



Facultad de Ciencias

**ESTUDIO DE LOS DIFERENTES MODELOS DE
FÍSICA NUCLEAR EN LOS ISÓTOPOS
RADIOACTIVOS DE LOS MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN DEL EXPERIMENTO OSCURA**

(Study of the diferent nuclear physics models in the
radioactive isotopes of the building materials of the Oscura
experiment)

Trabajo de Fin de Grado

para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autora: Irati Ahechu Leache

Coodirectoras: Rocío Vilar y Nuria
Castelló

Julio-2024

Resumen

La materia oscura es una componente esencial del Universo, cuyo origen y naturaleza se desconocen. El experimento Oscura busca detectar materia oscura utilizando dispositivos acoplados por carga (CCDs) con amplificadores skipper. Un desafío crucial en la detección de materia oscura es la identificación y modelización precisa de los fondos radioactivos. Este trabajo se enfoca en el estudio del isótopo ^{210}Pb , más concretamente en la desintegración del ^{210}Pb al ^{210}Bi . Para modelar esta desintegración se ha utilizado el framework de Geant4 [27], en particular, el código específico del experimento OSCURA: `g4oscura`.

El primer objetivo del trabajo ha sido estudiar los parámetros característicos de la desintegración del ^{210}Pb al ^{210}Bi , tales como la probabilidad de las posibles transiciones, el espectro beta, y el coeficiente de conversión total de electrones (α_T). Además, se ha analizado la distribución de las partículas emitidas en el proceso de conversión interna (electrones y rayos γ).

El segundo objetivo ha sido analizar el espectro de energía correspondiente a todas las partículas emitidas durante la desintegración del ^{210}Pb , con el fin de diferenciar entre la activación o desactivación de distintos procesos físicos mediante el uso de diferentes *physics lists* en las simulaciones.

Comprender las posibles diferencias entre las *physics lists* es crucial para determinar qué modelos físicos deben implementarse en el código de `g4oscura`, mejorando así la precisión de las mediciones en el experimento Oscura. Asimismo, este análisis proporcionará información sobre cómo diferentes entornos físicos pueden influir en los procesos de desintegración radiactiva. **Palabras clave:** Materia Oscura, Geant4, Oscura, desintegración del ^{210}Pb , espectro beta, coeficiente de conversión total de electrones, espectro de energía, Physics Lists

Abstract

Dark matter is an essential component of the Universe, whose origin and nature are unknown. The Oscura experiment aims to detect dark matter using charge-coupled devices (CCDs) with skipper amplifiers. A crucial challenge in dark matter detection is the identification and accurate modelling of radioactive backgrounds. This work focuses on the study of the isotope ^{210}Pb , more specifically on the decay of ^{210}Pb to ^{210}Bi . To model this disintegration, the Geant4 framework has been used, in particular, the specific code of the OSCURA experiment: `g4oscura`.

The first objective of the work has been to study the characteristic parameters of the decay of the ^{210}Pb to ^{210}Bi , such as the probability of the possible transitions, the beta spectrum, and the total electron conversion coefficient (α_T). In addition, the distribution of the particles emitted in the internal conversion process (electrons and γ rays) has been analysed.

The second objective has been to analyse the energy spectrum corresponding to all the particles emitted during the decay of Pb, in order to differentiate between the activation or deactivation of different physical processes by using different physics lists in the simulations.

Understanding the possible differences between the physics lists is crucial to determine which physics models should be implemented in the Oscura code, thus improving the accuracy of the measurements in the Oscura experiment. This analysis will also provide information on how different physical environments can influence radioactive decay processes.

ÍNDICE

1	Introducción	1
1.1	Materia Oscura	2
1.1.1	Evidencias	2
1.1.2	Candidatos	3
1.1.3	Búsqueda de la materia oscura	4
1.2	Experimento Oscura	6
1.2.1	CCDs	7
1.3	Fuentes de fondo en la búsqueda de materia oscura	8
1.4	Desintegración nuclear del ^{210}Pb	10
1.4.1	Desexcitación nuclear del $^{210}\text{Bi}[46\text{keV}]$	12
2	Simulaciones Monte Carlo	14
2.1	Simulaciones Monte Carlo con Geant4	14
2.2	Metodología para las simulaciones	15
2.3	Configuración de la física via las <i>physics lists</i>	17
3	Análisis y Resultados	20
3.1	Obtención de los parámetros relacionados con la desintegración nuclear	20
3.2	Obtención de los espectros, para fotones y electrones	25
4	Conclusiones y futuro trabajo	33
A	Macro	35
A.1	Comandos implementados en la macro	37
B	Códigos	38
B.1	Código para N_{ground} , % emisión gamma, %IC y α_T	38
B.2	Código para el espectro de energía	40

Capítulo 1

Introducción

La materia oscura, fundamental en la estructura del universo, se revela a través de observaciones astrofísicas y cosmológicas. Sin embargo, su verdadera naturaleza sigue siendo uno de los grandes enigmas de la ciencia contemporánea. La búsqueda de respuestas abarca una diversidad de candidatos propuestos, desde partículas exóticas hasta objetos astrofísicos hipotéticos. Para detectarla, se emplean una variedad de enfoques experimentales: métodos directos, que buscan interacciones directas con la materia oscura; métodos indirectos, que detectan productos de la aniquilación o desintegración de partículas de materia oscura; y experimentos de colisión, que investigan la producción de materia oscura en colisiones de alta energía.

El marco experimental de este trabajo es el experimento Oscura, uno de los experimentos de búsqueda directa de materia oscura. Este experimento utiliza dispositivos CCDs con amplificadores skipper, los cuales ofrecen una resolución sin precedentes, alcanzando niveles por debajo del electrón [17]. Esta alta resolución permite la búsqueda de partículas de materia oscura de baja masa (sub GeV/c^2).

La detección de materia oscura requiere un profundo conocimiento y caracterización de las señales de fondo, ya que estos constituyen el principal desafío para discriminar cualquier posible señal asociada a la interacción de partículas de materia oscura. Para modelar estos fondos se emplean técnicas de simulación Monte Carlo, que permiten simular y entender las características y distribuciones de estos eventos de fondo con gran precisión.

Este trabajo se centra en la modelización de uno de estos fondos mediante simulaciones Monte Carlo utilizando el framework de Geant4 ([27]). Esta herramienta permite construir el experimento en un ordenador y aplicar las leyes de la física de partículas para simular las señales producidas en el detector por la interacción radiación-materia. Para poder utilizar el framework, es necesario definir la geometría y materiales del experimento, y decidir que procesos físicos y partículas son relevantes en dicho experimento. Geant4 permite seleccionar dichos procesos de entre una extensa biblioteca de modelos físicos, adecuados a distintos escenarios. Optimizar la física del problema en este tipo de simulaciones es crucial para asegurar predicciones precisas.

El objetivo de este trabajo es simular la desintegración del ^{210}Pb al estado fundamental del ^{210}Bi en el experimento Oscura utilizando diferentes modelos en cada uno de los procesos físicos involucrados en la desintegración, estudiando las diferencias en la radiación producida. Las desintegraciones nucleares de los isótopos que se encuentran en los mate-

riales del experimento son uno de los fondos principales de Oscura y otros experimentos de detección directa de materia oscura de bajo fondo.

1.1 Materia Oscura

La Materia Oscura se define como la componente de masa desconocida e invisible, que se encuentra en el Universo y que no interacciona electromagnéticamente, pero que tenemos evidencias de sus efectos gravitatorios con la materia ordinaria, evolución y formación de las galaxias, efectos de lente gravitatorios, rotación de las estrellas etc. Además, la materia Oscura, junto con la Energía Oscura, representan más del 96 % del contenido de energía del universo [2]. Mientras que la materia oscura es responsable de la atracción gravitacional adicional observada en galaxias y cúmulos de galaxias, la energía oscura es una forma de energía responsable de la expansión acelerada del universo. Aunque la materia oscura y la energía oscura tienen orígenes y propiedades diferentes, ambas son conceptos clave para entender la composición y evolución del universo a gran escala. En este trabajo nos centraremos únicamente en la búsqueda de materia oscura.

1.1.1 Evidencias

El concepto de materia oscura surgió por primera vez en 1906 de la mano del francés Henri Poincaré, quien lo denominó como *matière obscure* en referencia al trabajo de Lord Kelvin, el cual postulaba que la mayoría de las estrellas eran cuerpos oscuros. Sin embargo, es Fritz Zwicky quien se considera el primero en observar la posible existencia de la materia oscura. En 1930, este astrónomo suizo-americano, analizó que al aplicar el teorema del virial a la masa visible del cúmulo de galaxias Coma, las energías potenciales y cinéticas del mismo no se comportaban como se esperaba. Analizó que las galaxias dentro del cúmulo se movían mucho más rápido de lo que podía explicarse solo por la materia visible [4]. Lo que le llevó a deducir que tenía que existir masa no visible que influía gravitacionalmente sobre las galaxias. Finalmente, Zwicky la denominó como *duncke Materie* (materia oscura) [1].

Años más tarde, en 1974 [6], Vera Rubin y sus colaboradores, encontraron una inconsistencia entre las distribuciones de las velocidades de las estrellas y el gas en una galaxia. Teniendo en cuenta la fuerza centrípeta en un campo gravitacional se tiene que

$$\frac{mv^2}{r} \approx \frac{Gm}{r^2}M(r)$$

dónde la velocidad disminuye con $r^{-1/2}$. Según la gravitación newtoniana, la velocidad de las estrellas debería ralentizarse a medida que aumentara la distancia al centro galáctico. Sin embargo, lo que Vera Rubin y Kent Ford observaron, en la nebulosa de Andromeda y otras galaxias espirales, fue que las **curvas de rotación** permanecían planas a distancias galactocéntricas muy grandes. Esta inconsistencia en las curvas de rotación ponía de manifiesto la necesidad de invocar una cantidad significativa de masa no visible (materia oscura) y así mantener la coherencia de las leyes de la física. Sin embargo, estas curvas también podrían explicarse mediante teorías que varían la gravedad.

Las medidas de las fluctuaciones en el **Fondo Cósmico de Microondas** también fueron relevantes para demostrar la existencia de la materia oscura. A diferencia de las curvas de rotación, el Fondo Cósmico de Microondas es más difícil de explicar mediante modificaciones de la gravedad, y por lo tanto, refuerzan la hipótesis de la materia oscura. El Fondo Cósmico de Microondas proporciona información sobre las fluctuaciones de temperatura del plasma de bariones ¹ y radiación en la recombinación ² para reproducir la estructura actual a gran escala. Estas fluctuaciones fueron clave para evidenciar la presencia de materia oscura, ya que se obtuvo un resultado aproximadamente dos órdenes de magnitud por debajo de lo esperado, lo que indicaba la presencia de materia desconocida. La inclusión de una componente de materia oscura fría, en la evolución de las fluctuaciones primordiales durante los diferentes períodos de expansión del universo no sólo permite llegar a la formación de las estructuras observadas hoy en día, sino que permite también definir el modelo estándar de cosmología. En este modelo, la materia oscura fría constituye aproximadamente el 27 % de la energía-materia total del universo y tan solo el 5 % se trata de materia ordinaria.

Cabe destacar la relevancia de la **lente gravitacional** en la observación de la existencia de la materia oscura. La lente gravitacional se define como un efecto que se basa en la teoría de la Relatividad General en el cual la luz se desvía debido a la presencia de masa. El cuerpo que produce esta desviación se le denomina lente gravitacional. La observación de imágenes de cúmulos de galaxias que presentan distorsiones notables permite inferir la distribución de materia oscura en dicha región. El análisis de la lente gravitacional débil aplicado al Cúmulo de Bala identificó la presencia de materia oscura. Este cúmulo se formó por la fusión de dos subcúmulos formados por galaxias, gas caliente de plasma que emite rayos X, y materia oscura. En ausencia de materia oscura, se esperaría que el potencial gravitacional siguiera la distribución de materia visible predominante (plasma de rayos X). Sin embargo, se observó una desviación de la distribución de masa respecto al plasma de rayos X, lo que indicó la presencia de materia oscura en esa región.

1.1.2 Candidatos

A lo largo de las últimas décadas, se han propuesto diferentes candidatos que podrían constituir la materia oscura, divididos principalmente en tres categorías: materia oscura fría, cálida y caliente. Esta clasificación se basa en cuán relativistas son estas partículas cuando se desacoplan del plasma térmico, en el universo primordial [5].

La **materia oscura fría** se refiere a partículas que tienen masa y velocidades no relativistas. Es precisamente esta componente fría la principal responsable de la estructura a gran escala del universo. Su capacidad para agruparse en halos gravitacionales propor-

¹El plasma se denomina como un gas cuasineutro compuesto de partículas cargadas y neutras que muestra un comportamiento colectivo. En general, consiste principalmente en electrones, protones y fotones del CMB. Dado que también hay una pequeña cantidad de helio y elementos más pesados que contienen neutrones, se suele referir a esta mezcla como un plasma de fotones y bariones [11]

²La recombinación se refiere al proceso en el cual los electrones y los protones se combinaron para formar átomos neutros cuando el Universo se enfrió lo suficiente, aproximadamente 300000 años después del Big Bang [11].

ciona los andamiajes sobre los que se forman las galaxias y las estructuras más grandes. Las medidas de la densidad de la materia oscura fría tienen una precisión muy alta, siendo el margen de error de apenas unos pocos por ciento. Actualmente, la teoría cuántica de campos es la responsable de describir las propiedades de los posibles candidatos en los modelos de materia oscura. En el caso de la materia oscura fría, estos candidatos tienen un rango muy amplio de masas, desde los μeV hasta los TeV [7]. Entre estos candidatos se encuentran los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), que según el modelo estándar de cosmología, podrían constituir una fracción significativa de la materia oscura fría. [1]. Como su nombre indica, los WIMPs son partículas masivas que interactúan débilmente con la materia ordinaria y que además son eléctricamente neutras, lo que dificulta su detección [5]. Además, se estima que tienen una masa en el rango de 1 GeV a 100 TeV. Estas partículas fueron generadas en el Universo temprano cuando estaban en equilibrio con el plasma térmico. A medida que el Universo se expandía, la temperatura del plasma disminuyó hasta alcanzar temperaturas por debajo de la masa de los WIMP, lo que impidió la producción adicional de los mismos. Este fenómeno, conocido como 'congelamiento', resultó en una densidad de WIMPs que coincide con la observada de la materia oscura en el universo actual. Los WIMPs son considerados uno de los candidatos más buscados, especialmente en detección directa y aceleradores de partículas [1]. Otro posible candidato a materia oscura fría son los axiones. Estos surgen como posible solución al problema de Paridad de Conjugación de Carga fuerte en la Cromodinámica Cuántica, donde no se han observado violaciones de CP en las interacciones fuertes. Estos se definen como un campo pseudo escalar con una masa muy baja, en un rango entre $50 \mu\text{eV}$ y 1.5meV . A pesar de su baja masa, los axiones se comportan como partículas no relativistas [8].

La **materia oscura cálida** se coloca en un rango de unos pocos keV. Se considera como una posible forma de mejorar las discrepancias encontradas en la materia oscura fría. Entre los candidatos se encuentran los neutrinos estériles. A diferencia de los neutrinos conocidos, los estériles no interactúan débilmente según lo descrito en el Modelo Estándar, lo que los hace más difíciles de detectar. Únicamente interactúan gravitacionalmente. Se les denomina 'neutrino' por su naturaleza fermiónica y su neutralidad en la carga eléctrica, y el adjetivo 'esteril' muestra la neutralidad frente a las interacciones débiles. Estos se definen como partículas hipotéticas (fermiones singlete) en la extensión del Modelo Estándar que interactúan con la materia ordinaria únicamente a través de la mezcla con los neutrinos [10].

Finalmente la **materia oscura caliente** se encuentra en un rango de masa de unas pocas decenas de eV, es decir, al desacoplarse del plasma era relativista. Un ejemplo de esta sería los neutrinos con masa muy pequeña. La materia oscura caliente no pertenece a la creación de conglomerados pequeños como galaxias, y tampoco reproduce el Universo analizado en simulaciones donde se estudia la formación de estructuras grandes. Por ello, la materia oscura caliente, de existir, únicamente contribuye a una pequeña fracción de la densidad total de la materia oscura.

1.1.3 Búsqueda de la materia oscura

La materia oscura se puede estudiar vía tres procesos diferentes: por la producción en un acelerador de partículas, indirectamente analizando exceso de partículas del modelo

estándar que provienen de desintegraciones de materia oscura, o directamente después de haber sido dispersado por un átomo. En la figura 1.2 se muestra un esquema de las tres posibilidades, siendo P una partícula de materia ordinaria.

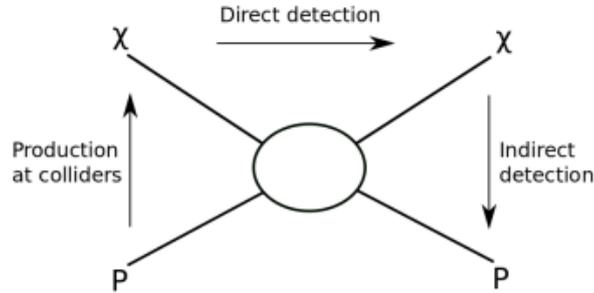


Figura 1.1: Esquema de las posibles técnicas de detección de materia oscura. P representa una partícula del modelo estándar y χ una de materia oscura. Las flechas indican los estados iniciales y finales. Recuperado de [12].

La **detección indirecta** consiste en detectar un flujo de partículas pertenecientes al Modelo Estándar que provienen de la aniquilación, la desintegración o la dispersión de la materia oscura en el espacio. Este método tiene como objetivo distinguir la materia oscura del fondo astrofísico [13]. Las partículas de materia oscura pueden acumularse gravitacionalmente en diversos objetos astrofísicos, como estrellas, galaxias o incluso en nuestro Sol. Las fuentes más comunes para buscar señales indirectas son el centro galáctico y el halo. A partir de la aniquilación de la materia oscura se pueden producir e^- , e^+ , p , \bar{p} , rayos γ y neutrinos. De las partículas mencionadas, las que contienen carga serán desviadas por campos magnéticos antes de llegar a la Tierra. Es importante destacar que existen telescopios en el espacio responsables de detectar estas partículas cargadas que no llegan a la Tierra. Sin embargo, los rayos γ y los neutrinos viajan en línea recta, por lo que los convierte en trazadores importantes para la detección indirecta de materia oscura. [13].

La segunda técnica de **detección** de materia oscura consiste en el empleo de **aceleradores de partículas**. En las últimas décadas, con los experimentos puestos en marcha (CMS y ATLAS) en el LHC, se han buscado nuevas partículas mediante colisiones protón-protón. Estas colisiones podrían producir partículas de materia oscura que, al no interactuar con los detectores, podrían manifestarse como de falta de momento y energía en la suma total de energía en la colisión, caracterizadas por un chorro energético y una transferencia de momento desequilibrada [9]. Hasta ahora, los resultados obtenidos son consistentes con el modelo estándar, pero se llevarán a cabo búsquedas adicionales en los próximos años [13].

Finalmente, hay la **detección directa** en la que se basa el experimento Oscura, marco experimental de éste trabajo. El objetivo de la detección directa es identificar los retrocesos nucleares o de electrones producidos por partículas de materia oscura en su interacción con los átomos del detector. El tipo de retroceso y la cantidad de energía depositada en el detector depende del candidato de materia oscura considerado. Por ejemplo, los WIMPs con masas del orden de $(10-1000)\text{GeV}/c^2$ producirían un retroceso nuclear en el rango de $(1-100)\text{keV}$. La materia oscura puede interactuar con un detector de tres maneras: generando calor, emitiendo fotones de centelleo cuando un núcleo se excita o desexcita, o

ionizando directamente los átomos del detector. Las estrategias de detección suelen centrarse en una de estas tres señales o incluso en una combinación de ellas. Por ejemplo, en el experimento DarkSide-50 se emplea argón líquido, que ofrece tanto la señal de ionización como el centelleo. Otros experimentos como SENSEI, DAMIC-M y Oscura se basan en medir la ionización inducida por la materia oscura al interactuar con los CCDs.

1.2 Experimento Oscura

El experimento Oscura es un proyecto de detección directa de materia oscura, que se propone liderar la búsqueda de candidatos de materia oscura con masas por debajo de la masa del protón, mediante una gran matriz de skipper CCDs. El diseño de Oscura se basa en sensores de 1.35 MPíxeles (1278×1058 píxeles), con un tamaño de píxeles de $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ y con un grosor de $695\mu\text{m}$. Estos tienen un amplificador de lectura, llamados amplificador skipper, que consigue resolución por debajo del electrón. Los CCDs están empaquetados en un Módulo de Chips Múltiples, donde cada uno de ellos contiene 16 sensores pegados a una oblea de silicio de 150mm de diámetro, y a su vez éstos se agrupan en un súper módulo de 16 módulos en forma de matriz. Oscura estará compuesto por 92 súper módulos para conseguir los 10 kg de masa activa [15]. En la figura 1.2, se muestra el diseño actual del detector, dónde se puede ver la distribución espacial de los módulos. Una novedad de éste experimento, con respecto sus predecesores, lo es el tipo de refrigeración necesaria para reducir la producción térmica de pares electrón-hueco. La temperatura de trabajo de este tipo de sensores es de 120K a 140K. Estas temperaturas se pueden conseguir con un cryocooler, pero al haber tantas CCDs, este no proporciona una distribución homogénea de la temperatura sin implementar más materiales. Sin embargo, sumergiendo el detector en nitrógeno líquido con una presión de vapor de 450 psi, se consigue esta homogeneidad con mayor facilidad [16]

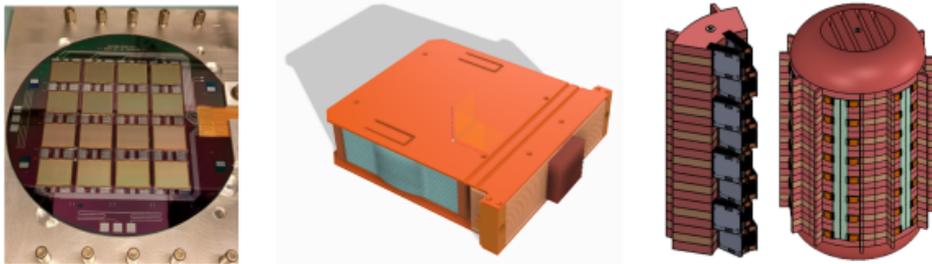


Figura 1.2: Módulo de Chips Múltiples (MCM) de Silicio sobre una bandeja de cobre (izquierda) , diseño de Súper Módulo (SM) compuesto por 16 MCMs y protegidos con cobre electroformado (centro), y segmento compuesta por 16 SMs y el detector completo con los seis segmentos (derecha).

Los detectores para Oscura se están diseñados para tener un umbral de dos electrones y una exposición total de 30 kg/año. Además de las interacciones nucleares, el experimento se focalizará en las dispersiones inelásticas de la materia oscura con el electrón, pudiendo alcanzar un rango de masas hasta 500 keV, y en la absorción de candidatos a materia oscura como las partículas tipo axiones, pudiendo llegar a cotas de hasta 1 eV.

Este experimento se instalará en un laboratorio subterráneo situado en Sudbury, Canada (visite [14]) junto a una mina de Niquel. SNOLAB está a una profundidad de unos 2 km, y con una profundidad de 6000 metros de agua equivalente, con el objetivo de alcanzar un nivel de ruido de fondo considerablemente bajo 0.025 eventos/keV/kg/día (1 dru). Esto significa que se registra menos de un evento de fondo por cada bin, número de electrones por píxel, en los píxeles en la región de señal de ionización de 2 a 10 electrones para una exposición total de 30kg-año. En este contexto, el término "fondo" se refiere a las fuentes que contribuyen al rango de energía de interés, es decir, el rango de energía donde se busca detectar la materia oscura. Para conseguir el fondo esperado, se están estudiando todas las posibles contribuciones, así como el uso de materiales puros en radioactividad, blindajes adecuados y ajuste de espesores para minimizar el fondo radiactivo, entre otros.

En la imagen 1.3 se compara la sensibilidad del experimento Oscura en la sección eficaz de interacción entre la materia oscura y un electrón en función de la masa de la materia oscura. Los colores sólidos representan los límites actuales establecidos por experimentos, y las líneas sólidas son la sensibilidad de los experimentos basados en CCDs.

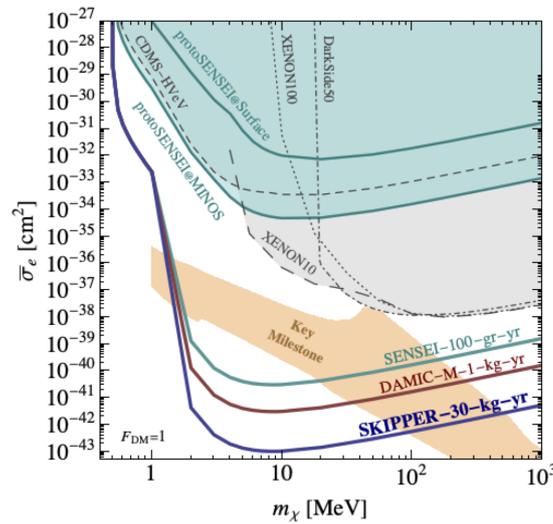


Figura 1.3: Alcance científico para la materia oscura de retroceso electrónico en el experimento OSCURA con la tecnología Skipper-CCD. Se compara con los experimentos SENSEI-100 y DAMIC-M. Recuperado de [19].

Se prevé que la parte de investigación y diseño concluya en 2024, seguida por el inicio de construcción entre 2026 y 2027. Se espera poder iniciar con el experimento entre 2028 y 2029.

1.2.1 CCDs

Los CCDs están fabricados con semiconductores de silicio debido a sus propiedades físicas. El silicio se caracteriza por su pequeña anchura en la banda prohibida, lo que permite la detección de masas de materia oscura más bajas en comparación con detectores basados en líquidos nobles, que requieren una energía de ionización de 10 eV. Para generar carga en los CCDs, una partícula debe alcanzar la zona de agotamiento e interactuar con el silicio. Si la energía liberada supera la brecha de banda del silicio, un electrón de la banda de valencia se moverá a la banda de conducción, creando un par electrón-hueco.

Al estar los CCDs bajo un voltaje, el campo eléctrico dirige los pares hacia direcciones opuestas dentro del píxel, donde la carga inducida se almacena en la parte frontal de la CCD, para ser leída después de un cierto tiempo de exposición. Aplicando una serie de voltajes en los píxeles, la carga se transfiere a lo largo de la matriz hasta el dispositivo de lectura. Se pueden diferenciar dos tipos de lectura: la estándar y la skipper. En la lectura estándar, la carga se elimina justo después de cada medición. Sin embargo, los amplificadores skipper proporcionan una mayor flexibilidad en los movimientos del voltaje aplicado en las puertas, permitiendo llevar a cabo múltiples mediciones no destructivas de la carga en cada píxel [18].

1.3 Fuentes de fondo en la búsqueda de materia oscura

Para detectar la débil interacción de la materia oscura con la materia ordinaria, los experimentos deben identificar y discriminar los eventos de fondo que podrían ocultar una señal de materia oscura.

Los muones son una de las principales fuentes que contribuyen al fondo. Los experimentos de física de eventos raros, se suelen instalar en laboratorios subterráneos para proporcionar la cobertura necesaria que los proteja de los muones de rayos cósmicos. En la mitad interior de la atmósfera, los muones son los más numerosos entre todas las partículas secundarias cargadas de rayos cósmicos, con una energía media de 4 GeV y una intensidad de aproximadamente $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ para detectores planos. Los muones son altamente penetrantes y pueden alcanzar profundidades significativas bajo tierra. La mayor preocupación es el fondo inducido por los muones, como los neutrones rápidos producidos en su interacción con los componentes del detector o la roca circundante, ya que los propios muones se pueden identificar y rastrear con relativa facilidad. Los muones o neutrones, a su vez, pueden provocar la espalación de núcleos debido a las interacciones foto-nucleares y a los procesos de captura de muones, causando la creación de isótopos radiactivos.

Como se ha mencionado, los neutrones pueden ser generados por muones mediante procesos radiactivos, es decir, reacciones (α, n) y fisión espontánea. Estos neutrones pueden luego inducir retrocesos nucleares y producir señales que se asemejan a las de una interacción de materia oscura. Generalmente, la tasa de producción de neutrones en un laboratorio subterráneo profundo es de dos a tres órdenes de magnitud menor que la producida por la radiactividad local a través de reacciones (α, n) . Sin embargo, mientras que este último proceso produce neutrones de baja energía que son relativamente fáciles de blindar, los neutrones inducidos por muones (neutrones rápidos) tienen un espectro de energía muy amplio, alcanzando varios GeV, pudiendo penetrar una profundidad significativa en los materiales de blindaje del detector.

Otro fondo significativo es el fondo producido por los electrones y las gammas. Estos se producen por desintegraciones nucleares en los materiales alrededor y dentro de la configuración experimental. Los rayos γ pueden generar electrones a través del efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares e^+/e^- . Los electrones de baja energía producidos por dispersión Compton son especialmente críticos en las energías de

interés tanto de Oscura como de DAMIC-M (ambos utilizando la misma tecnología de detección). Una medición detallada del espectro de electrones dispersados por Compton en el volumen de una CCD con tecnología skipper fue realizada por la colaboración DAMIC-M con un setup en la Universidad de Chicago [3]. Las principales fuentes de electrones y rayos γ son las cadenas de ^{238}U y ^{232}Th , el ^{40}K y los isótopos cosmogénicos. En la Figura 1.5 se muestra la cadena de desintegración del uranio como ejemplo. Se pueden encontrar trazas de estos elementos en el volumen de los componentes del detector, incluidos los CCDs, pero también en partículas en sus superficies, como polvo, o como hijas del radón absorbidas. Cada elemento en la cadena genera radiación secundaria al emitir tanto electrones como rayos γ , siendo fundamental la cuantificación de cada uno de ellos. Con este fin, se realizan ensayos para medir las actividades de los distintos elementos, y así poder modelar el espectro de energía esperado en el rango de interés para la búsqueda de materia oscura. Es importante mencionar en este punto, que los núcleos padre e hijo tienen la misma actividad si se alcanza el equilibrio secular, sin embargo, procesos químicos involucrados en las técnicas de limpieza y físicos pueden romper este equilibrio y causar la eliminación de uno o más componentes de la cadena. Por ejemplo, el radio es un elemento químicamente altamente reactivo, que puede ser eliminado o enriquecido durante el proceso de limpieza y/o fabricación.

Para minimizar el fondo se emplean diversas técnicas. Para reducir la contribución de fuentes externas, como muones, neutrones y gammas ambientales, se blindan el experimento con capas de plomo y polietileno; mientras que para reducir el fondo debido a las desintegraciones nucleares, se eligen elementos o materiales de alta pureza, i.e. con baja concentración de radioisótopos, como el plomo antiguo o el cobre electroformado, entre otros. Se adoptan también procedimientos de limpieza para reducir la contaminación superficial de los componentes que rodean los detectores. Estos procedimientos eliminan unas pocas micras de material de las superficies de los volúmenes, como el cobre o el plomo, eliminando efectivamente el ^{210}Pb superficial.

Para concluir, es fundamental cuantificar mediante ensayos la contribución de cada una de estos fondos y así modelar la señal de fondo esperada. Como ya hemos mencionado en la Introducción, este trabajo se ha centrado en el fondo debido a las desintegraciones nucleares. En concreto, se ha simulado la desintegración nuclear del plomo ^{210}Pb al estado fundamental del ^{210}Bi . Es importante señalar que, aunque se ha utilizado el ^{210}Pb como ejemplo específico del fondo producido por desintegraciones nucleares, compartirá los mismos modelos de desintegración que otros isótopos. Sin embargo, los espectros de energía variarán según las características específicas de cada desintegración.

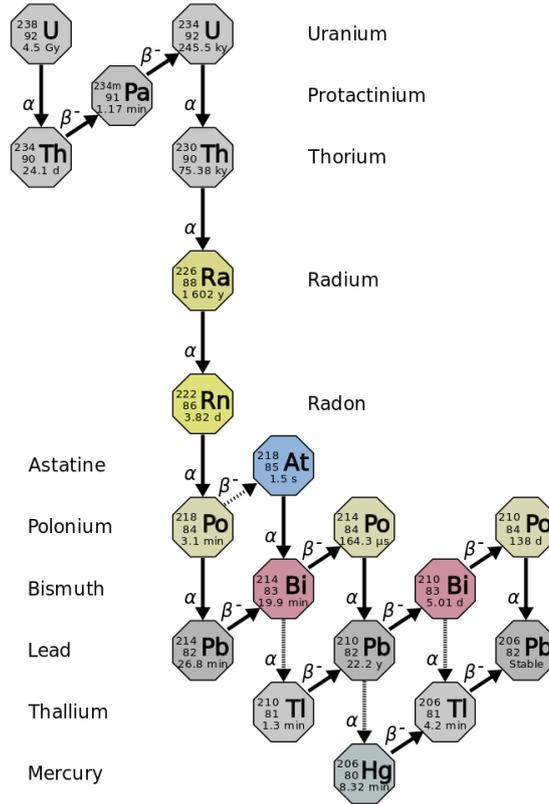


Figura 1.4: Diagrama de la secuencia de desintegración del ^{238}U . El hijo más estable del ^{238}U es el ^{226}Ra , que luego decae en una serie de elementos de vida corta hasta el ^{210}Pb , siendo este el hijo más estable en esta cadena después del radio. Por lo que estos dos isótopos radiactivos están presentes en muchos materiales y son generadores de radiación secundaria, principalmente gammas y electrones.

1.4 Desintegración nuclear del ^{210}Pb

El uranio es uno de los isótopos más abundantes en la Tierra, con una vida media de 4.47 mil millones de años y una actividad de 12.44 mil Bq/g [20]. En la cadena de desintegración del uranio se encuentra el isótopo ^{210}Pb , como se muestra en la Figura 1.4. El plomo tiene una vida media³, $T_{1/2}$, de 22.2 años lo que le hace bastante estable. Decae el 100% de las veces mediante desintegración β al isótopo ^{210}Bi . La vida media del bismuto es de tan sólo 5.012 días, lo que lo clasifica como un isótopo relativamente inestable. En la Figura 1.5 se muestra un esquema de esta desintegración β^- .

Las desintegraciones β implican la transformación de un neutrón en un protón (β^-), o viceversa (β^+), dentro de un núcleo excitado, emitiendo una partícula beta (electrón o positrón) y un neutrino o un antineutrino:



Durante la desintegración β , tanto la energía como el momento se conservan. El proceso

³La vida media representa el tiempo necesario para que la mitad de los núcleos iniciales se desintegren.

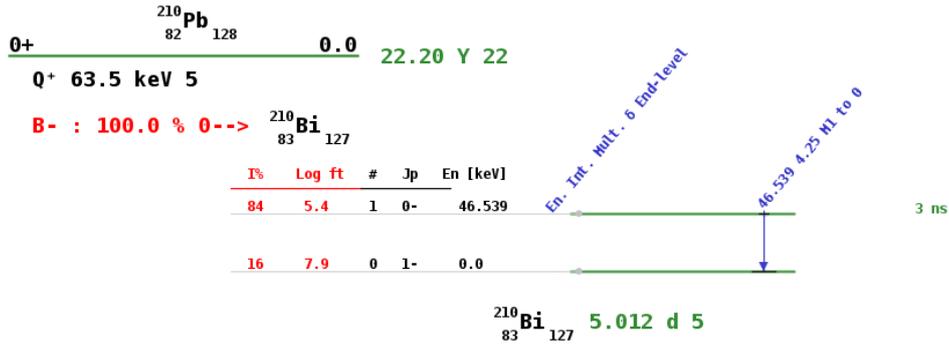


Figura 1.5: Esquema de la desintegración del isótopo ^{210}Pb al isótopo ^{210}Bi . Recuperado de [30].

de desintegración β^- se expresa en términos generales como [21]:

$$X_Z^A \rightarrow Y_{Z+1}^A + \beta^- + \bar{\nu}$$

donde X_Z^A representa el núcleo inicial, Y_{Z+1}^A el núcleo final después de la desintegración, β^- el electrón emitido y $\bar{\nu}$ el antineutrino. Es importante destacar también la energía total liberada en la desintegración, conocida como $Q+$. Esta energía se define como la diferencia de energía entre las partículas iniciales y finales involucradas en el proceso de desintegración: $Q = (m_{\text{part}_{ini}} - m_{\text{part}_{fin}})c^2$. En el espectro beta, que se muestra en la Figura 1.6, se observa esta energía donde la curva corta con el eje x ($Q+ = 63,5\text{keV}$).

El primer parámetro evaluado en este trabajo es el espectro de energía producido por las partículas beta emergentes de esta desintegración, mostrado en la Figura 1.6. El comportamiento continuo se debe a la emisión del antineutrino junto con las partículas beta, lo cual provoca que los antineutrinos se lleven una fracción de la energía liberada durante la desintegración. En el caso de la desintegración de tres cuerpos, las partículas hijas muestran un espectro de energía continuo debido al grado de libertad que existe.

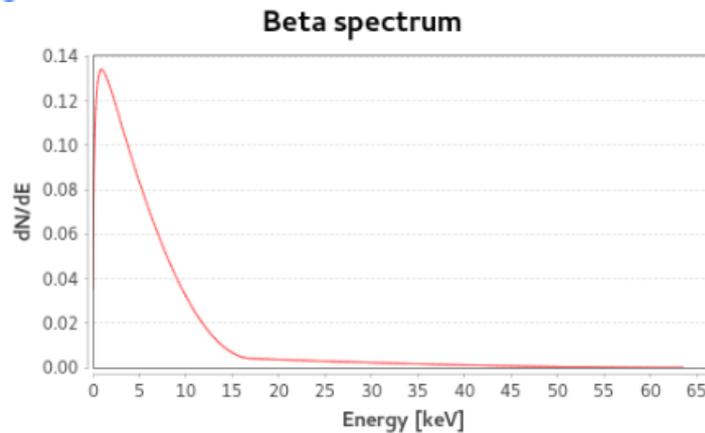


Figura 1.6: Espectro beta obtenido de la página web *Livechart*.

1.4.1 Desexcitación nuclear del ^{210}Bi [46keV]

Como se observa en la Figura 1.5, el isótopo ^{210}Pb decae al estado fundamental del ^{210}Bi con una probabilidad del 16 %, o bien a un estado excitado con una energía de excitación del núcleo de 46.539 keV el 84 % restante. El núcleo del bismuto, al encontrarse en su estado excitado, experimenta un proceso de desexcitación nuclear mediante emisión gamma o conversión interna, lo que desencadena una cascada Auger. El coeficiente de conversión[22], α_T , representa el cociente entre el número de transiciones por conversión interna, N_{IC} , y el de transiciones por emisión gamma, N_γ , i.e.

$$\alpha_T = \frac{N_{\text{IC}}}{N_\gamma} \quad (1.2)$$

Segun la base de datos NIST [25], el plomo tiene un coeficiente de conversión igual a 17.86, lo que implica que la mayoría de las veces (94.70 %) se libera la energía mediante conversión interna, y lo restante (5.30 %) por emisión gamma. Este coeficiente ha sido evaluado en los distintos escenarios físicos simulados en este trabajo.

Cuando la transición se produce por conversión interna, la energía nuclear de excitación se transfiere directamente a un electrón de la capa mas interna del átomo mediante interacción electromagnética. Este electrón es entonces expulsado del átomo con una energía $E_{e^-} = E_{ex} - E_b$, donde E_b la energía de enlace en el nivel original del electrón. El electrón arrancado del átomo deja un hueco en los orbitales, dejando la corteza electrónica en un estado excitado, lo que provoca el efecto Auger. Los electrones de los orbitales superiores se reorganizan para alcanzar el estado de mínima energía. En este proceso se liberan tanto electrones como fotones de rayos X. Sin embargo, cuando la transición al estado fundamental por emisión γ , el núcleo excitado libera únicamente un fotón con energía igual al del estado excitado. El numero de electrones y fotones emitidos en la transición al estado fundamental ha sido otro de los parámetros estudiados en este trabajo. Así como también el espectro de energía perdida de estas partículas a su paso por los CCDs.

En la imagen de la Figura 1.7 se tiene un esquema tanto de la emisión gamma de la conversión interna y su consiguiente efecto Auger.

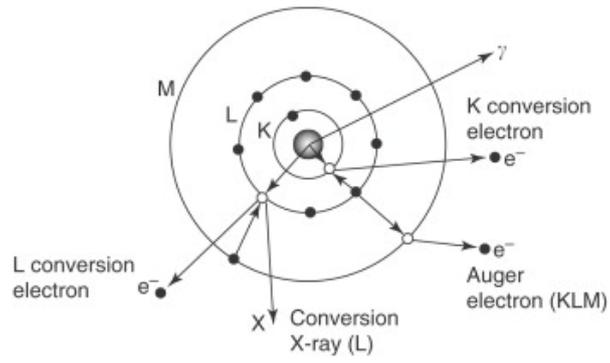


Figura 1.7: Diferentes procesos para la desexcitación de un átomo: emisión de un fotón de rayos gamma (arriba derecha), conversión interna (abajo izquierda), y efecto Auger (abajo derecha). Recuperado de [23].

Capítulo 2

Simulaciones Monte Carlo

En este segundo capítulo se explica la **metodología** principal empleada para realizar las **simulaciones** y el consiguiente **análisis**. Para llevar a cabo estas simulaciones, se han utilizado dos herramientas principales: Geant4 para las simulaciones Monte Carlo, y ROOT para el análisis de los datos generados por dicha simulación. Normalmente, estos programas se escriben en lenguaje C++. Sin embargo, en el caso de ROOT[24], se ha utilizado PYROOT para poder escribir en lenguaje Python todos los códigos necesarios para el reprocesado de los datos, y obtener los parámetros de estudio presentados en el capítulo anterior. Todos los códigos frutos de este trabajo son presentados en el apéndice B.

`g4oscura` es una aplicación desarrollada dentro de la colaboración Oscura que utiliza el framework de simulación Geant4. Esta aplicación está diseñada específicamente para simular el detector de Oscura y el paso de las partículas a través de él para obtener la energía depositada en el sensor. En este trabajo, hemos utilizado la aplicación para simular un mismo fondo, la desintegración del ^{210}Pb , pero simulando la física del problema con distintos modelos, lo que se conoce como *physics lists*, proporcionados por el framework de Geant4.

2.1 Simulaciones Monte Carlo con Geant4

En la física de altas energías, las simulaciones son muy comunes, ya que además de ser indispensables en la optimización de los detectores de partículas, ayudan a interpretar el gran volumen de datos generados y permiten modelar y analizar las interacciones de partículas subatómicas. Las simulaciones se definen como un método para imitar el comportamiento de un sistema a través de un modelo computacional, ya sea basado en datos empíricos de sistemas reales o en teorías matemáticas y físicas. Geant4 se utiliza fundamentalmente para la simulación del paso de partículas o radiación a través de la materia [26]. Originalmente se desarrolló para la física de altas energías, pero ha ido evolucionando hasta trabajar también en el dominio de baja energía (hasta la escala de eV). Actualmente se utiliza en física de altas energías y nuclear, en física médica, en la evaluación de efectos materiales en el diseño de líneas de haces de aceleradores y en la evaluación de los efectos de radiación espacial en satélites y cuerpos planetarios, entre otros [28].

Geant4 puede recrear cualquier entorno o volumen, incluyendo sus fuentes de radiación. Además, se pueden definir también las partículas con las que desean trabajar, y por ende, los procesos físicos a los que se someten estas partículas. Geant4 incluye procesos físicos relacionados con las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles de partículas en la materia, en un rango de energía desde meV hasta TeV. Estos procesos se implementan mediante modelos físicos que detallan cada interacción. Cada tipo de interacción puede modelarse con distintos algoritmos, dependiendo del rango de energía y/o el nivel de detalle necesario para la simulación. Un modelo puede ser más adecuado para un rango de energías y/o para un tipo específico de partículas. Geant4 proporciona una biblioteca de modelos físicos adecuados para distintas partículas y propósitos[28].

En una ejecución de Geant4, la geometría del detector y los procesos físicos permanecen constantes, mientras que las condiciones iniciales como la partícula primaria junto con su energía, posición y momento, van variando en cada ejecución. Estas partículas son rastreadas a lo largo del material que atraviesan hasta que se paran o desaparecen. La trayectoria de cada partícula se denomina *track* y se divide en *steps*. En cada paso, se evalúa la probabilidad de interacción y se determina el estado final más probable, así como la posible creación de partículas secundarias como resultado de dicha interacción. Las partículas primarias se rastrean hasta que se consideran sin energía, una condición que puede ser modificada por el usuario en la *physics lists*. Las partículas secundarias generadas también son *tracks* y por tanto son rastreadas de la misma manera. La imagen 2.1 muestra un esquema de la estructura de ejecución de Geant4.

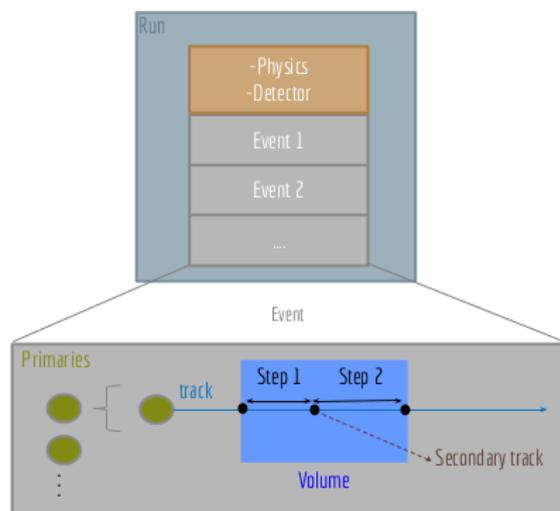


Figura 2.1: Representación de la estructura de una simulación en Geant4. Los puntos verdes son las partículas primarias, mientras que los puntos negros indican dónde ocurren los procesos físicos. Se muestra un evento con sus respectivas componentes: el track, y dentro de este, los steps.

2.2 Metodología para las simulaciones

Mediante la aplicación *g4oscura* se simula el entorno Oscura mostrado en la Figura 2.2. A la izquierda se muestra el detector, la caja de vacío, además del plomo interno que actúa como blindaje para reducir la radiación externa. La imagen de la derecha muestra

una sección transversal de los CCDs y su disposición dentro de cada torre.

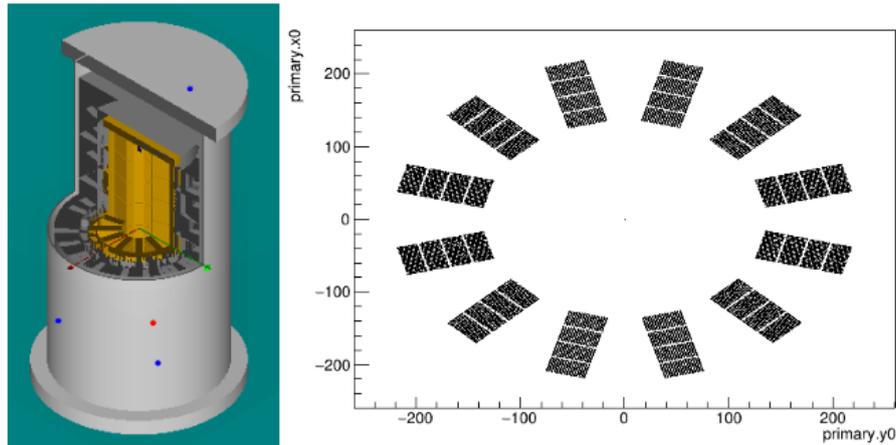


Figura 2.2: Geometría y diseño del detector realizado en `g4oscura`. Disposición de los CCDs en el detector (derecha) y detector completo (izquierda).

Sin modificar el entorno, la simulación de la desintegración del plomo en condiciones físicas distintas se ha realizado siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. Se distribuyen N_{Pb} radioisótopos de ^{210}Pb homogéneamente en el volumen de los CCDs, sin energía cinética. Las partículas primarias se colocan en los CCDs para evitar el apantallamiento de la radiación por otros materiales. La aplicación `g4oscura` sólo guarda información acerca de la simulación si las partículas pasan por el detector, i.e. por los CCDs, razón por la cual se ha escogido dicho volumen. Recordemos que estamos interesados en evaluar tanto la radiación primaria como la secundaria, y parte de ésta podría perderse si la población de isótopos se simula en otro volumen más alejado.
2. Se simula tanto la desintegración como la desexcitación nuclear, para diversos entornos físicos. Por entorno físico nos referimos al conjunto de partículas que intervienen en una simulación y al conjunto de modelos físicos necesarios para simular cualquier proceso físico involucrado. En el contexto de Geant4 a esto se le conoce como *physics lists*.

Mediante un fichero de configuración, conocido como macro, se define qué *physics lists* se va a utilizar, además de otros parámetros como el número de eventos a simular, las partículas primarias y sus propiedades, o la geometría de la simulación, entre otros. Escogida una *physics lists* es posible también configurar mediante este macro qué procesos deben ser considerados.

Como configuración inicial se escogió una macro proporcionada por la aplicación `g4oscura`: `leadbrem.mac`. Esta macro permite simular la desintegración del ^{210}Pb al ^{210}Bi en la zona activa de los CCDs. En ella se establece el tipo de partícula primaria (^{210}Pb) y su energía inicial (0 MeV), junto con el volumen en el que se van a distribuir homogéneamente todas las partículas primarias (i.e. la zona activa de los CCDs) y la geometría del experimento Oscura.

No todos los procesos físicos incluidos en una *physics lists* están activos por defecto, lo que significa que no todos son considerados automáticamente en la simulación. Es crucial asegurarnos de que los procesos mencionados en el Capítulo 1.4.1, relevantes para la física de este trabajo, estén activos. La macro seleccionada, sin embargo, no incluía la **activación** de los **procesos** físicos esenciales en la desintegración de un isótopo, por lo que, fue necesario realizar ajustes en la macro para garantizar la precisión de la simulación.

Para asegurar la correcta simulación del ^{210}Pb , se realizaron los siguientes ajustes en la macro:

1. **Desintegración limitada:** Se configuró para permitir únicamente la desintegración del isótopo ^{210}Pb , deteniendo la cadena de desintegración en el isótopo ^{210}Bi .
2. **Efecto Auger:** Se activó el proceso de emisión de electrones Auger.
3. **Cascada Auger:** Se permitió la producción de electrones y fotones provenientes del efecto Auger.
4. **Emisión de rayos X:** Se habilitó la producción de rayos X durante el paso de partículas a través de la materia o por procesos de desintegración.
5. **Desactivación corte de desexcitación:** Se desactivó el corte para la desexcitación electromagnética, permitiendo una simulación sin restricciones basadas en este parámetro.
6. **Paquete de desexcitación EM:** Se utilizó un paquete específico de Geant4 para definir el proceso de desexcitación electromagnética.
7. **Entorno de la física, physics lists:** Se seleccionó la *physics list* deseada

En cada ejecución se han simulado 100000 eventos, i.e. se han simulado 100000 ^{210}Pb , (N_{Pb}). Cada ejecución de `g4oscura` genera dos archivos: un archivo ROOT que contiene los datos creados por la simulación, y un archivo Json con metadatos sobre la ejecución. Este archivo ROOT proporciona toda la información necesaria de la simulación, entre todos los parámetros, los relevantes para este trabajo son: la energía depositada por las partículas en su interacción con los CCDs, el código o número asociado a cada tipo de partícula, el ID del evento y el ID de la partícula padre de la desintegración. A partir de la combinación de estas variables se obtendrán los parámetros investigados en este TFG.

2.3 Configuración de la física via las *physics lists*

Una *physics list* es una clase en la que se definen las partículas a simular y el modelo físico a usar para modelar cada uno de los procesos físicos involucrados. Todos los modelos de física (*physics lists*) se construyen definiendo dos métodos principales: `'ConstructParticle()'` y `'ConstructProcess()'`, las cuales el usuario debe implementar. Además, existe la opción de implementar un método adicional, `'SetCuts()'`, que configura los cortes necesarios para la simulación. En el primer método, `'ConstructParticle()'`, se definen las partículas que "existen", y por tanto que pueden ser creadas y rastreadas durante la simulación. Después, en `'ConstructProcess()'`, se definen los procesos físicos que cada una de las partículas existentes puede sufrir durante su interacción con la materia. Cada proceso

determina cómo interactúa cada partícula con la materia a través de un tipo específico de interacción. Un ejemplo de estos procesos (o clases) es 'G4RadioactiveDecayPhysics', donde se describe la desintegración radiactiva de un isótopo. Al estudiar el desintegración radiactivo del ^{210}Pb en este trabajo, esta clase tendrá una clara importancia a la hora de diferenciar las *physics lists* relevantes para este experimento. Finalmente, en el método 'SetCuts()' se definen los cortes de producción para partículas como γ s, e^- , e^+ y protones. Estos cortes se utilizan generalmente para limitar el umbral de generación de partículas secundarias producidas durante la simulación [29].

Para este trabajo, en lugar de configurar nuestra propia *physics lists*, hemos optado por utilizar varias de las más de 20 listas predefinidas que ofrece Geant4. Para la correcta selección, se ha tenido en cuenta los procesos físicos relevantes para la correcta simulación del problema. Se han considerado cruciales los procesos electromagnéticos, como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, el efecto Auger, y la producción de pares. Estos procesos determinan cómo se transfiere y deposita la energía en la región activa de los CCDs. Además, de la desintegración y la desexcitación nuclear. A continuación detallamos la elección de las *physics lists* utilizadas.

Una *physics lists* es un conjunto de extensiones, donde cada extensión se centra en un conjunto de partículas, sus procesos y su rango de energía. Los nombres de estas listas siguen el siguiente patrón: EXT1_EXT2_EXT2, según el número de extensiones involucradas. Las listas 'base' principales son: Shielding, QGSP y FTFP. Las listas que contienen QGSP incluyen el modelo de Cuerda Quark-Gluón para las interacciones de protones, neutrones, piones y kaones, de ahí las siglas (QGS) (queda fuera del 'conocimiento' del trabajo). Estas también incluyen la física electromagnética estándar y las interacciones gamma-nuclear y electrón-nuclear, que son los procesos de principal interés en este trabajo. Las listas que contienen FTFP, incluyen el modelo Fritiof para protones, neutrones, kaones y piones (también queda fuera del 'conocimiento' del trabajo). Por otro lado, la lista Shielding se utiliza generalmente para analizar el transporte de los neutrones. No obstante, cabe destacar la relevancia de esta lista en experimentos de detección de materia oscura debido a la importancia del fondo procedente de los neutrones producidos por la interacción de muones con el entorno del experimento (véase la sección 1.3).

Existen variaciones de estas dos listas principales que incluyen modelos de cascada (Bertini o Binario). Ejemplos de estas variaciones son: FTFP_BERT o QGSP_BIC_HP. Unas de las listas más utilizadas por los usuarios son: FTFP_BERT, QGSP_BERT y QGSP_BIC. Estas se utilizan normalmente para la física de colisionadores, para experimentos como ATLAS y CMS, y para el análisis de rayos cósmicos de altas energías, sin superar los 10 TeV [31]. En la tabla 2.1 se muestra las principales propiedades de estas extensiones: partículas incluidas, procesos físicos considerados, y energía máxima.

Physics List	Proceso Físico / Clase	Partículas Afectadas
Shielding (<20MeV) (no trata los fotones ópticos)	G4EmStandardPhysics G4EmExtraPhysics G4DecayPhysics G4RadioactiveDecayPhysics	e^- , e^+ , γ e^- , e^+ , γ isótopos Núcleos radiactivos
QGSP_BERT (no trata los fotones ópticos)	G4EmStandardPhysics G4EmExtraPhysics G4DecayPhysics	e^- , e^+ , γ e^- , e^+ , γ isótopos
QGSP_BIC (<200MeV) (no trata los fotones ópticos)	G4EmStandardPhysics G4EmExtraPhysics G4DecayPhysics	e^- , e^+ , γ e^- , e^+ , γ isótopos
FTFP_BERT (no trata los fotones ópticos)	G4EmStandardPhysics G4EmExtraPhysics G4DecayPhysics	e^- , e^+ , γ e^- , e^+ , γ isótopos

Tabla 2.1: Descripción de las *physics lists* proporcionadas por Geant4, determinando qué clases electromagnéticas y de procesos de desintegración tiene incluida cada una de ellas, así como las partículas afectas por los procesos físicos definidos en estas clases.

La principal diferencia entre estas cuatro listas es que la lista Shielding incluye una clase adicional ('G4RadioactiveDecayPhysics'), es decir, define la desintegración radiactiva de las partículas, proceso muy importante en nuestra simulación.

Para la simulación de los procesos electromagnéticos será necesario añadir extensiones electromagnéticas que consideren estos procesos físicos. Aunque Geant4 dispone de diez extensiones predefinidas, debido al rango de energía de interés (<100 keV), solo tres son adecuadas: EMZ, PEN y LIV. Las tres extensiones son muy similares en términos de los procesos físicos que se definen en ella. Todas incluyen el efecto Rayleigh, el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, la conversión gamma, la dispersión de Coulomb, el Bremsstrahlung y la ionización, para baja energía. Su diferencia radica en los rangos específicos para ciertos procesos. Por ejemplo, mientras que la extensión EMZ incluye un rango de energía en la ionización de hasta 100 keV, la extensión PEN tiene un rango de hasta 1 GeV. Por otra parte, la extensión LIV, en procesos como el efecto Compton o la conversión gamma, el rango de energía que ofrece es de hasta 1 GeV, ligeramente diferente al de EMZ. Como el rango de energía que se estudia en este trabajo se encuentra por debajo de los 50 keV, no deberíamos esperar diferencia alguna.

Aunque no es relevante para este trabajo, existe otra extensión denominada HP, que mejora la precisión en el transporte de neutrones a bajas energías, y añade cortes específicos para los protones. Aunque ninguno de los modelos involucra electrones o partículas gamma, se ha considerado también para este trabajo, pues sería la lista mas apropiada para simular el fondo de neutrones de experimentos como Oscura. El objetivo principal es evaluar si con una *physics list* óptima para neutrones es posible simular también electrones y fotones sin introducir errores sistemáticos.

Para información más detallada sobre las diferencias entre las distintas extensiones consulte [32].

Capítulo 3

Análisis y Resultados

El objetivo principal de este trabajo es la comparación de las *physics lists* en el ámbito de la desintegración del ^{210}Pb en el entorno del experimento Oscura. Para cada lista, se va a comparar el espectro de energía de la partícula beta, los porcentajes de desintegración, y el coeficiente de conversión α_T . Asimismo, se va a estudiar el número medio de electrones y gammas emitidos durante la transición al estado fundamental del bismuto por efecto Auger.

Además, se va a analizar el espectro de energía depositada en los CCDs por los electrones y los rayos X emitidos por el bismuto en su transición al estado fundamental. A partir de estos espectros se ha podido comparar las simulaciones realizadas con diferentes modelos para los procesos electromagnéticos. Se ha integrado la energía depositada en tres rangos de energía distintos, donde se espera un conjunto de líneas de emisión, para el caso del espectro de los rayos gammas, y un rango de energías para el caso de los electrones. Finalmente se han recopilado los resultados obtenidos y se han ordenado en una tabla, comparándolos con los valores esperados.

3.1 Obtención de los parámetros relacionados con la desintegración nuclear

En la primera parte de las simulaciones, se analizaron los parámetros de la desintegración radiactiva del ^{210}Pb en el entorno de Oscura. Inicialmente, se estudió el espectro beta. Para ello, se desarrolló un código en Python que calculaba y dibujaba la energía depositada por los electrones emitidos en la desintegración del ^{210}Pb , obteniendo así el espectro correspondiente. Asimismo, se verificó la energía total liberada en la desintegración (Q_+) del ^{210}Pb . Se comprobó si la energía de corte, $Q_+ = 63.48 \text{ keV}$, del espectro coincidía con el valor registrado en la base de datos utilizada por Geant4.

Se compararon en un mismo histograma el espectro obtenido de la página web *Live-chart* (véase [30]), con los resultados de las simulaciones realizadas utilizando el código `g4oscuro`. Como los valores teóricos estaban expresados en unidades de densidad espectral (número de desintegraciones (N) por unidad de energía (E)), se tuvieron que normalizar los datos simulados para así poder comparar los dos espectros. Para estas simulaciones, se empleó la *physics list* `Shielding.LIV`, ya que esta definía correctamente los procesos electromagnéticos. La Figura 3.1) muestra en rojo se muestra el espectro obtenido en este trabajo, y en azul el de referencia.

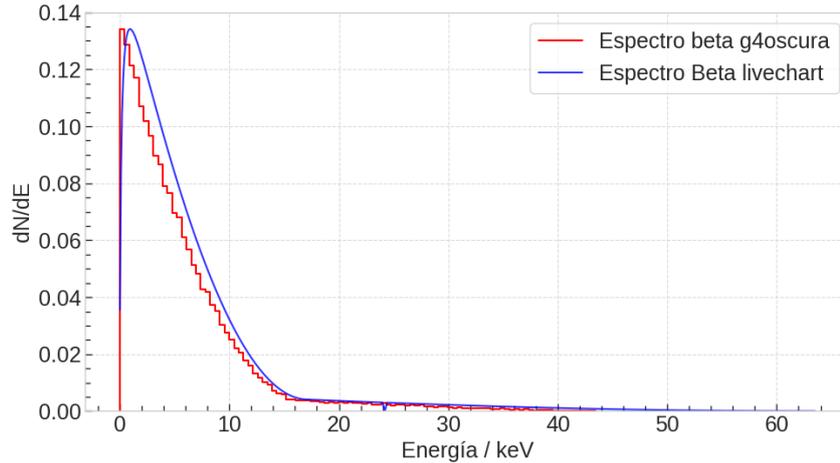


Figura 3.1: Comparación del espectro beta teórico de la página web *Livechart* y el obtenido con el código de *g4oscura*, con la *physics list* *Shielding_LIV*.

Los dos espectros observados en la Figura 3.1 muestran un comportamiento similar, con una ligera diferencias en la anchura del pico. Ambas curvas presentan un espectro continuo. No obstante, se esperaba que la curva roja presentara un corte en una energía de 63.48 keV, tal como se indica en el archivo *RadioactiveDecay5.6*. Sin embargo, la curva muestra un corte a una energía significativamente menor, aproximadamente 40 keV. Este desajuste puede ser causado por la estadística de la simulación; los eventos con energías superiores a 40 keV son muy poco probables, lo que habría requerido la generación de un número mucho mayor de eventos para analizar con mayor precisión el espectro beta.

A continuación, se estudió la desintegración nuclear del ^{210}Pb , en concreto, la probabilidad de que el isótopo decayese directamente al estado fundamental del ^{210}Bi . Según los datos teóricos definidos en *Geant4*, este valor es 16 %, respectivamente. Para analizar este porcentaje, se desarrolló un código en Python que permitió diferenciar los dos casos de desintegración del ^{210}Pb detallados en la sección 1.4. Se seleccionaron los eventos en los que no se emitían ni un electrón ni un fotón, identificándolos como los casos en los que el ^{210}Pb decaía directamente al estado fundamental del ^{210}Bi , y los demás casos se archivaron como los casos en los que el ^{210}Pb decaía al ^{210}Bi excitado. Se realizaron simulaciones variando la *physics list* utilizada en cada una de ellas para comparar si estas afectan en los parámetros de la desintegración radiactiva del ^{210}Pb . En principio, se esperaba que los resultados no variaran significativamente con el uso de las *physics lists*, puesto que el código *g4oscura* toma como referencia los valores de un fichero, sin considerar la *physics list* utilizada en la simulación.

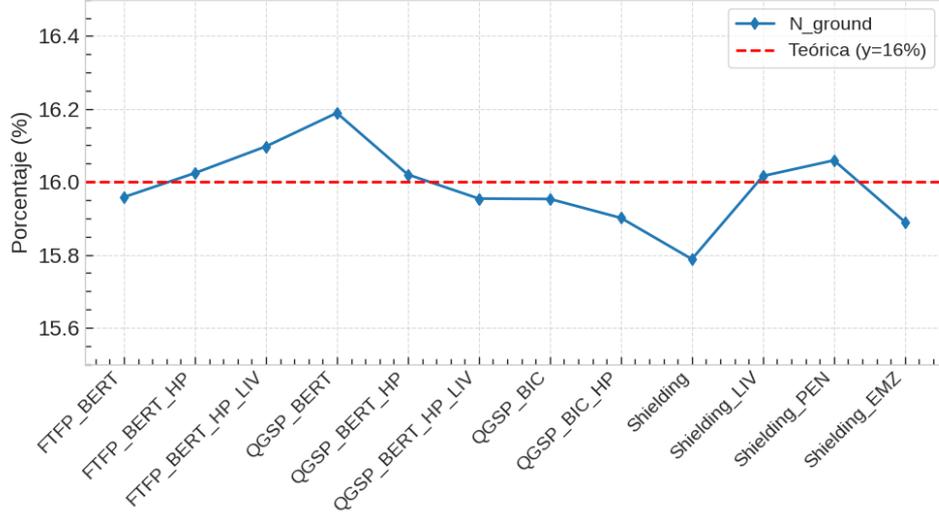


Figura 3.2: Probabilidad de que el isótopo ^{210}Pb decaiga al estado fundamental del ^{210}Bi , para diferentes *physics lists*.

La Figura 3.2 ilustra cómo la probabilidad de desintegración al estado no excitado de ^{210}Bi no varía significativamente con las *physics lists* evaluadas. La mayor discrepancia observada, del 0.4 %, se da entre las *physics lists* QGSP_BERT y la Shielding. Esta variación es insignificante, lo que permite concluir que el uso de diferentes *physics lists* en las simulaciones realizadas con el código `g4oscura`, no afecta de manera apreciable los parámetros que definen el desintegración del ^{210}Pb .

Una vez analizada la probabilidad de que el ^{210}Pb decayese al estado fundamental del ^{210}Bi se analizó el caso donde el ^{210}Pb decayese al ^{210}Bi excitado. En este caso, se introduce otro parámetro característico de la desintegración radiactiva, el coeficiente de conversión total de electrones (α_T). Para determinar este coeficiente mediante simulaciones realizadas con el código `g4oscura`, se desarrolló un código en Python que permitía distinguir entre los dos modos de desexcitación del ^{210}Bi (conversión interna y emisión gamma). El código clasifica los eventos en tres casos principales: aquellos donde se emite únicamente un fotón (emisión gamma), los eventos donde no se emite ni un electrón ni un fotón (desintegración directa al estado fundamental del ^{210}Bi , caso estudiado en el apartado anterior), y los demás eventos que incluye la conversión interna (IC). Para obtener directamente el valor de α_T se tuvo que normalizar el número de eventos (recordemos que simulábamos 100000 eventos).

Este coeficiente se ha obtenido para cada una de las *physics list* que se querían estudiar, con el fin de analizar si estas afectan al resultado de este parámetro o no. Dado que en Geant4 se establece que este coeficiente tiene un valor igual a 18.7, se espera que el valor encontrado para cada una de las simulaciones sea similar a este.

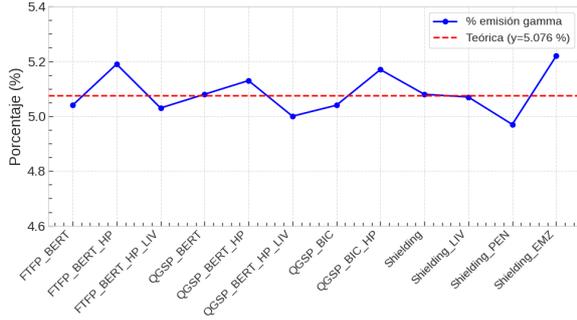


Figura 3.3: Probabilidad de que el ^{210}Pb se desexcite mediante emisión gamma para diferentes *physics lists*, comparándolo con el valor teórico y = 5.076 %.

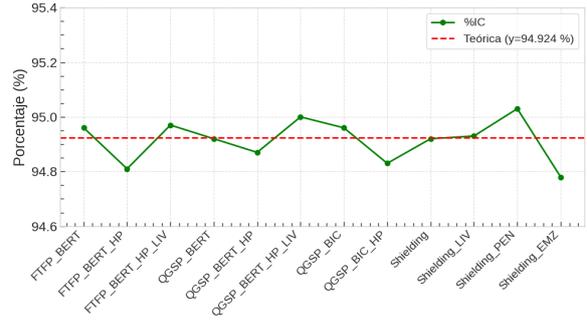


Figura 3.4: Probabilidad de que el ^{210}Pb se desexcite mediante conversión interna o efecto Auger, para diferentes *physics lists*, comparándolo con el valor teórico y = 94.924 %.

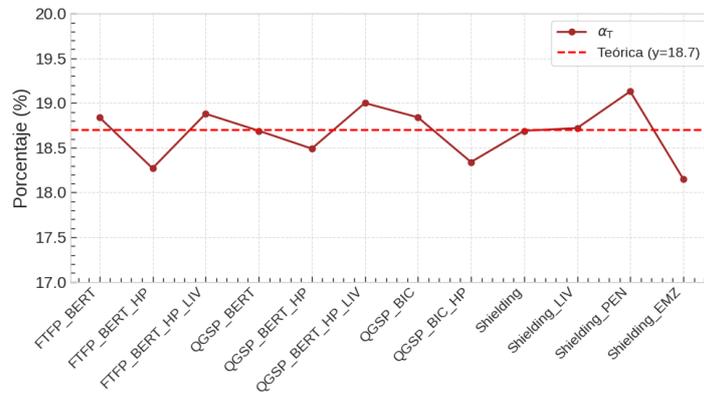


Figura 3.5: Coeficiente de conversión total de electrones (α_T) del ^{210}Pb , para diferentes *physics lists*, comparándolo con el valor teórico y = 18.7.

En las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5, no se observan variaciones significativas entre el uso de diferentes *physics lists*. Los valores más dispares en el coeficiente α_T son los correspondientes a las listas Shielding_EMZ (18.15) y Shielding_PEN (19.13). La primera lista es la que más se aleja del valor teórico encontrado en el fichero de Geant4, con un error relativo del 3%. Esto sugiere, una vez más, que la elección de diferentes *physics lists* para el análisis de los parámetros de la desintegración del isótopo ^{210}Pb no afecta de manera significativa.

Tras el análisis del coeficiente de conversión total de electrones (α_T) se procedió al estudio de las distribuciones de electrones y partículas gamma emitidas durante la desexcitación del ^{210}Bi mediante conversión interna. Para ello, se crearon dos listas en el código de Python para registrar el número de electrones y partículas gamma emitidas en cada evento de desexcitación del ^{210}Bi mediante conversión interna. Como se ha discutido en las secciones previas, las simulaciones realizadas con **g4oscura** para determinar los parámetros de desintegración del ^{210}Pb , no muestran variaciones significativas al cambiar la *physics list* utilizada. Por lo tanto, se espera que estas distribuciones no varíen considerablemente al emplear diferentes *physics lists* en las simulaciones, dado que el código utiliza los parámetros del fichero correspondiente para realizar estas distribuciones.

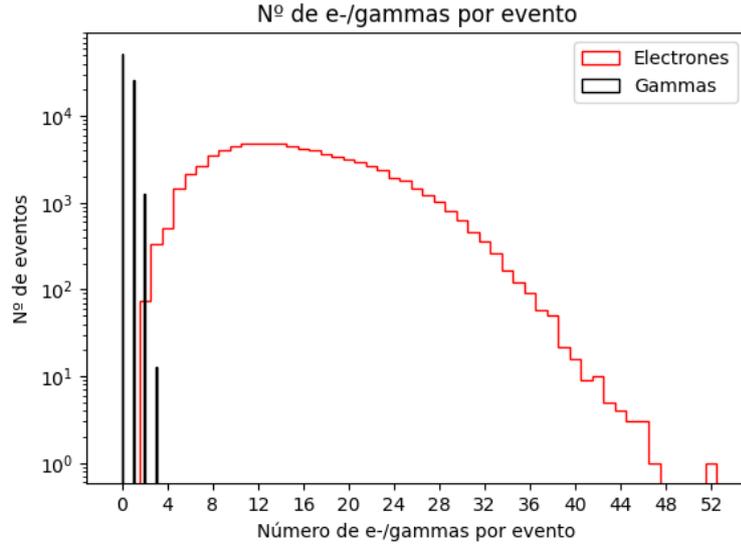


Figura 3.6: Distribución del número de electrones y de partículas gamma emitidas en la desexcitación del ^{210}Bi por conversión interna o efecto Auger, utilizando la *physics list* FTFP_BERT.

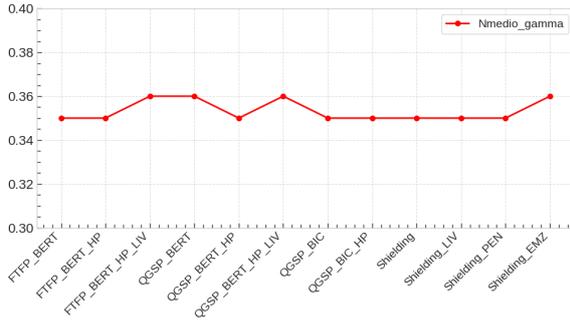


Figura 3.7: Número medio de partículas gamma emitidas en la desexcitación del ^{210}Bi mediante conversión interna o efecto Auger, para cada una de las *physics lists* estudiadas.

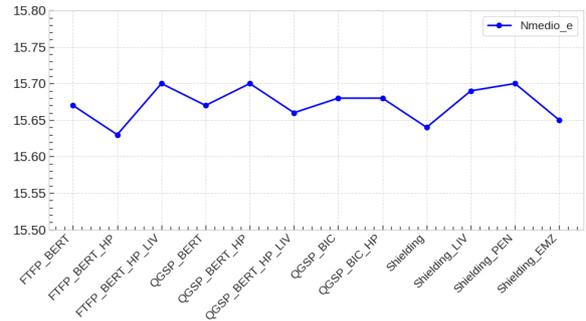


Figura 3.8: Número medio de electrones emitidos en la desexcitación del ^{210}Bi mediante conversión interna o efecto Auger, para cada una de las *physics lists* estudiadas.

En la Figura 3.6 se observa que la mayoría de los eventos en los que el ^{210}Bi se desexcita mediante conversión interna, se emiten entre 0 y 4 partículas gamma, así como entre 10 y 24 electrones. El número de electrones emitidos por evento es mayor que el de las partículas gamma, ya que, como se detalla en la sección 1.4.1, la conversión interna y el efecto Auger se fundamentan en la emisión de electrones.

En las Figuras 3.7 y 3.8, se demuestra que los resultados obtenidos con cualquier *physics list* son consistentes entre sí. En conclusión, el cambio de las *physics lists* en la simulación no afectan al proceso de desintegración del ^{210}Pb .

En la tabla 3.1 se presenta un resumen de los resultados asociados con los parámetros de la desintegración radiactiva del ^{210}Pb . La tabla incluye las *physics lists* analizadas, las clases de desintegración que contiene cada una, la llegada o no de partículas γ a la región

activa de los CCDs, el porcentaje de emisión gamma durante la desexcitación del ^{210}Bi , el porcentaje de desexcitación mediante conversión interna o efecto Auger, el coeficiente de conversión total de electrones (α_T) y el porcentaje de desintegración directa del ^{210}Pb al ^{210}Bi no excitado. Además, se ha añadido una línea con los valores teóricos proporcionados por Geant4 para compararlos con los resultados de las simulaciones.

Physics list	G4Decay-Physics	G4Radioactive-DecayPhysics	γ s en ccd_byiso	% emisión γ	% IC	α_T	N_{ground}
FTFP_BERT	✓	✗	✓	5.04	94.96	18.84	15.958
FTFP_BERT_HP	✓	✓	✓	5.19	94.81	18.27	16.024
FTFP_BERT_HP_LIV	✓	✓	✓	5.03	94.97	18.88	16.097
QGSP_BERT	✓	✗	✓	5.08	94.92	18.69	16.189
QGSP_BERT_HP	✓	✓	✓	5.13	94.87	18.49	16.020
QGSP_BERT_HP_LIV	✓	✓	✓	5	95	19	15.954
QGSP_BIC	✓	✗	✓	5.04	94.96	18.84	15.953
QGSP_BIC_HP	✓	✓	✓	5.17	94.83	18.34	15.901
Shielding	✓	✓	✓	5.08	94.92	18.69	15.788
Shielding_LIV	✓	✓	✓	5.07	94.93	18.72	16016
Shielding_PEN	✓	✓	✓	4.97	95.03	19.13	16.059
Shielding_EMZ	✓	✓	✓	5.22	94.78	18.15	15.89
Valores teóricos				5.076	94.924	18.70	16.00

Tabla 3.1: Resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones utilizando diferentes *physics lists*. Incluye la presencia de procesos físicos de desintegración (G4DecayPhysics y G4RadioactiveDecayPhysics), la detección de partículas γ en la región activa de los CCDs, el porcentaje de emisión gamma y de conversión interna (IC) durante la desexcitación del ^{210}Bi , el coeficiente de conversión total de electrones (α_T), y el porcentaje de desintegración directa del ^{210}Pb al estado fundamental del ^{210}Bi (N_{ground}).

3.2 Obtención de los espectros, para fotones y electrones

Tras analizar los parámetros correspondientes a la desintegración radiactiva del ^{210}Pb , se estudió la energía depositada en la región activa de los CCDs de silicio por las partículas emitidas en dicha desintegración. En particular, se analizó el espectro de energía depositada por electrones y partículas gamma en la región activa de los dispositivos de carga acoplada.

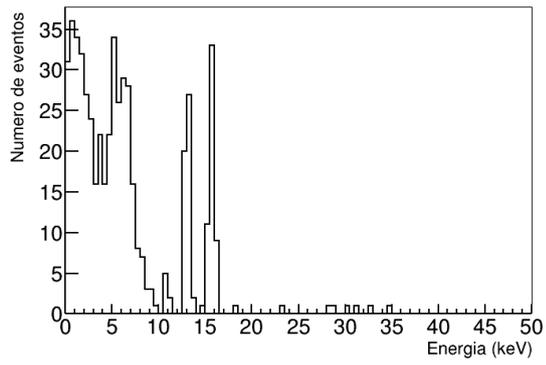
Para ello, se desarrolló un código sencillo en Python que analiza de manera independiente la energía depositada por los electrones y las partículas gammas generadas a partir de la desintegración del ^{210}Pb . Al igual que en los resultados anteriores, se obtuvieron espectros de energía para diferentes *physics lists* con el fin de observar su impacto en la simulación y comparar los resultados entre ellas.

Para comprender mejor las diferencias en los espectros de energía, se llevaron a cabo varios estudios comparativos entre las *physics lists*. Primero, se estudió la diferencia entre la *physics list* FTFP_BERT con FTFP_BERT_HP y FTFP_BERT_HP_LIV, para estudiar las diferencias de utilizar estas dos extensiones. También se ha comparado esta primera

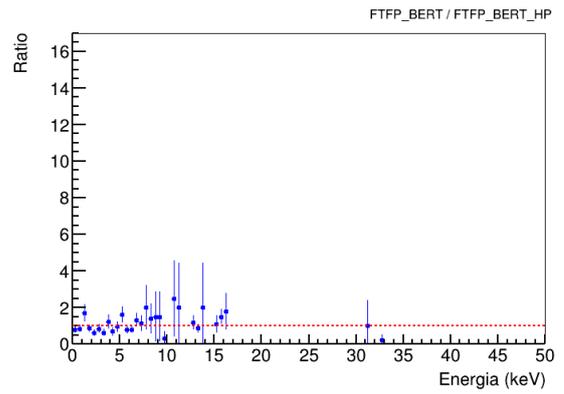
lista con las listas que aparecen en la Tabla 2.1, es decir, con QGSP_BERT, QGSP_BIC y Shielding.

Después se investigó si las diferencias entre imponer las extensiones mencionadas o no hacerlo afectaban de la misma manera en las listas QGSP_BERT, y en QGSP_BIC. Finalmente, se compararon las tres extensiones electromagnéticas comparando las simulaciones realizadas con Shielding_LIV, Shielding_PEN y con Shielding_EMZ. Todas las comparaciones se han estudiado tanto en el espectro de las gammas como en el de los electrones. Con el fin de observar las diferencias entre las *physics lists* con mayor claridad, se calculó la razón entre los espectros de energía de los electrones y las partículas gamma de cada *physics list*.

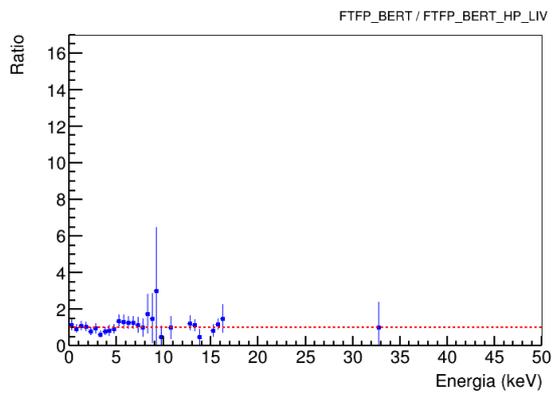
Se espera que los resultados varíen significativamente, ya que estos resultados no se basan en valores predefinidos como los resultados obtenidos en la sección anterior, sino que dependen de los procesos físicos definidos en las *physics lists*.



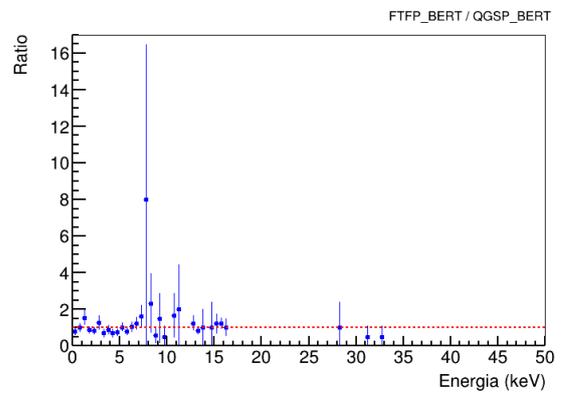
(a) Espectro de energía de las partículas gamma emitidas en la desintegración del ^{210}Pb , utilizando la *physics list* FTFP_BERT.



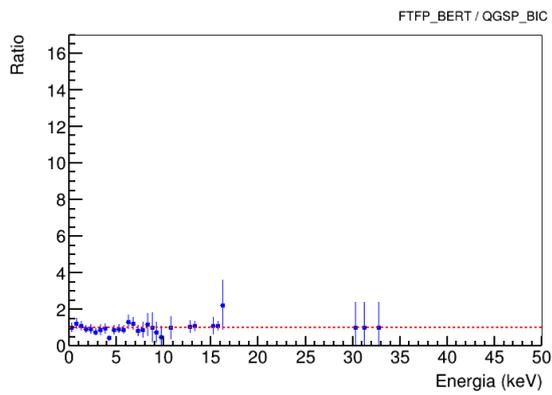
(b)



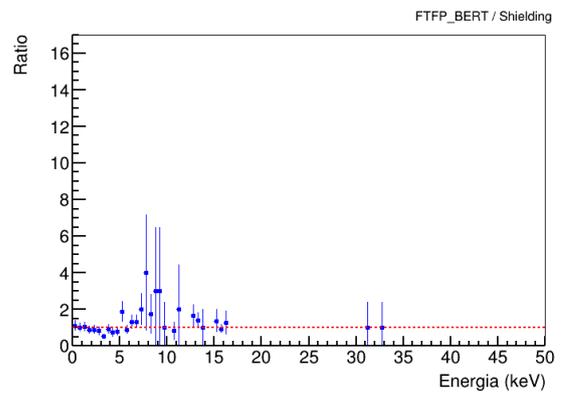
(c)



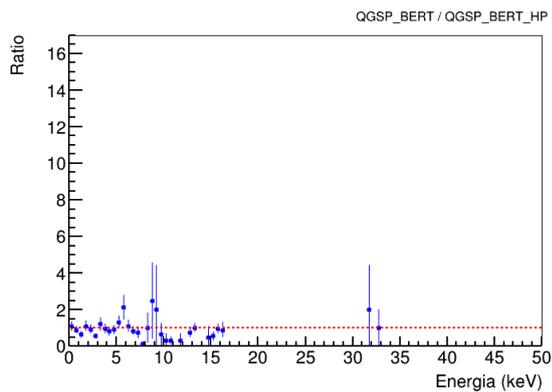
(d)



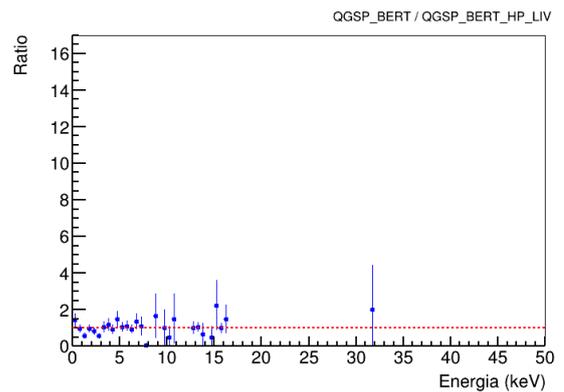
(e)



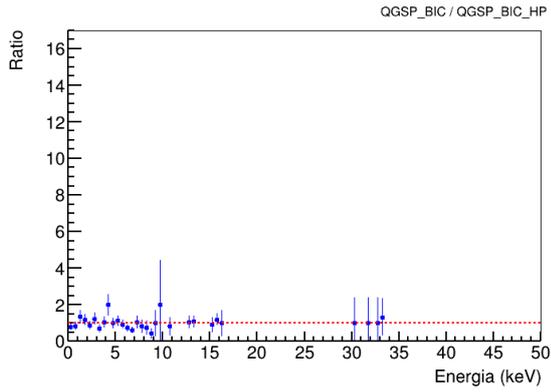
(f)



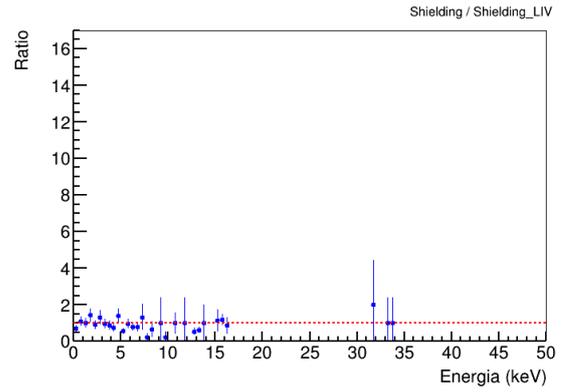
(g)



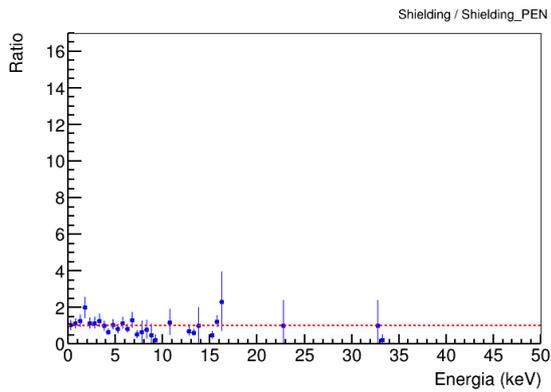
(h)



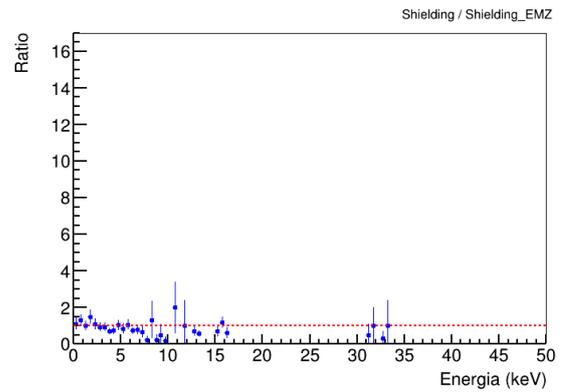
(i)



(j)



(k)



(l)

Observando globalmente las figuras donde se estudia la razón entre los espectros gamma de cada *physics list*, se destaca que en general en energías inferiores a 8 keV los espectros son prácticamente iguales, exceptuando la Figura 3.9l donde la mayoría de los puntos se encuentran por debajo de 1. Sin embargo, se observan diferencias en los rangos de energía entre 8 keV y 20 keV, ya que en este rango es donde se encuentra la emisión principal de los rayos X, y donde los procesos físicos definidos en las *physics lists* pueden tener un impacto significativo. Cabe señalar que, cuando las barras de error son más grandes, esto indica que la estadística de la simulación es menor, es decir, hay menos eventos con esa energía, y por lo tanto el error es mayor.

Analizando el espectro de las partículas gamma, Figura 3.9a, se identifican tres picos principales. Para comparar con mayor precisión los espectros de cada una de las *physics lists*, se decidió calcular la integral de cada pico en los espectros de las partículas gamma. Para ello, se integraron las áreas en tres rangos específicos: 10-12 keV, 12-14 keV, y 15-17 keV. Los errores de cada integral se calcularon utilizando errores poissonianos, tomando la raíz cuadrada del número de cuentas en cada rango. Se utilizó PYROOT y sus funciones para determinar los *bins* de cada rango y, a partir de estos, obtener el área correspondiente. Según los datos de la página web *Livechart* (véase [30]), el 22.7% de la emisión de rayos X se encuentra en una energía entre 9.419 keV - 16.389 keV, y como se observa en la Figura 3.9a, se puede corroborar esta teoría.

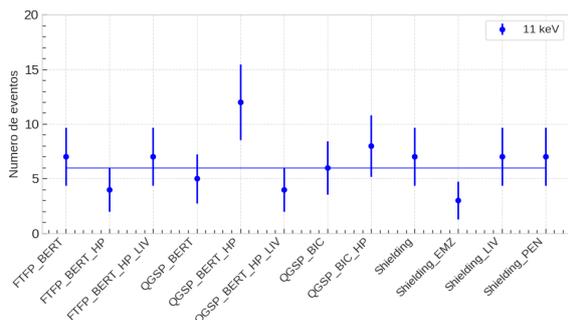


Figura 3.10: Área (número de cuentas) de-bajo del primer rango (denominado 11 keV) para cada *physics list* estudiada.

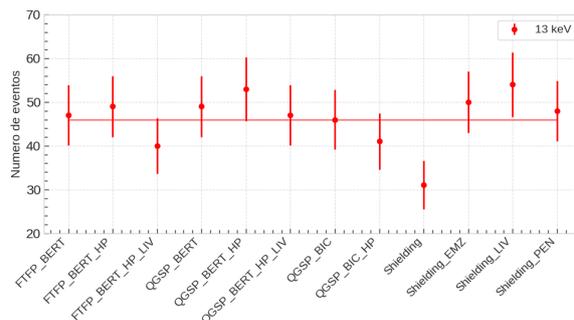


Figura 3.11: Área (número de cuentas) de-bajo del segundo rango (denominado 13 keV) para cada *physics list* estudiada.

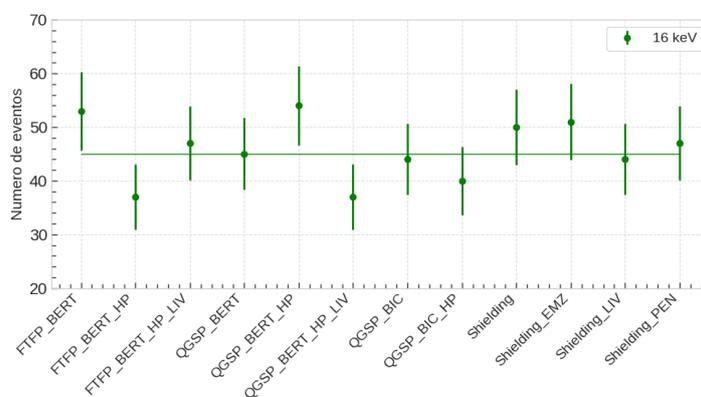
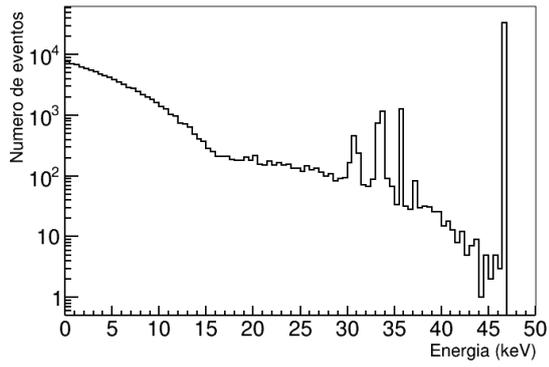


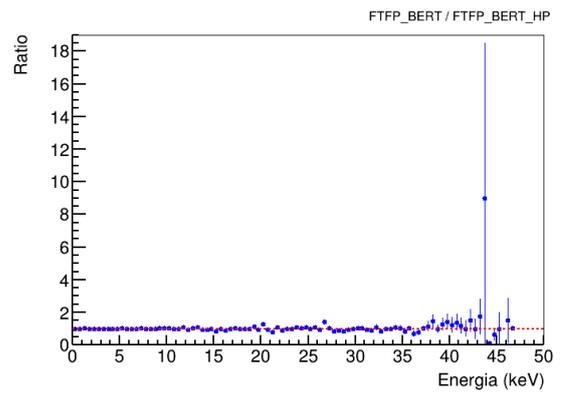
Figura 3.12: Área (número de cuentas) debajo del tercer rango (denominado 16 keV) para cada *physics list* estudiada.

Como se observa en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12, en general, todas las *physics lists* se encuentran en un intervalo similar. Sin embargo, al analizar el área de los picos observados en la *physics list* QCSP_BERT_HP, en los tres casos, esta se encuentra por encima del ajuste, sin que la barra de error esté dentro del mismo. También se puede destacar el área observado en el pico con energía aproximadamente 13 keV con la lista Shielding, puesto que esta se encuentra muy por debajo en comparación con los demás. Sin embargo, en los otros dos picos, esta misma lista está dentro del ajuste, por lo que se puede suponer que podría haber algún error en este segundo pico.

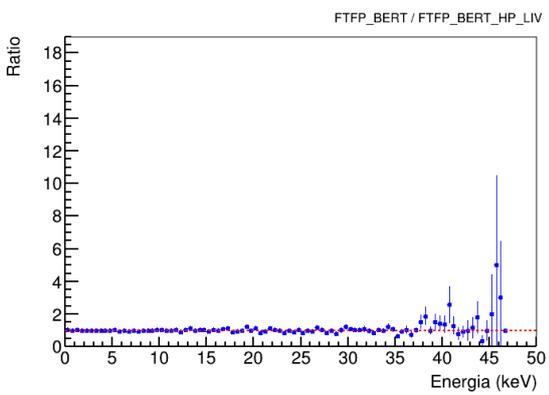
Una vez analizados los espectros de energía correspondientes a las partículas gamma se procedió a seguir el mismo procedimiento con los espectros de energía de los electrones. Como se observa en la Figura 3.13a, se destaca un pico significativo en torno a 46 keV. Este pico corresponde a los electrones emitidos en la desexcitación del ^{210}Bi , con una energía igual a 46.539 keV (como se detalla en la página web *Livechart*). En este pico también se ha calculado el área para analizar en qué se diferencian las *physics lists*.



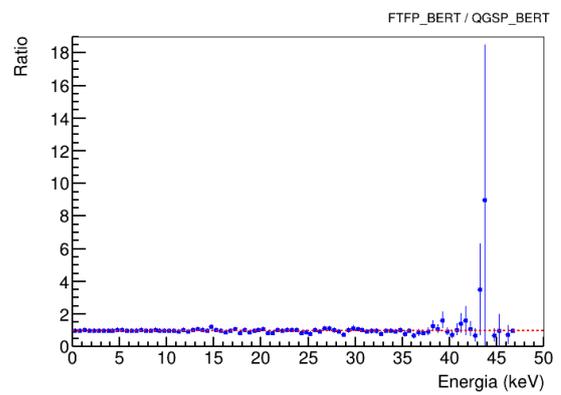
(a) Espectro de energía de los electrones emitidos en la desintegración del ^{210}Pb , utilizando la *physics list* FTFP_BERT.



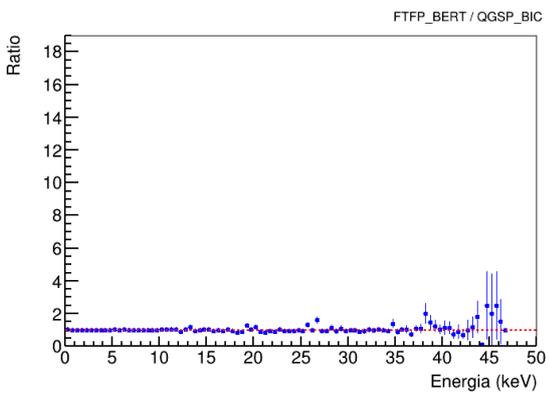
(b)



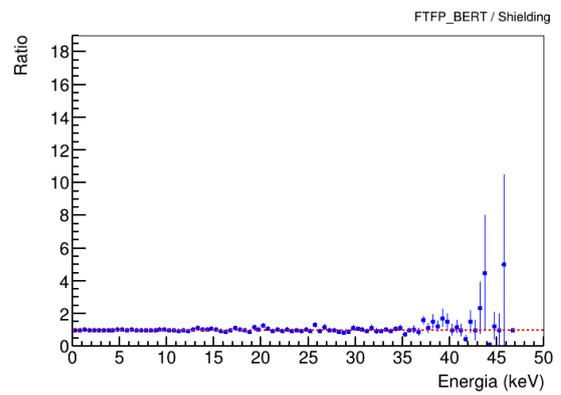
(c)



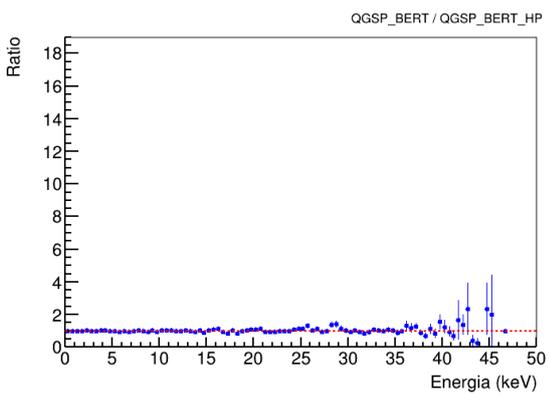
(d)



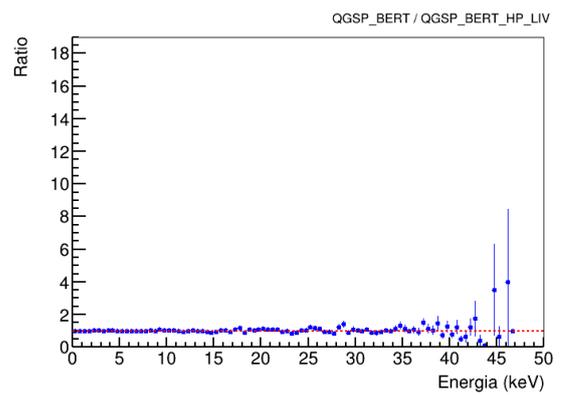
(e)



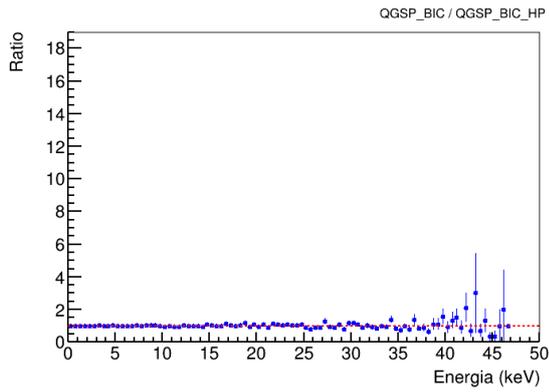
(f)



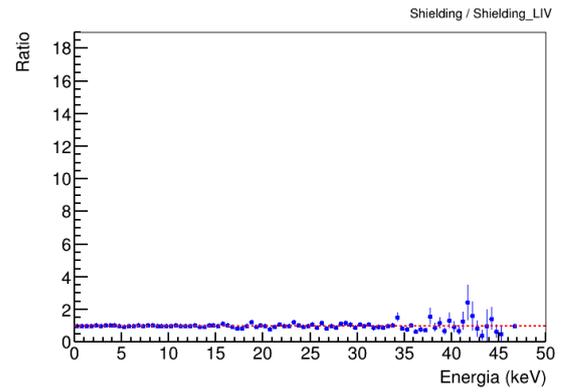
(g)



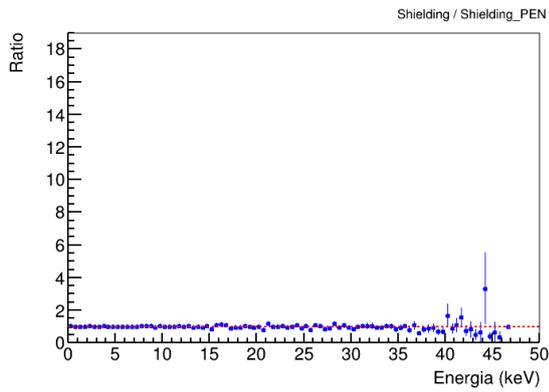
(h)



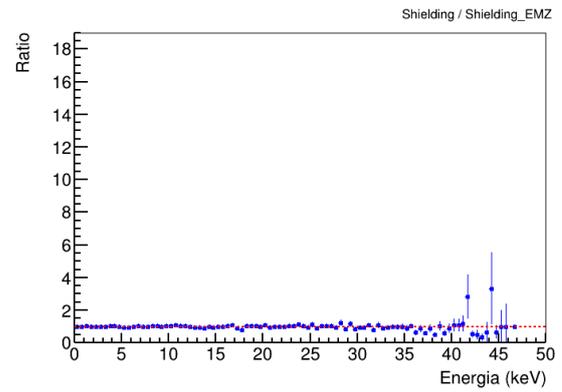
(i)



(j)



(k)



(l)

Las figuras que representan la razón entre diferentes *physics lists* demuestran que no se encuentran grandes distinciones entre ellas hasta una energía cercana a 40 keV. Hay figuras como la Figura 3.13b o como la Figura 3.13d, que se analizan puntos cercanos a 45 keV que se alejan considerablemente de la línea donde $y = 1$. Sin embargo, al tener barras de error tan grandes, estos valores no indican grandes cambios entre las *physics lists*.

En este caso también se ha obtenido el área del pico principal. Se ha procedido de la misma manera que con las líneas de emisión de las partículas gamma.

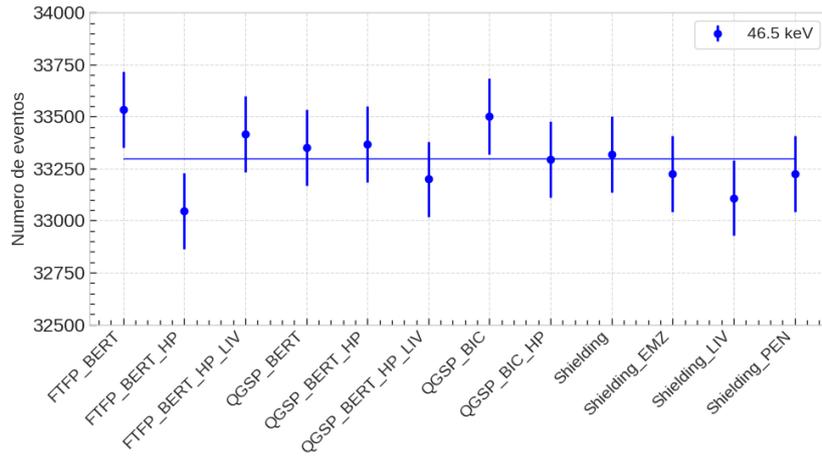


Figura 3.14: Área (número de cuentas) en el rango denominado 46.5 keV del espectro de los electrones, para cada *physics list* estudiada.

En la Figura 3.14 se observa que los resultados obtenidos del área bajo el pico del espectro son considerablemente similares para todas las simulaciones realizadas con diferentes *physics lists*. Sin embargo, destacan tres listas en las que la barra de error no incluye la línea de ajuste: FTFP_BERT, FTFP_BERT_HP y QGSP_BIC.

Capítulo 4

Conclusiones y futuro trabajo

En este capítulo final, se presentan y discuten los resultados obtenidos en el capítulo 3, además de proponer direcciones futuras para continuar esta investigación.

Se ha modelizado el fondo centrado en el isótopo ^{210}Pb en el entorno de Oscura con el framework Geant4 y el código `g4oscuro`. Este estudio ha evaluado las diferencias entre el uso de diversas *physics lists* para simular la desintegración del isótopo radiactivo ^{210}Pb y analizar la señal producida por las partículas resultantes de dicha desintegración.

Los hallazgos de este trabajo no solo contribuyen al conocimiento sobre los parámetros relacionados con la desintegración radiactiva del ^{210}Pb , como se detalla en la sección 3.1, sino que también ofrecen una base sólida para mejorar las simulaciones futuras en el entorno de OSCURA. Estas mejoras son cruciales para optimizar el análisis de las señales obtenidas en este contexto.

- En la primera parte de los resultados, se ha demostrado que las *physics lists* no afectan a los parámetros de desintegración, como el coeficiente de conversión total de electrones (α_T). Esta independencia se debe a que el código de `g4oscuro` utiliza los valores teóricos proporcionados por Geant4, en lugar de depender de las *physics lists*. Por esta razón, en los resultados obtenidos, como en el caso de desintegración directa del ^{210}Pb al estado fundamental del ^{210}Bi (N_{ground}), la mayor diferencia entre *physics lists* es de solo un 0.4 %. Además, se ha encontrado un error relativo del 3 % en las medidas del coeficiente α_T . Estos dos resultados sugieren que los parámetros de desintegración de un isótopo en el entorno de Oscura no dependen del uso de distintas *physics lists*.

También se ha estudiado cómo el número medio de electrones y de partículas gamma en la desexcitación del ^{210}Bi mediante conversión interna no varía significativamente entre el uso de distintas *physics lists*. Esto refuerza la conclusión de que las *physics lists* no afectan los procesos físicos en los que Geant4 utiliza parámetros ya definidos.

- En la segunda parte de los resultados, se demuestra la consistencia entre las *physics lists*, puesto que en todos los casos se observan los mismos picos, tanto en el espectro de los electrones como en el de las partículas gamma. Al analizar las figuras que comparan los áreas de los diferentes rangos en el espectro de las partículas gamma (Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12), no se detectan diferencias significativas entre el uso de distintas *physics lists*. Sin embargo, se identifican casos en los que el área

diverge de la línea de ajuste realizada, como en el caso de la lista QGSP_BERT_HP y la lista Shielding en el pico denominado 13 keV. Estas dos listas se diferencian de las demás al analizar con mayor detalle los neutrones a bajas energías. Dado que en esta investigación no se han tenido en cuenta estas partículas, no se ha llegado a comprender la diferencia entre estas dos listas y las demás. Sería necesario investigar si estas dos listas en específico tienen definidos modelos diferentes a las demás, o si al aumentar la estadística de la simulación, estas se acercan a la línea de ajuste. Finalmente, el análisis del área de la línea de emisión correspondiente al espectro de los electrones para cada una de las *physics lists* estudiadas tampoco varía significativamente. Sin embargo, se observan diferencias en tres listas específicas: FTFP_BERT, FTFP_BERT_HP y QGSP_BIC. Al igual que en el espectro de las partículas gamma, es necesario realizar una investigación más detallada para comprender por qué estas listas difieren de las demás, particularmente en lo que respecta a modelos asociados a los electrones definidos en estas listas.

Futuro trabajo

La investigación desarrollada en este trabajo se puede extender en dos direcciones principales:

- **Incremento de la estadística en las simulaciones:** Debido a la baja estadística presente en el espectro de las partículas gamma, es crucial aumentar el número de eventos simulados. Un aumento por un factor 10 o incluso 100 permitiría analizar con mayor precisión si existen variaciones significativas entre el uso de distintas *physics lists* o si, por el contrario, estas convergen a la línea de ajuste establecida.
- **Ampliación del estudio a otros isótopos:** Una vez establecida la metodología para simular la desintegración de un isótopo, en este caso el ^{210}Pb , sería interesante investigar el fondo causado por otros isótopos. Este estudio incluiría los procesos físicos asociados a la emisión de partículas distintas a los electrones y las partículas gamma, proporcionando una visión más completa del entorno radiactivo del experimento Oscura.

Capítulo A

Macro

```
## macro leadbrem.mac
## Usage: leadbrem.mac <nprimaries> [<fname>]
## Throw bremsstrahlung photons from Pb210 in lead from the inner surface

/control/verbose 1
/run/numberOfThreads 10

### define aliases for command-line arguments
/control/alias NPRIMARIES {ARG1}
/control/aliasDefault ARG4 0
/control/alias FILENAME {ARG2}
/control/alias WIDTH {ARG3}
#/control/alias SPECTRUM Pb210GammaFluxHist_2inthick.hist
#/control/testEnv COPPERTHICK 50
#/control/testEnv ANCIENTLEADTHICK 50
#/control/testEnv CONTAMLAYER ancientLead

### and set the metadata
/bgm/setMetadata primary gamma
/bgm/setMetadata spectrum spec
/bgm/setMetadata normalization (3.98+/-0.02)e-5/cm2/s/(Bq/kg)
## norm from sources/Readme

#Cambios Irati
/bgm/setMetadata volume p_ccdactive
/bgm/setMetadata primary isotope
/bgm/setMetadata isotope 82 210
/bgm/setMetadata nprimaries {NPRIMARIES}

### define the filename
/bgm/output/filename output/leadbrem_{FILENAME}
## append this run's uuid to the filename?
/bgm/output/adduuid true
```

```

### define the physics list
## good for em-only stuff
/physics_lists/factory/set Shielding_PEN

### define the geometry
/geom/buildDetector cryostat
/geom/shield/innerShield/addLayer copperShield G4_Cu 1 cm
/geom/shield/innerShield/addLayer ancientLead G4_Pb {WIDTH} cm
/geom/shield/innerShield/addLayer innerLead G4_Pb 15 cm
/geom/shield/innerShield/printConfig

### initialize geometry and physics
/run/initialize

### set up the primaries
## Here we're sampling the inner surface of the ancientLead layer
## could instead use the "innerLead" layer to estimate passage efficiency

#/bgm/generator/sampleVolume p_{CONTAMLAYER}Inside 0 surface
#/bgm/generator/sampleDirection LambertianInner
#/gps/particle gamma
#/gps/energy 0 MeV
#/bgm/generator/overrideEnergy sources/{SPECTRUM}

/bgm/generator/sampleVolume p_ccdactive
/gps/particle ion
/gps/ion 82 210
/gps/energy 0 MeV
/gps/ang/type iso
/process/had/rdm/nucleusLimits 210 210 82 82

#De Irati
#/grdm/applyARM true
#/grdm/applyICM true

### set up readout
/bgm/output/writeSteps false

## group output by sensor and decay ancestor
/bgm/output/addNtuple byiso ancestor copyno
/bgm/sensitive/ccd/deepCopyNo true
#/bgm/sensitive/ccd/localCoordinates false

## record flux passing into the innermost layer
## (turn off if starting from this layer obviously...
#/bgm/tracking/addFluxCounter copperShieldInside
## If you only want to record flux, can speed up sim by killing
## at flux boundeary (useful for quick scan of attenuation

```

```

#/bgm/sensitive/copperShieldInside_flux/killtracks true

## by default, record nothing if there are no hits in active areas
## if you want to check primary distribution, uncomment below
#/bgm/output/writeAllEvents true

## disable RDecays and primaries if not needed
#/hits/inactivate RDecays
#/hits/inactivate Primaries

## comment these if starting far from the CCDs to speed up
/physics_lists/setHiresRegion package
## some of these commands are redundant with the hires command above
/process/em/deexcitationIgnoreCut true
/process/em/fluo true
/process/em/auger true
/process/em/augerCascade true
## pixe can be really slow, watch out:
/process/em/pixe true
/process/em/deexcitation package 1 1 0
/process/em/printParameters

## progress verbosity
#/tracking/verbose 2
#/bgm/printProgress 100000
### run!
/run/beamOn {NPRIMARIES}

```

A.1 Comandos implementados en la macro

1. **Desintegración limitada:** /process/had/rdm/nucleusLimits 210 210 82 82
2. **Efecto Auger:** /process/em/auger true
3. **Cascada Auger:** /process/em/augerCascade true
4. **Emisión de rayos X:** /process/em/pixe true
5. **Desactivación corte de desexcitación:** /process/em/deexcitationIgnoreCut true
6. **Paquete de desexcitación EM:** /process/em/deexcitation package 1 1 0
7. **Entorno de la física, physics lists:** /physics_lists/factory/set Shielding.PEN

Capítulo B

Códigos

B.1 Código para N_{ground} , % emisión gamma, %IC y α_T

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl

# Physics lists
nombres = ["FTFP_BERT", "FTFP_BERT_HP", "FTFP_BERT_HP_LIV", "QGSP_BERT",
           "QGSP_BERT_HP", "QGSP_BERT_HP_LIV", "QGSP_BIC", "QGSP_BIC_HP",
           "Shielding", "Shielding_LIV", "Shielding_PEN", "Shielding_EMZ"]

# Datos %gamma_emision, %IC, alpha_T y N_ground

gamma_emision = [5.04, 5.19, 5.03, 5.08, 5.13, 5.00, 5.04, 5.17, 5.08,
                 5.07, 4.97, 5.22]

IC = [94.96, 94.81, 94.97, 94.92, 94.87, 95.00, 94.96, 94.83, 94.92, 9
      4.93, 95.03, 94.78]

alpha_T = [18.84, 18.27, 18.88, 18.69, 18.49, 19.00, 18.84, 18.34, 18.
          69, 18.72, 19.13, 18.15]

N_ground = [15.958, 16.024, 16.097, 16.189, 16.020, 15.954, 15.953, 15
           .901, 15.788, 16.016, 16.059, 15.89]

#Cálculo de errores estadísticos (poissonianos)

total_events = 100000
n_counts = [(gamma / 100) * (total_events - (N * 1000)) for gamma, N i
n zip(gamma_emision, N_ground)]
error_poissoniano = [np.sqrt(n) for n in n_counts]
barra_error = [(error / 100) for error in error_poissoniano]
```

```

# Estilo de la gráfica
plt.style.use('seaborn-v0_8-whitegrid')

# Paleta de colores personalizada
custom_palette = ['#1f77b4', '#7e36b5', '#cf683c', '#589e57', '#98579e',
'#9e3652']
# Actualizar rcParams para usar la paleta de colores personalizada
mpl.rcParams['axes.prop_cycle'] = mpl.cycler(color=custom_palette)

# Configuraciones de estilo
mpl.rcParams.update({
    'font.size': 14,          # Tamaño de la fuente
    'axes.titlesize': 18,    # Tamaño del título de los ejes
    'axes.labelsize': 18,    # Tamaño de las etiquetas de los ejes
    'legend.fontsize': 18,   # Tamaño de la fuente de la leyenda
    'xtick.labelsize': 18,   # Tamaño de la fuente de las etiquetas
    'ytick.labelsize': 18,   # Tamaño de la fuente de las etiquetas
    'figure.titlesize': 18,  # Tamaño del título de la figura
    'lines.linewidth': 2,    # Ancho de las líneas
    'lines.markersize': 6,   # Tamaño de los marcadores
    'legend.frameon': True,  # Borde en la leyenda
    'legend.loc': 'best',    # Ubicación de la leyenda
    'figure.figsize': [10, 6], # Tamaño de la figura
    'axes.grid': True,       # Mostrar la cuadrícula
    'grid.alpha': 0.7,       # Transparencia de la cuadrícula
    'grid.linestyle': '--',  # Estilo de la cuadrícula
    'axes.spines.top': True,  # Mostrar el borde superior del gráfico
    'axes.spines.right': True, # Mostrar el borde derecho del gráfico
    'xtick.direction': 'in',  # Ticks mayores en el eje X hacia dentro
    'ytick.direction': 'in',  # Ticks mayores en el eje Y hacia dentro
    'xtick.minor.visible': True, # Mostrar ticks menores en el eje X
    'ytick.minor.visible': True, # Mostrar ticks menores en el eje Y
    'xtick.minor.size': 4,    # Tamaño de los ticks menores en el eje X
    'ytick.minor.size': 4,    # Tamaño de los ticks menores en el eje Y
    'xtick.major.size': 6,    # Tamaño de los ticks mayores en el eje X
    'ytick.major.size': 6,    # Tamaño de los ticks mayores en el eje Y
    'xtick.major.width': 1,   # Ancho de los ticks mayores en el eje X
    'ytick.major.width': 1,   # Ancho de los ticks mayores en el eje Y
    'xtick.minor.width': 1,   # Ancho de los ticks menores en el eje X
    'ytick.minor.width': 1,   # Ancho de los ticks menores en el eje Y
})

# Crear la gráfica
plt.figure(figsize=(10, 6))

```

```

plt.plot(nombres,gamma_emision,marker='o', color='blue', label='% emi
sión gamma')

plt.plot(nombres, IC, marker='o', color='green', label='%IC')

plt.plot(nombres, alpha_T, marker='o', color='brown', label=r'$\alpha_
{\mathrm{T}}$')

# plt.plot(nombres, N_ground, marker='d', label='N_ground', linestyle=
'--')

plt.axhline(y=18.7, color='red',linewidth=2,linestyle='--',label='Teór
ica (y=18.7 keV)')

plt.ylabel('Porcentaje (%)', fontsize=18)
plt.xticks(rotation=45, ha='right', fontsize=14)
plt.ylim(17,20)
plt.yticks(fontsize=16)
#plt.ylim(4.5,5.5)
plt.legend(fontsize=14)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

B.2 Código para el espectro de energía

```

import ROOT
import matplotlib.pyplot as plt

def analizar_archivo(filename, particle_code, hist_name, x_title, y_title,
canvas_name):
    # Abrir el archivo
    f = ROOT.TFile.Open(filename)

    Emin = 0
    Emax = 50
    nbins = 100

    # Dibujar el histograma con las condiciones especificadas
    draw_command = f'edep*1000>>{hist_name}({nbins},{Emin},{Emax})'
    selection = f'particlecode=={particle_code}'
    f.ccd_byiso.Draw(draw_command, selection)

    # Obtener el histograma
    hist = ROOT.gDirectory.Get(hist_name)

    # Desvincular el histograma del archivo

```

```

hist.SetDirectory(0)

# Configurar los títulos de los ejes
hist.SetTitle('Espectro de energía: e-')
hist.SetXTitle(x_title)
hist.SetYTitle(y_title)
hist.GetAxis().SetTitleSize(0.04)
hist.GetAxis().SetTitleSize(0.04)
hist.SetLineWidth(2)
hist.SetLineColor(ROOT.kBlack)

# Dibujar el histograma en un nuevo canvas
canvas = ROOT.TCanvas(canvas_name, "Canvas", 800, 600)
hist.Draw()

#Configurar los bins
hist.GetAxis().SetNdivisions(510)
hist.GetAxis().SetNdivisions(10)

# Mostrar el canvas
canvas.Modified()
canvas.Update()
canvas.Draw()

input('Presiona enter para continuar...')
return hist, canvas

# Lista de archivos y configuraciones a analizar
archivos = [('leadbrem_FTFP_BERT_ec9112ee-ea47-4572-9591-468b6f1beb46.
root',11, 'hname2', 'Energia (keV)', 'Numero de eventos ', 'c2')]

# Analizar cada archivo en la lista
for archivo in archivos:
    analizar_archivo(*archivo)

```

Bibliografía

- [1] Claudia de Dominicis. (2022). Search for light dark matter with DAMIC-M experiment. Instrumentation and Detectors [physics.ins-det]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique. (NNT No. 2022IMTA0313) (Identificador tel-03884152).
- [2] De la Macorra, A., Cervantes Cota, J. L. (2012). El Cosmos: Energía Oscura y Materia Oscura. Revista Digital Universitaria, 13(4). ISSN 1067-6079. Recuperado de https://www.ru.tic.unam.mx/bitstream/handle/123456789/2008/art43_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] A. Aguilar-Arevalo et al. (DAMIC Collaboration), "Measurement of the electron recoil spectrum of Compton scattered electrons in a Skipper CCD", Phys. Rev. D 102, 092002 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.092002>
- [4] Fritz Zwicky and the whole dark matter thing. (n.d.). Cosmos Magazine. Recuperado de <https://cosmosmagazine.com/science/physics/science-history-fritz-zwicky-and-the-whole-dark-matter-thing/>
- [5] Coronado-Blázquez, J., Sánchez-Conde, M. A., Di Mauro, M., Aguirre-Santaella, A., Ciucă, I., Domínguez, A., Kawata, D., Mirabal, N. (2019). Spectral and spatial analysis of the dark matter subhalo candidates among Fermi Large Area Telescope unidentified sources. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2019(11), 045. Recuperado de <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/11/045>
- [6] Instituto de Astrofísica de Canarias. (2016, enero 1). Nuevos hallazgos en galaxias espirales desafían la hipótesis de la materia oscura. Recuperado de <https://www.iac.es/es/divulgacion/noticias/nuevos-hallazgos-en-galaxias-espirales-desafian-la-hipotesis-de-la-materia-oscura>
- [7] Bergström, L. (2009). Dark matter candidates. New Journal of Physics, 11(10), 105006. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/105006>
- [8] MADMAX Collaboration, Brun, P., Caldwell, A., Chevalier, L., Dvali, G., Freire, P., Garutti, E., Heyminck, S., Jochum, J., Knirck, S., Kramer, M., Krieger, C., Lasserre, T., Lee, C., Li, X., Lindner, A., Majorovits, B., Martens, S., Matysek, M., Millar, A., Raffelt, G., Redondo, J., Reimann, O., Ringwald, A., Saikawa, K., Schaffran, J., Schmidt, A., Schütte-Engel, J., Steffen, F., Strandhagen, C., Wieching, G. (2019). A new experimental approach to probe QCD axion dark matter in the mass range above 40 eV. Max-Planck-Institut für Physik, Munich, Germany. Recuperado de https://zaguan.unizar.es/record/78857/files/texto_completo.pdf

- [9] Nelson, T. (2017, March 24). Light Dark Matter eXperiment: A Missing Momentum Search for Light Dark Matter [Conference presentation]. US Cosmic Visions: New Ideas in Dark Matter, University of Maryland. Recuperado de https://indico.fnal.gov/event/13702/contributions/21133/attachments/13816/17611/USCV_LDMX_final.pdf
- [10] Dasgupta, B., Kopp, J. (2021). Sterile Neutrinos. Tata Institute of Fundamental Research, Homi Bhabha Road, Mumbai, India, Theoretical Physics Department, CERN, Geneva, Switzerland and Johannes Gutenberg University Mainz, Germany. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/2106.05913>
- [11] Kinney, W. H. (2002). Cosmic Microwave Background Primer: Recombination. NASA/IPAC Extragalactic Database (NED). Recuperado de <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept02/Kinney/Kinney3.html>
- [12] Marrodán Undagoitia, T., Rauch, L. (2016). Dark matter direct-detection experiments. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43(1), 013001. Recuperado de <https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/1/013001>
- [13] Marrodán Undagoitia, T., Rauch, L. (2015). Dark matter direct-detection experiments. Max-Planck-Institut für Kernphysik. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/1509.08767>
- [14] SNOLAB. (s.f.). <https://www.snolab.ca/>
- [15] Cervantes-Vergara, B. A., Perez, S., Estrada, J., Botti, A., Chavez, C. R., Chierchie, F., Saffold, N., Aguilar-Arevalo, A., Alcalde-Bessia, F., Avalos, N., Baez, O., Baxter, D., Bertou, X., ... Yajur, R. (2023). Skipper-CCD sensors for the Oscura Experiment: Requirements and preliminary tests. *Journal Title*. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/2304.04401>
- [16] Aguilar-Arevalo, A., Alcalde Bessia, F., Avalos, N., Baxter, D., Bertou, X., Bonifazi, C., ... Vilar, R. (2022). The Oscura Experiment. arXiv:2202.10518v2 [astro-ph.IM]. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2202.10518v2>
- [17] Cervantes-Vergara, B. A., Perez, S. A., D’Olivo, J. C., Estrada, J., Grimm, D. J., Holland, S., Sofo-Haro, M., Wong, W. (2022). Skipper-CCDs: current applications and future. arXiv:2208.05434. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/2208.05434>
- [18] European Research Council. DAMIC-M. Unveiling the Hidden: A Search for Light Dark Matter with CCDs. CNRS (2018-2024), doi:10.3030/788137. <https://cordis.europa.eu/project/id/788137>
- [19] Fermi National Accelerator Laboratory. (s.f.). Oscura Experiment. Recuperado de <https://astro.fnal.gov/science/dark-matter/oscura/>
- [20] Laboratoire National Henri Becquerel. (s.f.). Laraweb. Recuperado de <http://www.lnhb.fr/Laraweb/>
- [21] Knoll, G. F. (2000). *Radiation detection and measurement* (3rd ed.). John Wiley Sons. Recuperado de <http://www.gammaexplorer.com/wp-content/uploads/2014/03/Glenn-F.-Knoll.-Radiation-Detection-and-Measurement-3rd-1.pdf>

- [22] International Atomic Energy Agency. (s.f.). Guide to gamma ray spectrum analysis. Recuperado de <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/guide.html#gamma>
- [23] L'Annunziata, M. F. (2023). Atomic electron radiation. En Radioactivity (Tercera edición). ScienceDirect. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/internal-conversion>
- [24] ROOT CERN. (s.f.). About ROOT. Recuperado de <https://root.cern/about/>
- [25] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Nuclear Decay Data for Selected Radionuclides," <https://www.nist.gov/pml/radiation-dosimetry/nuclear-decay-data>
- [26] Arce, P., Bolst, D., Bordage, M.-C., Brown, J. M. C., Cirrone, P., Cortés-Giraldo, M. A., ... Fedon, C. (2020). Report on G4-Med: A Geant4 benchmarking system for medical physics applications. Medical Physics. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/mp.14226>
- [27] Geant4 Collaboration. (2017). Book For Application Developers: Release 10.3. Recuperado de <https://indico.cern.ch/event/647154/contributions/2714212/attachments/1529029/2397032/BookForApplicationDevelopers.pdf>
- [28] Geant4 Collaboration. (s.f.). About Geant4. Recuperado de <https://geant4.web.cern.ch/about/>
- [29] Novak, M. (2019). Geant4.10.5. Geant4 Tutorial at Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 4-8 February 2019. Recuperado de <https://indico.cern.ch/event/776050/contributions/3237925/attachments/1789252/2914238/PhysLists.pdf>
- [30] International Atomic Energy Agency. (s.f.). Nuclide Data Services: Virtual Chart of Nuclides. Recuperado de <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [31] Apostolakis, J., Folger, G., Grichine, V., Howard, A., Ivanchenko, V., Kosov, M., Ribon, A., Uzhinsky, V., Wright, D. H. (2008). GEANT4 Physics Lists for HEP. In 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.
- [32] Geant4 Collaboration. (2019). Guide For Physics Lists: Release 10.6 (Rev4.0: December 6th, 2019). Recuperado de https://geant4.kntu.ac.ir/Dorsapax/Data/Sub_207/File/PhysicsListGuide.pdf