



Universidad
Zaragoza



Trabajo Fin de Grado

**Simulación por Monte Carlo de procesos de
generación y recogida de luz para la
optimización del experimento ANAIS-112**

Grado en Física

AUTORA

Marta Villalba Cantero

DIRECTORES

María Martínez Pérez

David Cintas González

Universidad de Zaragoza
Facultad de Ciencias
Departamento de Física Teórica

24 de junio de 2021

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Generación y recogida de luz en ANAIS-112 | 4 |
| 3. Calibración del experimento ANAIS-112 a baja energía | 5 |
| 3.1. Contaminación de K-40 en el cristal de NaI(Tl) | 5 |
| 3.2. Fuente externa de Cd-109 | 6 |
| 4. Parámetros temporales de los pulsos de centelleo en ANAIS-112 | 7 |
| 5. Simulación por Monte Carlo en Geant4 | 8 |
| 5.1. Geometría de ANAIS-112 | 9 |
| 5.2. Parámetros ópticos en Geant4 | 10 |
| 6. Medida experimental de la longitud de absorción del NaI(Tl) | 13 |
| 6.1. Montaje experimental y ensamblaje del cristal de NaI(Tl) | 13 |
| 6.2. Procedimiento experimental | 14 |
| 6.3. Resultados | 14 |
| 7. Resultados de la simulación | 15 |
| 7.1. Dependencia de la recogida de luz con las propiedades del cristal de NaI(Tl) | 15 |
| 7.2. Linealidad de la respuesta del detector ante distintas poblaciones | 16 |
| 7.3. Identificación de poblaciones de sucesos | 16 |
| 7.4. Estudio de la forma del pulso de centelleo | 21 |
| 8. Conclusión | 21 |

1. Introducción

En las últimas décadas se han encontrado numerosas evidencias de que en el Universo existe otra componente además de la materia convencional, y que no puede ser entendido solo mediante el modelo estándar de física de partículas [1]. Se estima que más del 95 % del Universo nos es desconocido y se reparte entre la materia oscura, un tipo de materia que todavía no ha sido identificada, y la energía oscura, responsable de la expansión acelerada del Universo. La materia oscura es cinco veces más abundante que la materia bariónica, por lo que ha dominado la evolución del Universo hasta convertirlo en lo que conocemos hoy en día. Por ahora, las únicas evidencias de su existencia están basadas en los efectos gravitacionales que produce, por ejemplo en la rotación anormalmente rápida de las galaxias, movimiento de cúmulos de galaxias o en el espectro de anisotropías del fondo cósmico de microondas. Sin embargo, desconocemos cuál es su naturaleza. Entre los posibles candidatos a materia oscura destacan los axiones y los WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*). Ambos candidatos interactúan con la materia ordinaria, pero su detección directa es todavía un gran desafío [2].

La única señal positiva de detección directa hasta la fecha proviene del experimento DAMA/LIBRA [3] (Laboratorio Nacional del Gran Sasso, Italia), en el cual se ha encontrado una modulación anual del ritmo de interacciones compatible con el que producirían WIMPs distribuidas en el halo galáctico debido a la traslación de la Tierra en torno al Sol. La señal de DAMA/LIBRA es incompatible con los resultados negativos de otros experimentos, pero, debido a que estos experimentos utilizan blancos distintos al de DAMA/LIBRA (NaI(Tl)), esta comparación depende del modelo de WIMP y de su distribución en el halo galáctico [2]. Por lo tanto, es necesaria una comprobación independiente de este resultado utilizando el mismo material detector que DAMA/LIBRA. Este es el objetivo del experimento ANAIS-112, que desde 2017 está tomando datos en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (Huesca, España) con 9 centelleadores de NaI(Tl) de 12.5 kg cada uno [4].

Según los modelos actuales, las WIMPs interactuarían con el detector por dispersión elástica con los núcleos de los átomos que lo componen. El método de detección de ANAIS-112 consiste en que, cuando una partícula ionizante (en este caso el retroceso nuclear) atraviesa un cristal centelleador de NaI(Tl), se emite luz desde el rango azul hasta el ultravioleta, la cual es recogida mediante dos tubos fotomultiplicadores (PMTs) colocados en los extremos del cristal. El número de fotones producidos es proporcional a la energía depositada por la partícula ionizante en el centelleador. Uno de los problemas con los que se está encontrando ANAIS-112 es la presencia de sucesos en la región de interés (ROI) para la búsqueda de materia oscura (depósitos energéticos entre 1 y 6 keV) que no provienen del centelleo en los cristales de NaI(Tl) y cuyo origen se cree que está en los PMTs. Además, se ha observado una dependencia de la forma de los pulsos de centelleo con la posición del depósito energético (volumen o superficie) que todavía no está totalmente entendida.

En este trabajo, se ha realizado una simulación por Monte Carlo en Geant4 [5] de los mecanismos de generación, transporte y recogida de luz en un módulo de ANAIS-112 que permite estudiar la respuesta de los detectores de centelleo del experimento ante emisiones internas y externas al cristal de NaI(Tl). Además, el análisis posterior permite calcular los

parámetros característicos de cada población de sucesos con el fin de estudiar su dependencia con el tipo de partícula, su interacción con el detector y la magnitud y la posición del depósito energético producido en el cristal de NaI(Tl). En el futuro, esta simulación permitirá estudiar y entender la procedencia de los “falsos” sucesos que dominan la ROI de ANAIS-112.

2. Generación y recogida de luz en ANAIS-112

El principal proceso de generación de luz en los módulos de ANAIS-112 es el centelleo en los cristales de NaI(Tl). Una partícula ionizante interacciona con los electrones de los átomos del cristal haciendo que pasen a estados excitados y, cuando se desexcitan, emiten fotones en el visible y ultravioleta según el espectro característico del NaI(Tl). Estos fotones se propagan por el cristal hasta llegar a los PMTs, donde arrancan electrones del fotocátodo mediante efecto fotoeléctrico. Los electrones creados por este fenómeno se denominan fotoelectrones (o f.e.). Los fotoelectrones son acelerados a través de los sucesivos dínodos del PMT, arrancando más electrones de ellos y formando una cascada electrónica que puede recogerse en forma de corriente y medirse a su paso por un circuito.

El número de fotoelectrones generados en el fotocátodo por unidad de energía depositada en el cristal de NaI(Tl) es la recogida de luz, expresada como número de f.e./keV. Este parámetro tiene un impacto directo en la resolución y el umbral de energía de los módulos de ANAIS-112, y en él influyen tanto las características de los cristales de NaI(Tl) como el acoplamiento óptico con las ventanas de cuarzo y la eficiencia cuántica de los PMTs (probabilidad de que un fotón que incide en el fotocátodo arranque un electrón y genere una señal eléctrica). En la Tabla 1 aparece la eficiencia cuántica de los PMTs y la recogida de luz de los nueve módulos de ANAIS-112. Presentan una recogida de luz muy alta, en torno a los 15 f.e./keV, y que además ha sido muy estable en los 3 primeros años del experimento [6]. Solo el módulo D6 presenta una recogida de luz por debajo de los 13 f.e./keV. Dado que en este trabajo únicamente se ha simulado un módulo, la recogida de luz de referencia se ha tomado como la media de los valores para los nueve módulos de ANAIS-112, resultando ser 14.24 ± 0.18 f.e./keV. Respecto a la eficiencia de los PMTs de la simulación, se ha considerado que los dos PMTs del módulo tienen una misma eficiencia cuántica y su valor se ha establecido como la media de los 18 PMTs de ANAIS-112, que es 40.6 %.

| Módulo | Q.E. PMT-0 (%) | Q.E. PMT-1 (%) | Recogida de luz media (f.e./keV) |
|--------|----------------|----------------|----------------------------------|
| D0 | 38.2 | 37.2 | 14.49 ± 0.11 |
| D1 | 39.7 | 39.7 | 14.64 ± 0.15 |
| D2 | 39.2 | 42.6 | 14.21 ± 0.3 |
| D3 | 37.3 | 39.4 | 14.33 ± 0.12 |
| D4 | 40.1 | 41.8 | 14.33 ± 0.13 |
| D5 | 43.6 | 43.9 | 14.82 ± 0.13 |
| D6 | 40.4 | 38.9 | 12.74 ± 0.12 |
| D7 | 41.9 | 42.5 | 14.55 ± 0.18 |
| D8 | 41.6 | 43.4 | 15.81 ± 0.21 |

Tabla 1: Eficiencia cuántica (Q.E.) de los dos PMTs de cada módulo de ANAIS-112 indicada por el fabricante. Recogida de luz media y su error después de 3 años de operación.

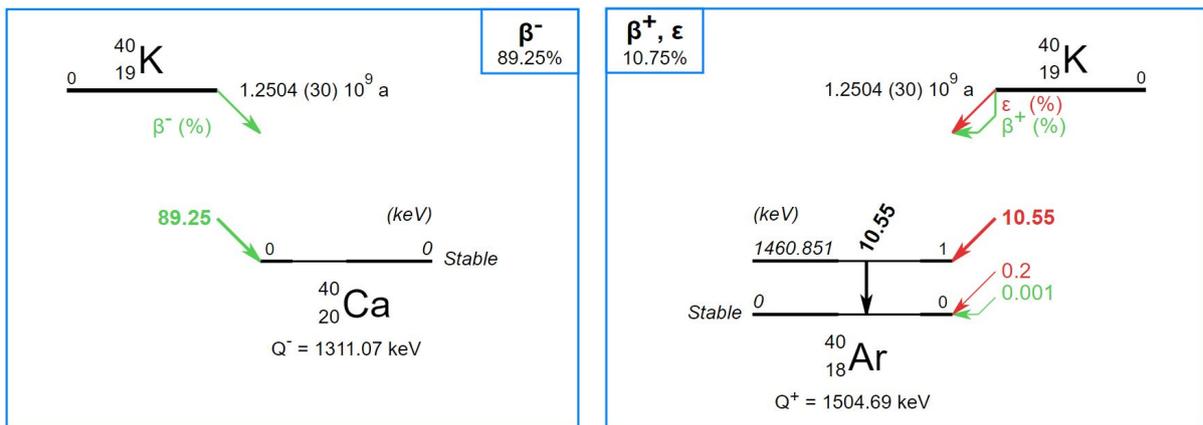
3. Calibración del experimento ANAIS-112 a baja energía

Para calibrar ANAIS-112 a baja energía se utilizan dos tipos de sucesos. Por un lado, se realizan calibraciones periódicas con una fuente externa de Cd-109, y por otro se utilizan los depósitos energéticos producidos por un contaminante interno del cristal: K-40. Estos sucesos se utilizan no solo como líneas de energía conocida, sino también como patrones de sucesos de centelleo en el cristal, que permiten calcular la eficiencia de los protocolos de filtrado de sucesos por la forma de los pulsos. A continuación, describimos ambas componentes.

3.1. Contaminación de K-40 en el cristal de NaI(Tl)

El K-40 es un isótopo radiactivo muy abundante en la naturaleza con una vida media de $1.25 \cdot 10^9$ años. En ANAIS-112, el K-40 está presente en forma de contaminación radiactiva en el interior de los cristales de NaI(Tl). Los sucesos producidos por este isótopo en ANAIS-112 pueden ser interpretados como sucesos de fondo radiactivo distribuidos uniformemente en los cristales centelleadores. Algunos de estos sucesos se encuentran en la ROI de la modulación anual (entre 1 y 6 keV), lo que permite utilizarlos para evaluar cualquier variación en el fondo atribuible a estos sucesos y también usarlos como calibración a baja energía.

En la Figura 1 aparecen las dos posibles vías de desintegración del K-40. El 89.25 % de las veces, el K-40 se desintegra β^- a Ca-40 emitiendo un electrón de 1311 keV como máximo y un antineutrino electrónico. El 10.75 % restante se desintegra por captura electrónica (CE) a un estado excitado del Ar-40, que se desexcita emitiendo un fotón de 1461 keV. En ANAIS-112, estos fotones de alta energía pueden escapar del interior del cristal de NaI(Tl) donde ha tenido lugar la desintegración y llegar a los demás detectores, produciendo sucesos en coincidencia con la desexcitación del átomo de Ar-40.



(a) Desintegración al Ca-40.

(b) Desintegración al Ar-40.

Figura 1: Esquemas de las posibles vías de desintegración del K-40 [8].

El 90% de las veces la CE se produce en la capa K, cuya energía de ligadura son 3.2 keV [7]. Como la contaminación de K-40 está dentro del detector, toda la energía de la desexcitación atómica del Ar-40 se suma y produce un depósito igual a la energía de

ligadura de la capa. Por lo tanto, en la simulación se ha tenido en cuenta este depósito energético colocando fotones de 3.2 keV distribuidos uniformemente en el cristal, que depositarán toda su energía en él sin posibilidad de escapar.

3.2. Fuente externa de Cd-109

En ANAIS-112 se realiza una calibración con fuentes externas de Cd-109 cada dos semanas. Los nueve módulos se calibran simultáneamente, y la toma de datos dura entre 3 y 4 horas. Como se ve en la Figura 2, este isótopo se desintegra por CE a un estado excitado del Ag-109 con una energía de 88 keV. El 3.7% de las veces se desexcitará emitiendo un fotón de 88 keV, mientras que el resto de las veces se producirán electrones de conversión. En la Tabla 2 se recogen, además, los rayos X emitidos en la desexcitación atómica del Ag-109 tras la CE. Los más relevantes tienen una energía en torno a los 22 keV.

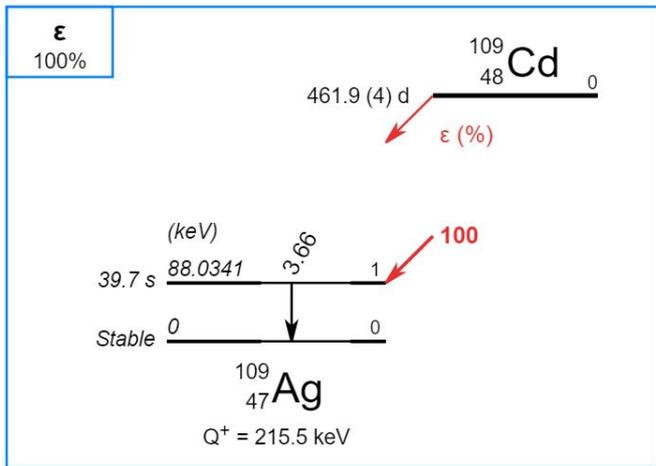


Figura 2: Esquema de la desintegración del Cd-109 [8].

| E (keV) | I (%) | Emisión |
|---------|------------------|--------------------|
| 2.634 | 0.18 <i>3</i> | Ag L _l |
| 2.806 | 0.097 <i>15</i> | Ag L _η |
| 2.978 | 0.50 <i>8</i> | Ag L _{α2} |
| 2.984 | 4.5 <i>7</i> | Ag L _{α1} |
| 3.151 | 2.6 <i>4</i> | Ag L _{β1} |
| 3.203 | 0.14 <i>4</i> | Ag L _{β4} |
| 3.234 | 0.22 <i>6</i> | Ag L _{β3} |
| 3.256 | 0.030 <i>5</i> | Ag L _{β6} |
| 3.348 | 0.58 <i>9</i> | Ag L _{β2} |
| 3.520 | 0.28 <i>4</i> | Ag L _{γ1} |
| 3.743 | 0.027 <i>7</i> | Ag L _{γ2} |
| 3.750 | 0.045 <i>12</i> | Ag L _{γ3} |
| 21.708 | 0.00122 <i>5</i> | Ag K _{α3} |
| 21.990 | 29.5 <i>11</i> | Ag K _{α2} |
| 22.163 | 55.7 <i>20</i> | Ag K _{α1} |
| 24.912 | 4.76 <i>17</i> | Ag K _{β3} |
| 24.943 | 9.2 <i>3</i> | Ag K _{β1} |
| 25.144 | 0.067 <i>3</i> | Ag K _{β5} |
| 25.455 | 2.30 <i>8</i> | Ag K _{β2} |
| 25.511 | 0.487 <i>24</i> | Ag K _{β4} |

Tabla 2: Rayos X emitidos por el Ag-109, hijo del Cd-109 [9].

En la calibración de ANAIS-112 se observan los picos en 22 keV y 88 keV, este último con menor intensidad. Sin embargo, también aparece un pico en 11.9 keV que no se produce directamente en la desintegración del Cd-109, sino que resulta de los rayos X del Br, elemento contenido en el material que rodea la fuente.

4. Parámetros temporales de los pulsos de centelleo en ANAIS-112

En el análisis de ANAIS-112, con el fin de discriminar poblaciones de sucesos con distinto origen (por ejemplo, centelleo en el cristal de NaI(Tl), luz de Cherenkov o fosforescencia), se introducen algunos parámetros asociados a la forma de los pulsos (PSA) de dichos sucesos. Uno de los parámetros PSA de ANAIS-112 es P_1 , definido como

$$P_1 = \frac{\sum_{t=100ns}^{t=600ns} (S_0(t) + S_1(t))}{\sum_{t=0}^{t=600ns} (S_0(t) + S_1(t))} \quad (1)$$

donde $S_{0,1}(t)$ es la amplitud del pulso en un tiempo t medido a partir de la llegada del primer f.e. a los PMTs 0, 1 de cada módulo. Los pulsos de centelleo en el cristal de NaI(Tl) están dominados por la constante de centelleo (~ 230 ns) y P_1 toma un valor en torno a 0.65.

Otro parámetro temporal de los pulsos utilizado en ANAIS-112 es el tiempo medio de la distribución de los tiempos de llegada de los fotoelectrones individuales, definido como

$$\mu_p = \frac{\sum_p A_p t_p}{\sum_p A_p} \quad (2)$$

donde A_p y t_p son la amplitud y el tiempo de llegada del fotoelectrón, respectivamente.

En la Tabla 3 se muestran los resultados del valor medio de P_1 y μ_p en ANAIS-112 para la fuente de Cd-109 y para el fondo en coincidencia (es decir, cuando se registra un depósito energético simultáneamente en dos de los módulos de ANAIS-112), en ambos casos con energías entre 2 y 5 keV. El fondo en coincidencia entre 2 y 5 keV está dominado por los depósitos de 3.2 keV del K-40 que se encuentra en los cristales de NaI(Tl) cuando el fotón de 1461 keV es absorbido en otro de los módulos. En estos datos se observa que los parámetros P_1 y μ_p en ANAIS-112 son menores en los pulsos de la calibración con Cd-109 que en los pulsos del fondo en coincidencia.

| | P_1 | μ_p (ns) |
|--------|---------------------|-----------------|
| Cd-109 | 0.6377 ± 0.0009 | 190.9 ± 0.3 |
| Fondo | 0.6805 ± 0.0008 | 217.4 ± 0.3 |

Tabla 3: Valor medio de la distribución de P_1 y μ_p calculado con los datos de ANAIS-112 para los sucesos con energías entre 2 y 5 keV correspondientes a la calibración con Cd-109 y al fondo en coincidencia.

En la simulación de este trabajo no se ha incluido el sistema de adquisición de datos posterior a la recolección de luz en los PMTs, y por tanto no se dispone de la información sobre la amplitud de los pulsos. Sin embargo, se ha hecho una aproximación para calcular los parámetros PSA de las distintas poblaciones de sucesos. En la simulación se ha asignado a todos los f.e. una misma amplitud, de manera que el parámetro P_1 queda definido como el número de fotones que han llegado a los PMTs entre 100 ns y 600 ns tras la llegada del primer fotón dividido entre el número de fotones que han llegado en los primeros 600 ns tras la llegada del primer fotón. Por otro lado, μ_p queda expresado como la suma de los tiempos de llegada de los fotones a los PMTs (respecto a la llegada del primero) dividido entre el número total de fotones que han llegado.

5. Simulación por Monte Carlo en Geant4

Geant4 es una herramienta de programación en C++ desarrollado en el CERN que permite simular el paso de las partículas a través de la materia. Sus principales aplicaciones se encuentran en la física de altas energías, nuclear y de aceleradores, aunque es útil para modelar la interacción de la radiación en cualquier sistema físico (por ejemplo, en el sector médico o espacial). Geant4 se utiliza en multitud de experimentos en la actualidad, como ATLAS, CMS y LHCb en el LHC (CERN).

Para determinar el tipo de interacción que va a experimentar una partícula con los distintos materiales que atraviesa, Geant4 utiliza una combinación de métodos de Monte Carlo de aceptación-rechazo. Con este método pueden simularse gran variedad de procesos físicos (electromagnéticos, hadrónicos, ópticos...) en un rango de energías muy amplio, desde los eV hasta los TeV. Este trabajo se centra en procesos ópticos y electromagnéticos a baja energía.

Una simulación en Geant4 consta de las siguientes partes:

- Geometría: es necesario definir los distintos volúmenes que conforman el sistema físico donde se quiere estudiar la interacción de las partículas. Cada volumen, además de tener una forma determinada, lleva asociado un material y sus propiedades físicas (composición, densidad, temperatura, presión...). También pueden especificarse propiedades relacionadas con el tipo de procesos que se quieren estudiar, como parámetros ópticos o parámetros característicos del centelleo de ese material.
- Inicialización de eventos: para comenzar la simulación, hay que especificar el tipo de partícula (electrones, fotones, átomos...), su posición y su energía inicial. Además, se elige el número de sucesos (partículas iniciales) a simular. A partir de cada partícula madre pueden aparecer otras partículas hijas, que serán simuladas de forma consecutiva.
- Trayectoria de las partículas: Geant4 es capaz de calcular la evolución temporal de la posición y la energía de todas las partículas simuladas, indicando también las interacciones con la materia que han tenido lugar en el proceso.
- Respuesta de un detector: es posible definir volúmenes que se comporten como lo haría un detector de partículas real, guardando la información sobre la interacción de cada partícula en dicho detector.
- Almacenamiento de los eventos: todos los detalles acerca de las partículas y sus trayectorias que se han obtenido mediante la simulación se almacenan para ser analizados posteriormente.
- Visualización: Geant4 permite almacenar la información gráfica de los sucesos en un fichero, que puede verse con distintas aplicaciones. En este trabajo, se ha empleado la herramienta HepRApp [10] para la visualización.

Una vez se han almacenado los sucesos simulados con Geant4, es necesario analizarlos para extraer de ellos la información deseada. Para ello, se emplea la herramienta ROOT [11] en C++ desarrollada por el CERN. En este trabajo, el análisis se ha dividido en dos niveles. El primero de ellos contiene los datos de todas las partículas secundarias producidas en

cada suceso (su posición en cada instante de tiempo, su energía, el volumen en el que se encuentran...), mientras que el segundo hace uso de estos datos para calcular otras variables, como el número de interacciones en el detector, la energía total depositada por las partículas en el cristal de centelleo o los parámetros de los pulsos de centelleo que han producido.

5.1. Geometría de ANAIS-112

El experimento ANAIS-112 [4] está formado por nueve módulos con detectores de centelleo de NaI(Tl) producidos por Alpha Spectra Inc. en Estados Unidos. Cada cristal pesa 12.5 kg y tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 12 cm y 30 cm de largo. Además, hay dos PMTs de alta eficiencia cuántica acoplados a cada cara lateral. Los nueve módulos de NaI(Tl) están blindados con 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja anti-radón, un sistema de veto de muones y, por último, 40 cm de un moderador de neutrones formado por tanques de agua y bloques de polietileno. En la simulación de este trabajo se ha incluido un solo detector de centelleo y un blindaje de 20 cm de plomo, ya que el objetivo es estudiar el comportamiento de un módulo aislado.

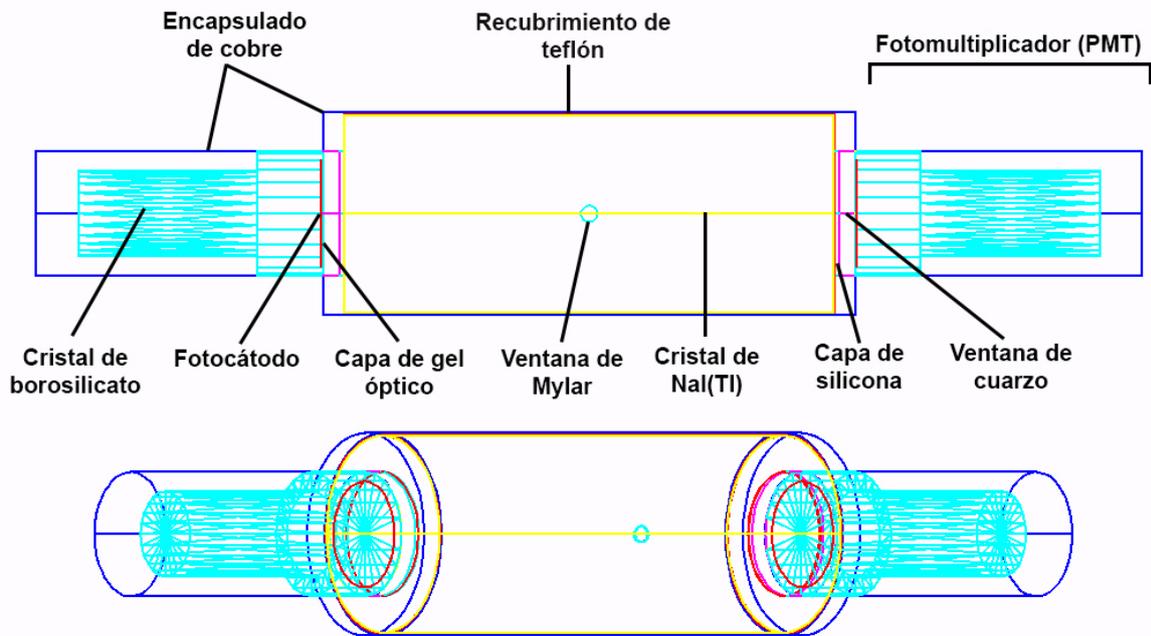


Figura 3: Esquema de la geometría de un módulo de centelleo de ANAIS-112 definida en la simulación.

En la Figura 3 se muestra la geometría definida en la simulación y en la Tabla 4 las dimensiones de los distintos volúmenes cilíndricos. En la parte central se encuentra el cristal centelleador de NaI(Tl), que está recubierto de teflón, y a ambos lados se sitúan los PMTs. Todo ello está encapsulado en cobre a excepción de un orificio donde está colocada una ventana de Mylar muy delgada (20 micras), la cual permite la calibración empleando fuentes gamma externas de baja energía. El cristal de NaI(Tl) está unido mediante una capa de silicona por sus dos laterales a unas ventanas de cuarzo. Todo el sistema es perfectamente estanco para proteger al cristal de la humedad. A su vez, las ventanas de cuarzo están acopladas al fotocátodo de los PMTs mediante líquido de índice o gel óptico.

Tanto la silicona como el gel óptico sirven para acoplar los índices de refracción entre los componentes del módulo. El material que conforma el cuerpo del PMT es un cristal de borosilicato, en cuyo interior se encuentran los dínodos. En este trabajo se ha simplificado su geometría con dos cilindros de diferente radio (cabeza y cuerpo del PMT) con vacío en su interior, prescindiendo de los dínodos. En la simulación el fotocátodo está definido como el detector sensible del módulo, de manera que las interacciones de fotones que se producen en él quedan registrados de igual manera que se medirían en un PMT real.

| Volumen | Longitud (mm) | Radio externo (mm) |
|----------------------------------|---------------|--------------------|
| Cristal de NaI(Tl) | 298.45 | 60.325 |
| Recubrimiento de teflón | 299.45 | 60.825 |
| Encapsulado de cobre (NaI(Tl)) | 324.45 | 61.325 |
| Ventana de Mylar | 0.02 | 5 |
| Capa de silicona | 3 | 38.1 |
| Ventana de cuarzo | 10 | 38.1 |
| Encapsulado de cobre (PMT) | 175 | 38.2 |
| Capa de gel óptico | 0.1 | 38.1 |
| Fotocátodo | 0.05 | 32.5 |
| Cristal de borosilicato (cabeza) | 40 | 38.1 |
| Cristal de borosilicato (cuerpo) | 129 | 26.25 |

Tabla 4: Dimensiones de los volúmenes cilíndricos de la geometría de ANAIS-112 en la simulación.

5.2. Parámetros ópticos en Geant4

En una simulación óptica en Geant4 [12] [13], los fotones con longitud de onda en el rango óptico y ultravioleta (denominados fotones ópticos, `G4OpticalPhoton`) son tratados de forma diferente a los fotones convencionales de la física de partículas (`G4Gamma`). Las partículas de tipo `G4OpticalPhoton` son las únicas que se pueden reflejar o refractar en las superficies de cambio de medio, que en el contexto de la simulación se llaman superficies ópticas (`G4OpticalSurface`), y solo se crean en procesos ópticos de centelleo y radiación de Cherenkov. Además, pueden experimentar fundamentalmente tres tipos de procesos: *scattering* elástico, absorción e interacciones de cambio de medio.

Para llevar a cabo una correcta simulación de los procesos ópticos es necesario definir las propiedades ópticas de cada material. En este trabajo, se ha incluido el índice de refracción y la longitud de absorción de los materiales. Dentro de la simulación los parámetros se definen para una serie de valores discretos de la energía, de tal forma que Geant4 lleva a cabo una interpolación lineal entre los valores definidos. Además, es necesario especificar las propiedades del centelleo del cristal de NaI(Tl), cuyos valores se han extraído de [14] y son las siguientes:

- **Espectro de emisión:** es la intensidad normalizada de fotones emitidos por el centelleador en cada intervalo de energía o longitud de onda determinado. A diferencia del índice de refracción o de la longitud de absorción, el espectro de emisión no es interpolado de forma lineal, sino que el valor para energías comprendidas entre dos extremos definidos se toma como constante e igual al valor medio de ambos extre-

mos. En la Figura 4 se muestra el espectro de emisión del NaI(Tl) generado por la simulación a partir de los valores de entrada (puntos rojos).

- Constante de centelleo: es el tiempo característico de la luz de centelleo emitida, definido como el tiempo en el cual la cantidad de fotones emitidos disminuye un factor $1/e$. La constante de centelleo del NaI(Tl) es de 230 ns.
- *Light yield*: es el número de fotones emitidos por el centelleador por unidad de energía depositada en él, y también es característico de cada material. El *light yield* del NaI(Tl) se suele encontrar entre los 38 y los 45 fotones/keV.

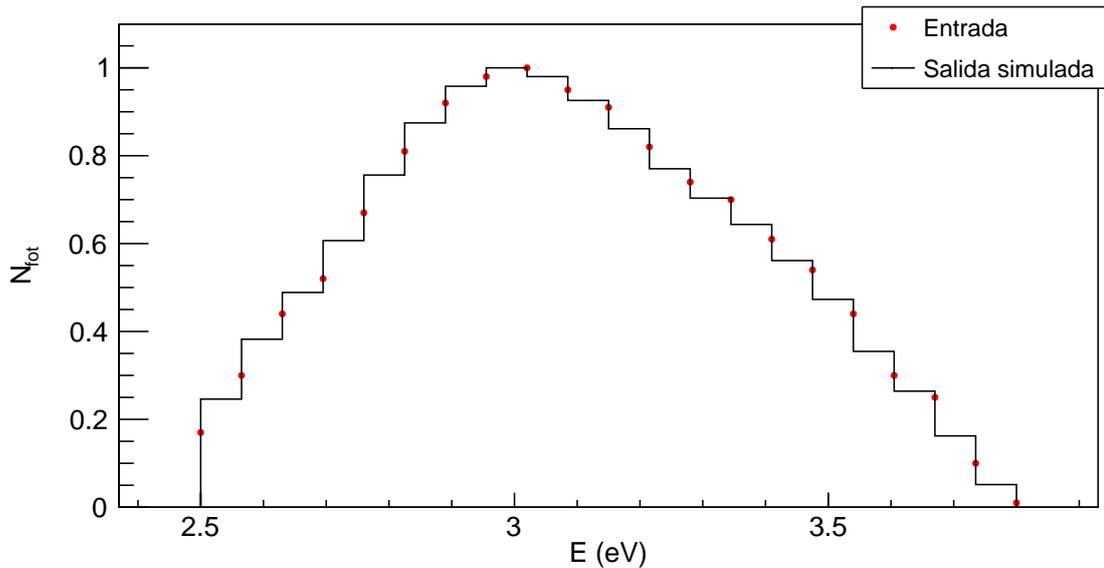
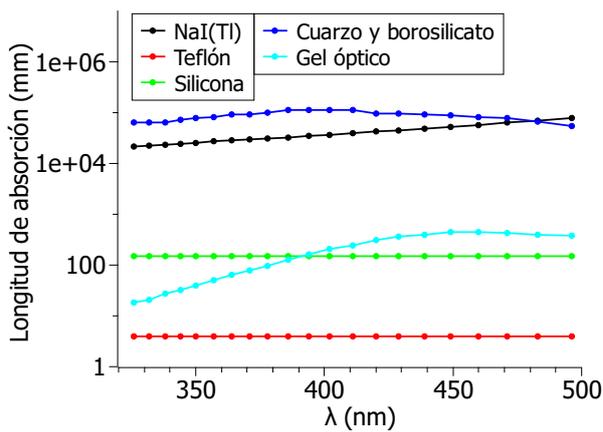
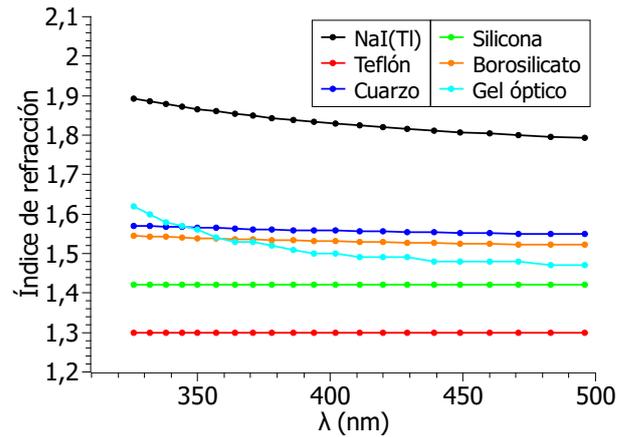


Figura 4: Espectro de emisión del cristal de NaI(Tl) de la simulación. Los puntos son los valores discretos del espectro de emisión definidos como entrada, y el histograma representa la energía inicial de los fotones ópticos emitidos por el NaI(Tl) en la simulación.

También es posible definir varias componentes de centelleo (rápido o lento) y el tiempo de subida, pero en ese trabajo se ha considerado una sola componente con tiempo de subida nulo. Además, el rango de energía en el que se han definido todos los parámetros ópticos en la simulación es desde 2.5 hasta 3.8 eV (correspondientes a longitudes de onda entre 326 y 496 nm), que es el rango de emisión del cristal de NaI(Tl). En las Figuras 5a y 5b se recogen la longitud de absorción y el índice de refracción que se han definido para los distintos materiales. En el caso del NaI(Tl), su longitud de absorción se ha extraído de [15] con una concentración de Tl del 0.05 %. Sin embargo, estas medidas están realizadas a la temperatura del nitrógeno líquido y no están tomadas en todo el rango de 2.5 a 3.8 eV, por lo que se han utilizado en este trabajo de forma provisional. Además, se ha planteado la posibilidad de realizar una medida de la absorción en el NaI(Tl) para este trabajo como se detalla el apartado 6.



(a) Longitud de absorción.



(b) Índice de refracción.

Figura 5: Parámetros ópticos en función de la longitud de onda de los distintos elementos de la geometría de ANAIS-112 [16] [17] [18] [19] [20].

Los cambios de medio se simulan en Geant4 mediante superficies ópticas, las cuales tienen sus propios parámetros dependiendo del tipo concreto de superficie que se defina. Hay dos posibles cambios de medio: entre dos dieléctricos de materiales diferentes, y entre un dieléctrico y un metal. El parámetro más relevante en ambos tipos de superficies es la reflectividad [21]. Cuando se trata de una superficie entre un dieléctrico y un metal, la reflectividad es la probabilidad de que los fotones ópticos se reflejen. En caso de que no se reflejen, son absorbidos en el segundo medio según su longitud de absorción. Sin embargo, cuando se trata de una superficie entre dieléctricos, primero se considera que los fotones ópticos se absorben con una probabilidad $100\% - r$, siendo r la reflectividad especificada en la simulación. Los fotones restantes son reflejados o refractados según la ecuación de Fresnel.

Cuando no se define una superficie óptica entre dos dieléctricos, la reflexión es simulada aplicando la ley de Snell y considerando que la superficie es pulida. Por lo tanto, definir una superficie óptica entre dieléctricos solo permite simular la rugosidad o un hueco de aire entre los dos medios. Este es el caso de la superficie entre el cristal del NaI(Tl) y el teflón, que es la más relevante en el transporte de los fotones ópticos a través del cristal. Dicha superficie se ha definido con el acabado `groundbackpainted`, que simula una capa de aire entre los dos volúmenes, y se ha considerado que se produce solo reflexión difusa con una reflectividad del 99% [22].

Respecto a las superficies ópticas entre un dieléctrico y un metal, pueden especificarse la reflectividad o el índice de refracción complejo como parámetros. En la simulación de este trabajo, las superficies de este tipo se encuentran entre los materiales del interior del módulo y el encapsulado de cobre que los rodea. En todas ellas se ha elegido una reflectividad del 100%, ya que se ha comprobado en la simulación que esta reflectividad no es un parámetro muy influyente en la cantidad de luz recogida por los PMTs.

6. Medida experimental de la longitud de absorción del NaI(Tl)

Tal y como se ha explicado en el apartado 5.2, uno de los parámetros que se deben especificar para la simulación de procesos ópticos en Geant4 es la longitud de absorción en los materiales. No obstante, durante la realización de este trabajo no ha podido extraerse dicha información de forma completa de ninguna fuente bibliográfica. Esto podría deberse a que el NaI(Tl) es un material higroscópico, de manera que es necesario manipularlo en una atmósfera sin humedad o encapsularlo herméticamente, y esto dificulta la medida de la absorción en él. Además, pese a que es un cristal centelleador comúnmente utilizado en los sistemas de detección de partículas, su uso no es tan habitual en las aplicaciones ópticas.

Ante esta escasez de información bibliográfica acerca de la absorción en el NaI(Tl), se ha optado por intentar realizar una medida experimental de la misma. El NaI(Tl) es uno de los materiales más importantes en la simulación, ya que en él tiene lugar el principal proceso de generación de luz: el centelleo. La absorción en este material influye, por tanto, en la propagación de todos los fotones ópticos producidos por centelleo, y en consecuencia en la luz registrada en los PMTs (como se verá con más detalle en el apartado 7.1).

6.1. Montaje experimental y ensamblaje del cristal de NaI(Tl)

El montaje que se ha empleado en el estudio de la absorción en el NaI(Tl) se muestra en la Figura 6. Consiste en una lámpara de xenón cuyo haz de luz se hace pasar por un colimador y, tras atravesar el objeto de estudio, es recogido en una esfera integradora. En la parte superior de la esfera se encuentra un detector conectado a un espectrómetro, de donde se puede extraer y analizar la información del espectro de absorción mediante software en un ordenador.

El cristal de NaI(Tl) empleado en la medida es cilíndrico, con 1" de diámetro y 1" de longitud, y su dopaje en talio es de 1/1000 molar. El proceso de ensamblaje del cristal se ha realizado en una caja de guantes con una atmósfera seca de nitrógeno. En primer lugar, se

pule la superficie de las caras del cristal con isopropanol para eliminar la capa de material que ha absorbido algo de humedad durante su almacenamiento previo a la manipulación. Posteriormente, se comienza con el encapsulamiento en una carcasa cilíndrica de aluminio. Se coloca primero una junta tórica en una cara de la carcasa, y sobre ella se inserta la primera ventana de cuarzo. A continuación, se añade una fina capa de líquido de índice, que servirá de acoplo entre los materiales, y se introduce el cristal pulido de NaI(Tl) recubierto por una fina capa de teflón. Se termina el proceso de igual manera, poniendo líquido de índice sobre la cara restante del cristal, depositando sobre él la ventana de cuarzo y la junta tórica y, finalmente, cerrando la carcasa de aluminio. Una vez se ha comprobado

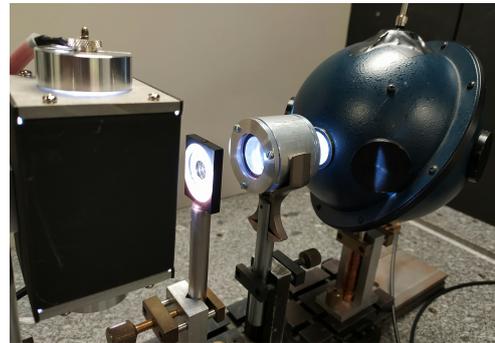


Figura 6: Montaje para la medida del espectro de absorción en el NaI(Tl). De izquierda a derecha: lámpara de xenón, colimador, cristal de NaI(Tl) encapsulado, esfera integradora.

que el encapsulado es correcto, puede sacarse el cristal de la caja de guantes sin peligro de que sea dañado por la humedad del ambiente.

6.2. Procedimiento experimental

Dado que el cristal de NaI(Tl) ha de estar encapsulado, es necesario hacer en primer lugar una medida de referencia. Para ello, se emplea la misma carcasa de aluminio del ensamblaje, pero se colocan en ella únicamente las dos ventanas de cuarzo separadas por una capa de líquido de índice. De esta manera, se puede determinar la absorción en los materiales que no son NaI(Tl). Es importante que la capa de líquido de índice sea equivalente a las dos capas que llevará el cristal una vez esté ensamblado para asegurar que no se atribuyen fenómenos de absorción al NaI(Tl) que en realidad correspondan al líquido de índice. Una vez se ha obtenido el espectro de absorción y el factor de atenuación en la muestra sin cristal de NaI(Tl), se repiten las medidas con el cristal debidamente encapsulado. Comparando ambos resultados podrá determinarse cómo ha sido la absorción en el cristal de NaI(Tl). Se han realizado un total de 3 medidas de referencia y otras 3 medidas con la muestra encapsulada, con un tiempo de integración de 1000 ms.

6.3. Resultados

En la Figura 7a se muestra el promedio del espectro de transmisión en la medida de referencia y en la medida con el cristal de NaI(Tl) encapsulado. El cociente de ambas (multiplicado por 100) da el espectro de transmisión en el cristal de NaI(Tl), a partir del cual se puede calcular la longitud de absorción que aparece en la Figura 7b. Los resultados muestran una longitud de absorción entre 10 y 100 cm, un valor muy pequeño para un cristal de NaI(Tl). Esto se debe probablemente a que las pérdidas de energía en la medida experimental están dominadas por la difusión debida a los efectos de superficie, y no a la absorción en el cristal de NaI(Tl). Por lo tanto, por el momento no ha podido obtenerse satisfactoriamente la longitud de absorción del NaI(Tl) a partir de esta medida experimental, y este trabajo se ha realizado con los valores provisionales extraídos de [15] que se han mostrado en el apartado 5.2 y que se encuentran entre 10 y 100 m.

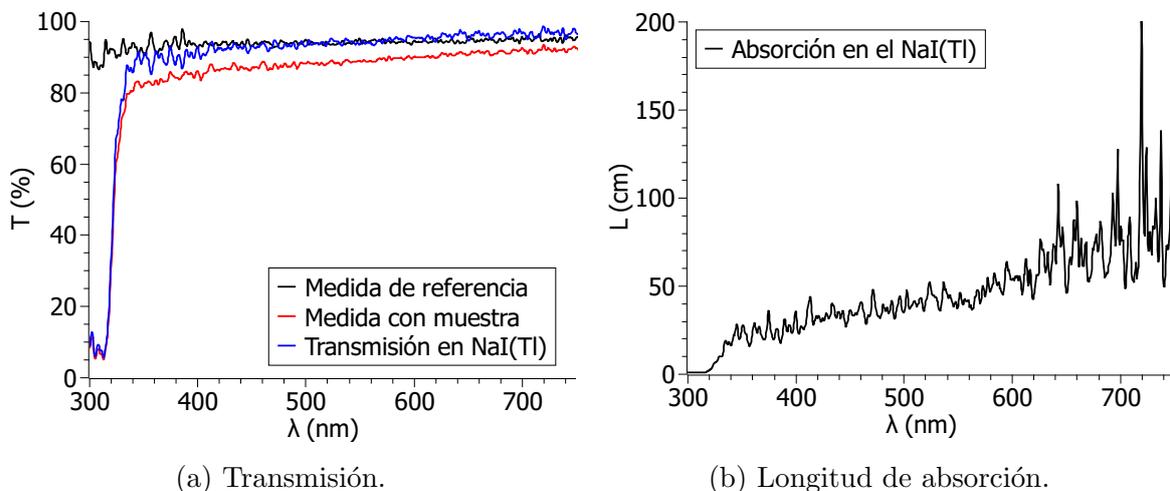


Figura 7: Espectros de la transmisión y la longitud de absorción obtenidos en la medida experimental.

7. Resultados de la simulación

Una vez implementada la simulación de un módulo de ANAIS-112, ha sido testada estudiando la respuesta del detector de centelleo ante las poblaciones de sucesos que se han explicado en el apartado 3. A continuación, se presentan todos los resultados que han podido obtenerse gracias a esta simulación y las conclusiones que se extraen de ellos.

7.1. Dependencia de la recogida de luz con las propiedades del cristal de NaI(Tl)

Mediante la simulación de los fotones de 3.2 keV internos procedentes de la contaminación de K-40 en el NaI(Tl), se ha estudiado cómo depende la recogida de luz en los PMTs con la longitud de absorción y el *light yield* del NaI(Tl). En la Figura 8 se presenta la evolución de los f.e./keV recogidos mediante los dos PMTs del módulo simulado con la longitud de absorción en el NaI(Tl) para un *light yield* de 40 fot/keV. Se puede observar que hay una gran variación de la recogida de luz para longitudes de absorción entre 0.1 y 100 m, lo cual incide en la necesidad de hacer una medida precisa de la absorción en el NaI(Tl). Por encima de los 100 m, la recogida de luz satura y se vuelve aproximadamente constante.

Uno de los argumentos que podrían explicar la buena recogida de luz que presentan los módulos de ANAIS-112 es que el *light yield* de sus cristales sea mayor que los valores típicos que se encuentran en la bibliografía, los cuales se sitúan entre 38 y 45 fot/keV. En la Figura 9 se observa la dependencia lineal de la recogida de luz en el módulo simulado con el *light yield* del NaI(Tl). En ella, se ha utilizado la longitud de absorción del NaI(Tl) extraída de [15] provisionalmente. A partir de este ajuste, se deduce que el *light yield* que sería compatible con una recogida de luz similar a la media de los módulos de ANAIS-112 es de 57 ± 1 fot/keV, un valor mayor que los encontrados normalmente en la literatura pero razonable para un cristal de NaI(Tl).

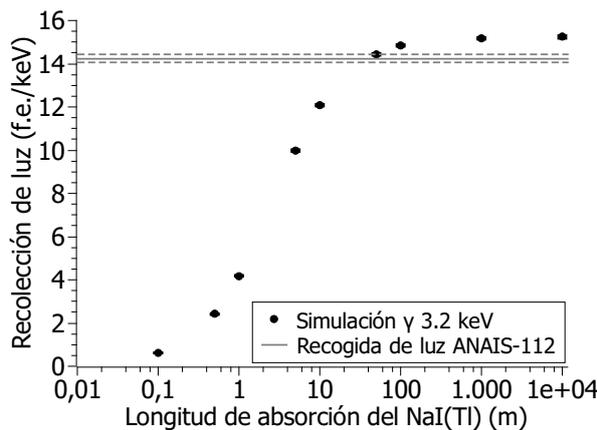


Figura 8: Dependencia de la recogida de luz en el módulo de la simulación con la longitud de absorción del cristal de NaI(Tl). Comparación con el valor de la recogida de luz promediada en los 9 módulos de ANAIS-112.

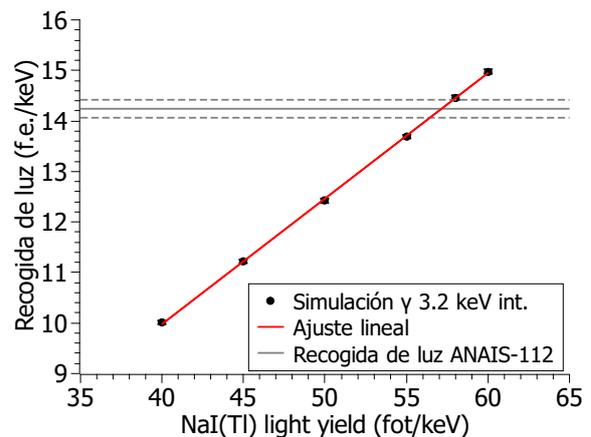


Figura 9: Ajuste lineal de la recogida de luz en el módulo de la simulación con el *light yield* del cristal de NaI(Tl). Comparación con el valor de la recogida de luz promediada en los 9 módulos de ANAIS-112.

7.2. Linealidad de la respuesta del detector ante distintas poblaciones

En la Figura 10 se muestra el número de fotoelectrones recogidos por los PMTs del módulo simulado frente a la energía depositada en el cristal de NaI(Tl) para las distintas poblaciones de sucesos que se usan en la calibración de ANAIS-112. La fuente externa de Cd-109 produce depósitos energéticos en todo el intervalo, y se puede observar una mayor densidad de sucesos en forma de líneas verticales en torno a 22 keV. Los fotones de 11 keV observados en la calibración de ANAIS-112 se han simulado tanto dentro como fuera del cristal para compararlos. Los fotones externos dan lugar a depósitos energéticos entre 0 y 11 keV, mientras que los internos producen depósitos monoenergéticos en 11 keV al igual que ocurre con los fotones de 3.2 keV provenientes del K-40 distribuido uniformemente en el cristal de NaI(Tl).

Los depósitos energéticos de estas cuatro poblaciones siguen una misma tendencia lineal. Esto implica que la recogida de luz en el módulo simulado tiene un mismo comportamiento tanto para emisiones internas y distribuidas uniformemente en el cristal de NaI(Tl) como para emisiones de una fuente radiactiva externa, cuya energía se deposita muy cerca de la superficie del cristal más cercana a la ventana de Mylar.

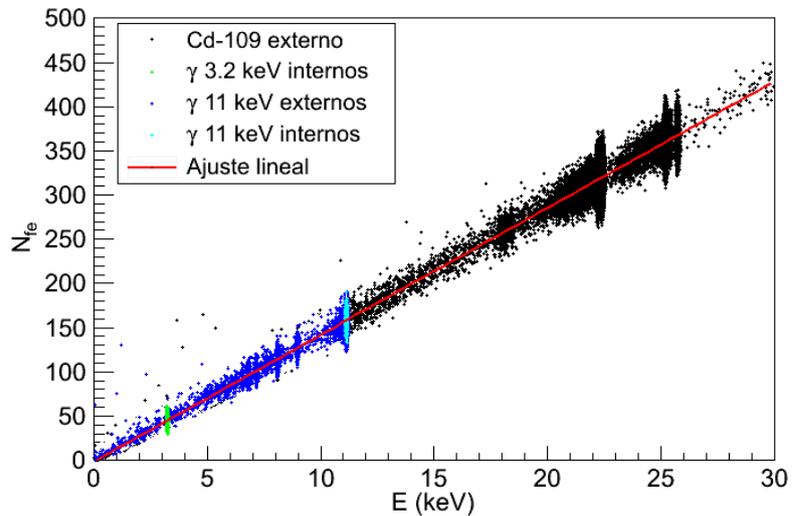


Figura 10: Recolección de luz en los PMTs frente a la energía depositada en el cristal de NaI(Tl) para sucesos internos y externos.

7.3. Identificación de poblaciones de sucesos

En este trabajo se ha estudiado cómo difieren los parámetros temporales P_1 y μ_p de los pulsos calculados en el segundo nivel de análisis de la simulación respecto a los obtenidos en ANAIS-112, que se han mostrado en el apartado 4. En la Figura 11 se recogen las distribuciones de P_1 y μ_p obtenidas en la simulación para las tres poblaciones de sucesos con depósitos energéticos entre 2 y 5 keV. La distribución correspondiente a la fuente de Cd-109 externa se encuentra desplazada hacia valores menores de P_1 y μ_p respecto a la distribución de los fotones de 3.2 keV del K-40. Este hecho denota que el comportamiento de los parámetros P_1 y μ_p en la simulación es similar al observado en ANAIS-112 para estas dos poblaciones. Sin embargo, se observa que los fotones de 11 keV externos dan lugar a una distribución distinta a la del Cd-109, indicando que la diferencia entre las distribuciones del Cd-109 y del K-40 no se debe al hecho de que el depósito energético para radiación proveniente del exterior del cristal sea más superficial.

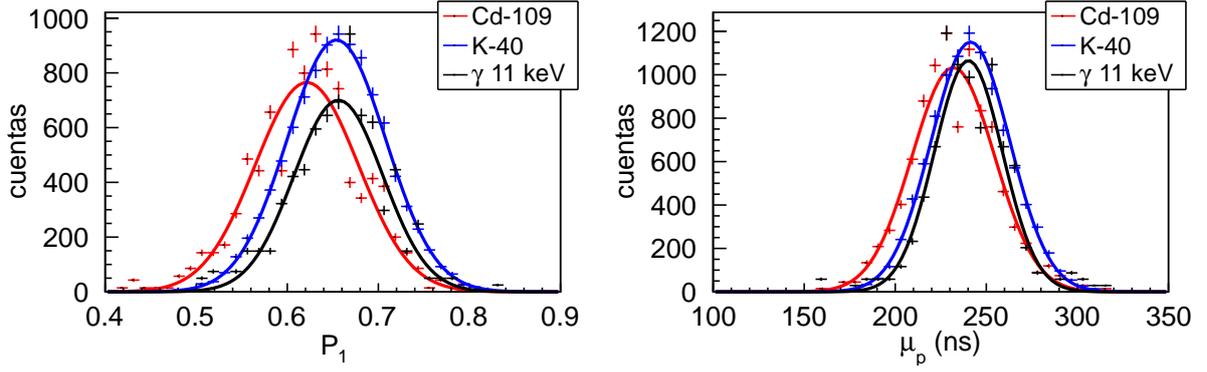


Figura 11: Distribución gaussiana de los parámetros temporales P_1 y μ_p calculados para los sucesos con energía entre 2 y 5 keV provenientes de: fuente de Cd-109 en la ventana de Mylar, fotones de 3.2 keV del K-40 distribuido uniformemente en el cristal de NaI(Tl), fotones de 11 keV provenientes de la ventana de Mylar.

Con el fin de indagar más acerca de la discrepancia entre la distribución de P_1 y μ_p para los sucesos de la fuente de Cd-109 y el resto de poblaciones, se ha estudiado la distribución de los tiempos de llegada de los fotones de centelleo a los PMTs. Los sucesos producidos por la fuente de Cd-109 tienen tiempos de llegada del orden de 10^{17} ns debido a que Geant4 tiene en cuenta la vida media del Cd-109 ($T_{1/2} = 462.2$ días). Sin embargo, los fotones de 3.2 keV provenientes del K-40 interno dan lugar a sucesos con tiempos de llegada menores ya que la generación del fotón se produce de forma instantánea.

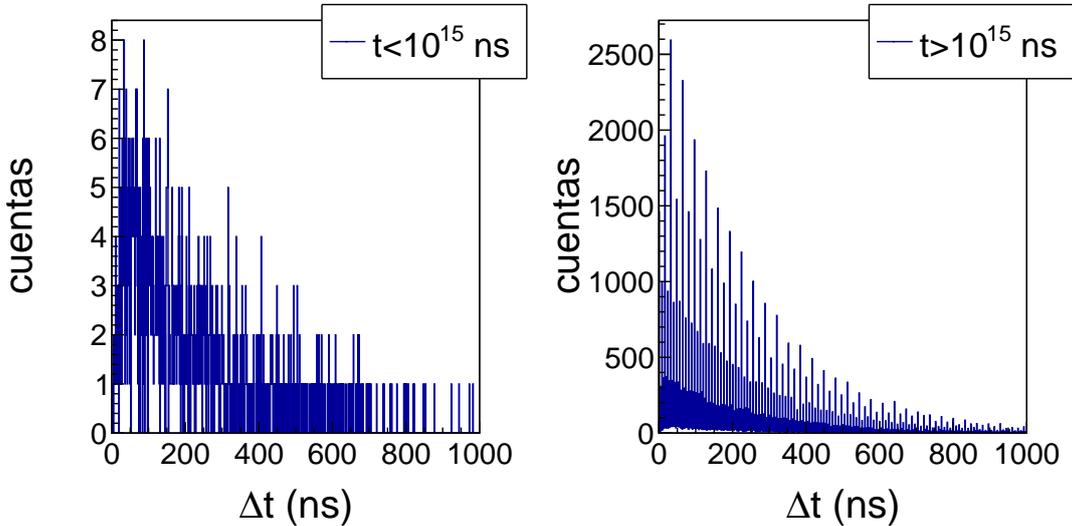


Figura 12: Distribución de los tiempos de llegada de los fotones al PMT (respecto a la llegada del primero) para los depósitos energéticos entre 2 y 5 keV producidos por la fuente externa de Cd-109 en los primeros 10^{15} ns de la simulación y en un tiempo mayor que 10^{15} ns.

En la Figura 12 se muestra la distribución de tiempos de llegada (Δt , calculado como la diferencia temporal con el primer depósito de energía en el NaI(Tl)) de los sucesos de la fuente de Cd-109 entre 2 y 5 keV en dos casos: desintegraciones que se han producido en los primeros 10^{15} ns de la simulación, y desintegraciones con tiempos mayores que 10^{15} ns. Se observa que, para sucesos con tiempos más largos, hay una pérdida de

precisión en el cálculo de Δt que da lugar a una diferencia en el parámetro P_1 respecto a las desintegraciones más rápidas. Este hecho tiene su origen en que los tiempos de cada suceso se almacenan en variables de tipo `double` en Geant4, de tal forma que al calcular la diferencia entre dos magnitudes muy grandes se pierde precisión. Este hecho podría solucionarse utilizando para el tiempo un tipo de variable entera con mayor resolución, pero ello requeriría una modificación de las rutinas de Geant4.

En la Tabla 5 se recogen los valores del parámetro P_1 obtenidos mediante las distribuciones del Cd-109 y del K-40. Para las desintegraciones del Cd-109 en los primeros 10^{15} ns de la simulación se obtiene un valor de P_1 próximo al de los sucesos del K-40, mientras que en las desintegraciones con tiempos mayores que 10^{15} ns el valor de P_1 es mayor y aparece la misma discrepancia que se observaba en la Figura 11.

| | P_1 |
|--------------------------|--------|
| Cd-109, $t < 10^{15}$ ns | 0.6617 |
| Cd-109, $t > 10^{15}$ ns | 0.6160 |
| γ 3.2 keV K-40 | 0.6568 |

Tabla 5: Valor medio de P_1 calculado con la distribución de los tiempos de llegada de los sucesos entre 2 y 5 keV de: fuente externa de Cd-109 (desintegraciones en los primeros 10^{15} ns y en tiempos mayores), fotones de 3.2 keV del K-40 interno.

En la Tabla 6 se resumen los resultados numéricos de P_1 y μ_p para las tres poblaciones de sucesos estudiadas y para distintos valores de la constante de centelleo del cristal de NaI(Tl). Comparando estas cifras con las de ANAIS-112 (Tabla 3), se observa que los valores de P_1 hallados en la simulación son menores que los de ANAIS-112 y los de μ_p son mucho mayores. La diferencia se debe a que el método empleado para calcular estos parámetros difiere del utilizado en ANAIS-112, ya que en la simulación se ha asociado una misma amplitud a todos los pulsos. No obstante, pese a la aproximación realizada en el cálculo de P_1 y μ_p , los resultados son razonables. Se observa que el parámetro μ_p sigue bastante bien el valor de la constante de centelleo utilizada en la simulación. El parámetro P_1 es menos sensible al cambio en la constante de centelleo, presentando variaciones del orden del 3% para una variación de la constante de centelleo del orden del 9%.

| | | P_1 | μ_p (ns) |
|--------|-----------------|---------------------|-----------------|
| 220 ns | Cd-109 | 0.6447 ± 0.0003 | 231.3 ± 0.1 |
| | K-40 | 0.6445 ± 0.0005 | 231.3 ± 0.2 |
| | γ 11 keV | 0.6458 ± 0.0007 | 231.0 ± 0.2 |
| 230 ns | Cd-109 | 0.6543 ± 0.0003 | 241.3 ± 0.1 |
| | K-40 | 0.6538 ± 0.0005 | 241.3 ± 0.2 |
| | γ 11 keV | 0.6579 ± 0.0006 | 240.0 ± 0.2 |
| 240 ns | Cd-109 | 0.6629 ± 0.0003 | 251.3 ± 0.1 |
| | K-40 | 0.6627 ± 0.0005 | 251.3 ± 0.2 |
| | γ 11 keV | 0.6657 ± 0.0007 | 249.8 ± 0.2 |

Tabla 6: Valor medio de la distribución de P_1 y μ_p calculado con los datos de la simulación para los sucesos con energías entre 2 y 5 keV correspondientes a: fuente externa de Cd-109 (sucesos con $t < 10^{15}$ ns), fotones de 3.2 keV del K-40 distribuido uniformemente en el cristal de NaI(Tl), fotones de 11 keV externos.

Otra tendencia de los parámetros P_1 y μ_p de ANAIS-112 es que toman un mismo valor para los distintos depósitos energéticos de la fuente de Cd-109. En la Figura 13 se observa este mismo comportamiento en P_1 y μ_p con los datos de la simulación de la fuente de Cd-109 externa. Además, hay una mayor densidad de puntos en los depósitos de 22 keV y la dispersión disminuye conforme aumenta la energía, lo cual también coincide con lo obtenido en ANAIS-112.

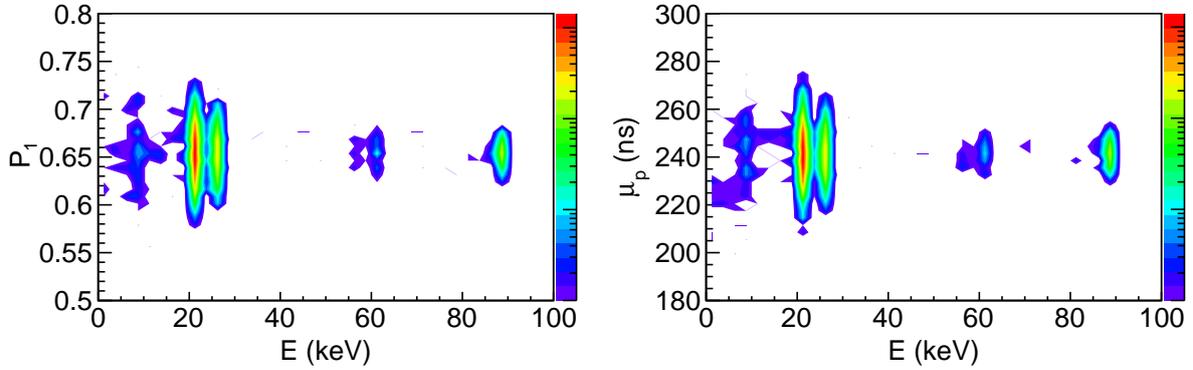


Figura 13: Distribución de los parámetros temporales P_1 y μ_p frente a la energía depositada en el cristal de NaI(Tl) por la fuente de Cd-109 externa ($t < 10^{15}$ ns).

Mediante la simulación se ha estudiado cómo dependen los parámetros P_1 y μ_p de los depósitos energéticos cuyo origen es interno o externo al módulo de centelleo. En la Figura 14 se presenta la distribución del parámetro P_1 para fotones internos de distintas energías provenientes del interior del cristal de NaI(Tl) y del exterior. En ambos casos el valor medio de P_1 no depende de la energía de los fotones, y por tanto de la magnitud depósito energético, y la anchura de la distribución disminuye conforme aumenta la energía de los fotones. Esta dependencia coincide con lo obtenido en la Figura 13, en la que la dispersión de los parámetros P_1 y μ_p decrece con la energía.

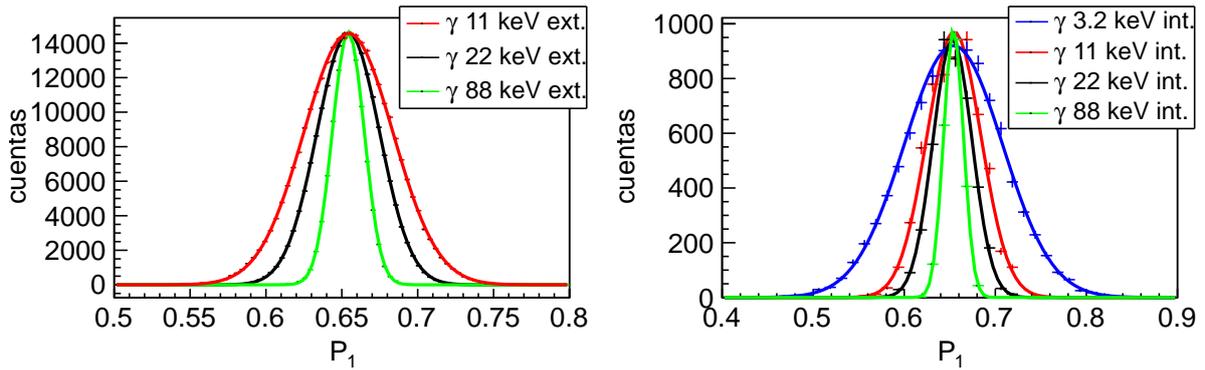


Figura 14: Distribución gaussiana del parámetro temporal P_1 calculado para fotones internos (distribuidos uniformemente en el interior del cristal de NaI(Tl)) y externos (colocados en la ventana de Mylar) de diferentes energías.

En la Figura 15 se compara la distribución de P_1 y μ_p para fotones de una misma energía pero que provienen del interior o del exterior del módulo de centelleo. El valor medio de P_1 y μ_p coincide en ambos casos, de manera que los parámetros temporales de los pulsos no dependen de si la partícula que ha producido los sucesos proviene del interior del cristal de NaI(Tl) o del exterior.

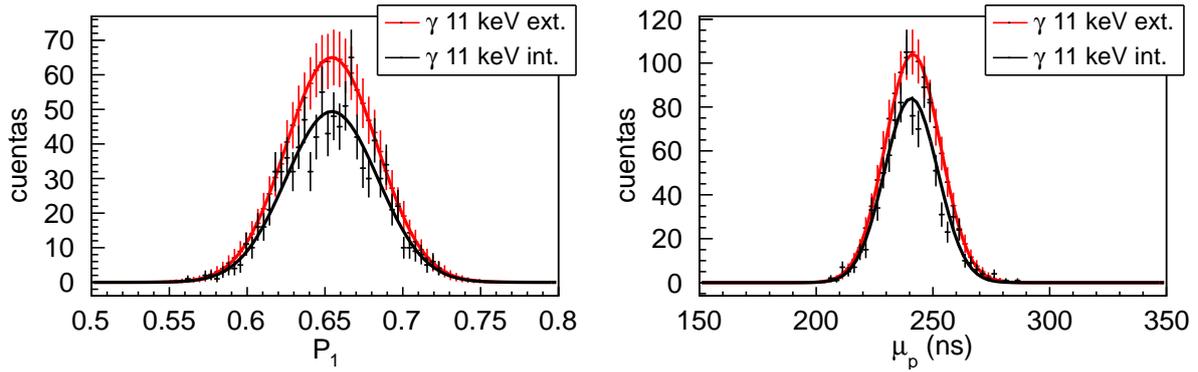


Figura 15: Distribución gaussiana de los parámetros temporales P_1 y μ_p calculados para fotones de 11 keV externos (provenientes de la ventana de Mylar) e internos (distribuidos uniformemente en el cristal de NaI(Tl)).

Por último, se ha estudiado la dependencia de los parámetros P_1 y μ_p con el tipo de partícula. El Cd-109 emite electrones de conversión tras la captura electrónica, y los más probables tienen una energía de 84 keV [23]. Estos electrones atraviesan el encapsulado de la fuente de Cd-109, que consiste en 1 mm de PVC, y después llegan al cristal de NaI(Tl), aunque en esta simulación no se ha tenido en cuenta el encapsulado de la fuente.

En la Figura 16 se presenta la distribución de P_1 y μ_p producida por electrones de 84 keV provenientes de la ventana de Mylar seleccionando los depósitos energéticos entre 2 y 5 keV, y se compara con las distribuciones de las otras tres poblaciones estudiadas en la Figura 11 teniendo en cuenta solo los sucesos con $t < 10^{15}$ ns del Cd-109. La distribución correspondiente a los electrones sigue una tendencia próxima a la del resto de poblaciones, aunque se aprecia un ligero desplazamiento hacia valores menores de P_1 y μ_p . Para determinar si este desplazamiento es un efecto real, es necesario realizar un estudio más detallado y una simulación con mayor estadística.

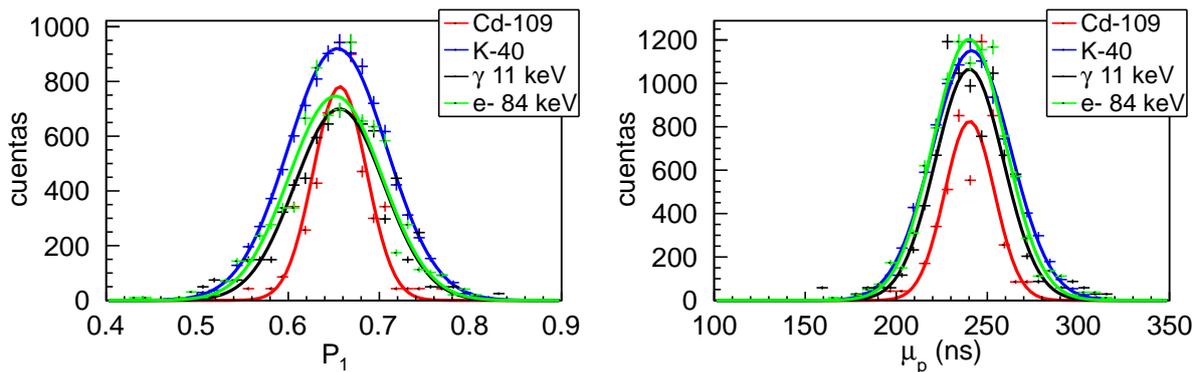


Figura 16: Distribución gaussiana de los parámetros temporales P_1 y μ_p calculados para los sucesos con energía entre 2 y 5 keV provenientes de: fuente de Cd-109 en la ventana de Mylar ($t < 10^{15}$ ns), fotones de 3.2 keV del K-40 distribuido uniformemente en el cristal de NaI(Tl), fotones de 11 keV provenientes de la ventana de Mylar, electrones de 84 keV provenientes de la ventana de Mylar.

De estos resultados se concluye que la diferencia entre los parámetros P_1 y μ_p de la fuente de Cd-109 y la contaminación interna de K-40 observada en ANAIS-112 no se debe

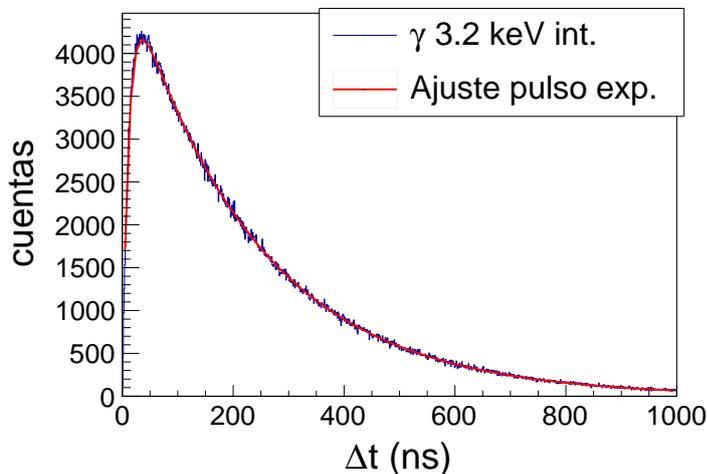
al tipo de mecanismo por el cual se absorbe la energía en el cristal de NaI(Tl), ni a la posición del depósito energético (distribuido homogéneamente en el cristal o situado cerca de la ventana de Mylar), ni a la recolección de luz de las distintas poblaciones.

7.4. Estudio de la forma del pulso de centelleo

Por último, se ha estudiado más en detalle cómo es la distribución de tiempos de llegada de los fotones para los sucesos producidos por los fotones de 3.2 keV del K-40 interno. Esta distribución se muestra en la Figura 17. En ella se aprecia una constante de subida que no es debida al centelleo en el cristal de NaI(Tl), sino al transporte de los fotones a través del cristal hasta llegar a los PMTs. Se ha ajustado esta distribución a un pulso exponencial según

$$f(\Delta t) = \frac{A}{\tau_d + \tau_r} (e^{-\Delta t/\tau_d} - e^{-\Delta t/\tau_r}) \quad (3)$$

donde A es un parámetro relacionado con el máximo del pulso, τ_d es la constante de bajada, dada por el centelleo en el cristal de NaI(Tl), y τ_r es la constante de subida. En la Tabla 7 se recogen los resultados de estos tres parámetros tras el ajuste. Se observa que τ_d coincide con la constante de centelleo del NaI(Tl) (~ 230 ns) y que τ_r se sitúa en torno a los 10 ns. Este es el tiempo promedio que tardan los fotones producidos por el centelleo en el NaI(Tl) en llegar a los PMTs tras sucesivos rebotes en las paredes del cristal. Esta información acerca del pulso de llegada de los fotones producidos por la contaminación de K-40 en el cristal es relevante a la hora de diseñar protocolos de discriminación de sucesos por la forma de los pulsos.



| | |
|------------------|-------------------|
| A (10^6 ns) | 1.234 ± 0.001 |
| τ_d (ns) | 229.7 ± 0.3 |
| τ_r (ns) | 11.38 ± 0.08 |

Tabla 7: Valores del parámetro A y las constantes de bajada y de subida obtenidos en el ajuste del pulso producido por los fotones de 3.2 keV del K-40 interno.

Figura 17: Distribución de los tiempos de llegada de los fotones al PMT (respecto a la llegada del primero) para los fotones de 3.2 keV del K-40 distribuidos homogéneamente en el cristal de NaI(Tl).

8. Conclusión

En este trabajo se ha implementado y testeado una simulación por Monte Carlo en Geant4 de los mecanismos de producción y recogida de luz en el experimento ANAIS-112. Para ello, se ha definido la geometría de un módulo de ANAIS-112, así como sus

materiales y sus propiedades ópticas. Después, mediante esta simulación se ha estudiado la respuesta de un detector de centelleo ante distintas partículas (fotones, una fuente radiactiva y electrones) provenientes del interior del cristal de NaI(Tl) o del exterior. De los resultados que se han presentado en este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La recogida de luz en el módulo sigue una dependencia lineal con el *light yield* del NaI(Tl), y se ha planteado la hipótesis de que la alta recolección de luz presente en ANAIS-112 sea debida a que el *light yield* del cristal de NaI(Tl) es mayor que los valores típicos para este material (entre 38 y 45 fot/keV), siendo del orden de 57 ± 1 fot/keV.
- La recogida de luz es también lineal con la energía depositada en el cristal de NaI(Tl), y además presenta un mismo comportamiento tanto para emisiones internas distribuidas uniformemente en el cristal como para emisiones externas, cuya energía se deposita cerca de la superficie del cristal más cercana a la ventana de Mylar. Por lo tanto, la recogida de luz no depende de la posición del depósito energético.
- Los parámetros temporales P_1 y μ_p presentan una distribución similar para emisiones internas y externas al cristal de NaI(Tl) con distintas energías, y también para distintos tipos de partículas (fotones y electrones). Sin embargo, se ha observado una diferencia en el valor de los parámetros P_1 y μ_p de los sucesos de la fuente externa de Cd-109 respecto al resto de poblaciones (fotones internos provenientes de la contaminación de K-40 en el cristal, o fotones externos). Se ha concluido que esta diferencia es un artefacto debido a una pérdida de resolución en el cálculo del tiempo de llegada de los fotones de centelleo a los PMTs, y no a un fenómeno físico.
- La simulación no proporciona una explicación para las diferencias observadas en los datos de ANAIS-112 entre los sucesos de la fuente de Cd-109 respecto al resto de poblaciones, y habrá que estudiar otras posibilidades (por ejemplo, la existencia de una capa con menor emisión de luz en la superficie del cristal).
- La distribución de tiempos de llegada de los fotones a los PMTs es un pulso con una constante de bajada dada por la constante de centelleo en el cristal de NaI(Tl), pero también con una constante de subida cuyo origen no está en el centelleo, sino en el transporte de los fotones a lo largo del cristal hasta llegar a los PMTs.

Respecto a las mejoras y perspectivas de futuro de esta simulación, cabe mencionar que:

- La simulación realizada en este trabajo trata los fotoelectrones producidos en el fotocátodo del PMT como entidades discretas, pero puede completarse con la generación de los pulsos de centelleo. A cada fotoelectrón se le asociaría una distribución de carga teniendo en cuenta el tiempo de tránsito a través del PMT, que es de unos 5 ns, y una cierta amplitud muestreada sobre la distribución de amplitudes de f.e. medidas en los módulos de ANAIS-112. Esto mejoraría la precisión del cálculo de los parámetros asociados a los pulsos individuales.
- Esta simulación puede ser de gran utilidad para estudiar la forma de los pulsos de sucesos no generados en el cristal centellador, como por ejemplo sucesos producidos por generación de luz de Cherenkov en el cristal del PMT o las ventanas de cuarzo, u otras poblaciones como la contaminación de Pb-210 presente en la superficie del cristal de NaI(Tl).

Referencias

- [1] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).
- [2] M. Schumann, “Direct Detection of WIMP Dark Matter: Concepts and Status”, J. Phys. G46 (2019) no.10, 103003 (2019).
- [3] R. Bernabei et al., “The DAMA project: Achievements, implications and perspectives”, Prog. Part. Nucl. Phys. 114, 103810 (2020).
- [4] J. Amaré et al., “Performance of ANAIS-112 experiment after the first year of data taking” Eur. Phys. J. C (2019) 79:228.
- [5] S. Agostinelli et al., “Geant4—a simulation toolkit”, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res., 506(2003) 250.
- [6] J. Amaré et al., “Annual Modulation Results from Three Years Exposure of ANAIS-112” Phys. Rev. D 103, 102005 (2021).
- [7] Tabla de energías de ligadura del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley. URL: https://xdb.lbl.gov/Section1/Table_1-1a.htm
- [8] Página web del Laboratoire National Henri Becquerel. URL: <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/module-lara/>
- [9] Página web sobre el isótopo Cd-109. URL: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=480109>
- [10] Página web de HepRep. URL: <https://www.slac.stanford.edu/~perl/heprep/>
- [11] R. Brun y F. Rademakers, “ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework”, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81.
- [12] Geant4 Collaboration, “Physics Reference Manual” (2020).
- [13] Geant4 Collaboration, “Book For Application Developers” (2020).
- [14] Glenn F. Knoll, “Radiation detection and measurement”, p. 233-235 (1989).
- [15] Y. Uchida, R. Kato. “Optical Studies on Thallium-activated Alkali-iodide Crystals” (1959).
- [16] Hoja de especificaciones técnicas del AL-1246 Thixotropic Optical Gel.
- [17] Página web del grupo Heraeus. URL: <https://www.heraeus.com/>
- [18] Página web Matmatch. URL: <https://matmatch.com/>
- [19] Página web sobre propiedades ópticas de materiales. URL: <https://refractiveindex.info/>
- [20] Hoja de especificaciones técnicas del BC-634A Optical Interface Pad.
- [21] E. Dietz-Laursonn, “Peculiarities in the Simulation of Optical Physics with Geant4” (2016). arXiv:1612.05162v1

- [22] E. Dietz-Laursonn, “Detailed Studies of Light Transport in Optical Components of Particle Detectors” p. 214 (2016).
- [23] Página web con base de datos de isótopos radiactivos. URL: https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_dec.jsp