỏng dưới hai dạng: nguồn Cf-252 mô phỏng theo phổ phát neutron của nguồn Cf-252. Nguồn đơn năng: mô phỏng chùm neutron đơn năng để đánh giá hiệu suất của đầu dò theo năng lượng của neutron.

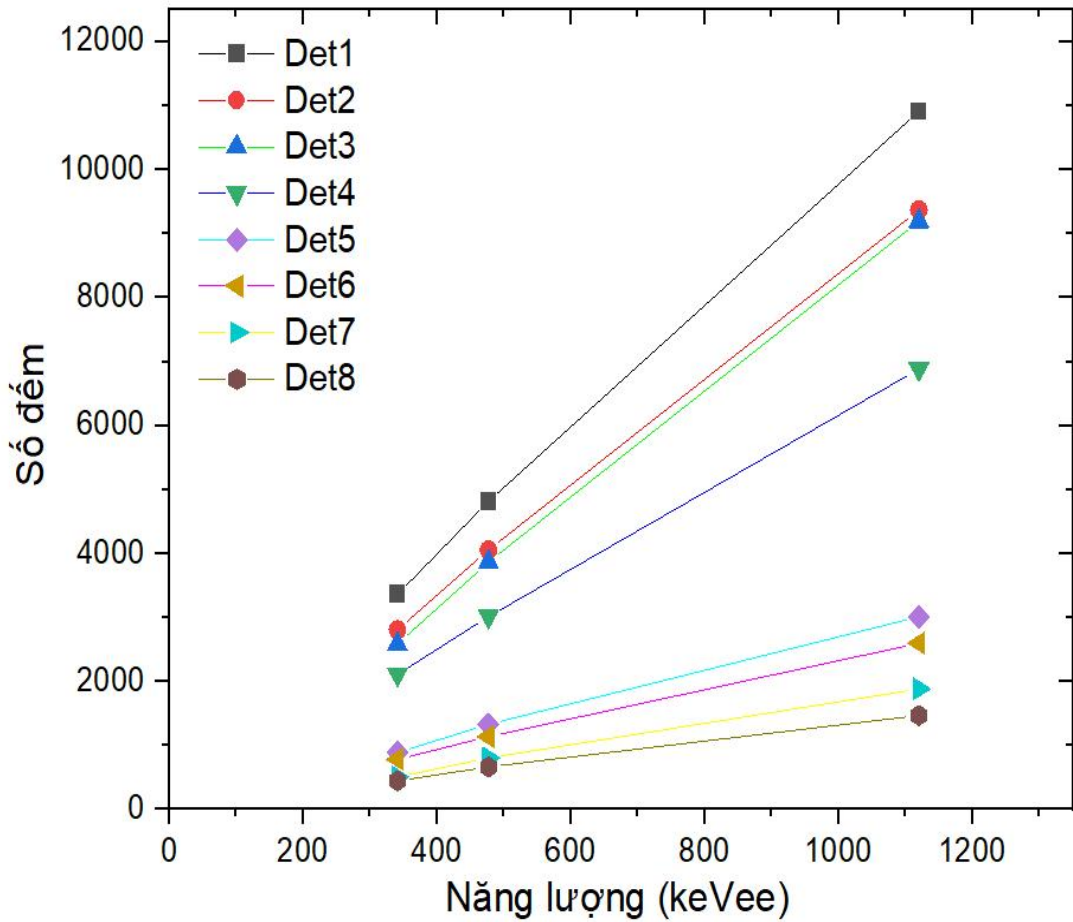
Chương trình sử dụng một ngưỡng ghi nhận dựa vào biên độ để tính toán hiệu suất ghi cho đầu dò EJ-301. Chỉ các xung có biên độ lớn hơn ngưỡng đặt mới được ghi nhận cho việc tính hiệu suất ghi.

Để xác định ngưỡng biên độ theo năng lượng, các đầu dò được chuẩn năng lượng theo biên độ xung. Các nguồn gamma chuẩn gồm Na-22, Cs-137 và Co-60 được mô phỏng để tính toán đường chuẩn năng lượng cho các đầu dò. Do tán xạ Compton là tương tác chủ yếu trong chất nhấp nháy EJ-301 nên các mép Compton thu được từ các phổ gamma là các đặc trưng duy nhất để xác định đường chuẩn năng lượng. Mép Compton được xác định thông qua biểu thức (2.9) [1].

$$E_c = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma + m_e} \quad (2.9)$$

Trong đó: E_γ là năng lượng của nguồn gamma; m_e là khối lượng của electron; E_c là năng lượng tại mép Compton tương ứng.

Mỗi đầu dò có kích thước khác nhau được chuẩn năng lượng theo biên độ xung. Mỗi đầu dò đã được chuẩn năng lượng bằng cách sử dụng các nguồn gamma đơn năng. Đường chuẩn năng lượng được xây dựng bằng cách khớp các điểm thu được với một mô hình đường thẳng (Hình 2.16).



Hình 2.16 Các đường chuẩn năng lượng cho các mô hình đầu dò EJ-301.

Các hạt bức xạ khác nhau nếu để lại cùng một năng lượng trong chất nhấp nháy thì lượng ánh sáng phát ra cũng khác nhau; lý do là năng suất phát nhấp nháy của các hạt khác nhau thì khác nhau trên một chất nhấp nháy. VD: electron tiêu tán 1 keV trong nhấp nháy thì phát ra 1000 photon; nhưng 1 neutron để lại năng lượng 1 keV thì chỉ phát ra 100 photon. Do đó để đánh số lượng photon phát ra trong chất nhấp nháy cho các hạt khác nhau tiêu tán năng lượng của chúng trong chất nhấp nháy, đơn vị keVee (kylo electrol Voltage electron equivalent) được sử dụng thay cho keV. Chúng có nghĩa là năng lượng tiêu tán của neutron và các hạt khác được tính tương đương như năng lượng tiêu tán của electron trong chất nhấp nháy mà tạo ra cùng số photon.

Các phương trình chuẩn năng lượng cho các đầu dò Det1- Det8, có kích thước khác nhau được trình bày bởi các biểu thức (2.10) ÷ (2.17).

$$\text{Det1: } E = 0,104 \times N - 1,17 \quad (2.10)$$

$$\text{Det2: } E = 0,119 \times N - 0,19 \quad (2.11)$$

$$\text{Det3: } E = 0,118 \times N - 2,11 \quad (2.12)$$

$$\text{Det4: } E = 0,164 \times N - 1,09 \quad (2.13)$$

$$\text{Det5: } E = 0,371 \times N - 1,31 \quad (2.14)$$

$$\text{Det6: } E = 0,432 \times N - 1,67 \quad (2.15)$$

$$\text{Det7: } E = 0,574 \times N - 2,98 \quad (2.16)$$

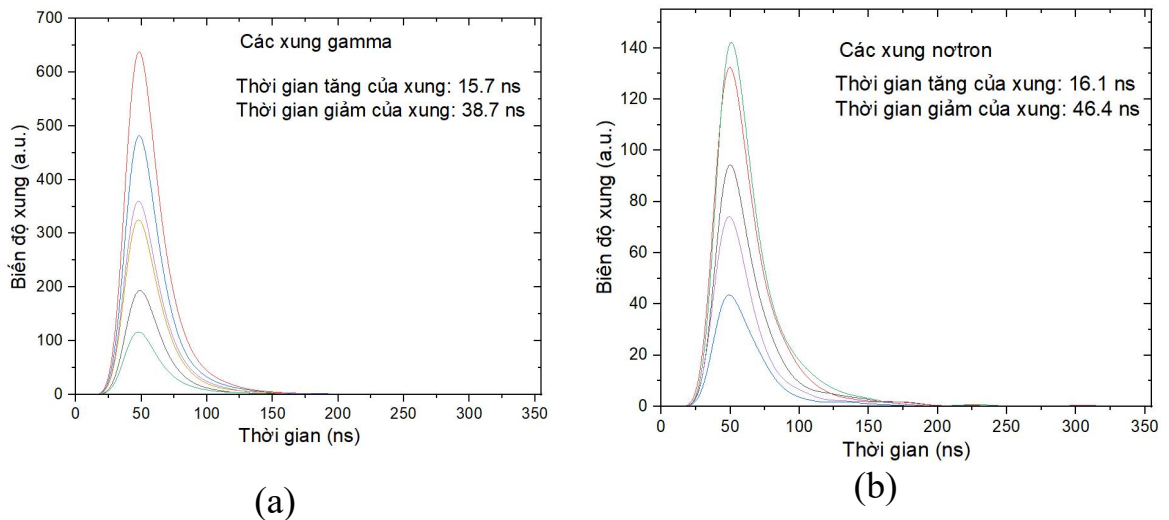
$$\text{Det8: } E = 0,772 \times N - 2,22 \quad (2.17)$$

Trong đó: E là năng lượng của bức xạ, tính theo keVee; N là số đếm của biên độ xung tương ứng.

Các đường chuẩn năng lượng được sử dụng để xác định các ngưỡng tính hiệu suất cho các mô hình đầu dò EJ-301. Để thuận tiện trong việc so sánh với số liệu thực nghiệm trên các đầu dò EJ-301 đo neutron nhanh. Hiệu suất của tất cả các đầu dò đều được tính toán với ngưỡng đo 50 keVee.

2.7 Mô phỏng đáp ứng của đầu dò EJ-301 với bức xạ neutron và gamma

Trong mỗi sự kiện bức xạ đi vào và tương tác với đầu dò, các photon được giải phóng. Các photon lan truyền, phản xạ và khúc xạ trên tinh thể khi đến được cathode sẽ được ghi nhận như một photon đơn lẻ. Mật độ photon đi đến cathode nói chung giảm theo hàm mũ với hai thành phần phân ra nhanh và phân rã chậm. Thông qua hàm đáp ứng của PMT và TKĐ xung điện đầu ra được hình thành với một sườn tăng đến khi đạt đỉnh và theo sau là sườn giảm của xung. Với sườn tăng của xung rất ngắn, thành phần này chỉ phụ thuộc vào thời hằng phân rã nhanh của photon nên không có sự khác biệt giữa xung neutron với gamma. Trong khi sườn giảm phụ thuộc vào thành phần phân rã chậm, nên thời hằng này có sự khác biệt giữa xung neutron với xung gamma.



Hình 2.17 Mô phỏng một số xung: (a) Xung gamma, (b) Xung neutron.

Hình 2.17 (a) mô tả xung thu được ở đầu ra của mô hình khi các sự kiện gamma được mô phỏng. Hình 2.17 (b) mô tả kết quả các xung thu được từ mô hình khi các sự kiện neutron được mô phỏng. Các xung mô phỏng cho thấy, thời gian tăng của xung không khác biệt nhiều đối với các sự kiện gamma và neutron. Trong khi thời gian giảm của xung có sự khác nhau giữa các sự kiện gamma và neutron. Thời gian giảm của các xung neutron dài hơn so với các xung gamma. Đây cũng là cơ sở cho các phương pháp phân biệt dạng xung neutron/gamma.

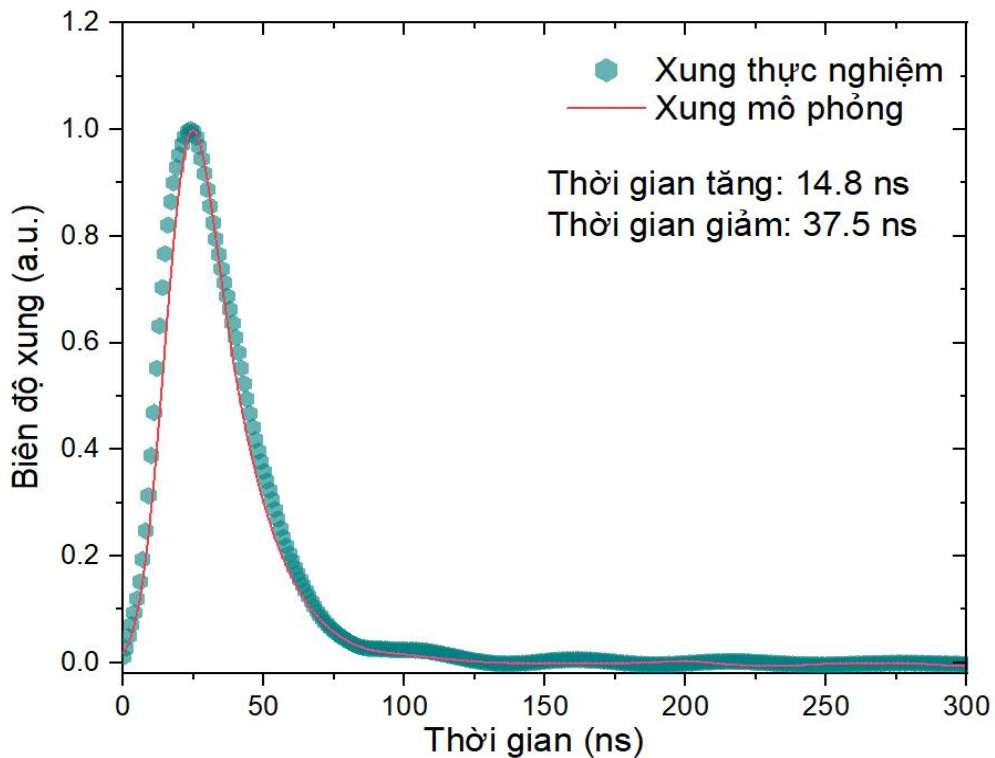
2.8 Đánh giá khả năng phân biệt dạng xung neutron/gamma

Để đánh giá khả năng phân biệt neutron/gamma trên các đầu dò Det 1 ÷ Det 8, phương pháp phân biệt dạng xung dựa trên diện tích xung được áp dụng. Tham số phân biệt dạng xung PSD (Pulse Shape Discrimination) – là tỉ lệ của diện tích đuôi xung với diện tích xung được tính trên mỗi xung mô phỏng trên các đầu dò. Thống kê tham số phân biệt dạng xung của mỗi đầu dò với các xung trên ngưỡng cố định cho biết hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma của đầu dò đó. Để định lượng hiệu quả phân biệt neutron/gamma cho các đầu dò, tham số FoM được tính cho mỗi mô hình đầu dò dựa trên tập xung được mô phỏng trên đầu dò. Hai tập FoM được tính cho mỗi mô hình đầu dò Det 1 ÷ Det 8, gồm FoM được tính trên tập xung với ngưỡng 50 keVee, và tập các FoM tính với các xung trong khoảng năng lượng hẹp ± 100 keVee. Mỗi tập xung để tính cho một giá trị FoM gồm 50.000 xung neutron/gamma có biên độ nằm trong khoảng năng lượng được chọn để tính.

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Xung mô phỏng từ đầu dò EJ-301

Hình 3.1 trình bày xung trung bình từ nguồn Co-60 được mô phỏng trên mô hình đầu dò Det 2 (đường kính 34 mm, chiều dài 50 mm) và so sánh với xung trung bình từ thực nghiệm trên đầu dò có kích thước tinh thể tương đương. So sánh giữa xung mô phỏng với thực nghiệm cho thấy hình dạng xung khớp nhau tốt với cả mặt tăng và giảm của xung. Thời gian tăng của xung mô phỏng khoảng 14,8 ns so với xung trung bình thực nghiệm 14,3 ns. Thời gian giảm của xung mô phỏng đạt 37,5 ns so với xung trung bình thực nghiệm là 38,5 ns.

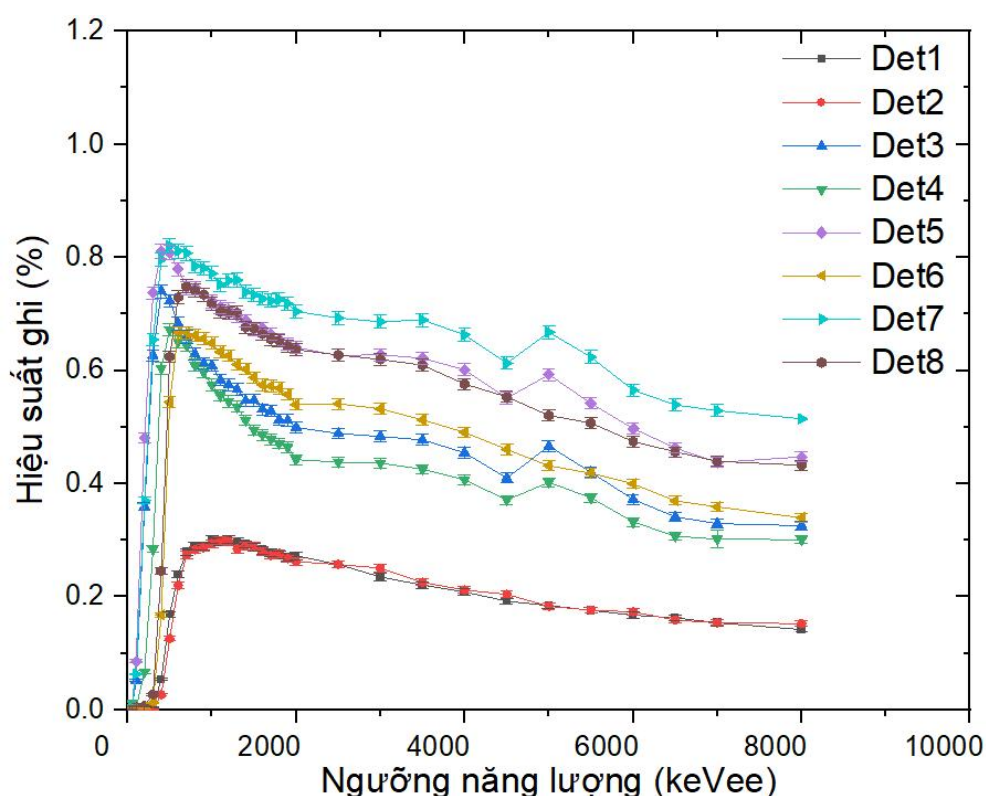


Hình 3.1 So sánh xung gamma mô phỏng trên mô hình Det 2 với đầu dò thực nghiệm EJ-301 cùng kích thước.

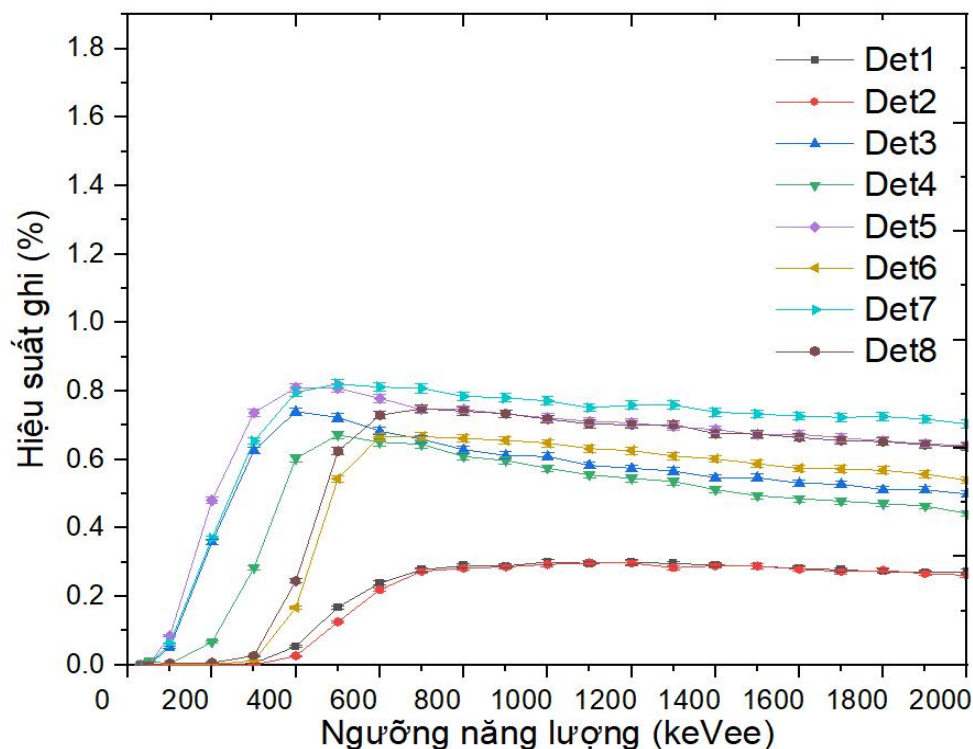
3.2 Hiệu suất ghi của các đầu dò EJ-301

Kết quả khảo sát hiệu suất ghi tổng của các mô hình đầu dò Det 1 – Det 8 đối với bức xạ neutron được trình bày trên Hình 3.2. Hiệu suất ghi của cả 08 đầu dò đều được khảo sát với ngưỡng 30 keVee. Hiệu suất ghi của 08 đầu dò đều có hình dạng tương đồng nhau. Hiệu suất ghi nhỏ ở vùng gần ngưỡng 30 keVee và tăng nhanh khi ngưỡng tăng. Hiệu suất đạt giá trị lớn nhất trong

khoảng 400 keVee đến 600 keVee và giảm chậm khi ngưỡng năng lượng tăng. Hiệu suất ghi với các ngưỡng khác nhau cho thấy, đầu dò có đường kính càng lớn, hiệu suất ghi càng lớn. Kết quả khảo sát hiệu suất cho thấy cơ bản có 3 nhóm. Nhóm 1, Det 1 và Det 2 có hiệu suất nhỏ nhất và tương đồng nhau; mặc dù Det 2 có chiều dài lớn hơn Det 1. Nhóm 2, gồm Det 3 và Det 4 (đều có đường kính 50 mm) và Det 6 (đường kính 75 mm) có hiệu suất lớn hơn nhóm 1. Nhóm 3, gồm các Det 5 (đường kính 75 mm), Det 7 và Det 8 (đường kính 100 mm) có hiệu suất ghi cao nhất. Đối với các đầu dò có tinh thể cùng đường kính, tinh thể có chiều dài lớn hơn thì có hiệu suất ghi nhỏ hơn. Điều này có thể giải thích là khi chiều dài tinh thể tăng lên, số photon bị hấp thụ cũng tăng làm cho chiều cao trung bình của các xung giảm. Kết quả là một số xung hoặc tất cả các photon bị hấp thụ hoàn toàn và không xuất hiệu xung để ghi nhận, hoặc biên độ xung suy giảm đến mức nằm dưới ngưỡng ghi nhận. Với Det 6 có hiệu suất thấp hơn so với Det 5 do chiều dài của tinh thể trên Det 6 dài hơn Det 5.



Hình 3.2 Hiệu suất ghi của các đầu dò theo ngưỡng năng lượng bức xạ.



Hình 3.3 Hiệu suất ghi của các đầu dò trong khoảng $30 \div 2000$ keVee.

Bảng 3.1 Giá trị hiệu suất ghi của các đầu dò theo ngưỡng năng lượng

Năng lượng (keVee)	Det1	Det2	Det3	Det4	Det5	Det6	Det7	Det8
30	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$
50	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,002 $\pm 0,000$	0,011 $\pm 0,001$	0,002 $\pm 0,000$	0,003 $\pm 0,001$	0,002 $\pm 0,000$	0,001 $\pm 0,000$
100	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,052 $\pm 0,002$	0,004 $\pm 0,001$	0,086 $\pm 0,003$	0,002 $\pm 0,000$	0,063 $\pm 0,001$	0,006 $\pm 0,001$
200	0,000 $\pm 0,000$	0,000 $\pm 0,000$	0,360 $\pm 0,007$	0,067 $\pm 0,003$	0,481 $\pm 0,009$	0,002 $\pm 0,000$	0,370 $\pm 0,006$	0,007 $\pm 0,001$
300	0,005 $\pm 0,001$	0,001 $\pm 0,000$	0,627 $\pm 0,010$	0,284 $\pm 0,006$	0,737 $\pm 0,011$	0,012 $\pm 0,001$	0,655 $\pm 0,010$	0,027 $\pm 0,002$
400	0,054 $\pm 0,002$	0,027 $\pm 0,002$	0,740 $\pm 0,012$	0,604 $\pm 0,010$	0,811 $\pm 0,012$	0,168 $\pm 0,004$	0,797 $\pm 0,012$	0,246 $\pm 0,006$
500	0,169 $\pm 0,005$	0,126 $\pm 0,004$	0,723 $\pm 0,012$	0,672 $\pm 0,011$	0,809 $\pm 0,012$	0,544 $\pm 0,009$	0,821 $\pm 0,012$	0,625 $\pm 0,010$

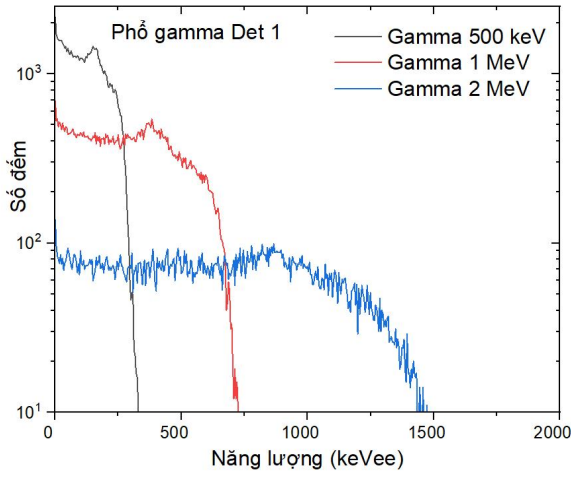
Năng lượng (keVee)	Det1	Det2	Det3	Det4	Det5	Det6	Det7	Det8
600	0,239 ±0,006	0,220 ±0,005	0,683 ±0,011	0,651 ±0,011	0,779 ±0,012	0,667 ±0,011	0,812 ±0,012	0,730 ±0,011
700	0,279 ±0,006	0,274 ±0,006	0,660 ±0,011	0,645 ±0,011	0,746 ±0,012	0,667 ±0,011	0,808 ±0,012	0,749 ±0,012
800	0,290 ±0,007	0,283 ±0,006	0,629 ±0,011	0,609 ±0,010	0,746 ±0,012	0,662 ±0,011	0,785 ±0,012	0,741 ±0,012
900	0,289 ±0,007	0,286 ±0,007	0,613 ±0,011	0,597 ±0,010	0,734 ±0,012	0,656 ±0,011	0,781 ±0,012	0,734 ±0,012
1000	0,301 ±0,007	0,294 ±0,007	0,609 ±0,011	0,575 ±0,010	0,722 ±0,012	0,648 ±0,011	0,772 ±0,012	0,719 ±0,011
1100	0,297 ±0,007	0,299 ±0,007	0,583 ±0,010	0,556 ±0,010	0,712 ±0,012	0,633 ±0,011	0,752 ±0,012	0,704 ±0,011
1200	0,301 ±0,007	0,298 ±0,007	0,575 ±0,010	0,545 ±0,010	0,708 ±0,011	0,626 ±0,011	0,759 ±0,012	0,702 ±0,011
1300	0,296 ±0,007	0,285 ±0,007	0,567 ±0,010	0,536 ±0,010	0,696 ±0,011	0,611 ±0,010	0,760 ±0,012	0,703 ±0,011
1400	0,293 ±0,007	0,290 ±0,007	0,547 ±0,010	0,512 ±0,010	0,688 ±0,011	0,602 ±0,010	0,739 ±0,012	0,676 ±0,011
1500	0,288 ±0,007	0,289 ±0,007	0,547 ±0,010	0,495 ±0,009	0,672 ±0,011	0,588 ±0,010	0,733 ±0,012	0,675 ±0,011
1600	0,283 ±0,007	0,280 ±0,007	0,531 ±0,010	0,486 ±0,009	0,674 ±0,011	0,574 ±0,010	0,727 ±0,012	0,664 ±0,011
1700	0,278 ±0,007	0,273 ±0,007	0,529 ±0,010	0,478 ±0,009	0,664 ±0,011	0,573 ±0,010	0,724 ±0,012	0,655 ±0,011
1800	0,273 ±0,007	0,277 ±0,007	0,513 ±0,010	0,471 ±0,009	0,655 ±0,011	0,569 ±0,010	0,726 ±0,012	0,653 ±0,011
1900	0,270 ±0,007	0,267 ±0,007	0,512 ±0,010	0,465 ±0,009	0,646 ±0,011	0,558 ±0,010	0,718 ±0,012	0,643 ±0,011
2000	0,272 ±0,007	0,262 ±0,007	0,500 ±0,010	0,443 ±0,009	0,641 ±0,011	0,540 ±0,010	0,705 ±0,012	0,637 ±0,011
2500	0,257	0,257	0,489	0,438	0,626	0,541	0,693	0,627

	$\pm 0,006$	$\pm 0,006$	$\pm 0,010$	$\pm 0,009$	$\pm 0,011$	$\pm 0,010$	$\pm 0,011$	$\pm 0,011$
Năng lượng (keVee)	Det1	Det2	Det3	Det4	Det5	Det6	Det7	Det8
3000	0,235 $\pm 0,006$	0,251 $\pm 0,006$	0,484 $\pm 0,010$	0,436 $\pm 0,009$	0,628 $\pm 0,011$	0,533 $\pm 0,010$	0,686 $\pm 0,012$	0,620 $\pm 0,011$
3500	0,221 $\pm 0,006$	0,226 $\pm 0,006$	0,478 $\pm 0,009$	0,425 $\pm 0,009$	0,622 $\pm 0,011$	0,513 $\pm 0,009$	0,690 $\pm 0,012$	0,610 $\pm 0,010$
4000	0,208 $\pm 0,006$	0,212 $\pm 0,006$	0,455 $\pm 0,009$	0,407 $\pm 0,009$	0,602 $\pm 0,011$	0,491 $\pm 0,009$	0,663 $\pm 0,011$	0,576 $\pm 0,010$
4500	0,192 $\pm 0,005$	0,204 $\pm 0,006$	0,410 $\pm 0,009$	0,371 $\pm 0,008$	0,551 $\pm 0,010$	0,460 $\pm 0,009$	0,613 $\pm 0,011$	0,554 $\pm 0,010$
5000	0,184 $\pm 0,005$	0,183 $\pm 0,005$	0,467 $\pm 0,009$	0,402 $\pm 0,008$	0,593 $\pm 0,011$	0,432 $\pm 0,008$	0,668 $\pm 0,012$	0,521 $\pm 0,009$
5500	0,176 $\pm 0,005$	0,176 $\pm 0,005$	0,420 $\pm 0,009$	0,375 $\pm 0,008$	0,542 $\pm 0,010$	0,418 $\pm 0,008$	0,624 $\pm 0,012$	0,507 $\pm 0,009$
6000	0,167 $\pm 0,005$	0,173 $\pm 0,005$	0,372 $\pm 0,008$	0,332 $\pm 0,008$	0,498 $\pm 0,010$	0,400 $\pm 0,008$	0,565 $\pm 0,011$	0,474 $\pm 0,009$
6500	0,163 $\pm 0,005$	0,159 $\pm 0,005$	0,341 $\pm 0,008$	0,307 $\pm 0,007$	0,463 $\pm 0,009$	0,370 $\pm 0,008$	0,539 $\pm 0,010$	0,456 $\pm 0,009$
7000	0,154 $\pm 0,005$	0,154 $\pm 0,005$	0,330 $\pm 0,008$	0,302 $\pm 0,016$	0,438 $\pm 0,009$	0,359 $\pm 0,008$	0,529 $\pm 0,010$	0,439 $\pm 0,009$
8000	0,142 $\pm 0,005$	0,152 $\pm 0,005$	0,326 $\pm 0,008$	0,301 $\pm 0,007$	0,448 $\pm 0,009$	0,339 $\pm 0,008$	0,515 \pm - -	0,433 $\pm 0,009$

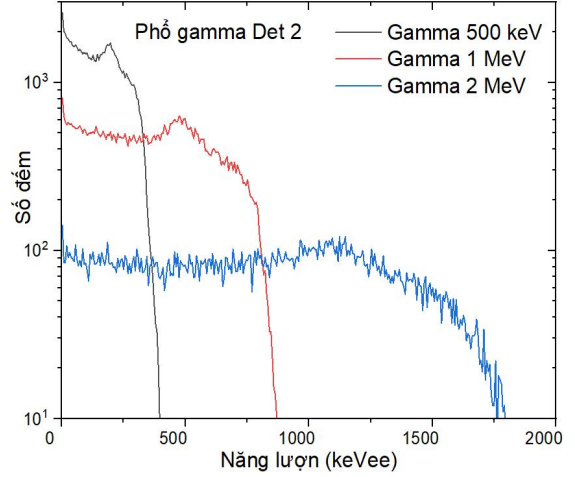
3.3 Hàm đáp ứng phổ neutron/gamma trên các đầu dò EJ-301

3.3.1 Hàm đáp ứng phổ trên các nguồn gamma

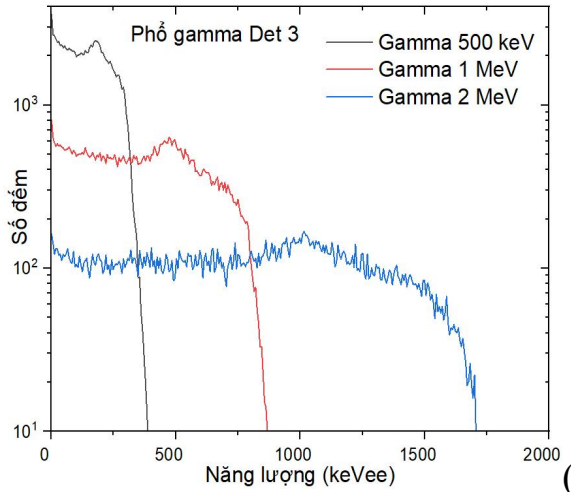
Hàm đáp ứng của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 đối với nguồn gamma đã được khảo sát với các nguồn phát gamma đơn năng: 500 keV, 1000 keV, và 1500 keV. Kết quả hàm đáp ứng của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 được trình bày trên các Hình 3.4 (a) – (h) cho thấy rõ hàm đáp ứng dạng hình chữ nhật. Mỗi phổ ghi trên đầu dò thể hiện một mép tán xạ Compton rõ ràng với vị trí tỉ lệ với năng lượng nguồn phát.



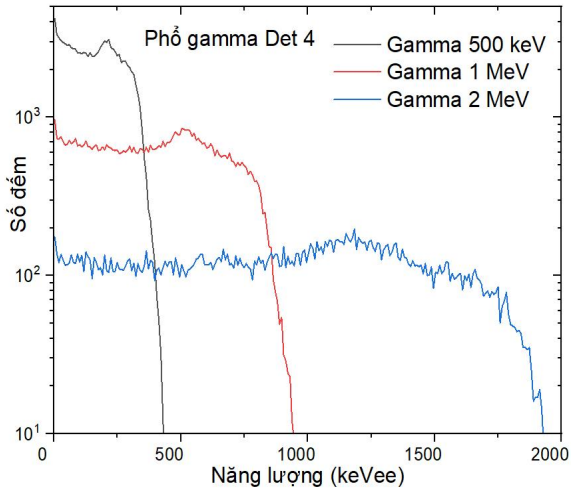
(a)



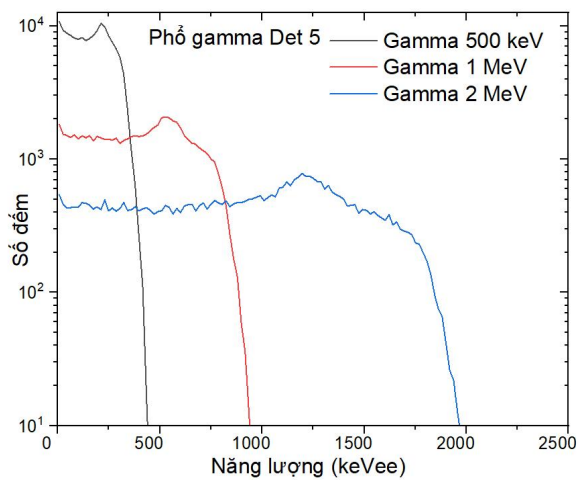
(b)



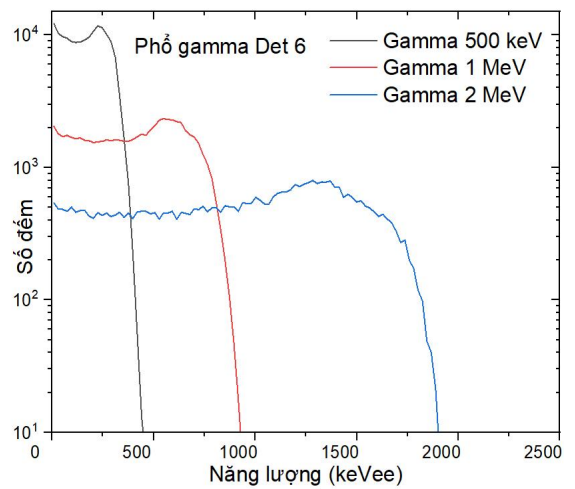
(c)



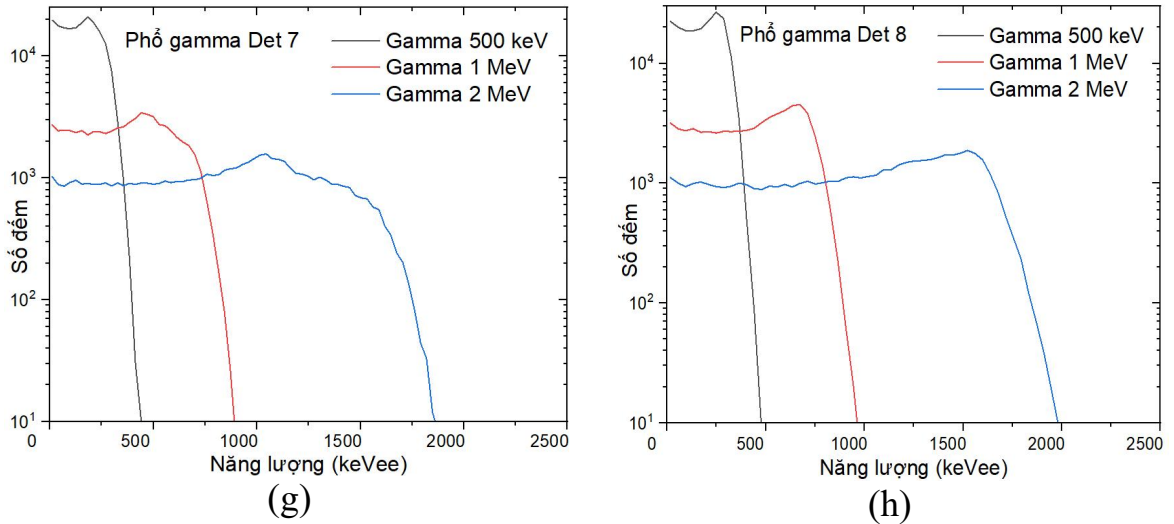
(d)



(e)



(f)

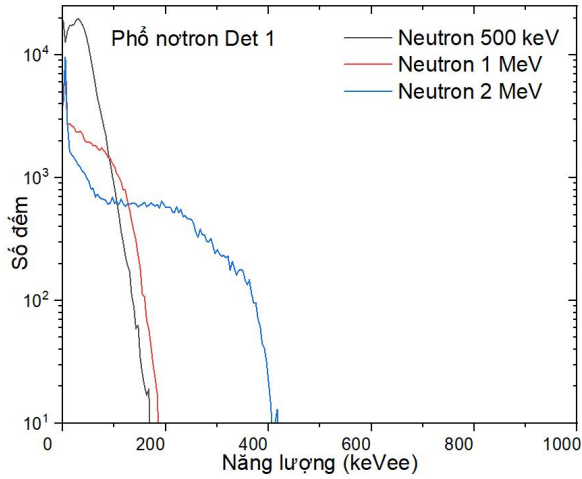


Hình 3.4 Đáp ứng phổ của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 trên các nguồn gamma đơn năng.

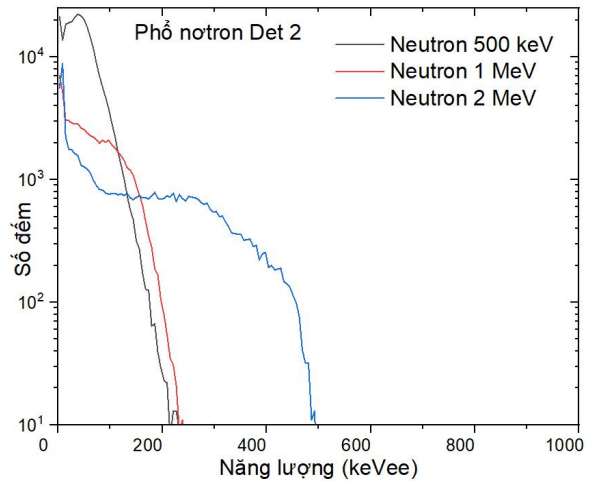
Kết quả cũng cho thấy đối với các đầu dò có thể tích lớn, hình dạng phổ gamma gần giống với dạng hình chữ nhật. Bên cạnh đó, với nguồn gamma năng lượng thấp, phổ đo được có xu hướng dịch chuyển về phía năng lượng thấp nhiều hơn.

3.3.2 Hàm đáp ứng phổ trên các nguồn neutron

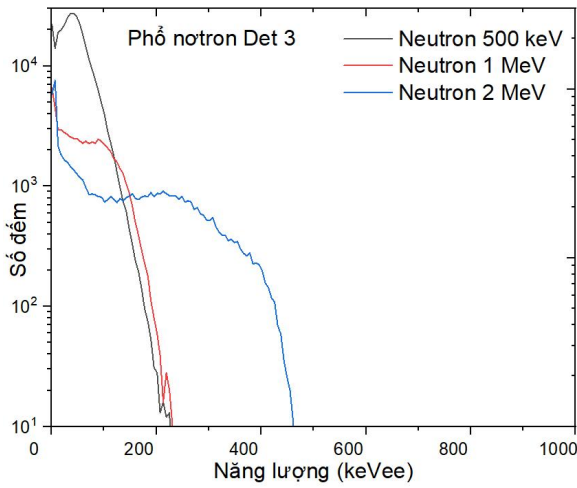
Hàm đáp ứng của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 đối với nguồn neutron đã được khảo sát với các nguồn phát neutron đơn năng: 500 keV, 1000 keV, và 1500 keV. Các phổ neutron thu được đều cho thấy một cạnh của hình chữ nhật bị biến dạng. Các số đếm bị dồn về phía năng lượng thấp hơn tạo thành phổ “hình yên ngựa”. Các dạng điệu phổ thu được trên các đầu ghi là khá tương đồng. Các đầu ghi thể tích lớn hơn (Det 4 ÷ Det 8) có các cạnh nằm ở phía năng lượng lớn hơn. Trong khi các đầu ghi nhỏ (Det 1 ÷ Det 3) có các cạnh chữ nhật nằm phía năng lượng thấp hơn. Vị trí cạnh chữ nhật của phổ neutron đối với các đầu dò nhỏ phụ thuộc ít vào chiều dài tinh thể. Trong khi với các đầu dò thể tích lớn, vị trí các mép tán xạ không phụ thuộc nhiều vào chiều dài của đầu ghi mà phụ thuộc vào bán kính của đầu ghi.



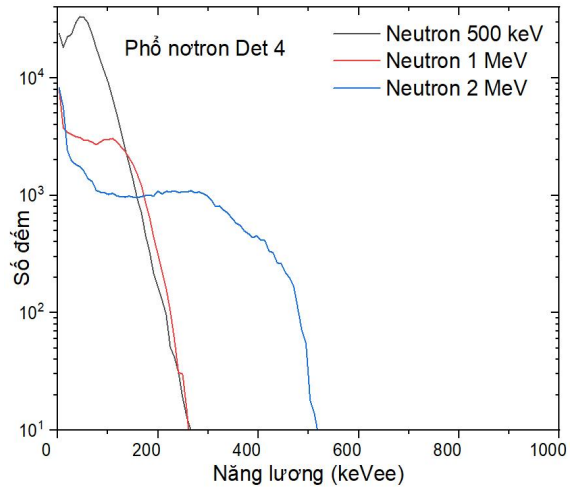
(a)



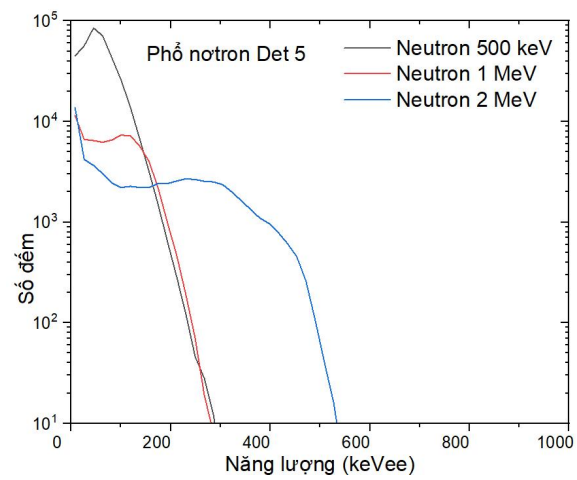
(b)



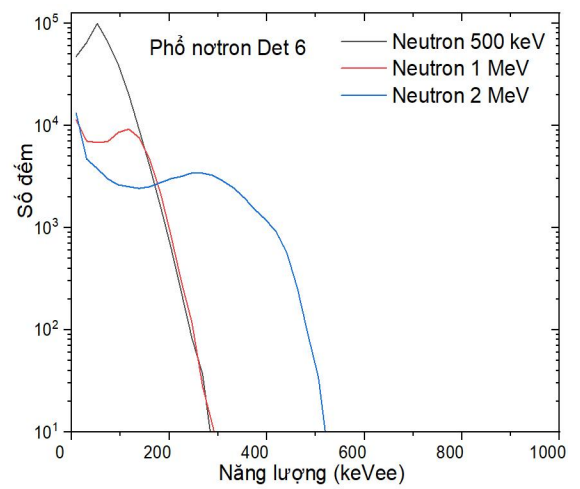
(c)



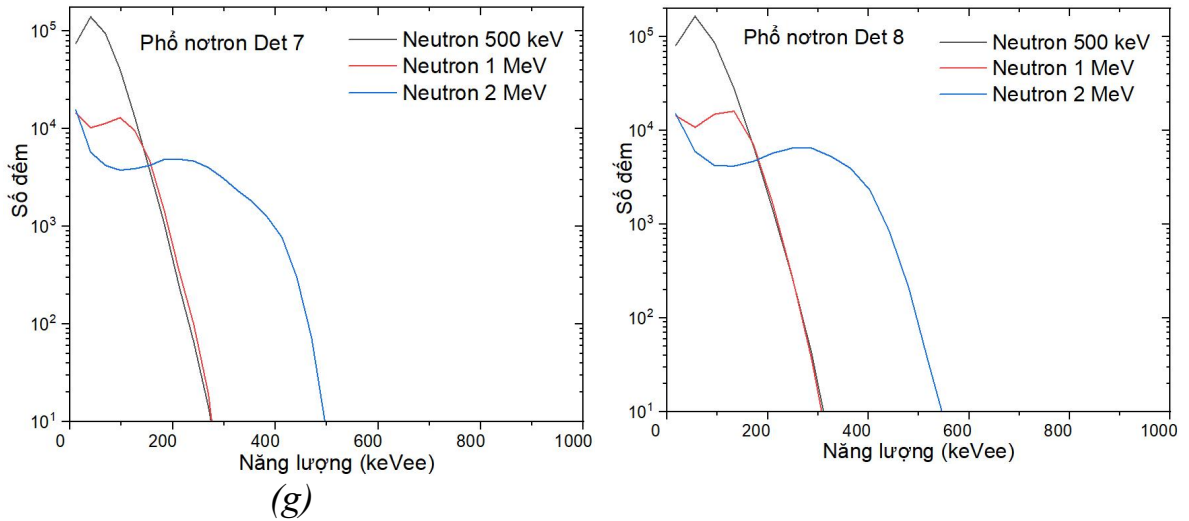
(d)



(e)



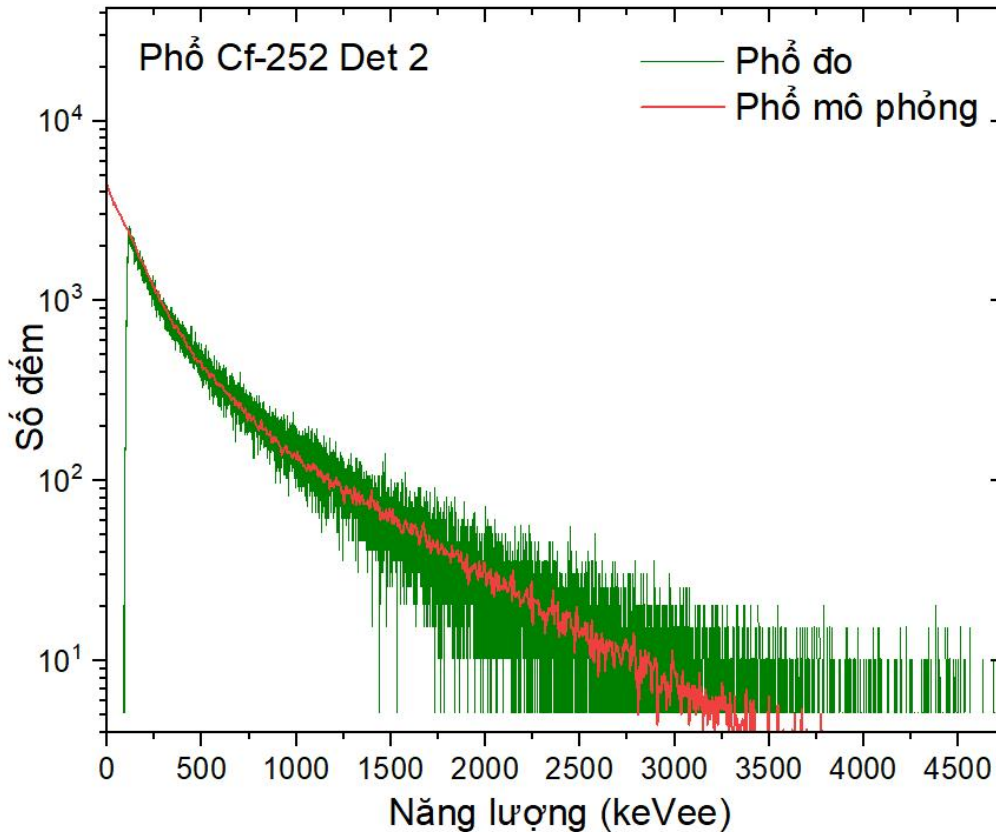
(f)



(h)

Hình 3.5 Đáp ứng phổ của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 trên các nguồn neutron đơn năng.

Hình 3.6 so sánh kết quả phổ thu được trong mô phỏng cho mô hình Det 2 với thực nghiệm trên đầu dò có kích thước tương đương. Khi mô phỏng và đo thực nghiệm đối với nguồn Cf-252, với dải so sánh ($> 50 \text{ keVee}$). Kết quả thu được cho thấy sự tương đồng khá tốt giữa phổ mô phỏng và thực nghiệm. Phổ năng lượng thực nghiệm có độ rộng nhiều lớn hơn so với phổ mô phỏng do đóng góp của các nhiễu điện tử vào phổ đo. Tuy nhiên, có thể thấy hình dạng phổ mô phỏng cùng dạng trung bình với phổ trên thực nghiệm.



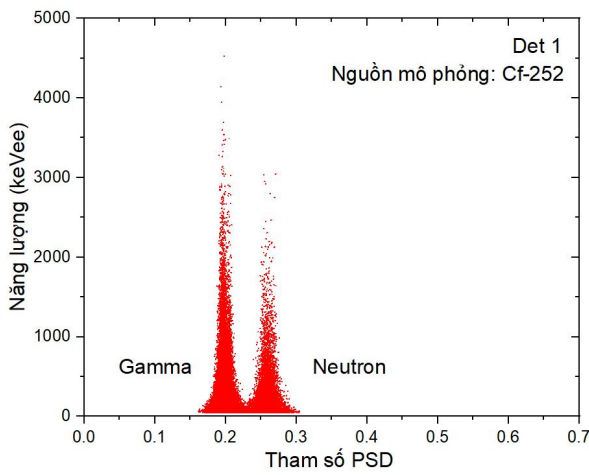
Hình 3.6 So sánh phổ Cf-252 giữa mô phỏng Geant4 và thực nghiệm trên đầu dò Det 2.

3.4 Khả năng phân biệt neutron/gamma trên các đầu dò EJ-301

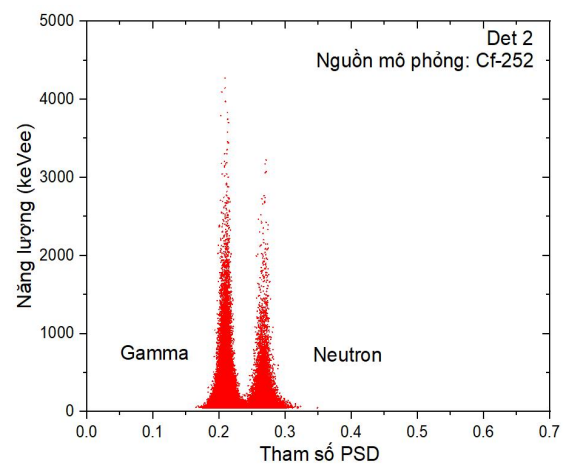
Các mô hình đầu dò Det 1 ÷ Det 8 đã được đánh giá khả năng phân biệt neutron/gamma trên số liệu thu được từ nguồn mô phỏng Cf-252. Phương pháp phân biệt dạng xung dựa trên diện tích (DCI) được sử dụng trong mô phỏng. Các tham số phân biệt dạng xung PSD được tính cho mỗi xung được mô phỏng tương ứng với biên độ xung được biểu diễn như một điểm trên mặt phẳng, gồm: PSD (trục nằm ngang) – biên độ xung (trục đứng). Kết quả tính toán PSD tương ứng với các xung neutron và gamma mô phỏng nguồn Cf-252 được trình bày trên các Hình 3.7 (a) – (h). Kết quả thu được từ mô phỏng trên các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 cho thấy, các điểm phân bố của PSD được phân thành hai vùng tương đối rõ ràng. Một vùng gồm các điểm có PSD cao hơn được nhận diện như các xung neutron; vùng gồm các điểm có PSD thấp hơn được nhận dạng như các xung gamma.

Các phân bố PSD trên cả 08 đầu dò cho thấy hai vùng tách biệt rõ ràng nếu biên độ xung (keVee) lớn. Trong vùng năng lượng thấp, cả 08 đầu dò

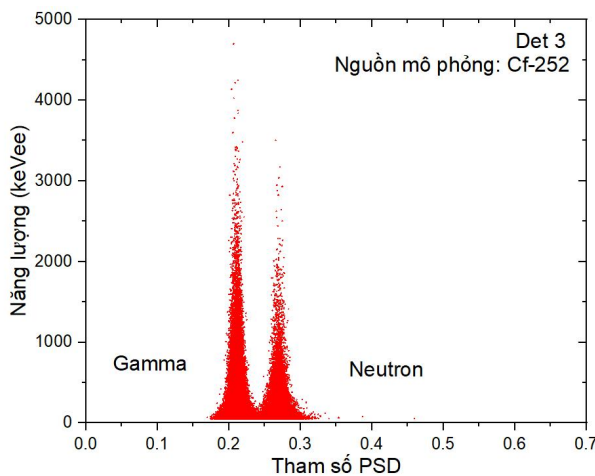
đều có vùng phân bố PSD giao nhau. Do đó, nếu sử dụng một ngưỡng PSD để phân biệt neutron/gamma thì trong vùng năng lượng thấp một số sự kiện là gamma bị nhận dạng nhầm thành neutron và ngược lại một số sự kiện neutron bị nhận dạng nhầm thành gamma. Kết quả thể hiện trên các Hình 3.7 (a) ÷ (h) cũng cho thấy, các đầu dò thể tích lớn vùng giao nhau của các điểm PSD nhiều hơn đối với các đầu dò có thể tích nhỏ. Đặc biệt với các đầu dò có cùng đường kính tinh thể, đầu dò có chiều dài tinh thể ngắn hơn thì vùng giao nhau nhỏ hơn. Điều này cho thấy, các đầu dò có chiều dài tinh thể ngắn hơn đạt hiệu quả phân biệt neutron/gamma tốt hơn đối với các đầu dò có tinh thể dài hơn.



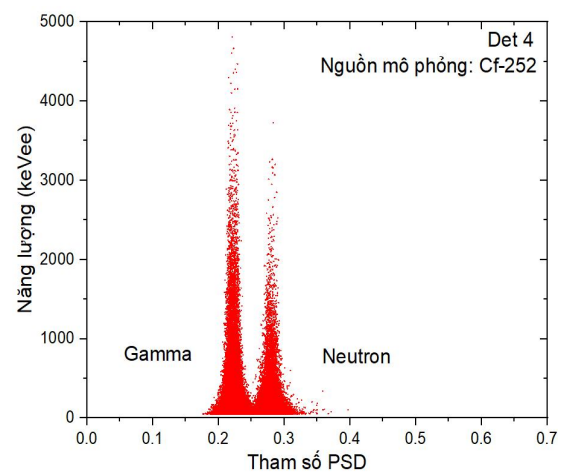
(a)



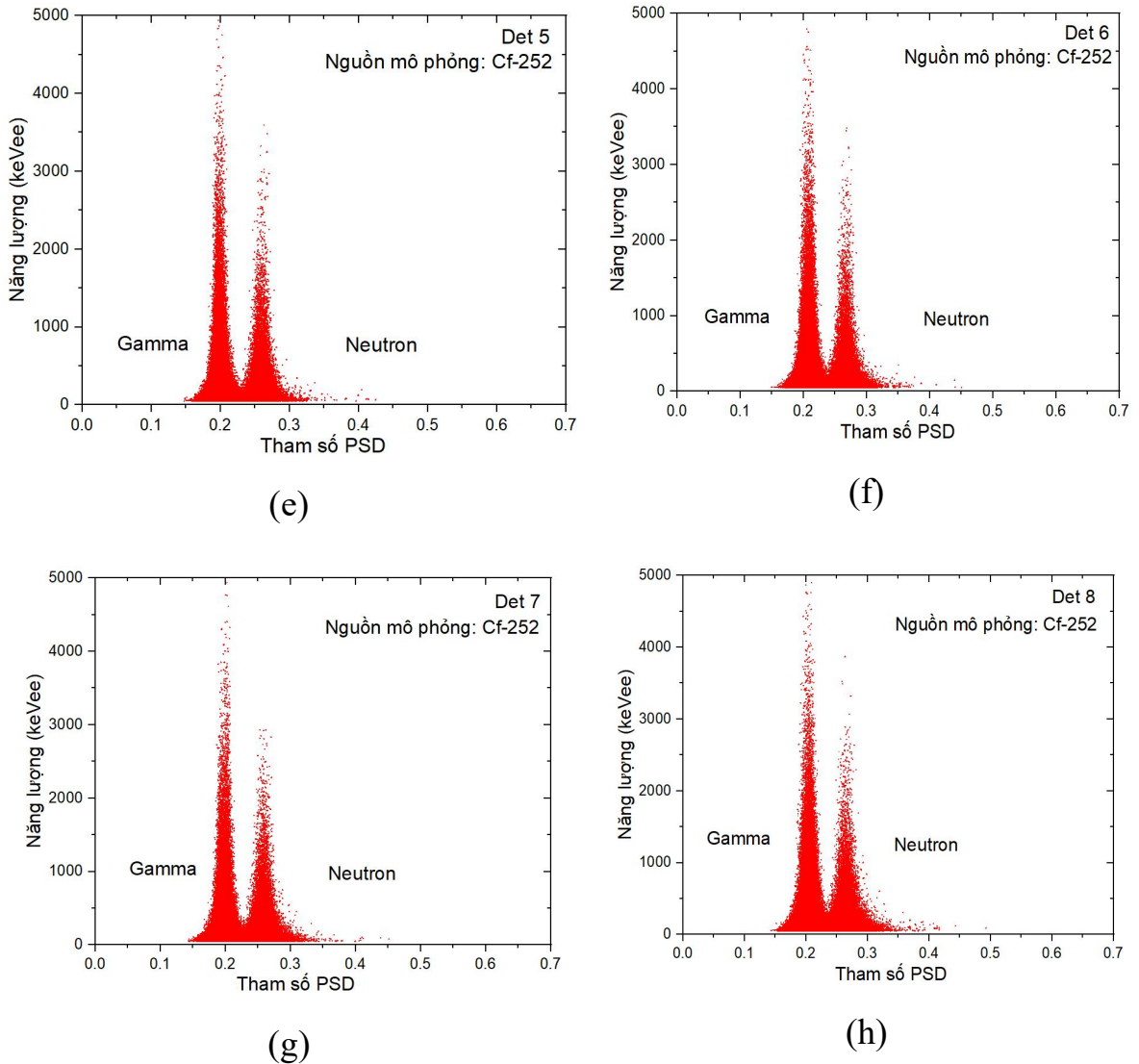
(b)



(c)

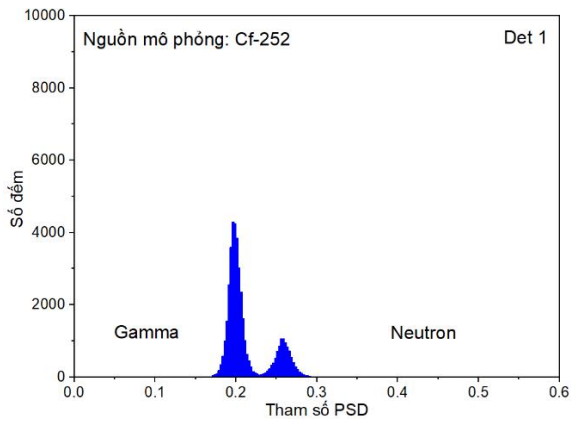


(d)

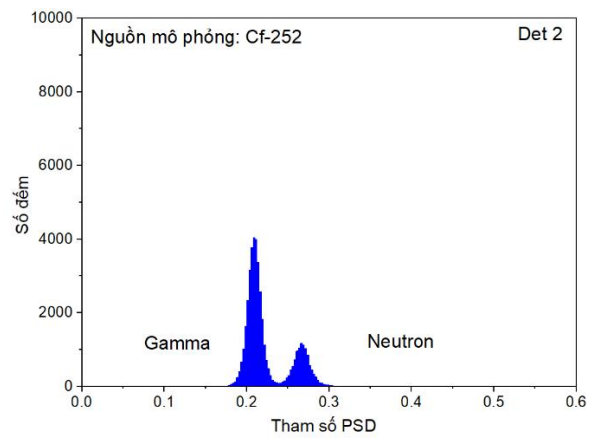


Hình 3.7 Phân bố tham số PSD theo biên độ xung của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Cf-252.

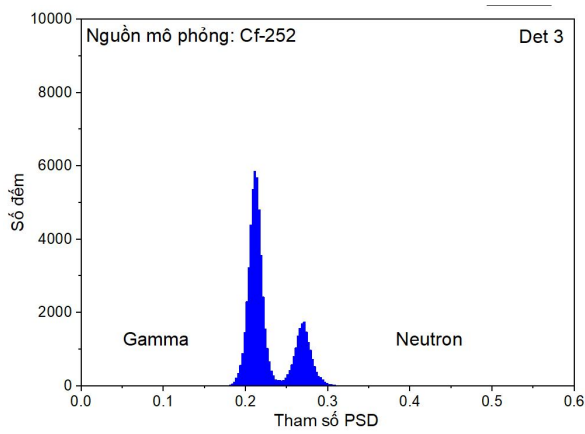
Hình 3.8 (a)÷(h) trình bày kết quả thống kê các tham số PSD cho các đầu dò tương ứng Det 1 ÷ Det 8 khi đo trên nguồn Cf-252. Thống kê tham số PSD cho thấy các hai đỉnh với phân bố mỗi đỉnh có dạng hình Gaussian. Phân bố bên trái được nhận diện là các sự kiện gamma, và phân bố phía bên phải được nhận dạng gồm các sự kiện neutron. Dựa trên đồ thị thống kê PSD cho các đầu dò có thể thấy, các đầu dò có thể tích nhỏ (Det 1 ÷ Det 3) có phân bố 2 hình Gauss rõ ràng hơn so với các đầu dò có thể tích lớn (Det 4 ÷ Det 8). Nếu xét các đầu dò có cùng đường kính tinh thể như: cặp (Det 1, Det 2), (Det 3, Det 4), (Det 5, Det 6) và (Det 7, Det 8) thì đầu dò có chiều dài tinh thể ngắn hơn có phân bố hình Gauss tách biệt nhau tốt hơn.



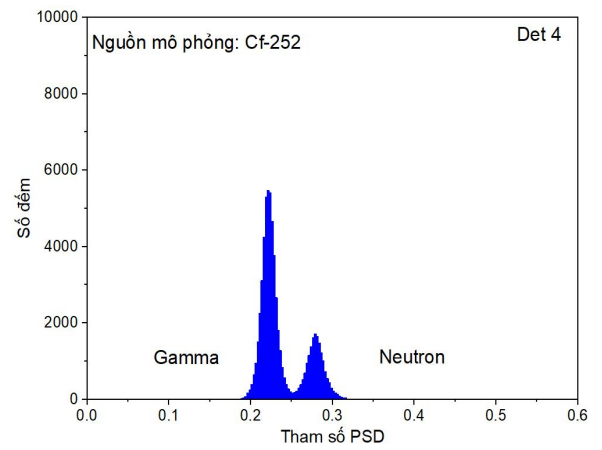
(a)



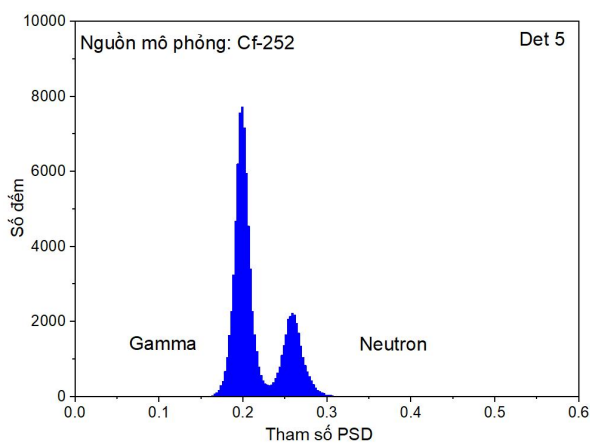
(b)



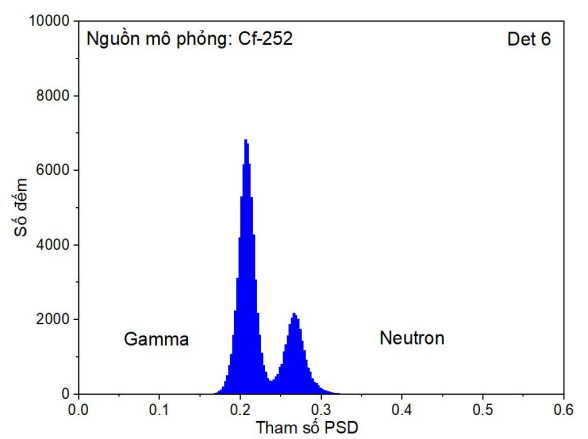
(c)



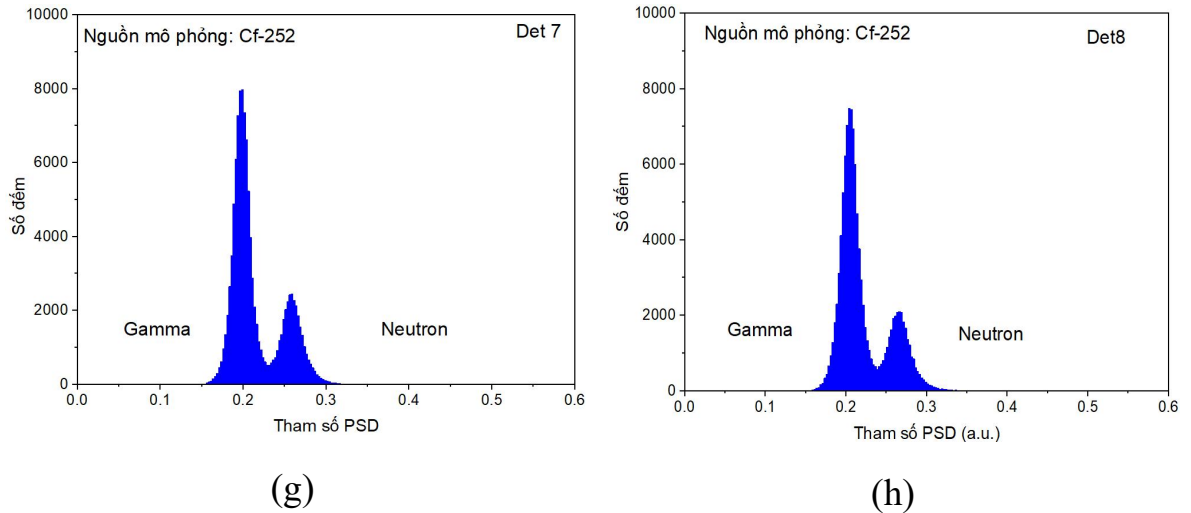
(d)



(e)

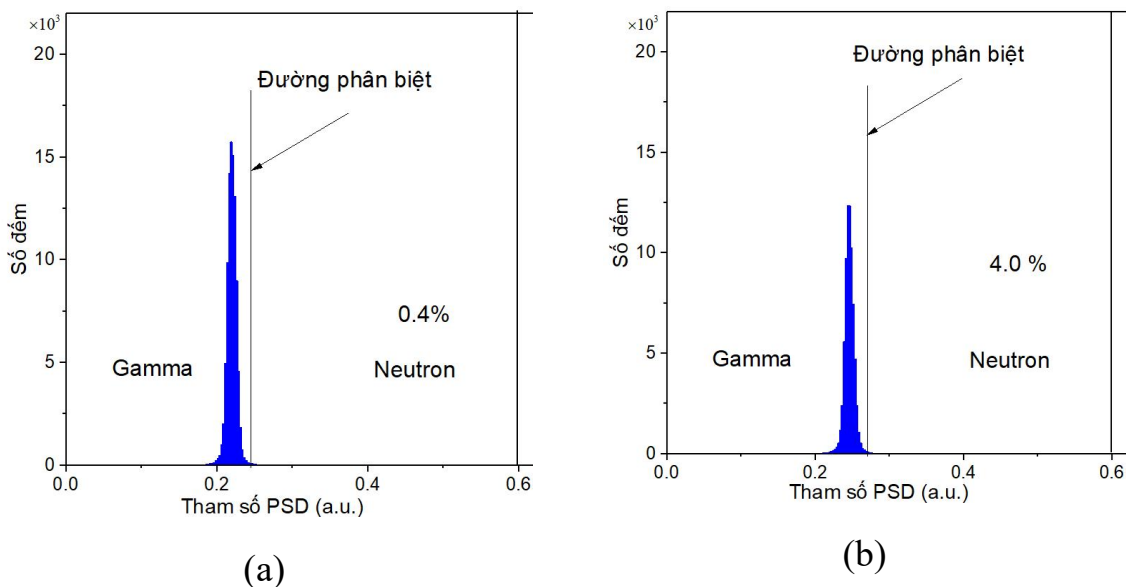


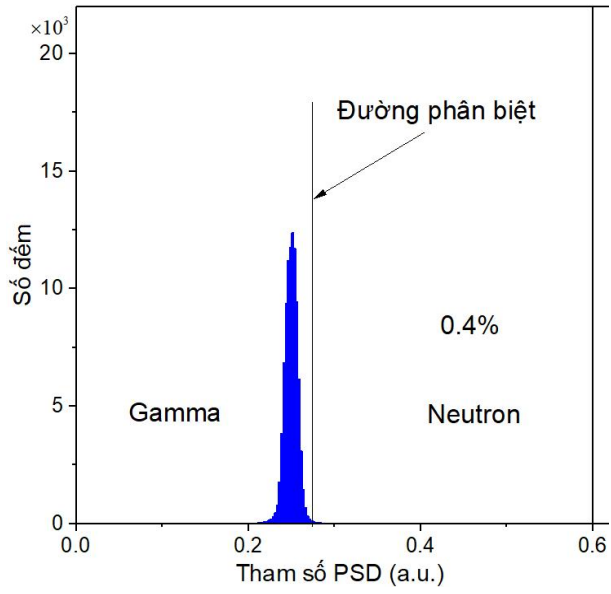
(f)



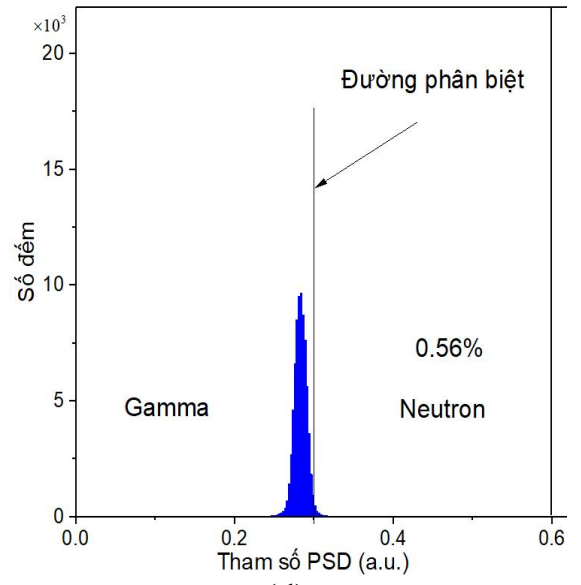
Hình 3.8 Thống kê theo tham số PSD của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Cf-252.

Hình 3.9 (a)÷(h) trình bày kết quả thống kê tham số PSD khi mô phỏng với nguồn Co-60, tương ứng cho các đầu dò Det 1 ÷ Det 8. Các kết quả cho thấy thống kê tham số PSD của các đầu dò đều có phân bố dạng hình Gauss. Nếu mỗi đầu dò sử dụng một ngưỡng để phân biệt các sự kiện neutron/gamma. Có thể tính được tỉ lệ nhầm lẫn của gamma sang vùng nhận dạng của neutron. Tỉ lệ này cũng đánh giá hiệu quả nhận dạng neutron/gamma cho đầu dò. Tỉ lệ nhầm lẫn của đầu dò đạt khoảng $0,3 \div 0,8\%$. Các đầu dò Det 1, Det 2, Det 3, Det 5, Det 6 và Det 7 có tỉ lệ nhầm lẫn nhỏ, trong khi Det 4 và Det 8 có tỉ lệ nhầm lẫn cao hơn.

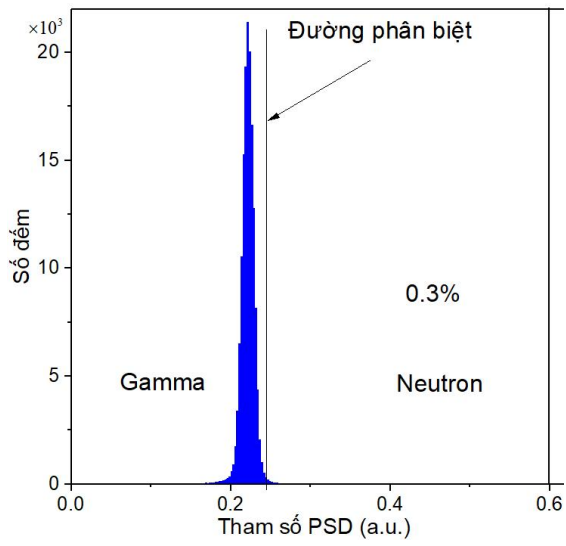




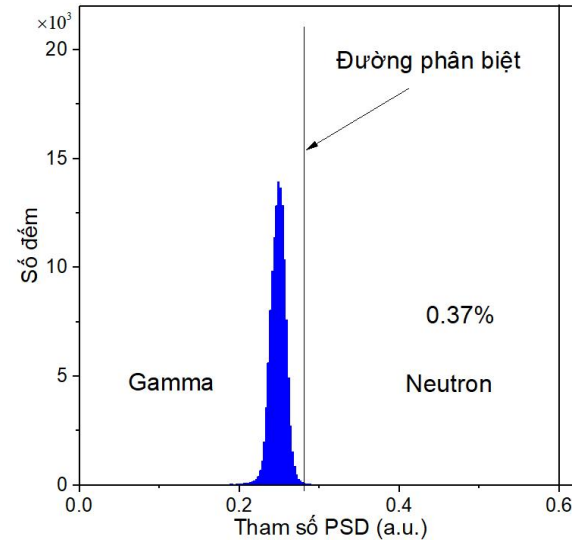
(c)



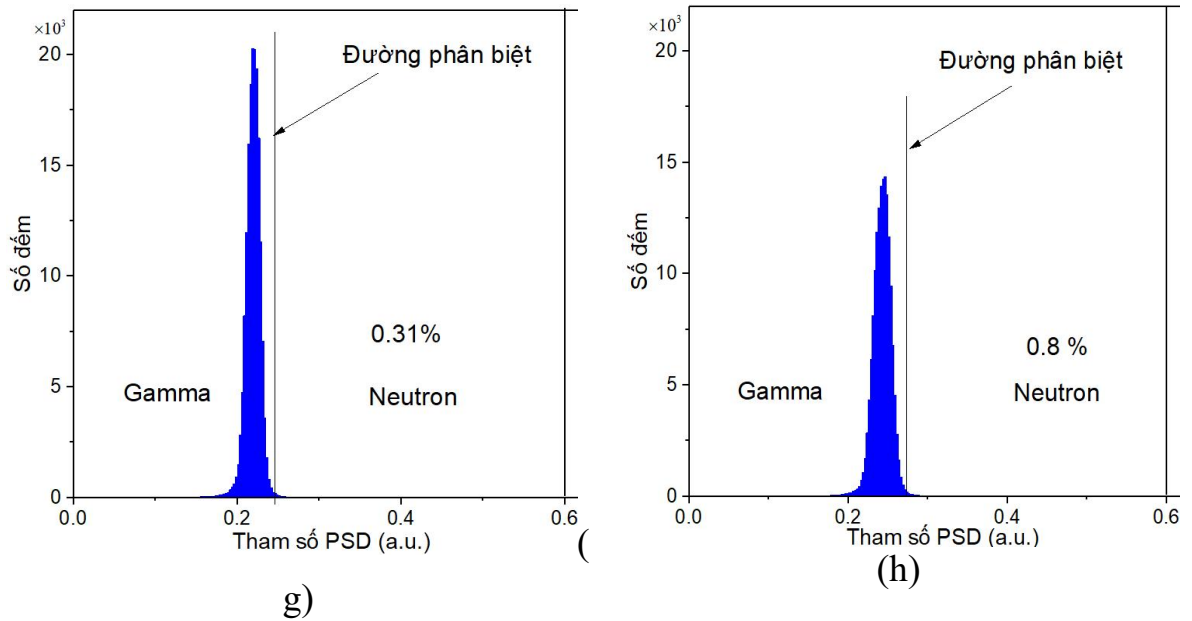
(d)



(e)



(f)



Hình 3.9 Thống kê tham số PSD theo biên độ xung của các đầu dò được mô phỏng trên nguồn Co-60.

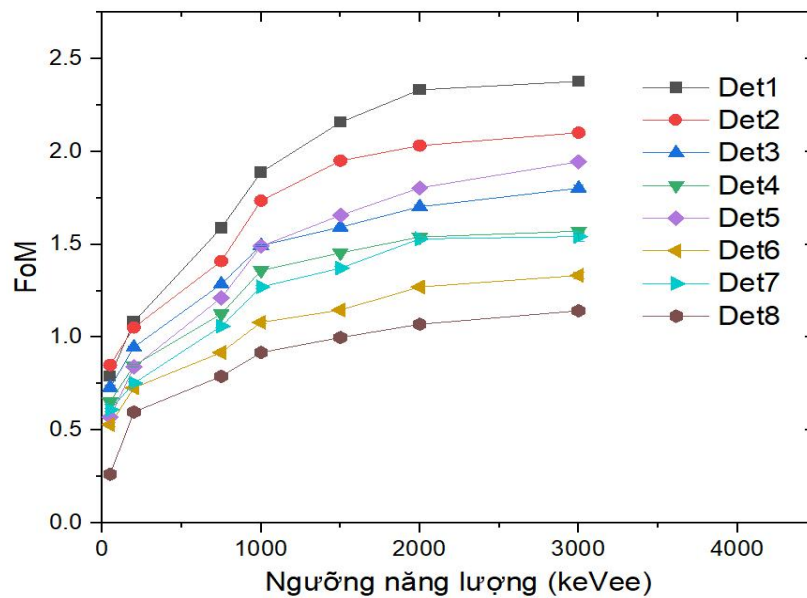
Để đánh giá định lượng hiệu quả phân biệt neutron/gamma cho các đầu dò, các phổ thống kê của PSD được khớp với dạng phân bố hình Gauss để tính toán hệ số FoM. Bảng 3.2 trình bày kết quả tính toán FoM cho thống kê các tham số PSD trên các đầu dò tương ứng. Bảng kết quả FoM cho thấy, tinh thể bán kính nhỏ có giá trị FoM lớn hơn và tỉ lệ giữa chiều dài với đường kính của tinh thể lớn thì giá trị FoM nhỏ. Trường hợp như Det 4 và Det 8.

Bảng 3.2 FoM của các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 khi đo trên nguồn Cf-252.

Đầu dò	Khoảng cách giữa 2 đỉnh phân bố Gauss	Độ rộng phân bố Gauss 1	Độ rộng phân bố Gauss 2	FoM
Det 1	0,058	0,010	0,015	$1,03 \pm 0,07$
Det 2	0,056	0,012	0,013	$1,03 \pm 0,09$
Det 3	0,056	0,011	0,014	$0,95 \pm 0,05$
Det 4	0,049	0,012	0,012	$0,86 \pm 0,04$
Det 5	0,057	0,012	0,014	$0,92 \pm 0,08$
Det 6	0,054	0,013	0,012	$0,92 \pm 0,09$
Det 7	0,058	0,013	0,015	$0,88 \pm 0,05$
Det 8	0,057	0,016	0,015	$0,78 \pm 0,04$

Hình 3.10 trình bày các giá trị FoM tính được trên các đầu dò Det 1 ÷ Det 8 như một hàm của ngưỡng năng lượng trong vùng 30 ÷ 3000 keVee. Mỗi điểm FoM trên đồ thị được tính bằng cách sử dụng các xung đo có cùng biên độ thu được trên mỗi đầu ghi theo đơn vị chuẩn hóa keVee.

Kết quả FoM thu được trên mỗi đầu ghi tương ứng với các ngưỡng năng lượng cho thấy đầu ghi Det 1 đạt giá trị lớn nhất. Trong khi đầu ghi Det 8 đạt các giá trị FoM thấp nhất trong toàn vùng khảo sát. Có thể thấy các FoM của các đầu dò trên toàn dải thử nghiệm được chia vào 3 nhóm. Nhóm 1, gồm đầu dò Det 1 và Det 2 có chỉ số FoM lớn nhất. Nhóm 2, gồm: Det 3, Det 4, Det 5 và Det 7 có chỉ số FoM thấp hơn nhóm 1. Nhóm 3, gồm Det 6 và Det 8 có chỉ số FoM thấp nhất. Điều này có thể do nguyên nhân các photon bị phân tán nhiều hơn về mặt thời gian trong quá trình đến được cathode của ống nhân quang. Do đó nó cho thấy với các tinh thể dài hơn, FoM có giá trị nhỏ hơn.



Hình 3.10 Khả năng phân biệt neutron/gamma trên các đầu dò EJ-301.

Giá trị FoM của đầu ghi Det 8 đạt giá trị $0,26 \pm 0,01$ tại ngưỡng 30 keVee và tăng dần đến giá trị $1,14 \pm 0,01$ tại ngưỡng 3000 keVee, được xem là đầu dò có kết quả tồi nhất trong các đầu dò đã khảo sát. Đầu ghi Det 1 đạt giá trị $0,79 \pm 0,01$ tại ngưỡng 30 keVee và tăng dần đến giá trị $2,38 \pm 0,01$ tại ngưỡng 3000 keVee, được xem là kết quả tốt nhất trong các đầu dò đã khảo sát. Nhóm 2, các đầu dò đạt giá trị FoM từ $0,57 \pm 0,01$ (ngưỡng 30 keVee) đến $1,95 \pm 0,01$ (ngưỡng 3000 keVee). Nhóm 3, các đầu dò đạt giá trị FoM từ $0,26 \pm 0,01$ (ngưỡng 30 keVee) đến $1,33 \pm 0,02$ (ngưỡng 3000 keVee).

Bảng 3.3 Kết quả tính FoM của các mô hình đầu dò với các ngưỡng năng lượng khác nhau.

Năng lượng (keVee)	FoM Det1	FoM Det2	FoM Det3	FoM Det4
50	$0,79 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,01$
200	$1,08 \pm 0,02$	$1,05 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,01$
750	$1,59 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,01$	$1,29 \pm 0,01$	$1,12 \pm 0,01$
1000	$1,89 \pm 0,01$	$1,74 \pm 0,01$	$1,49 \pm 0,01$	$1,36 \pm 0,01$
1500	$2,16 \pm 0,01$	$1,95 \pm 0,01$	$1,59 \pm 0,01$	$1,45 \pm 0,01$
2000	$2,33 \pm 0,01$	$2,03 \pm 0,01$	$1,70 \pm 0,01$	$1,54 \pm 0,01$
3000	$2,38 \pm 0,01$	$2,10 \pm 0,02$	$1,80 \pm 0,02$	$1,57 \pm 0,01$
Năng lượng (keVee)	FoM Det5	FoM Det6	FoM Det7	FoM Det8
50	$0,57 \pm 0,01$	$0,53 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$
200	$0,84 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01$
750	$1,21 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,01$	$1,06 \pm 0,01$	$0,79 \pm 0,01$
1000	$1,49 \pm 0,01$	$1,08 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,01$
1500	$1,66 \pm 0,01$	$1,15 \pm 0,01$	$1,37 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,01$
2000	$1,80 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,01$	$1,07 \pm 0,01$
3000	$1,95 \pm 0,01$	$1,33 \pm 0,02$	$1,54 \pm 0,02$	$1,14 \pm 0,01$

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN ĐỀ TÀI

1. KẾT LUẬN

Đề tài đã khảo sát hiệu suất ghi neutron và hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma dựa trên 8 mô hình đầu dò có kích thước khác nhau. Dựa trên cơ sở các đường kích thông dụng của cửa sổ PMT phổ biến là 34 mm và 50 mm, 08 mô hình tinh thể và ống dẫn sáng với kích thước khác nhau đã được mô phỏng. Đồng thời, một mô hình hàm đáp ứng của PMT và mạch TKĐ cũng được tích hợp trong mô hình; nhằm thu được kết quả mô phỏng các xung đầu ra chính xác. Các nguồn gamma, gồm: Cs-137, Co-60 và Na-22 đã được mô phỏng như các nguồn điểm đặt gần đầu dò. Nguồn Cf-252 được mô phỏng cho chùm bức xạ neutron/gamma với phương chiều ngang trên đầu dò. Một phương pháp phân biệt dạng xung dựa trên cơ sở so sánh diện tích xung -DCI đã được tích hợp cùng với mô hình mô phỏng để tính toán trực tiếp các tham số PSD cho từng xung được mô phỏng. Tham số FoM đã được tính toán cho từng đầu dò trong cùng một khoảng năng lượng được khảo sát. Đồng thời tỉ lệ nhầm lẫn khi mô phỏng trên các nguồn gamma cũng được tính toán để đánh giá hiệu quả phân biệt neutron/gamma cho từng mô hình đầu dò. Các kết quả chính đạt được gồm:

Đã khảo sát hiệu suất ghi tổng của các đầu dò, gồm: Det 1 và Det 2: đường kính 34 mm; Det 3, Det4: đường kính 50 mm; Det 5 và Det 6: đường kính 75 mm; Det 7 và Det 8: đường kính 100 mm. Kết quả khảo sát trên các nguồn neutron đơn năng đã cho thấy hiệu suất ghi tăng theo bán kính của đầu ghi. Các đường cong hiệu suất tăng nhanh theo ngưỡng năng lượng và đạt giá trị lớn nhất trong vùng từ $400 \div 1000$ keVee, và sau đó giảm chậm theo ngưỡng năng lượng. Hiệu suất ghi ít phụ thuộc vào chiều dài của đầu ghi đối với các tinh thể có đường kính nhỏ, nhưng giảm nhiều theo chiều dài đối với các tinh thể có đường kính lớn: Hiệu suất ghi của Det 7 đạt giá trị lớn nhất, đạt $0,821 \pm 0,012$ tại ngưỡng 500 keVee; Các đầu dò Det 1 và Det 2 đạt hiệu suất ghi nhỏ nhất, hiệu suất lớn nhất của hai đầu dò này đạt $0,301 \pm 0,007$ ở ngưỡng 1000 keVee.

Đã khảo sát khả năng phân biệt neutron/gamma trên 08 mô hình đầu dò. Hiệu quả phân biệt dạng xung neutron/gamma được đánh giá trên các đầu dò qua các nguồn gamma, nguồn neutron Cf-252 và nguồn neutron đơn năng. Kết

qua cho thấy, đầu dò có đường kính tinh thể nhỏ: Det 1 và Det 2 có hiệu quả phân biệt neutron/gamma tốt hơn. Đầu dò có đường kính tinh thể lớn: Det 7 và Det 8 có hiệu quả phân biệt neutron/gamma thấp hơn. Hiệu quả phân biệt neutron/gamma cũng phụ thuộc vào chiều dài tinh thể của đầu dò. Hai đầu dò có đường kính tinh thể bằng nhau, tinh thể có chiều dài ngắn hơn có hiệu quả phân biệt neutron/gamma tốt hơn.

2. KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu hiệu suất ghi và hiệu quả phân biệt neutron/gamma thu được trên các mô hình đầu dò trong nghiên cứu này, nên được sử dụng làm cơ sở để tính toán và xây dựng các đầu dò đo đồng thời cả neutron và gamma dựa trên chất nhấp nháy EJ-301.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Knoll G.F., 2010, *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sons.
2. Payne C., Sellin P.J., Ellis M., Duroe K., Jones A., Joyce M., Speller R., 2015, Neutron/gamma pulse shape discrimination in EJ-299-34 at high flux, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, pp. 1-5.
3. Collaboration Geant, 2012, Geant4 User's Guide for Application Developers, *Accessible from the GEANT4 web page Version geant4 9*.
4. Nicholson P.W., 1973, *Nuclear Electronics*, A Wiley-Interscience Publication.
5. Phan Van Chuan, Nguyen Xuan Hai, 2018, Evaluating four neutron-gamma discrimination methods with EJ-301 scintillator, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, (98, Issue 1), pp. 75–84.
6. Bayat E., Afarideh H., Davani F.A., Ghal-Eh N., 2016, A quality survey on different shielding configurations of gamma ray detector used with a portable PGNA system, *Radiation Physics and Chemistry*, (120), pp. 7-11.
7. Sosa C.S., Flaska M., Pozzi S.A., 2016, Comparison of analog and digital pulse-shape-discrimination systems, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, (826), pp. 72–79.
8. Lotfi Y., Moussavi-Zarandi S.A., Ghal-Eh N., Pourjafarabadi E., Bayat E., 2019, Neutron–gamma discrimination based on quantum clustering technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, (928), pp. 51-57.
9. Amiri, M., Přenosil, V., Cvachovec, F., Matěj, Z., & Mravec, F., 2015, Quick algorithms for real-time discrimination of neutrons and gamma rays, *Journal of Radioanal. Nucl. Chem.*, 303(1), pp. 583–599.
10. Phan Van Chuan, Nguyen Duc Hoa, Nguyen Xuan Hai, Nguyen Ngoc Anh, Nguyen Nhi Dien, Pham Dinh Khang, 2018, A scintillation detector

configuration for pulse shape analysis, *Nuclear Engineering and Technology*, (50), pp. 1426-1432.

11. Jastaniah S.D., Sellin P.J., 2002, Digital pulse shape algorithms for scintillation-based neutron detectors, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (49.4), pp. 1824-1828.

12. ENDF/B-VII, No Title, <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.jsp>. (n.d.).

13. Geant4, <http://geant4.cern.ch>

14. Photonics H., 2014, Photomultiplier Tube R9420 datasheet, *Hamamatsu*.

15. Choong, W.-S., 2009, The timing resolution of scintillation-detector systems: Monte Carlo analysis, *Phys. Med. Biol.*, (54), pp. 6495–6513.

16. De Haas J.T.M., Dorenbos P., 2011, Methods for accurate measurement of the response of photomultiplier tubes and intensity of light pulses, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, (58), pp. 1290-1296.

17. Smith A. B., Fields P. R., & Roberts J. H., 1957, Spontaneous fission neutron spectrum of Cf-252. *Physical Review*, 108(2), pp. 411.

PHỤ LỤC

Code Chương trình

+ Hàm Main:

```
// hàm EJ301

#include "EJ301DetectorConstruction.hh"
#include "EJ301ActionInitialization.hh"
#include "G4Types.hh"

// them vao de cahy da luong

#ifdef G4MULTITHREADED
#include "G4MTRunManager.hh"
#else
#include "G4RunManager.hh"
#endif

#ifdef G4MULTITHREADED
G4MTRunManager* runManager = new G4MTRunManager;
runManager-
>SetNumberOfThreads(2*(G4Threading::G4GetNumberOfCores()));
#else
G4RunManager* runManager = new G4RunManager;
#endif

#include "G4UImanager.hh"
#include "QBBC.hh"
#include <G4UIGAG.hh>
#include "G4VisExecutive.hh"
#include "G4UIExecutive.hh"
#include "Randomize.hh"
#include "PhysicsList.hh"
```

```

//....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0O
Oooo....

int main(int argc,char** argv)
{
    // Detect interactive mode (if no arguments) and define UI session
    G4UIExecutive* ui = 0;
    if ( argc == 1 ) {
        ui = new G4UIExecutive(argc, argv);
    }

    // Choose the Random engine
    G4Random::setTheEngine(new CLHEP::RanecuEngine);
    runManager->SetUserInitialization(new EJ301DetectorConstruction());
    runManager->SetUserInitialization(new PhysicsList);

    // User action initialization
    EJ301DetectorConstruction*      detConstruction      =      new
    EJ301DetectorConstruction();

    runManager->SetUserInitialization(new
    EJ301ActionInitialization(detConstruction));

    // Initialize visualization
    G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;
    visManager->Initialize();

    // Get the pointer to the User Interface manager
    G4UImanager* UImanager = G4UImanager::GetUIpointer();

    // Process macro or start UI session
    if ( ! ui ) {

        // batch mode

        G4String command = "/control/execute ";

```

```

G4String fileName = argv[1];
UImanager->ApplyCommand(command+fileName);
}
else {
    // interactive mode
    UImanager->ApplyCommand("/control/execute init_vis.mac");
    ui->SessionStart();
    delete ui;
}
delete visManager;
delete runManager;
}
+ Hàm Construction EJ301
// Construction EJ301 detec
//-----
#include "EJ301DetectorConstruction.hh"
#include "EJ301SteppingAction.hh"
#include "EJ301EventAction.hh"
#include "EJ301PMTSD.hh"
#include "G4RunManager.hh"
#include <G4SDManager.hh>
#include "G4NistManager.hh"
#include "G4MaterialTable.hh"
#include "G4Element.hh"
#include "G4ElementTable.hh"
#include "G4Box.hh"

```

```

#include "G4Tubs.hh"
#include "G4Cons.hh"
#include "G4Orb.hh"
#include "G4Polycone.hh"
#include "G4Sphere.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4LogicalBorderSurface.hh"
#include "G4OpticalSurface.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Trd.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
#include <G4LogicalSkinSurface.hh>
using namespace CLHEP;

//...oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0O
Oooo.....

EJ301DetectorConstruction::EJ301DetectorConstruction()
: G4VUserDetectorConstruction(),
  fScoringVolume(0)
{ }

//...oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0O
Oooo.....

EJ301DetectorConstruction::~EJ301DetectorConstruction()
{ }

//...oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0O
Oooo.....

```

```

//-----
// Material definitions
//-----

void EJ301DetectorConstruction::DefineMaterials()
{
    // world mat
    G4NistManager* nist = G4NistManager::Instance();
    world_mat = nist->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
    G4double energy[2] = {1.239841939*eV/0.2, 1.239841939*eV/0.9};
    G4double rindexWorld[2] = {1.0, 1.0};
    G4MaterialPropertiesTable *mptWorld = new G4MaterialPropertiesTable();
    mptWorld->AddProperty("RINDEX", energy, rindexWorld, 2);
    world_mat->SetMaterialPropertiesTable(mptWorld);

    G4double a, density, fracMass, z;
    G4int ncomp;
    G4String symbol;

    // Detector EJ-301
    // EJ301 Elements
    a = 1.00794*g / mole;
    elHydrogen = new G4Element("Hydrogen", symbol = "H", z = 1., a);
    a = 12.0107*g / mole;
    elCarbon = new G4Element("Carbon", symbol = "C", z = 6., a);
    density = 0.874*g / cm3;
    EJ301 = new G4Material("Cell_EJ_301", density, ncomp = 2);
    EJ301->AddElement(elHydrogen, fracMass = 9.2*perCent);
    EJ301->AddElement(elCarbon, fracMass = 90.8*perCent);
}

```



```

//-----
// Container (Aluminium) Al
    a = 26.9815*g / mole;
    elAluminium = new G4Element("Aluminium", symbol = "Al", z = 13.,
a);
    density = 2.6989*g / cm3;
    det_shell_mat = new G4Material("Container NE213", density, ncomp =
1);
    det_shell_mat->AddElement(elAluminium, fracMass = 100.*perCent);

//=====

// Glass (window for detector and PM tube)
    a = 28.0855*g / mole;
    elSilicium = new G4Element("Silicium", symbol = "Si", z = 14., a);
    a = 15.9994*g / mole;
    elOxygen = new G4Element("Oxygen", symbol = "O", z = 8., a);
    density = 2.648*g / cm3;
    Quartz = new G4Material("Glass", density, ncomp = 2);
    Quartz->AddElement(elOxygen, 2);
    Quartz->AddElement(elSilicium, 1);

//=====

// Ong dang sang
    fH = new G4Element("H", "H", z=1., a=1.01*g/mole);
    fC = new G4Element("C", "C", z=6., a=12.01*g/mole);
    fGlass = new G4Material("Glass", density=1.032*g/cm3,2);
    fGlass->AddElement(fC,91.533*perCent);

```

```

fGlass->AddElement(fH,8.467*perCent);

//-----

// athode Element SbSb
a = 121.76*g / mole;

G4Element* Sb = new G4Element("Antimony", symbol = "Sb", z = 51.,
a);

// Cs
a = 132.905*g / mole;

G4Element* Cs = new G4Element("Cesium", symbol = "Cs", z = 55., a);

// K
a = 39.0983*g / mole;

G4Element* K = new G4Element("Potassium", symbol = "K", z = 19.,
a);

// Photocathode Material
density = 2.00*g / cm3;

K2CsSb = new G4Material("K2CsSb", density, ncomp = 3);
K2CsSb->AddElement(K, 2);
K2CsSb->AddElement(Cs, 1);
K2CsSb->AddElement(Sb, 1);

// Scintillator Optical Properties

// Container-----

const G4int nEntries = 8;

const G4int EJ301_NUMENTRIES = 8;

// Energy

G4double EJ301_Energy[EJ301_NUMENTRIES] = { 2.48*eV, 2.61*eV,
2.76*eV, 2.84*eV, 2.92*eV, 3.10*eV, 3.20*eV, 3.31*eV };

// Al reflector

```

```

G4double AlRefractionIndex[nEntries] = { 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
1.0 };

G4double AlAbsorptionLength[nEntries] = { 1.0E-9*m, 1.0E-9*m,
1.0E-9*m, 1.0E-9*m, 1.0E-9*m, 1.0E-9*m, 1.0E-9*m, 1.0E-9*m };

G4MaterialPropertiesTable* AlMPT = new G4MaterialPropertiesTable();
AlMPT->AddProperty("RINDEX", EJ301_Energy, AlRefractionIndex,
nEntries);

AlMPT->AddProperty("ABSLENGTH", EJ301_Energy,
AlAbsorptionLength, nEntries);

det_shell_mat->SetMaterialPropertiesTable(AlMPT);

//-----
// EJ301 Cell

G4double EJ301RefractionIndex[nEntries] = { 1.9, 1.9, 1.9, 1.9, 1.9, 1.9,
1.9, 1.9 };

G4double EJ301AbsorptionLength[nEntries] = { 50.*cm, 50.*cm,
50.*cm, 50.*cm, 50.*cm, 50.*cm, 50.*cm, 50.*cm };

EJ301_mt = new G4MaterialPropertiesTable();
EJ301_mt->AddProperty("RINDEX", EJ301_Energy,
EJ301RefractionIndex, nEntries);

EJ301_mt->AddProperty("ABSLENGTH", EJ301_Energy,
EJ301AbsorptionLength, nEntries);

// pho phat xa NL

G4double EJ301_SCINT[EJ301_NUMENTRIES] = { 0.18, 0.36, 0.7,
0.85, 1.0, 0.65, 0.35, 0.05 };

G4double EJ301_RIND[EJ301_NUMENTRIES] = { 1.53, 1.53, 1.53,
1.53, 1.53, 1.53, 1.53 };

// chieu dai hap thu

G4double EJ301_ABSL[EJ301_NUMENTRIES] = { 7.0*m, 7.0*m,
7.0*m, 7.0*m, 7.0*m, 7.0*m, 7.0*m }; // (lower value)

```

```

//-----
EJ301_mt->AddProperty("FASTCOMPONENT",      EJ301_Energy,
EJ301_SCINT, EJ301_NUMENTRIES);

EJ301_mt->AddProperty("SLOWCOMPONENT",      EJ301_Energy,
EJ301_SCINT, EJ301_NUMENTRIES);

EJ301_mt->AddProperty("RINDEX",    EJ301_Energy,  EJ301_RIND,
EJ301_NUMENTRIES);

EJ301_mt->AddProperty("ABSLENGTH",      EJ301_Energy,
EJ301_ABSL, EJ301_NUMENTRIES);

EJ301_mt->AddConstProperty("SCINTILLATIONYIELD", 12900. /
MeV); // EJ301 = 12900 photon/1MeV [knoll]

EJ301_mt->AddConstProperty("RESOLUTIONSCALE", 1.0);

EJ301_mt->AddConstProperty("FASTTIMECONSTANT", 3.16*ns); //
EJ 301 datasheep

EJ301_mt->AddConstProperty("SLOWTIMECONSTANT", 32.3*ns); //
Order of Magnitude from G.F. Knoll(10 times fast component)

EJ301_mt->AddConstProperty("YIELDRATIO", 1.0);

EJ301->SetMaterialPropertiesTable(EJ301_mt);

EJ301->GetIonisation()->SetBirksConstant(0.137*mm / MeV);

// Ong dang sang + cua so

G4double QuartzRefractionIndex[nEntries] = { 1.49, 1.49, 1.49, 1.49,
1.49, 1.49, 1.49, 1.49};

G4double QuartzAbsorptionLength[nEntries] = { 420.0*cm, 420.0*cm,
420.0*cm, 420.0*cm, 420.0*cm, 420.0*cm, 420.0*cm, 420.0*cm };

G4MaterialPropertiesTable*      GlassMPT      =      new
G4MaterialPropertiesTable();

GlassMPT->AddProperty("RINDEX",      EJ301_Energy,
QuartzRefractionIndex, nEntries);

```

```

    GlassMPT->AddProperty("ABSLENGTH",           EJ301_Energy,
    QuartzAbsorptionLength, nEntries);

    fGlass->SetMaterialPropertiesTable(GlassMPT);
}

G4VPhysicalVolume* EJ301DetectorConstruction::Construct()
{
    DefineMaterials();
    return ConstructDetector();
}

G4VPhysicalVolume* EJ301DetectorConstruction::ConstructDetector()
{
    // vung mo phong
    G4double world_sizeXY = 100 * cm, world_sizeZ = 100 * cm;
    G4bool checkOverlaps = true;
    //  khoi World
    G4Box* solidWorld =
        new G4Box("World",           //its name
            0.5*world_sizeXY, 0.5*world_sizeXY, 0.5*world_sizeZ); //its size

    G4LogicalVolume* logicWorld =
        new G4LogicalVolume(solidWorld, //its solid
            world_mat, //its material Air (khÃ'ng khÃ)
            "World"); //its name

    G4VPhysicalVolume* physWorld =
        new G4PVPlacement(0, //no rotation
            G4ThreeVector(), //at (0,0,0)
            logicWorld, //its logical volume

```

```

    "World",          //its name
    0,                //its mother volume
    false,           //no boolean operation
    0);              //copy number

//=====

// cac tham so hinh hoc cho detEJ301

    G4double StartPhi = 0.*deg;
    G4double DeltaPhi = 360.*deg;
    G4double ContainerThickness = 1.0*mm;           // Thickness of
Container
    G4double ScintHalfLength = 1.25*cm;           // HalfLength of Scint
L=2.5 cm
    G4double ScintRadius = 1.7*cm;               // Radius of Scint
    G4double PMTWindowHalfLength = 1.25*cm;      // chieu dai ong
dan sang
    G4double CathodeHalfLength = 1*mm;
    G4double CathodeRadius =1.7*cm;

//-----

    G4double ContainerRadius = ScintRadius + ContainerThickness;
// Radius of container
    G4double ContainerHalfLength = ScintHalfLength;//
// Container
    G4ThreeVector contain_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, 0.*cm);
    G4Tubs* Cell_solid =
        new G4Tubs("cell_contain",
            ScintRadius, ContainerRadius, ContainerHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
    G4LogicalVolume* logiccontain =

```

```

new G4LogicalVolume(Cell_solid,      //its solid
                    det_shell_mat,
                    "cell_contain"); //its name
G4VPhysicalVolume* physiContain = new G4PVPlacement(0,      //no
rotation
                    contain_pos,      //at position
                    logiccontain,      //its logical volume
                    "cell_contain",    //its name
                    logicWorld,        //its mother volume
                    false,             //no boolean operation
                    0);                //copy number
                    //checkOverlaps); //overlaps checking

//-----
// tinh the nhap nhay
G4ThreeVector cell_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, 0.*cm);
G4Tubs* solidcell_EJ301 =
    new G4Tubs("cell_EJ301",          //its name
              0, ScintRadius, ScintHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
G4LogicalVolume* logiccell_EJ301 =
    new G4LogicalVolume(solidcell_EJ301, //its solid
                        EJ301,           //its material Ej-301
                        "cell_EJ301");  //its name

//-----
G4VPhysicalVolume* physiCrystalCellEJ301 = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
                    cell_pos,          //at position
                    logiccell_EJ301,    //its logical volume

```

```

"cell_EJ301",          //its name
logicWorld,           //its mother volume
false,                //no boolean operation
0);                  //copy number
//checkOverlaps);    //overlaps checking

// cua so+ Ong dan sang

G4ThreeVector back_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, ScintHalfLength
+ PMTWindowHalfLength);

//-----

G4Cons*   solidQuartz   =   new   G4Cons("Win_Quartz",0.*cm,
ScintRadius,0.*cm,CathodeRadius,   PMTWindowHalfLength,   StartPhi,
DeltaPhi);

G4LogicalVolume*   logicBack   =   new   G4LogicalVolume(solidQuartz,
//its solid

    fGlass,                //its material Glass

    "Win_Quartz");        //its name

G4VPhysicalVolume*   physiPMTWindow   =   new   G4PVPlacement(0,
//no rotation

    back_pos,              //at position

    logicBack,            //its logical volume

    "Win_Quartz",        //its name

    logicWorld,          //its mother volume

    false,                //no boolean operation

    0);

//-----

G4Cons*   WinContai   =   new   G4Cons("Win_Container",ScintRadius,
ContainerRadius,CathodeRadius,CathodeRadius+ContainerThickness,
PMTWindowHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);

```



```

G4LogicalVolume* logicContai = new G4LogicalVolume(WinContai,
//its solid
    det_shell_mat,                //its material Glass
    "Win_Container");            //its name
G4VPhysicalVolume* physiWindowContai = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
    back_pos,                    //at position
    logicContai,                //its logical volume
    "Win_Container",            //its name
    logicWorld,                //its mother volume
    false,                      //no boolean operation
    0);
//-----
// Front_contain
G4ThreeVector front_pos = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm, -
(ContainerHalfLength + 0.5*ContainerThickness));
//ContainerThickness
G4Tubs* Front_contain_solid =
    new G4Tubs("Front_contain",
    0, ContainerRadius, 0.5*ContainerThickness, StartPhi, DeltaPhi);
G4LogicalVolume* logicFront_contain =
    new G4LogicalVolume(Front_contain_solid, //its solid
    det_shell_mat,                //its material (chưa thay đổi)
    "Front_contain");            //its name
G4VPhysicalVolume* physiFront_contain = new G4PVPlacement(0,
//no rotation
    front_pos,                  //at position

```

```

    logicFront_contain,      //its logical volume
    "Front_contain",        //its name
    logicWorld,             //its mother volume
    false,                  //no boolean operation
    0);                     //copy number
    //checkOverlaps);      //overlaps checking
//-----
// Photocathode
G4Tubs* solidCathode = new G4Tubs("Cathode", 0.*cm, CathodeRadius,
    CathodeHalfLength, StartPhi, DeltaPhi);
                                // K2CsSb
G4LogicalVolume* logicCathode = new G4LogicalVolume(solidCathode,
K2CsSb, "logicCathode");
G4ThreeVector positionCathode = G4ThreeVector(0.*cm, 0.*cm,
ScintHalfLength + 2*PMTWindowHalfLength + CathodeHalfLength);
G4VPhysicalVolume* physiCathode = new G4PVPlacement(0,
positionCathode, logicCathode,
    "logicCathode", logicWorld, false, 0);
//-----
// Su ly bien va be mat, khong đư ợc vi ết tại đây
//-----
return physWorld;
}
+ Hàm physicsList:
#include "PhysicsList.hh"
#include "NotronHPphysics.hh"
#include "EJ301EventAction.hh"

```

```
#include "G4VUserPhysicsList.hh"
#include "G4EmStandardPhysics.hh"
#include "G4HadronElasticPhysics.hh"
#include "G4OpticalPhysics.hh"
#include "G4OpticalProcessIndex.hh"
##include "G4DecayPhysics.hh"
// particles
#include "G4BosonConstructor.hh"
#include "G4LeptonConstructor.hh"
#include "G4MesonConstructor.hh"
#include "G4BosonConstructor.hh"
#include "G4BaryonConstructor.hh"
#include "G4IonConstructor.hh"
#include "G4ShortLivedConstructor.hh"
#include "G4ParticleTypes.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
PhysicsList::PhysicsList() : G4VModularPhysicsList()
{
    // default cut value (0.1 mm)
    defaultCutValue = 0.1*mm;
    SetVerboseLevel(1);
    // EM Physics
    RegisterPhysics(new G4EmStandardPhysics());
    // Neutron Physics
    RegisterPhysics(new NeutronHPphysics("neutronHP"));
}
```

```

// Optical Physics
G4OpticalPhysics* opticalPhysics = new G4OpticalPhysics();
RegisterPhysics(opticalPhysics);
//-----m
//theParticleIterator->reset();
opticalPhysics->SetScintillationYieldFactor(1.0); // ti le phat quang
opticalPhysics->SetTrackSecondariesFirst(kScintillation, true);
}
PhysicsList::~PhysicsList() {}
void PhysicsList::ConstructParticle()
{
G4BosonConstructor pBosonConstructor;
pBosonConstructor.ConstructParticle();
G4LeptonConstructor pLeptonConstructor;
pLeptonConstructor.ConstructParticle();
G4MesonConstructor pMesonConstructor;
pMesonConstructor.ConstructParticle();
G4BaryonConstructor pBaryonConstructor;
pBaryonConstructor.ConstructParticle();
G4IonConstructor pIonConstructor;
pIonConstructor.ConstructParticle();
G4ShortLivedConstructor pShortLivedConstructor;
pShortLivedConstructor.ConstructParticle();
}
void PhysicsList::SetCuts() {
SetCutsWithDefault();
}

```

```

}
+ Hàm RunAction
// EJ301RunAction.cc
#include "EJ301RunAction.hh"
#include "EJ301PrimaryGeneratorAction.hh"
#include "EJ301DetectorConstruction.hh"
#include "G4GeneralParticleSource.hh"
#include "EJ301Run.hh"
#include "EJ301Analysis.hh"
#include "G4RunManager.hh"
#include "G4LogicalVolumeStore.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"
#include "G4ios.hh"
#include <iomanip>
//...oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0OOooo.....oooOO0O
Oooo.....
EJ301RunAction::EJ301RunAction()
: G4UserRunAction()
{
    // Khai báo các đơn vị sử dụng
    const G4double milligray = 1.e-3*gray;
    const G4double microgray = 1.e-6*gray;
    const G4double nanogray = 1.e-9*gray;
    const G4double picogray = 1.e-12*gray;
    new G4UnitDefinition("milligray", "milliGy", "Dose", milligray);

```

```

new G4UnitDefinition("microgray", "microGy", "Dose", microgray);
new G4UnitDefinition("nanogray", "nanoGy", "Dose", nanogray);
new G4UnitDefinition("picogray", "picoGy", "Dose", picogray);
// add new units for mass
const G4double milligram = 1.e-3*kg;
new G4UnitDefinition("milligram", "mg", "Dvkl", milligram);
// add new units for energy
const G4double keV = 1.e-3*MeV;
new G4UnitDefinition("keV", "keV", "DvNL", keV);
G4RunManager::GetRunManager()->SetPrintProgress(1);
G4AnalysisManager*          analysisManager          =
G4AnalysisManager::Instance();
G4cout << "Using " << analysisManager->GetType() << G4endl;
// Create directories
xmin = 0; // in keV
xmax = 2e3; // in keV
binsize = 1; // in keV
nbins = (int)((xmax - xmin) / binsize);
analysisManager->SetVerboseLevel(1);
analysisManager->SetFirstHistoId(1);
// Creating histogram
analysisManager->CreateH1("1", "Amplitude of pulses", nbins, xmin,
xmin);
xmin = 0; //
xmax = 4e3; //
binsize = 2; //
nbins = (int)(xmax - xmin) / binsize;

```

```

analysisManager->CreateH1("2", "Absorbed Photons", nbins, xmin,
xmin);

// Here we need some units!
xmin = 0; // in Area_tail/Area_total * 1000
xmax = 1000; // in Area_tail/Area_total * 1000
binsize = 1; // in ns
nbins = (int)(xmax - xmin) / binsize;

analysisManager->CreateH1("3", "Index max of pulse", nbins, xmin,
xmin);

xmin = 0; // in keV
xmax = 10e3; // in keV
binsize = 2; // in keV
nbins = (int)((xmax - xmin) / binsize);

analysisManager->CreateH1("4", "Energy of Primary Particles", nbins,
xmin*keV, xmax*keV);

// Creating ntuple
// phan nay co the mo de ghi dang cột
analysisManager->CreateNtuple("Data", "Parameter pulse shape");
analysisManager->CreateNtupleDColumn("Vmax");
analysisManager->CreateNtupleDColumn("Area_tail");
analysisManager->CreateNtupleDColumn("Area_total");
analysisManager->CreateNtupleDColumn("Index_max");
analysisManager->FinishNtuple();
}

EJ301RunAction::~EJ301RunAction()
{}

G4Run* EJ301RunAction::GenerateRun()

```

```

{
    return new EJ301Run;
}

void EJ301RunAction::BeginOfRunAction(const G4Run*)
{
    //inform the runManager to save random number seed
    G4RunManager::GetRunManager()->SetRandomNumberStore(false);
    // Get analysis manager
    G4AnalysisManager* analysisManager = G4AnalysisManager::Instance();
    G4String fileName = "Datatest";
    analysisManager->OpenFile(fileName);
}

void EJ301RunAction::EndOfRunAction(const G4Run* run)
{
    G4int nofEvents = run->GetNumberOfEvent(); // trả về số sự kiện đã phát
    if (nofEvents == 0) return;

    const EJ301Run* ej301Run = static_cast<const EJ301Run*>(run);
    G4AnalysisManager* analysisManager = G4AnalysisManager::Instance();

    if (analysisManager->GetH1(1)) {
        G4cout << " EAbs : mean = "
                << G4BestUnit(analysisManager->GetH1(1)->mean(), "DvNL")
                << " rms = "
                << G4BestUnit(analysisManager->GetH1(1)->rms(), "DvNL") <<
G4endl
                << nofEvents << G4endl;
    }
}

```



```
    }  
    analysisManager->Write();  
    analysisManager->CloseFile();  
}  
+ Hàm PMT  
// EJ301PMTSD  
#include "EJ301PMTSD.hh"  
#include "EJ301PMTHit.hh"  
#include "EJ301DetectorConstruction.hh"  
#include "EJ301UserTrackInformation.hh"  
#include "EJ301EventAction.hh"  
#include "G4UserEventAction.hh"  
#include "EJ301Analysis.hh"  
#include "G4VPhysicalVolume.hh"  
#include "G4LogicalVolume.hh"  
#include "G4Track.hh"  
#include "G4ThreeVector.hh"  
#include "G4Step.hh"  
#include "G4ParticleDefinition.hh"  
#include "G4VTouchable.hh"  
#include "G4TouchableHistory.hh"  
#include "G4ios.hh"  
#include "G4ParticleTypes.hh"  
#include "G4ParticleDefinition.hh"  
#include "G4VAnalysisManager.hh"  
#include "algorithm"
```

```

#include "iostream"
#include "globals.hh"
EJ301PMTSD::EJ301PMTSD(G4String name)
: G4VSensitiveDetector(name), fPhotonDetHitCollection(0)
{
}
EJ301PMTSD::~~EJ301PMTSD()
{
}
G4bool EJ301PMTSD::ProcessHits(G4Step* aStep, G4TouchableHistory*
Ohist)
{
    // dem so ph ton
    if (aStep == NULL) return false;
    G4Track* theTrack = aStep->GetTrack();
    if(theTrack->GetDefinition()!=
G4OpticalPhoton::OpticalPhotonDefinition()) return false;
    G4StepPoint* thePostPoint = aStep->GetPostStepPoint();
    nstep++;
    //-----
    G4int chisomang;
    chisomang = aStep->GetPostStepPoint()->GetGlobalTime() / 1+10; // lay
phan nguyen
    if ((chisomang > 0) && (chisomang < 998))
    {
        mangphoton[chisomang + 1]++;
        if (chisomang>Ind_max)

```

```

        Ind_max=chisomang; // lay so mang max
    }
    nAbsPhotons++;
return true;
}
void EJ301PMTSD::Initialize(G4HCofThisEvent* HCE)
{
nstep = 0;
nAbsPhotons = 0.;
for (int i = 0; i < 1000; i++)
{
    mangphoton[i] = 0;
    Det_pulse[i]=0;
    Det_pulse1[i]=0;
}
}
void EJ301PMTSD::EndOfEvent(G4HCofThisEvent* HCE)
{
if (nAbsPhotons>0)
{
    nEvents++;
    convolve(F1, mangphoton, 298, 1000,Det_pulse1);
    convolve(F2, Det_pulse1, 298, 1000,Det_pulse);
    G4int index_max = 0;
    G4int Vmax = 0;
    for (int i = 0; i < 70; i++){ // tìm trong 70 ns o khoang đầu xung
    if (Vmax < Det_pulse[i])

```

```

{
Vmax = Det_pulse[i];
index_max = i;
}
}

G4double Area_total = 0; //
G4double Area_tail = 0;
for (int i = 1; i < index_max + 250; i++)
{
    Area_total += Det_pulse[i]; // DT tổng
    if (i > index_max + 20)
    {
        Area_tail += Det_pulse[i]; // DT xung
    }
}

G4AnalysisManager* analysisManager = G4AnalysisManager::Instance();
analysisManager->FillNtupleDColumn(0, Vmax);
analysisManager->FillNtupleDColumn(1, Area_tail);
analysisManager->FillNtupleDColumn(2, Area_total);
analysisManager->FillNtupleDColumn(3, Area_tail/Area_total);
analysisManager->AddNtupleRow();
if (nEvents % 1000 == 0)
{
    // ghi file
    analysisManager->Write();
}
}

```