



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS FÍSICAS

FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS, FÍSICA NUCLEAR,  
GRAVITACIÓN Y FÍSICA MATEMÁTICA

SIMULACIONES DE RUIDO DE FONDO PRODUCIDAS POR NEUTRONES  
EN EL DETECTOR DE MATERIA OSCURA PICO-40L

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE: MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)

PRESENTA:  
ALBERTO ACEVEDO RENTERÍA

TUTOR PRINCIPAL:  
Dr ERIC VÁZQUEZ JÁUREGUI, IF  
MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:  
Dra LIBERTAD BARRÓN PALOS, IF  
Dr CÉSAR FERNÁNDEZ RAMÍREZ, ICN

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO, 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos.

El presente trabajo agradece al Programa UNAM-PAPIIT IN108020 y IN105923, así como al Proyecto CONAHCyT CB-2017-2018/A1-S-8960.

A mi familia. Muchas gracias por el constante apoyo y cariño en todo momento.

A mi asesor, Dr Eric Vázquez Jáuregui, mi comité tutor, Dra Libertad Barrón Palos y Dr César Fernández Ramírez, y a mis sinodales. Gracias por las observaciones y consejos para mi desarrollo científico y profesional.

# Resumen.

Actualmente, la materia oscura es una de las mayores incógnitas de la física, ya que abre una puerta a física más allá del modelo estándar. Por este motivo, se han desarrollado distintas tecnologías, métodos de análisis y reducción de ruido de fondo, con la intención de obtener una respuesta. El detector PICO-40L busca la detección directa de materia oscura empleando una cámara de burbujas. Está empezando con su toma de datos en el laboratorio subterráneo SNOLAB, con un nuevo diseño cuyo objetivo es reducir los eventos de ruido de fondo, reducción que se aplicará a un futuro detector, el PICO-500L. Como método de detección directa, el PICO-40L es muy sensible, y se requiere estimar los ruidos de fondo inducidos por los componentes del detector y los alrededores. En este trabajo se estimó la contribución de los neutrones debido a los decaimientos en trazas de las cadenas de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en los componentes del detector mediante simulaciones de Monte Carlo en GEANT4, encontrando que en un año se estiman  $4.5 \pm 0.9$  eventos de una burbuja. También se estimó la contribución de neutrones provenientes de la roca de la caverna en SNOLAB donde se ubica el detector, por las cadenas de  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$ , obteniendo 43.9 eventos de una burbuja en un año considerando un tanque vacío. Al ubicar el detector en un tanque de agua, se estiman menos de 0.7 eventos de una burbuja al año con un nivel de confianza del 90%. Es importante notar que al colocar el detector en un tanque lleno de agua, la cantidad de eventos de una burbuja en las simulaciones se reduce a cero, por lo que se pueden imponer límites en este caso. Finalmente, considerando este trabajo, así como estimaciones de otras fuentes de ruido de fondo, se estima que en un año la cantidad de eventos de una burbuja en el detector PICO-40L es menor a 5.5 eventos, muestra que la fuente principal de ruido proviene de los componentes del detector.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2. Materia Oscura</b>	<b>11</b>
2.1. Evidencia . . . . .	11
2.1.1. Masa de cúmulos galácticos . . . . .	11
2.1.2. Andrómeda y Via Láctea . . . . .	11
2.1.3. Rotación de galaxias . . . . .	12
2.1.4. Radiografía de galaxias . . . . .	12
2.1.5. Lentes gravitacionales ( <i>gravitational lensing</i> ) . . . . .	13
2.1.6. Fondo Cósmico de Microondas . . . . .	13
2.1.7. Cúmulo bala (bullet cluster) . . . . .	14
2.2. Candidatos . . . . .	14
2.2.1. Materia bariónica . . . . .	15
2.2.2. Materia no bariónica . . . . .	16
2.3. Detección . . . . .	18
2.3.1. Detección directa . . . . .	18
2.3.2. Detección indirecta . . . . .	19
2.3.3. Colisionadores de partículas . . . . .	20
<b>3. Cámara de burbujas PICO-40L</b>	<b>21</b>
3.1. Cámara de burbujas . . . . .	21
3.2. Detector PICO-40L . . . . .	23
3.3. Ruidos de fondo . . . . .	25
3.3.1. Radiación gamma . . . . .	25
3.3.2. Partículas alfa . . . . .	25
3.3.3. Rayos cósmicos . . . . .	26
3.3.4. Neutrones . . . . .	26
<b>4. Simulaciones y resultados</b>	<b>28</b>
4.1. GEANT4 y el método de Monte Carlo . . . . .	28
4.2. Descripción del detector . . . . .	29
4.3. Simulaciones y análisis . . . . .	36
4.4. Resultados . . . . .	41
4.4.1. Componentes . . . . .	41
4.4.2. Estudio de eventos esperados de la roca Norita . . . . .	43
<b>5. Conclusiones</b>	<b>45</b>

<b>A. Tablas</b>	<b>47</b>
<b>B. Gráficas</b>	<b>52</b>
<b>C. Códigos</b>	<b>54</b>
C.1. Paquete ( <i>job</i> ) . . . . .	54
C.2. Código de análisis . . . . .	62
<b>D. Incertidumbres</b>	<b>74</b>

# Índice de figuras

2.1.	Comparación de las curvas de rotación esperada y observada para la galaxia M33 [7].	12
2.2.	Representación de GAL-CLUS-022058s, uno de los anillos de Einstein más completos descubiertos en el universo. Crédito: ESA/Hubble & NASA, S. Jha. . . . .	13
2.3.	Espectro de potencias para la radiación de fondo cósmico de microondas. Imagen de ESA, Planck collaboration. . . . .	14
3.1.	El retroceso de electrón no es lo suficientemente localizado para crear una burbuja, como se observa en la parte superior del diagrama. Por otro lado, el retroceso nuclear que se observa en la parte inferior sí es lo suficientemente localizado para crear una burbuja. . . . .	22
3.2.	A la izquierda se muestra un diagrama para PICO-60L, mientras que a la derecha se observa el de PICO-40L [55, 76]. . . . .	24
3.3.	A la izquierda se observa la proyección para la interacción independiente del espín, mientras que a la derecha se presenta para la interacción dependiente del espín. . . . .	25
3.4.	Diferencia en la amplitud entre un evento originado por una partícula alfa y un neutrón. . . . .	26
3.5.	Cadena de decaimiento del $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ y $^{238}\text{U}$ . Imágenes obtenidas de Wikipedia [82, 83]. . . . .	27
4.1.	Representación del detector PICO-40L en GEANT4. En la presente representación se muestra el recipiente de presión, las cuatro cámara y parte de los componentes internos. El aceite mineral (de color verde) llena por completo al recipiente de presión, y el material activo se encuentra dentro de los recipientes de cuarzo. . . . .	30
4.2.	Representación de la caverna de SNOLAB con el detector PICO-40L. Se consideran dos metros de roca Norita alrededor de la caverna de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ donde se encuentra el detector. En la imagen se presenta el caso de dos metros de roca Norita. El detector se ubica dentro de un tanque (de color gris). . . . .	30
4.3.	El aceite mineral representado de color verde, contiene por completo los retroreflectores, el cuarzo, los piezos y el aislante térmico. Con flechas se indican parte de los componentes. . . . .	31
4.4.	En color gris se encuentra el recipiente de cuarzo que contiene por completo la región activa del $C_3F_8$ de color amarillo. Dentro se observa un segundo recipiente de cuarzo (color azul) que contiene aceite mineral y el control de calor interno. . . . .	32
4.5.	Representación del $C_3F_8$ de color amarillo. Se indica la región activa (sobrecalentado) y la fría. Se observa también el recipiente de cuarzo contenido en el $C_3F_8$ de color gris. . . . .	32
4.6.	Representación de una cámara de PICO-40L donde se indican las posiciones de algunos componentes. . . . .	33

4.7. Vista desde arriba del detector para mostrar los doce piezoeléctricos que se encuentran alrededor del recipiente de cuarzo. Para que se distingan bien los piezos de color rojo, el soporte de PE para los piezos no es visible en la imagen. . . . .	34
4.8. Representación de uno de los doce piezoeléctricos. EL cilindro es de cobre y en su interior por medio de flechas se indican los componentes de PCB y el piezo. . . . .	34
4.9. Representación de las dos secciones cónicas de retroreflectores. . . . .	35
4.10. El disco y plato de cobre indicados respectivamente. . . . .	35
4.11. Representación del aislante térmico en GEANT4 desde una vista lateral. . . . .	35
4.12. De color azul se presenta la función escalón para la eficiencia del carbono en función de la energía, mientras que de color rojo es para el flúor. . . . .	39
4.13. Arriba se observa un gráfico de Z vs R al no considerar el corte en el eje z, mientras que en el gráfico inferior sí es considerado el corte. Las gráficas son para el componente disco de cobre para la cadena $^{238}U$ . . . . .	41
4.14. La producción de burbujas se reduce al aumentar su multiplicidad, sin embargo, al final la suma de los eventos múltiples supera a los eventos de una sola burbuja. . . .	42
4.15. Espectro de energías de la cadena $^{232}Th$ del componente disco de cobre del detector. De color rojo el espectro para múltiples y de azul para individuales. . . . .	42
B.1. Piezo. . . . .	52
B.2. Leds. . . . .	52
B.3. Lente. . . . .	52
B.4. PV. . . . .	52
B.5. Aceite mineral. . . . .	52
B.6. Cámara. . . . .	52
B.7. OV. . . . .	53
B.8. Retrorreflector A. . . . .	53
B.9. Retrorreflector B. . . . .	53
B.10. Piezo parte PCB. . . . .	53
B.11. Piezo parte de cobre. . . . .	53
B.12. Aislante térmico. . . . .	53
B.13. Plato de cobre. . . . .	53
B.14. Disco de cobre. . . . .	53



# Índice de cuadros

4.1. Componentes y el rendimiento para cada cadena. La cadena del $^{238}\text{U}$ está separada en alta y baja. Notar las unidades del Rendimiento, van como $[1/s]$ , mientras que en la fórmula 4.1 se requiere que la unidad de tiempo sea en años no segundos, por lo cual es importante incluir un factor de conversión al efectuar el cálculo. Datos obtenidos de SOURCES-4C [87]. . . . .	37
4.2. Componentes y su respectiva pureza para las cadenas correspondientes. Se separa la cadena del $^{238}\text{U}$ en dos partes. Datos obtenidos en el laboratorio SNOLAB con detectores de germanio de alta pureza (HPGe) [89]. . . . .	37
4.3. Masa de los distintos componentes simulados. . . . .	38
4.4. Estimaciones de eventos de una burbuja y múltiples esperados en un año por varios componentes. . . . .	43
4.5. Valores obtenidos para la roca al considerar dos y tres metros de grosor de Norita con el contenedor vacío y lleno de agua. . . . .	44
5.1. Cuadro de distintas contribuciones a la señal de eventos para el detector PICO-40L. . . . .	46
A.1. Resultados para un piezo de cobre. . . . .	47
A.2. Resultados para piezo de PCB. . . . .	47
A.3. Resultados para un piezo. El resultado final de la contribución de los piezos es multiplicado por doce debido a la simetría cilíndrica. . . . .	47
A.4. Resultados para el aislante térmico. . . . .	47
A.5. Resultados para disco cobre. . . . .	48
A.6. Resultados para plato cobre. . . . .	48
A.7. Resultados para reflector A. . . . .	48
A.8. Resultados para reflector B. . . . .	48
A.9. Resultados para OV (recipiente de cuarzo). . . . .	48
A.10. Resultados para IV (recipiente de cuarzo bajo). . . . .	48
A.11. Resultados para el aceite mineral. . . . .	49
A.12. Resultados para una cámara (aluminio). . . . .	49
A.13. Resultados para una lente (aluminio). . . . .	49
A.14. Resultados para LEDs de una cámara. . . . .	49
A.15. Resultados para parte PCB de una cámara. . . . .	49
A.16. Resultados para recipiente de presión (PV). . . . .	49
A.17. Resultados RTD sensor. . . . .	50
A.18. Resultados RTD cable rojo. . . . .	50
A.19. Resultados RTD cable blanco. . . . .	50
A.20. Resultados RTD cable rojo Teflón. . . . .	50
A.21. Resultados RTD cable blanco Teflón. . . . .	50

A.22.Resultados cable de Al para piezo. . . . .	50
A.23.Resultados cable Al para cámara. . . . .	51
A.24.Resultados para roca Norita con el tanque lleno de aire considerando dos metros de roca. . . . .	51
A.25.Resultados para roca Norita con el tanque lleno de aire considerando tres metros de roca. . . . .	51
A.26.Resultados para roca Norita con el tanque lleno de agua. . . . .	51
A.27.Resultados para roca Norita con el tanque lleno de agua imponiendo una cota por la ausencia de eventos. . . . .	51

# Capítulo 1

## Introducción

Un hecho que ha caracterizado a la humanidad a lo largo de su historia es el desarrollo de modelos y teorías que puedan explicar lo observado tanto en la vida diaria como en el universo. Se pueden encontrar colecciones antiguas del movimiento de estrellas y planetas, los cuales después se han explicado con diversos modelos, como son las leyes de Kepler para describir el movimiento de planetas alrededor del Sol, la ley de gravitación universal de Newton para la gravedad clásica, o la teoría de la relatividad general de Einstein para la gravedad en la actualidad. Las discrepancias que surjan entre los modelos y las observaciones del movimiento de un planeta o galaxia pueden resolverse de dos formas:

- Hay alguna masa invisible,
- Modificar la teoría de gravedad.

En la actualidad existen discrepancias entre lo observado y lo indicado por el modelo. Al considerar que la teoría de la gravedad utilizada no es correcta, se desarrollan las teorías de gravedad modificada MOND (por sus siglas en inglés), mientras que proponer la existencia de algo nuevo conduce a la materia oscura. Al optar por la materia oscura, es importante explicar las discrepancias observadas (evidencia que la justifique), determinar su naturaleza (candidatos) y, si es real, medirla para probar su existencia (detección).

Existen tres métodos principales para detectar la materia oscura: detección directa, detección indirecta y por medio de colisionadores. Entre los métodos de detección directa se encuentran las cámaras de burbujas, en las cuales, cuando una partícula de materia oscura interactúa con un líquido en estado metaestable, la energía depositada es suficiente para que se genere una burbuja visible.

Una cámara de burbujas tiene la ventaja de ser altamente sensible, lo cual permite medir las energías de retroceso nuclear esperadas tras la interacción de materia oscura ( $\sim\text{keV}$ ). Sin embargo, interacciones de otras fuentes con el detector, como la radioactividad ambiental y los rayos cósmicos, generan señales no deseadas que complican la búsqueda de la materia oscura. Por este motivo, es importante la realización de estudios y análisis de los ruidos de fondo de un detector, y así, estimar la contribución a la señal debida a otras fuentes.

El detector PICO-40L emplea una cámara de burbujas para la detección directa de materia oscura. Se encuentra en el laboratorio subterráneo SNOLAB y actualmente está iniciando la toma de datos. Utiliza octafluoropropano ( $C_3F_8$ ) como líquido sensible e implementa un nuevo diseño que, en comparación con su antecesor PICO-60L, le permite reducir ruidos de fondo.

En el presente trabajo se espera contribuir a la búsqueda de la materia oscura por medios de detección directa con el detector PICO-40L, teniendo en cuenta que el camino aún es largo y queda mucho por desarrollar. En particular, el presente trabajo desarrollado va a contribuir para

---

dos artículos, *The PICO-40L Detector* que actualmente se encuentra en desarrollo, y otro artículo más con el análisis de la toma de datos.

El siguiente capítulo abarca el tema de la materia oscura, discutiendo la evidencia que sustenta su existencia, los posibles candidatos y los métodos de detección. En el capítulo 3 trata sobre la descripción y funcionamiento general del detector PICO-40L, así como las fuentes de ruido de fondo que son de importancia para las mediciones y forman la contribución que da este trabajo. El capítulo 4 introduce las bases de GEANT4, que es la herramienta utilizada para realizar las simulaciones, la caracterización del detector en GEANT4, el análisis de las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, el quinto capítulo da las conclusiones del trabajo desarrollado, indicando la contribución a la señal esperada por ruidos de fondo, donde se observa que la fuente principal de ruido proviene de los componentes del detector, cuya contribución es estimada en el presente trabajo.

## Capítulo 2

# Materia Oscura

En el modelo estándar cosmológico se incluye a la materia oscura (en particular fría) para explicar observaciones y datos que se han obtenido del universo. De acuerdo a esto, la materia oscura se encuentra por todo en universo, formando incluso estructuras en algunas regiones, pero en particular se puede encontrar también dentro del sistema solar, lo cual se ha de buscar detectar.

A continuación se menciona parte de la evidencia que sugiere la existencia de la materia oscura, así como los principales candidatos y métodos para su detección.

### 2.1. Evidencia

En la presente sección, se muestra la evidencia que sugiere la existencia de la materia oscura. Gran parte de la evidencia de la existencia de materia oscura, proviene de observaciones astronómicas. Hay varias posibles explicaciones para distintas observaciones, y donde fallan unas otras triunfan, pero en general, la hipótesis de materia oscura parece cubrir tales observaciones.

#### 2.1.1. Masa de cúmulos galácticos

La estimación de la masa de un cúmulo galáctico se puede hacer por la luminosidad de sus nebulosas o por las velocidades intrínsecas. Del segundo método, un cúmulo galáctico estable ha de seguir el teorema del Virial, con lo cual Zwicky estimó la masa del cúmulo Coma  $\mathcal{M} > 9 \times 10^{46}$  gr, con lo cual el promedio de masa de una galaxia (nebulae) del cúmulo Coma es  $\overline{\mathcal{M}} > 4.5 \times 10^{10} \mathcal{M}_{\odot}$ , con  $\mathcal{M}_{\odot} = 2 \times 10^{33}$  gr la masa solar. El resultado es llamativo, pues la luminosidad promedio para galaxia es  $8.5 \times 10^7$  soles. Así, Zwicky halló que el factor de conversión de luminosidad a masa por galaxia en el cúmulo Coma es del orden de 500 [1].

Para evitar que las galaxias escapen del cúmulo se requiere de una gran cantidad de masa no visible, a la cual Zwicky denominó *dunkle materie* (materia oscura).

#### 2.1.2. Andrómeda y Vía Láctea

Se estima que la galaxia de Andrómeda se acerca a la Vía Láctea a 300 km/s relativo al Sol, de acuerdo a Nasa/ipac Extragalactic Database [2]. Al considerar las dos galaxias como un sistema gravitacional y usando la dinámica de Kepler, se puede estimar la masa del sistema. El resultado es mayor a la suma de las masas de las estrellas de ambas galaxias. El exceso de masa se puede asociar a gas ionizado o a la presencia de un halo de materia oscura. En apoyo a la idea de materia oscura, simulaciones muestran que para estabilizar la estructura del disco de galaxias espirales, es necesaria la presencia de halos masivos a su alrededor [3].

### 2.1.3. Rotación de galaxias

De aplicar las leyes de Kepler a una galaxia se encuentra la caída Klepperiana, la cual consiste en que hay un máximo para la velocidad de rotación que decrete conforme se aleja del centro. Para confirmar este resultado se puede emplear el efecto Doppler al saber que cuando el movimiento rotacional de estrellas se acerca al observador la luz se inclina al azul, mientras que cuando se alejan del observador la luz se inclina al rojo [4]. El cambio en la longitud de onda de la luz es proporcional a la velocidad de la fuente, lo que hace posible determinar las velocidades de rotación en diferentes posiciones del disco galáctico. Sin embargo, los hallazgos del estudio fueron que la velocidad de rotación de estrellas lejanas del centro no decrece. Este resultado se puede interpretar como evidencia de la existencia de una gran cantidad de masa no visible a las afueras de la galaxia. Esta interpretación de masa en exceso dio apoyo a las observaciones de que para algunas galaxias hay grandes valores de la razón masa-brillo, lo cual indica que hay una mayor masa que no es observable [5].

La distribución de la materia no visible se puede encontrar en una primera aproximación con la mecánica Newtoniana, la cual indica que es una distribución esférica. Modelos más precisos muestran que en realidad la distribución es elipsoidal, teniendo así un halo de materia oscura. Además, las curvas de rotación también pueden ayudar para dar indicios de la distribución de la materia oscura en la galaxia; la materia ordinaria domina en las regiones internas a unos pocos kpc (1 pársec, pc, es del orden de  $3 \times 10^{16}$  metros), a 10 kpc la materia oscura es dominante. Como referencia, la distancia del centro de la Vía Láctea a la Tierra es poco más de 8 kpc [6].

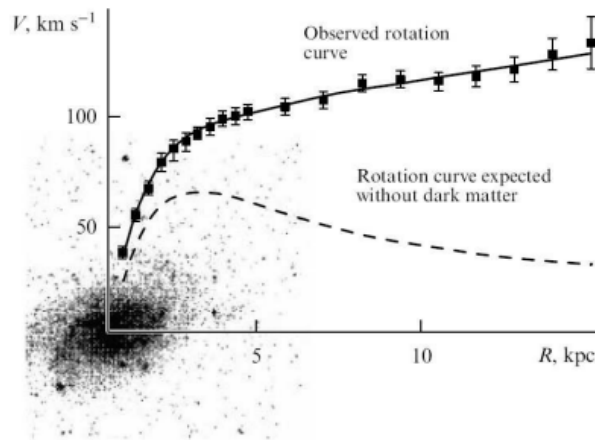


Figura 2.1: Comparación de las curvas de rotación esperada y observada para la galaxia M33 [7].

### 2.1.4. Radiografía de galaxias

El gas caliente en galaxias elípticas y cúmulos galácticos emiten rayos-x. De este modo, la temperatura y densidad de un cúmulo se pueden estimar por la emisión de rayos-x del cúmulo, así que se requieren telescopios de rayos-x. Obteniendo la temperatura y la densidad del cúmulo, se puede determinar su distribución de masa. Dentro del cúmulo, el gas se encuentra atrapado por el campo gravitatorio, sin embargo, la gravedad generada solamente por las estrellas no es suficiente para retener al gas. Para evitar que el gas escape y se encuentre en un equilibrio hidrostático (el movimiento en el campo gravitacional del cúmulo es con velocidades proporcionales a su masa) como se observa, se requiere de una gran cantidad de masa invisible. Esta masa invisible no es detectable por ningún telescopio, a diferencia de materia interestelar que si bien no es visible en el ancho de banda óptico, se puede ver con telescopios sensibles al infrarrojo. Estudios de las

observaciones del gas caliente pueden concluir que de la masa de un cúmulo el 5% es por galaxias, 15% por gas y el 80% por la masa no visible. Nuevamente, una propuesta a la masa no visible es la materia oscura [8].

### 2.1.5. Lentes gravitacionales (*gravitational lensing*)

Una de las pruebas de la teoría general de la relatividad, es que la luz cambia su trayectoria por deformaciones en el espacio-tiempo. Estas distorsiones del espacio-tiempo son producidas por la presencia de objetos masivos [9].

El efecto de los lentes gravitacionales viene de la distorsión del camino de la luz de galaxias lejanas, y ocurre por la presencia de objetos entre el observador y la fuente. Se identifica principalmente por imágenes múltiples o anillos de Einstein. El anillo de Einstein se forma cuando la Tierra (observador), lente (otra galaxia, materia oscura o agujero negro) y la fuente están perfectamente alineados, mientras que las imágenes múltiples surgen cuando la alineación no es perfecta [10, 11]. Confirmación del efecto del lente gravitacional se encuentra con la distorsión de las galaxias que se encuentran detrás de los cúmulos Lynds y Petrosian [12]. Un detalle importante es que con la distorsión de la luz de galaxias lejanas, se puede determinar la masa total del lente, esto es, la suma de la masa estelar, gas y materia oscura. Con efecto de lente débil se puede estimar que gran parte de la masa de un cúmulo está entre las galaxias. Con la propuesta de lente-microscópico (microlensing) se puede estudiar la materia oscura en forma de objetos compactos (ver más adelante MACHOs).

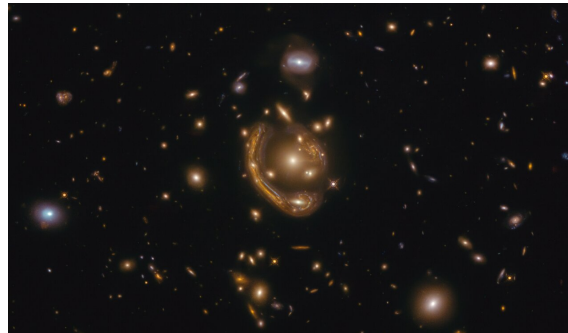


Figura 2.2: Representación de GAL-CLUS-022058s, uno de los anillos de Einstein más completos descubiertos en el universo. Crédito: ESA/Hubble & NASA, S. Jha.

### 2.1.6. Fondo Cósmico de Microondas

El fondo cósmico de microondas (CMB por sus siglas en inglés) es una de las pruebas de la teoría del Big Bang, y ofrece evidencias de la materia oscura. Con los datos obtenidos por el experimento BOOMERanG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation And Geophysics*) [13], se pudo determinar la geometría del universo, la cual resulta ser plana sustentando la existencia de la energía oscura. Con el experimento MAXIMA (*Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array*) [14, 15], que cubrió una menor parte del espacio que BOOMERanG pero midiendo a mayor detalle las fluctuaciones del CMB, se logró calcular los primeros tres picos acústicos del espectro de potencias del CMB, con lo cual se obtiene que la densidad de materia bariónica es de alrededor del 4%. El experimento WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) midió las diferencias en la temperatura del CMB y obteniendo como resultado un modelo cosmológico estándar con parámetros restringidos [16]. Con el experimento Planck se logró obtener una caracterización más

precisa del mapa CMB, así como constricciones a los parámetros del modelo estandar cosmológico [17].

Caracterizaciones del mapa CMB encuentran que la materia ordinaria es 4.86 %, fotones 0.005 %, neutrinos 0.4 %, materia oscura 25.89 %, con lo cual se complementa aproximadamente el 31 % de la densidad crítica. El restante 69 % se asocia a la energía oscura [18]. En general, los picos del CMB y la curvatura del universo se puede explicar con el modelo estándar cosmológico, conocido como modelo  $\Lambda$ CDM.  $\Lambda$  se asocia a la energía oscura y CDM es abreviación en inglés para materia oscura fría (*cold dark matter*) [19]. De este modo, con el CMB se puede obtener información sobre la materia oscura, como es su cantidad en el universo y que ha de ser fría (no-relativista).

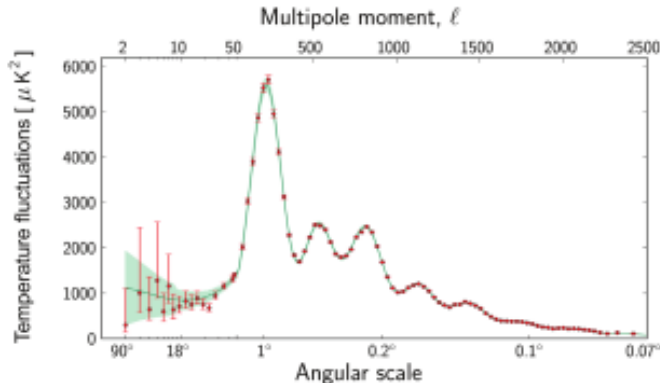


Figura 2.3: Espectro de potencias para la radiación de fondo cósmico de microondas. Imagen de ESA, Planck collaboration.

### 2.1.7. Cúmulo bala (bullet cluster)

Estudiar el resultado de la colisión de dos cúmulos, da pistas de las propiedades de las galaxias y la masa que constituye a los cúmulos. Como se ha mencionado antes, la distribución de masa se puede determinar con las emisiones de rayos-x y el lente gravitacional.

El cúmulo bala 1E 0657-56 en la constelación de Carena es el resultado de la colisión de dos cúmulos [20]. La masa bariónica, constituida principalmente por gas, que emite rayos-x en el espectro electromagnético está en la parte central del cúmulo y es separada por dos regiones con la mayor masa. Con el argumento de la materia oscura de interacción débil se puede explicar lo observado: en la colisión de los cúmulos, las estrellas cambian su movimiento, el gas se va frenando por interacciones electromagnéticas y se detiene en el centro, mientras que la materia oscura continúa su camino casi sin alteraciones. Propuestas alternas como gravedad modificada o diferente a la de Einstein, no logran explicar exitosamente lo observado, así que los cúmulos bala se pueden considerar como una prueba fuerte de la existencia de la materia oscura débilmente interactuante.

## 2.2. Candidatos

En esta sección se presentan varios candidatos a materia oscura, los cuales se proponen de acuerdo a la evidencia de su existencia. Las observaciones que pueden ser explicadas con el argumento de la materia oscura, también han de dar pistas sobre las propiedades y características que ha de satisfacer la materia oscura para lograr explicar todas las observaciones mencionadas. Considerando estas bases, se pueden proponer candidatos para determinar exactamente qué es la



materia oscura. Por ejemplo, ha de ser neutra o tener poca carga, pues de lo contrario interactuaría más de lo observado; está sujeta a la fuerza gravitacional; su interacción con la materia ordinaria es mediante la fuerza débil, mientras que su interacción con las otras fuerzas, si existe, es pequeña; en su mayoría es materia no-bariónica; ha de ser estable o si decae su vida media es mayor a la de la edad del universo, pues la cantidad de materia oscura en el universo temprano es casi la misma al día de hoy; del cúmulo bala también se pueden hacer estimaciones de la autointeracción de la materia oscura, la cual resulta ser poca; es fría, es decir, cuando ocurrió el desacoplamiento debía tener una velocidad de dispersión menor a la de la luz; ha de ser abundante para sumar el 26 % de la masa del universo; incluso si es fundamental para la formación de estructuras cósmicas, no puede influir en la nucleosíntesis primordial; a pesar de ser fundamental para la formación y evolución de galaxias, no ha de influir en la evolución estelar.

Todo esto en consideración, en las siguientes subsecciones se presentan algunos de los candidatos así como argumentos a su favor y en contra.

### 2.2.1. Materia bariónica

Como una primera propuesta para la materia oscura puede surgir la materia bariónica. Estos candidatos suelen ser referidos como MACHOs (*massive astrophysical compact halo objects*) [21], su emisión de radiación es muy baja o nula, lo cual los hace difíciles de detectar, además son objetos que se encuentran a la deriva en el universo. Como propuestas para MACHOs se encuentran agujeros negros, estrellas de neutrones, enanas marrones, planetas aislados e incluso se han propuesto enanas blancas y rojas. Los agujeros negros aislados no emiten luz y cualquier luz que se envíe a ellos será absorbida; materia que se junte a su alrededor por su campo gravitatorio es muy poca por lo que no habría emisión detectable de rayos-x o de radio, así que sólo se pueden detectar mediante el lente gravitacional. Sin embargo, la masa faltante asociada a la materia oscura se encuentra a través de la galaxia, y los agujeros negros son sólo en regiones aisladas, por lo cual no podrían ser toda la materia oscura. Las estrellas de neutrones, después del suficiente tiempo, pueden haber radiado suficiente como para no ser visibles (similar a que las enanas blancas se convertirían en enanas negras), aunque el tiempo estimado para ello es mayor a la edad de universo, así que no se espera que se encuentren en tal punto para ser materia oscura. Las enanas blancas y rojas sí emiten luz, así que como materia oscura estas propuestas serían una fracción insignificante, además de que no se espera que las enanas blancas ya sean enanas negras [22].

Para la detección de un MACHO se requiere que pase cerca o enfrente de una estrella, de tal modo que la gravedad del MACHO altera el camino de la luz provocando que la estrella parezca ser más brillante, el denominado *microlensing* (ver sección 2.1.5).

El proyecto OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*) en conjunto de la colaboración MAO (*Microlensing Observations in Astrophysics*), presentaron la primera detección no ambigua de un agujero negro solitario (aislado), así como la medición de su masa de  $7.1 \pm 1.3 M_{\odot}$  [23].

Con el experimento EROS2 (*Experience pour la Recherche d'Objets Sombres*) se determinó que menos del 25 % de un halo estándar de materia oscura está compuesto por MACHOs [24].

La colaboración MACHO con observaciones de 5.7 años descartó que el halo de la Vía Láctea este compuesto en su totalidad por MACHOs con un nivel de confianza del 95 %, sino que en su lugar los MACHOs sólo constituirían entre el 8 % y el 50 % del halo [25].

La nucleosíntesis primordial (confirmada por CMB) estima que sólo entre el 4 y 5 % de la materia es bariónica, lo cual impone un límite para la cantidad de materia bariónica que puede ser considerada materia oscura, es decir, la materia oscura no está constituida totalmente por bariones. Se requiere materia no-bariónica en su mayoría para conseguir las estimaciones de materia oscura en el universo.

Por otro lado, debido a la gran densidad que había durante la formación del universo, se pudieron generar agujeros negros primordiales con masas pequeñas de orden de  $10^{12}$  kg, como los cometas. La detección de ondas gravitacionales por LIGO/VIRGO [26] abre la posibilidad a la existencia de agujeros negros primordiales, pues el evento que produjo las ondas gravitacionales detectadas fue la colisión de dos agujeros negros de masas inesperadas, haciendo posible una nueva familia de agujeros negros que puede incluir a los agujeros negros primordiales.

Otro detalle a tener en consideración, es que puede haber agujeros negros primordiales que estén formados por materia no-bariónica. Al considerar este detalle, así como que los límites impuestos por la nucleosíntesis primordial no aplican para objetos formados antes de la nucleosíntesis, los agujeros negros primordiales como candidatos a materia oscura son viables.

En conclusión, exceptuando agujeros negros primordiales, por la teoría de nucleosíntesis primordial y el CMB, la materia oscura no puede ser completamente bariones.

### 2.2.2. Materia no bariónica

Al considerar un universo plano y que la cantidad de materia oscura es entre el 20% y 30%, así como que después de la recombinación siguió la formación de estructuras, permitió estimar las fluctuaciones de las densidades de materia, las cuales tenían que ser menores al valor teórico. Por ello se comenzó a considerar que la materia oscura sería una partícula.

Una primera propuesta son los neutrinos, pues cumplen algunas de las características requeridas para la materia oscura, son neutros y masivos. Los neutrinos son partículas relativistas (viajan a velocidades cercanas a la de la luz en el vacío), por lo cual el modelo que los postula como materia oscura es llamado *hot dark matter model* (HDM), modelo de materia oscura caliente.

El experimento KATRIN (*KArlsruhe TRItium Neutrino experiment*) [27] ha impuesto un límite superior para la masa del antineutrino del electrón  $m_{\nu}$ , que ha de ser menor a  $0.8 \text{ eV}/c^2$  con un nivel de confianza del 90%. En general, el mejor ajuste para el rendimiento (*yield*) es  $m_{\nu}^2 = (0.26 \pm 0.34) \text{ eV}^2 c^{-4}$ . Con este resultado, para que los neutrinos puedan sumar la cantidad de masa que se estima que conforma la materia oscura, se requiere un universo gobernado por neutrinos. En tal caso, debido a las grandes velocidades de los neutrinos, las perturbaciones de escala pequeña son amortiguadas dejando sólo perturbaciones mayores. Como resultado primero se formarían cúmulos galácticos, y después por fragmentación surgen las galaxias. Esto genera discrepancias con simulaciones y las observaciones, que postulan primero la formación de galaxias seguidas por los cúmulos galácticos. Así que debido a lo ligeros que son los neutrinos y en congruencia a las observaciones, el modelo HDM no puede ser la respuesta [28].

Con relación a los neutrinos, otra propuesta que explicaría toda la materia oscura es el hipotético neutrino estéril, propuesto por Dodelson y Widrow en 1993. El neutrino estéril se postula que sólo interactúa con otras partículas a través de la gravedad y la oscilación de neutrinos [29]. Para cumplir teoría de la leptogénesis (el proceso que produjo la asimetría entre leptones y antileptones en la formación del universo) y ser candidato a materia oscura, tiene que haber tres sabores de neutrinos estériles, al igual que hay tres sabores de neutrinos activos. A diferencia de los neutrinos, para los neutrinos estériles su masa no es conocida y puede valer desde menos de un eV hasta ir del orden de  $10^{15}$  GeV. Como candidato a materia oscura, se le pueden poner restricciones al neutrino estéril, por ejemplo, para producir la estructura del universo que se observa se requiere que su masa esté en la escala de keV [30].

Se han desarrollado varios experimentos que entre sus objetivos se encuentra la detección del neutrino estéril como STEREO (*Search for Sterile Reactor Neutrino Oscillations experiment*) que descarta masas de unos cuantos eV como solución a anomalías de anti-neutrinos en reactores [31, 32]. BEST (*Baksan Experiment on Sterile Transitions*) reportó deficiencias en la producción

de un isótopo de germanio que se puede asociar al neutrino estéril [33]. MiniBooNE encontró un exceso de eventos tanto de neutrinos como antineutrinos de electrón de  $4.5\sigma$  y  $4.7\sigma$  respectivamente, que junto con el exceso de LSND (*Liquid Scintillator Neutrino Detector*) hay una significancia de  $6.0\sigma$ , y que la interpretación de los datos como oscilación de dos neutrinos requiere de al menos 4 tipos de neutrinos [34]. MicroBooNE buscó el exceso de eventos reportado por MiniBooNE pero no encontró evidencia de neutrinos estériles [35].

Otras propuestas son el axion, gravitino, photino y otras partículas no relativistas, por lo que el modelo se llamó *cold dark matter model* (CDM), modelo de materia oscura fría. Estas partículas no suprimen las perturbaciones de escala pequeña así que la formación de estructuras es de pequeño a grande, de acuerdo con las observaciones. Exceptuando al axion que se puede ligar de algún modo en el modelo estándar, las demás partículas surgen de teorías de supersimetría y de dimensiones extra [36].

La supersimetría se desarrolló para resolver problemas del modelo estándar como el problema de jerarquía y la unificación de las tres fuerzas fundamentales, lo cual da paso a teorías de gran unificación (GUT, por sus siglas en inglés). Dentro de estas teorías se predice el decaimiento del protón con una vida media  $\sim 10^{34}$  años, lo cual de momento no se ha observado, pero se busca por ejemplo en LHC y próximamente en Hyper-Kamiokande [37]. Un problema también de la supersimetría, es que no resuelve la discrepancia entre el valor observado y el calculado para la constante cosmológica, por lo cual queda trabajo por hacer, además que hasta este momento no hay indicios de la existencia de la supersimetría [38].

Por otro lado, es de interés que la supersimetría introduce partículas con las características de la materia oscura, como es el neutralino, que es neutro, de interacción débil y no-bariónico. Pertenece a la familia de los llamados WIMPs (*weakly interactive massive particles*). Un motivo por el cual los WIMPs han tomado fuerza como candidatos a materia oscura, es por el llamado *WIMP miracle*. El nombre proviene de que en modelos supersimétricos surgen partículas que satisfacen las propiedades para ser materia oscura, además de que la abundancia estimada para la materia oscura da una sección eficaz de auto-aniquilación que es consistente para partículas que interactúan por la fuerza débil [39]. Un problema con el escenario de WIMPs, es que se presentan discrepancias para la descripción de la distribución de la materia oscura a escalas pequeñas ( $\sim 1$  kpc), como es el problema de núcleo-cúspide (*core-cusp problem*), el cual es una discrepancia entre el perfil de densidad central de halo de materia oscura fría interactuante gravitacionalmente obtenida a través de simulaciones, con el inferido a partir de datos observacionales. Las simulaciones tienden a una cúspide en la región central, mientras que las observaciones tienden a mostrar un núcleo plano [40].

En teorías de dimensiones extra pueden surgir simetrías que dan lugar a partículas que son candidatos a materia oscura como se ha mencionado. Sin embargo, el problema con estas teorías es mayor pues incluso hay discusión en sí son teorías científicas, además, de ser teorías no triviales. Las dimensiones extras están compactas (comprimidas) y hay al menos  $10^{500}$  formas de compactar las dimensiones extra, así que es demasiado. Una forma posible de descubrir dimensiones extra, es que se detecte una pérdida de energía en un proceso, ya alguna partícula se movió en otra dimensión llevando consigo su energía, sin embargo, indicios de teorías de dimensiones extra han sido nulos [41, 42].

Si no se considera la supersimetría, además del axion se pueden considerar como candidatos al fotón oscuro, wimpzilla y más partículas. De forma similar, al no considerar CDM ni WIMP, hay escenarios de materia oscura auto-interactuante, materia oscura asimétrica, materia oscura difusa, materia oscura ultraligera y más [43, 44, 45].

El axion es una partícula hipotética originalmente propuesta para resolver el problema de CP fuerte, que es la conservación de simetría CP (carga-paridad) en la cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés) a pesar de que no hay ninguna necesidad o motivo por el cual QCD tenga que

conservar la simetría [46]. En el caso de que el axion sea de masa ligera, puede ser considerado como un candidato a materia oscura; en este escenario el axion es una partícula sin espín, con una masa de  $10^{-6} - 10^{-3}$  eV, y cuya interacción con la materia ordinaria es débil. Un método para la detección del axion, se basa en que la presencia de un campo magnético intenso en el cual el axion se convierte en fotones y viceversa, acto que es conocido como el efecto Primakoff. Empleando este método, ADMX (*Axion Dark Matter eXperiment*) ha excluido modelos de axion en algunos rangos del orden de  $\mu\text{eV}$  [47]. Otros experimentos se basan en medir retrocesos nucleares como CDMS y XENONnT, los cuales han excluido otras regiones [48, 49].

El fotón oscuro es un bosón masivo hipotético que funciona como mediador en la interacción de partículas del modelo estándar y el sector oscuro, el cual es un campo cuántico cuyas partículas no se han observado. Aparte de mediador, el fotón oscuro también es candidato a materia oscura y experimentos para su detección se pueden encontrar en el CERN [50, 51]. La interacción entre el sector oscuro y las partículas del modelo estándar, también podría ser mediada por axion o neutrino estéril, además, el bosón del Higgs podría interactuar con el sector oscuro por el portal de Higgs.

Hay varios candidatos y experimentos están siendo desarrollados, mientras otros ya han dado resultados con el objetivo de detectar la materia oscura. Distintos métodos por los cuales se lleva a cabo esta detección son descritos en la siguiente sección.

## 2.3. Detección

En esta sección, se toma en consideración lo mencionado en las pasadas dos secciones para tratar el tema de la detección de materia oscura. Se pueden clasificar tres métodos para la búsqueda de materia oscura: detección directa, detección indirecta y colisionadores de partículas.

### 2.3.1. Detección directa

Con la suposición que la Vía Láctea se encuentra dentro de un halo de materia oscura, se puede considerar que en el sistema solar hay cierta cantidad de materia oscura, en particular alrededor de la Tierra. La probabilidad de que una partícula de materia oscura, por ejemplo un WIMP, interactúe con un material, como puede ser un detector, depende de la masa y densidad del WIMP, y su interacción con la materia puede ser dependiente o independiente del espín. Tomando en cuenta lo anterior, en la detección directa se considera un modelo de partícula de materia oscura, WIMP, que interactúe con un núcleo del material sensible del detector por medio del proceso físico de dispersión elástica o inelástica, produciendo un retroceso nuclear (*recoil*) que deposita energía en el material. El proceso se puede escribir como

$$\chi + MS \rightarrow \chi + MS, \quad (2.1)$$

donde  $\chi$  es la partícula de materia oscura y  $MS$  la partícula del modelo estándar. La energía depositada puede ser medida de distintas formas, por ejemplo, por fonones (se miden las vibraciones de la red cristalina del material), ionización (el átomo queda cargado ya sea por la pérdida o ganancia de electrones), centelleo (tras la colisión se genera un pulso de luz), o por nucleación de burbujas (*bubble nucleation*).

Entre los experimentos de detección directa se encuentran CDMS [52, 53], PICO [54, 55], XENON[56, 57], LZ[58], DAMIC [59], CRESST [60]. CDMS mide por ionización y fonones con cristales de silicio y germanio, su versión actual es SuperCDMS. XENON mide por centelleo y ionización usando xenón líquido, y el más reciente sucesor es XENONnT. PICO emplea una cámara de burbujas para medir la nucleación de burbujas en  $C_3F_8$ , siendo la versión actual PICO-40L.

LZ es la unión de dos grupos (LUX-ZEPLIN) en la búsqueda de materia oscura por ionización y centelleo en xenón. CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) emplea detectores criogénicos para buscar materia oscura ligera con masas desde  $0.16 \text{ GeV}/c^2$ , midiendo simultáneamente fonones y fotones; se ha reportado un exceso de eventos de origen desconocido. DAMIC usa CCDs (*charged coupled devices*) para obtener imágenes de ionizaciones de posibles interacciones de materia oscura desde el halo galáctico; han reportado un exceso de eventos a bajo keV.

El objetivo de tener varios experimentos no es solamente trabajar en técnicas de reducción de ruido, análisis de datos y nuevos parámetros de búsqueda, sino que también para confirmar resultados en otros proyectos. DAMA/LIBRA (experimento de centelleo con ioduro de sodio  $NaI$ ) presentó resultados con una gran significancia en la señal de WIMP [61], sin embargo, el resultado no ha sido replicado y en particular COSINE-100 descartó que la señal sea interacción dependiente de espín WIMP-nucleón, y que parece ser que la señal es un efecto por el método de análisis de datos [62]. XENON1T observó un exceso en el retroceso de electrones [63], que se puede interpretar como el acoplamiento de axion-electrón al considerar el axion como partícula de materia oscura, aunque el exceso de retrocesos también puede ser producido por decaimientos beta de trazas de tritio (como contaminante del material sensible que es el xenón) dentro del xenón, lo cual es también uno de los problemas que enfrentan los experimentos de detección directa.

Los experimentos de detección directa son muy sensibles, así que uno de sus mayores obstáculos es la interacción de otras fuentes con el material sensible del detector, como puede ser la radioactividad ambiental generando decaimientos  $\alpha, \beta, \gamma$  y neutrones, y los rayos cósmicos que generan cascadas de partículas. Todas estas interacciones con otras fuentes, es decir, el ruido, se tratan de reducir empleando ciertos materiales en el diseño del detector y ubicando el experimento en minas o montañas para tener así un escudo de varios metros de roca. Es importante tomar en cuenta que tanto la roca, como los materiales empleados, también puede generar ruido de fondo en la medición al interactuar con el material sensible. Este ruido es principalmente por medio de las cadenas del uranio, torio, radón y plomo, y en los materiales también influye su pureza, o en otras palabras, la presencia de contaminantes. Es en esta parte en que las simulaciones toman importancia, pues permiten estimar el ruido producido por roca y materiales, lo cual permite determinar si una señal es parte del ruido o puede considerarse una detección de materia oscura. Otro detalle es que conforme se va mejorando la sensibilidad de los experimentos, se va acercando al ruido de fondo de neutrinos, que en principio es un ruido irreducible.

### 2.3.2. Detección indirecta

La detección indirecta se basa en medir los resultados de alguna aniquilación o decaimiento de materia oscura, y se puede escribir el proceso como

$$\chi + \bar{\chi} \rightarrow MS, \quad (2.2)$$

con  $\chi$  la partícula de materia oscura,  $\bar{\chi}$  la antipartícula de materia oscura, y  $MS$  una partícula del modelo estándar. Por ejemplo, la aniquilación de WIPMs en el espacio vacío podría generar fotones muy energéticos (en un rango de energía de 1 a 1000 GeV), que después interactúan con la atmosfera generando cascadas de partículas. Existen dos posibilidades para detectar estos rayos gamma, con observatorios en órbita (antes de que interactúen con la atmósfera) como es *Fermi Gamma-ray Space Telescope* [64], y con telescopios terrestres como HAWC (*High-Altitude Water Cherenkov Observatory*) [65], MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope*) [66] y próximamente CTA (*Cherenkov Telescope Array*) [67].

Otro método de detección indirecta es utilizar la razón de antimateria-materia en rayos cósmicos, la cual decrece conforme aumenta la energía, mientras que con la presencia de aniquilación de

materia oscura, la razón crecería. Con esta idea hay experimentos como PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Experiment and Light-nuclei Astrophysics*) [68], DAMPE (*Dark Matter Particle Explorer*) [69] y AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*) [70].

### 2.3.3. Colisionadores de partículas

El tercer método de detección consiste en producir partículas de materia oscura en colisionadores de partículas como el LHC. Al colisionar dos partículas, por ejemplo protones, a altas energías, existe la posibilidad de generar una partícula de materia oscura y su correspondiente antipartícula. La presencia de la partícula de materia oscura se inferiría al final de los eventos al existir una pérdida de energía y momento, ya que la partícula de materia oscura interactuaría débilmente con la materia ordinaria y escaparía sin ser notada pero llevándose su masa-energía. El proceso es

$$pp \rightarrow \chi\bar{\chi} + X. \quad (2.3)$$

En este caso  $\chi$  representa la partícula de materia oscura y  $\bar{\chi}$  su antipartícula,  $X$  representa un extra que puede ser fotón, bosones  $W$   $Z$  en un decaimiento leptónico o un jet hadrónico. Los experimentos CMS y ATLAS han buscado partículas nuevas relacionadas con modelos supersimétricos y extra dimensionales, encontrando hasta la fecha resultados nulos, pues todo concuerda con el modelo estándar.

## Capítulo 3

# Cámara de burbujas PICO-40L

La colaboración PICO surgió de la unión de PICASSO (*Project In CANada to Search for Supersymmetric Objects*) [71, 72] y COUPP (*Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics*) [73, 74] con el objetivo de detectar materia oscura de forma directa. Para la detección directa se emplea una cámara de burbujas, idea que los proyectos anteriores ya habían desarrollado, PICASSO usando como material sensible  $C_4F_{10}$  y COUPP con  $CF_3I$ .

Los experimentos desarrollados por la colaboración consisten de PICO-2L [54], PICO-60L [55], PICO-40L [76] y en desarrollo PICO-500L. El presente trabajo se enfoca en PICO-40L, que como material activo utiliza el octafluoropropano ( $C_3F_8$ ), el cual es una sustancia sintética no inflamable y no tóxica. Por ello se han de dar primero bases, como la idea y funcionamiento de una cámara de burbujas.

### 3.1. Cámara de burbujas

Las cámaras de burbujas son altamente sensibles y aprovechan la transición de fase de líquido a gas. El funcionamiento de una cámara de burbujas se puede describir mediante los siguientes pasos.

- El recipiente es llenado con líquido sobrecalentado justo por debajo del punto de ebullición.
- Con un pistón se disminuye la presión a temperatura constante, provocando que el líquido entre en un estado metaestable.
- Cuando una partícula entra al recipiente, deposita energía en el líquido generando que el fluido hierva localmente nucleando una burbuja a escalas macroscópicas.
- La densidad de burbujas es proporcional a la energía perdida por la partícula al interactuar con el líquido en estado metaestable.

La formación de burbujas en regiones calientes y localizadas es descrito por el modelo de nucleación de Seitz (*hot spike model*) [75]. El proceso consiste en dos partes, iniciando con una partícula energética que transfiere su momento al núcleo atómico formando una burbuja, para después pasar a una fase de crecimiento obteniendo una burbuja macroscópica. Para la primera etapa, una burbuja en equilibrio mecánico está sujeta a distintas fuerzas: la presión del vapor hacia afuera, la presión de la tensión superficial actuando para colapsar la burbuja, y la presión del fluido empujando hacia adentro. Así, la condición para el radio crítico de una burbuja ( $r_c$ ) es

$$r_c = \frac{2\kappa}{P_v - P_l}, \quad (3.1)$$

donde  $\kappa$  es la tensión superficial,  $P_v$  la presión de vapor dentro de la burbuja, y  $P_l$  la presión líquida que suprime la burbuja. La condición para que una burbuja continúe con su crecimiento se puede expresar como

$$P_b - P_l \geq \frac{2\kappa}{r_c}, \quad (3.2)$$

con  $P_b$  la presión interna de la burbuja que la impulsa a crecer y que es levemente menor que la presión de vapor  $P_v$ . Al sumar la energía superficial y de vaporación para una burbuja de radio  $r_c$ , se obtiene la energía necesaria para formar una burbuja de radio  $r_c$

$$E_m = 4\pi\kappa r_c^2 + \frac{4\pi}{3}r_c^3 nH. \quad (3.3)$$

En este caso,  $n$  es el número de moles por unidad de volumen a la presión de equilibrio, y  $H$  es el calor latente por mol. Esto indica que una burbuja se forma si se deposita suficiente energía a lo largo de una longitud crítica  $l_c$ . Se puede expresar el promedio de la energía depositada ( $E_{dep}$ ) por unidad de distancia como

$$\frac{dE_{dep}}{dx} \geq \frac{E_m}{l_c}. \quad (3.4)$$

El umbral de energía ( $E_{th}$ ) que se tiene que superar para el crecimiento de una burbuja se expresa

$$E_{th} = 4\pi r_c^2 \left( \kappa - T \frac{\partial \kappa}{\partial T} \right) + \frac{4\pi}{3} r_c^3 \rho_v h. \quad (3.5)$$

La primera parte de la expresión es para la energía superficial, mientras que el segundo es del calor latente, con  $\rho_v$  la densidad de vapor de la burbuja. Finalmente, cuando una energía mayor a  $E_{th}$  es depositada en un radio menor a  $r_c$  se obtiene una burbuja capaz de superar la tensión superficial y alcanzar escalas macroscópicas. Un detalle importante de este proceso, es que para ciertos materiales sensibles en la cámara de burbujas, se puede reducir el ruido de fondo producido por retrocesos de electrón, ya que la energía depositada no se encuentra lo suficientemente localizada para formar una burbuja, es decir, la energía se deposita en un radio mayor a  $r_c$ . Esta es una de las razones por las que PICO-40L usa como material activo octafluoropropano, ya que cualitativamente es mejor que el  $CF_3I$  para rechazar retrocesos de electrón. Además, la formación de la burbuja va acompañada por una onda acústica de impacto que es grabada por transductores piezoeléctricos (*piezoelectric transducers*), los cuales suelen estar ubicados en las paredes del detector y ayudan para la eliminación de ruido.

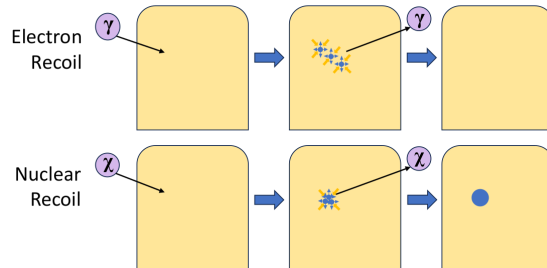


Figura 3.1: El retroceso de electrón no es lo suficientemente localizado para crear una burbuja, como se observa en la parte superior del diagrama. Por otro lado, el retroceso nuclear que se observa en la parte inferior sí es lo suficientemente localizado para crear una burbuja.

Entre los éxitos de cámaras de burbujas está el descubrimiento de la corriente neutra que dio paso a detectar los bosones  $W$  y  $Z$  [77, 78]. Para la búsqueda de WIMPs las cámaras de burbujas



son una opción, pues se pueden medir las energías de retrocesos nucleares, que en el caso particular de PICO, se puede operar a umbrales de energía bajos hasta 2.45 keV para retrocesos nucleares. En este caso, los detectores se han de diseñar para operar a las presiones más bajas posibles para minimizar el umbral de retroceso nuclear, mientras se maximiza el umbral del retroceso de electrón.

### 3.2. Detector PICO-40L

El laboratorio subterráneo SNOLAB otorga un escudo de radiación cósmica por sus 2 km de tierra. Además, hay un cuarto limpio para que la presencia de polvo u otros contaminantes sea mínimo, lo cual propicia un ambiente adecuado para el estudio de interacciones débiles como es la detección de neutrinos o materia oscura.

PICO-40L se encuentra dentro de un tanque de agua en una caverna de las instalaciones subterráneas de SNOLAB. El objetivo de PICO-40L es determinar la viabilidad del diseño RSU (*Right Side Up*) para futuros detectores como PICO-500L. El diseño RSU significa que en comparación al detector PICO-60L, el envase está rotado 180°. Esto se puede observar de forma simple en la Figura 3.2 al ver las posiciones de las cámaras.

El recipiente de presión es de acero inoxidable y contiene aceite mineral, el cual cubre por completo un frasco de cuarzo dentro del cual se halla el material activo  $C_3F_8$ . El recipiente de presión contiene tres acumuladores que permiten una rápida compresión de las burbujas generadas. La recompresión de las burbujas antes de que crezcan demasiado es útil, ya que permite reducir el tiempo requerido para que la cámara de burbujas complete un ciclo y pueda regresar a un estado activo. Para la temperatura de operación en el rango de 12-18 °C, la presión del  $C_3F_8$  se encuentra en el rango de 90-110 psia.

El recipiente de cuarzo, que contiene el  $C_3F_8$ , permite una observación clara de la formación de burbujas, el cambio del volumen líquido con cambios mínimos en la presión, y otorga conexiones a tuberías que no son fuentes de nucleación de burbujas. El volumen total de  $C_3F_8$  contenido es de 44.9 a 51.5 L, de los cuales 38-45 L se encuentran en la región caliente,  $\sim 15^\circ\text{C}$ , que representa el volumen supercalentado activo. Un volumen activo de 40 L, corresponde a un blanco de 45 kg de flúor. La región fría se encuentra  $\sim -25^\circ\text{C}$  que es el resto del volumen de  $C_3F_8$  no activo. El sistema termal de acuerdo con el diseño de PICO-40L permite tener control de la temperatura.

PICO-40L cuenta con cuatro cámaras monocromáticas que se encuentran dentro de un recipiente de agua con anillos LED. Cada anillo LED consta de 48 LEDs rojos, con lo cual se da la luz necesaria para las imágenes producidas por las cuatro cámaras, y así identificar las burbujas y realizar la reconstrucción de las coordenadas espaciales del evento en el frasco de cuarzo. Arriba del recipiente de presión hay secciones cónicas de lámina retrorreflektante, y del mismo modo, la parte de atrás del recipiente de presión se encuentra cubierta por una lámina retrorreflektante. Las láminas retrorreflektantes iluminan las burbujas por atrás al reflejar de regreso a las cámaras la luz LED [76].

Durante la formación de burbujas, se emplean 12 sensores piezoeléctricos para la lectura de las ondas acústicas. Con la lectura de las ondas acústicas se puede determinar la amplitud de la onda en el momento de la formación de burbujas, lo cual ayuda a la reducción de ruido de fondo para el análisis de datos (ver 3.3.2.).

La interacción entre la materia ordinaria y la materia oscura puede ser dependiente o independiente del espín, por lo cual se han de explorar ambas posibilidades, y PICO es sensible a ambas opciones. En particular, el flúor es más sensible a las interacciones dependientes del espín, mientras que el yodo, xenón y argón permiten explorar de mejor forma secciones eficaces independientes del espín. Esto le permite a PICO-40L imponer mejores límites para las interacciones dependientes del espín, en comparación con los experimentos LZ, XENONnT y PandaX-4T (*Particle and*

*Astrophysical Xenon Detector*) que usan como material sensible xenón [57, 58, 79].

Implementación tecnológica que diferencia PICO-40L de su antecesor PICO-60L, es su diseño RSU, por sus siglas en inglés *right side up*, lo cual permite eliminar ruido de fondo inducido por el agua que amortigua los pistones que comprimen al octafluoropropano, que en PICO-60L funcionó para aislar los componentes del acero inoxidable con el volumen activo ( $C_3F_8$ ). Además, incluye un nuevo sistema termal que otorga un mayor control al modificar la temperatura y presión para determinar el umbral de energía para el detector. De este modo, el detector se enfoca en disminuir el ruido de fondo de neutrones y mejorar la sensibilidad en un orden de magnitud en comparación a PICO-60L.

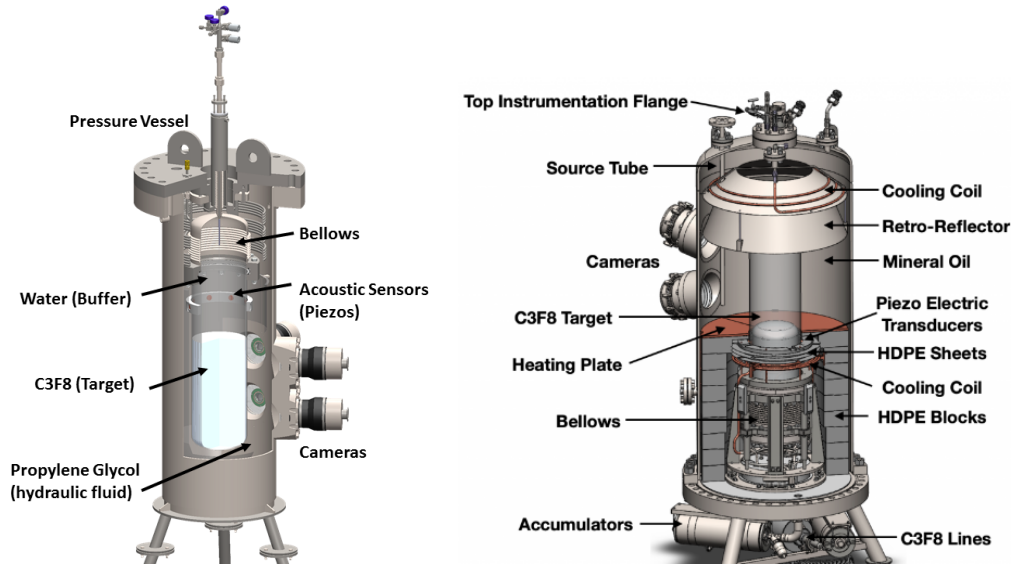


Figura 3.2: A la izquierda se muestra un diagrama para PICO-60L, mientras que a la derecha se observa el de PICO-40L [55, 76].

Un estudio de las proyecciones del detector PICO-40L, considerando un umbral de energía de 3.29 keV y con una masa de 45.3 kg de flúor (el volumen activo de 40 L del octafluoropropano  $C_3F_8$ ) durante una corrida de toma de datos de un año (188 días efectivos), estima una mejora en comparación a PICO-60L. En particular, para una masa WIMP de 25 GeV/ $c^2$  con una interacción independiente del espín, la mejora es de 3.3, mientras que para la interacción dependiente del espín la mejora es de 2.6. En la Figura 3.3 se observan las gráficas de proyecciones para PICO-40L en comparación con PICO-60L, donde se aprecia la mejora del alcance del detector en comparación con su predecesor [80].

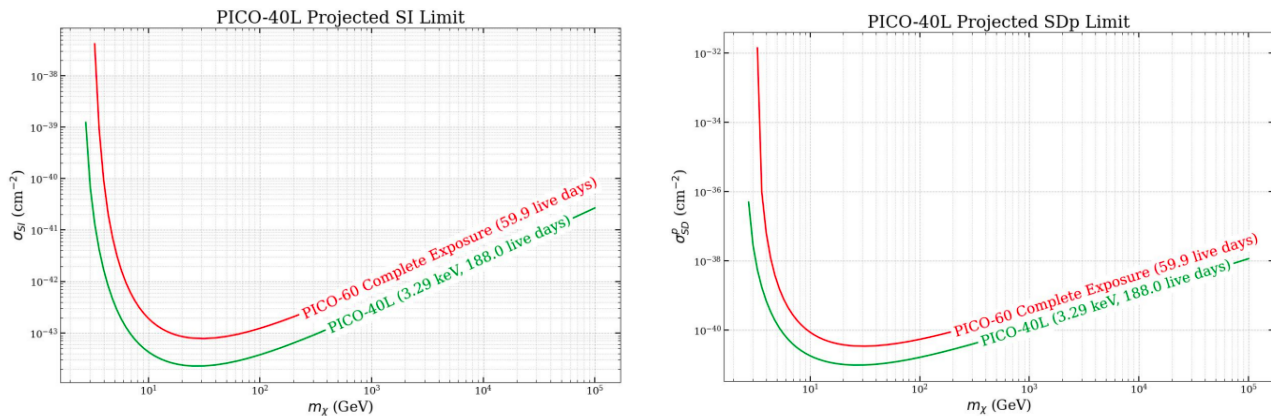


Figura 3.3: A la izquierda se observa la proyección para la interacción independiente del espín, mientras que a la derecha se presenta para la interacción dependiente del espín.

### 3.3. Ruidos de fondo

Las energías de retroceso nuclear que se buscan medir en el experimento PICO-40L (y en general en los experimentos de detección directa de materia oscura) son pequeñas ( $\sim$  keV), con lo cual se requiere una gran sensibilidad del detector, así como una reducción del ruido. Los 2 km de roca que cubren el laboratorio otorgan poco más de 6000 metros de agua equivalente como barrera contra rayos cósmicos, obteniendo una reducción del ruido ambiental, sin embargo, mediante otros procesos se podrían obtener señales que generen ruido para las mediciones sensibles que se buscan realizar. Entre estas otras fuentes de ruido se encuentra la radiación gamma, las partículas alfa y los neutrones.

#### 3.3.1. Radiación gamma

Rayos gamma generados por los decaimientos de los isótopos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$ , que se pueden encontrar en los materiales del detector, pueden interactuar con la nube de electrones del material sensible generando un retroceso de electrón. Teniendo un control adecuado de la presión permite rechazar las nucleaciones por retrocesos de electrón (modelo de Seitz, ecuación (3.1)). Un modelo alternativo postula que en fluidos ligeros, como el  $\text{C}_3\text{F}_8$ , la nucleación de burbujas por radiación gamma se podría dar por ionización a través de electrones- $\delta$  y no por la energía del modelo de nucleación de Seitz, con lo cual se obtiene un grado de libertad extra que se puede usar para reducir el umbral de retroceso nuclear para la materia oscura sin introducir el ruido de retroceso de electrones [81].

También se ha hecho mención que en materiales con alto número atómico ( $Z$ ), como el yodo, se puede dar un proceso de nucleación por cascadas de Auger. Para eliminar este mecanismo de producción de ruido, basta con limitar la exposición del detector con contaminantes de alto  $Z$ . De este modo se puede entender que el  $\text{C}_3\text{F}_8$  alcance umbrales bajos para WIMP en comparación de usar  $\text{CF}_3\text{I}$ .

#### 3.3.2. Partículas alfa

La cadena de desintegración del  $^{222}\text{Rn}$ , que se origina de la cadena del  $^{238}\text{U}$ , proporciona la mayor contribución al ruido de decaimientos alfa. Otras cadenas de desintegración que generan partículas alfa como ruido son las de  $^{232}\text{Th}$  y  $^{235}\text{U}$ . Estas partículas alfa pueden depositar energía en el  $\text{C}_3\text{F}_8$  generando una nucleación como si fuera un retroceso nuclear. Sin embargo, se pueden

diferenciar las burbujas inducidas por partículas alfa de las inducidas por neutrones, ya que las primeras son mucho más ruidosas, como se observa en la Figura 3.4. De este modo, empleando el parámetro acústico AP (*acoustic parameter*) se puede medir el poder acústico, con lo cual se diferencia un proceso generado por partícula alfa de un retroceso nuclear [71].

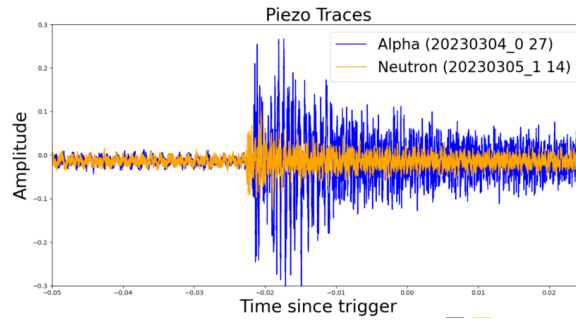


Figura 3.4: Diferencia en la amplitud entre un evento originado por una partícula alfa y un neutrón.

### 3.3.3. Rayos cósmicos

Cuando una partícula de los rayos cósmicos, principalmente protones, interactúa con un núcleo de la atmósfera, se producen una gran cantidad de partículas secundarias. Estas partículas secundarias suelen ser en un inicio mesones ligeros que decaen en el aire originando más partículas, como muones, y radiación electromagnética.

A la superficie terrestre pueden llegar muones, neutrones, electrones y fotones, los cuales se convierten en ruido para los detectores. Los electrones y muones van perdiendo su energía al ir interactuando con la materia, principalmente por radiación Bremsstrahlung, sin embargo, la radiación Bremsstrahlung de los electrones es  $\sim 40,000$  veces la del muon, es decir, los electrones se frenan en la materia mucho más rápido que los muones. Por esto los muones pueden penetrar mucho más profundo en la tierra y llegar incluso a las profundidades donde se encuentran los experimentos subterráneos. La ubicación de los experimentos subterráneos permite reducir el ruido de fondo por rayos cósmicos, sin embargo, los muones aún puede llegar a los detectores, por lo cual es necesario determinar su presencia ya que pueden inducir señales no deseadas a las mediciones.

### 3.3.4. Neutrones

Los neutrones pueden interactuar con el  $C_3F_8$  y producir un retroceso nuclear similar al que daría un WIMP, lo que convierte a los neutrones en una fuente de ruido que es importante reducir. Los neutrones como fuente de ruido se pueden clasificar en dos categorías: cosmogénicos y radiogénicos.

Los neutrones cosmogénicos se originan por la interacción entre rayos cósmicos y los componentes del detector. Si bien los 6 km de agua equivalente de blindaje disminuyen significativamente el flujo de rayos cósmicos, partículas muy energéticas, como los muones ( $\mu$ ), son capaces de atravesar la roca. Estos muones pueden intercambiar un fotón virtual con un núcleo, lo que genera nuevos hadrones como los neutrones. Los rayos cósmicos también generan cascadas hadrónicas, en las cuales un  $\pi^-$  puede colisionar con núcleos de varios protones, lo que genera neutrones ultraenergéticos, los cuales a su vez al colisionar pueden dar origen a núcleos excitados de donde se pueden generar neutrones de baja energía que componen el ruido de fondo.

Por otro lado, los neutrones radiogénicos se originan por la fisión espontánea, reacciones  $(\alpha, n)$  y neutrones ambientales. La contribución de neutrones por fisión espontánea se da por las trazas

de  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  presentes en los materiales utilizados en el detector. Por este motivo, es importante conocer la composición y concentración de elementos en los materiales empleados para la construcción del detector. La contribución de reacciones  $(\alpha, n)$  proviene de las cadenas de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y el  $^{232}\text{Th}$ , donde se produce una partícula alfa que puede interactuar dando como resultado un neutrón. Los neutrones ambientales tienen su origen en los gases radioactivos que se encuentran en el laboratorio como el radón, el cual puede decaer emitiendo neutrones o gammas que podrían interactuar con el detector.

Mediante simulaciones de Monte Carlo, se puede estimar la cantidad de neutrones que interactúan con el  $\text{C}_3\text{F}_8$  para así mitigar el ruido de fondo generado por los neutrones. En particular en PICO-40L, los neutrones son propensos a dispersar varias veces, lo que genera eventos con múltiples burbujas, lo que permite diferenciar estos eventos con los de WIMP, que sólo darían una burbuja. Además, el uso de las simulaciones de Monte Carlo también permiten establecer la radiopureza de los componentes que serán empleados en el experimento.

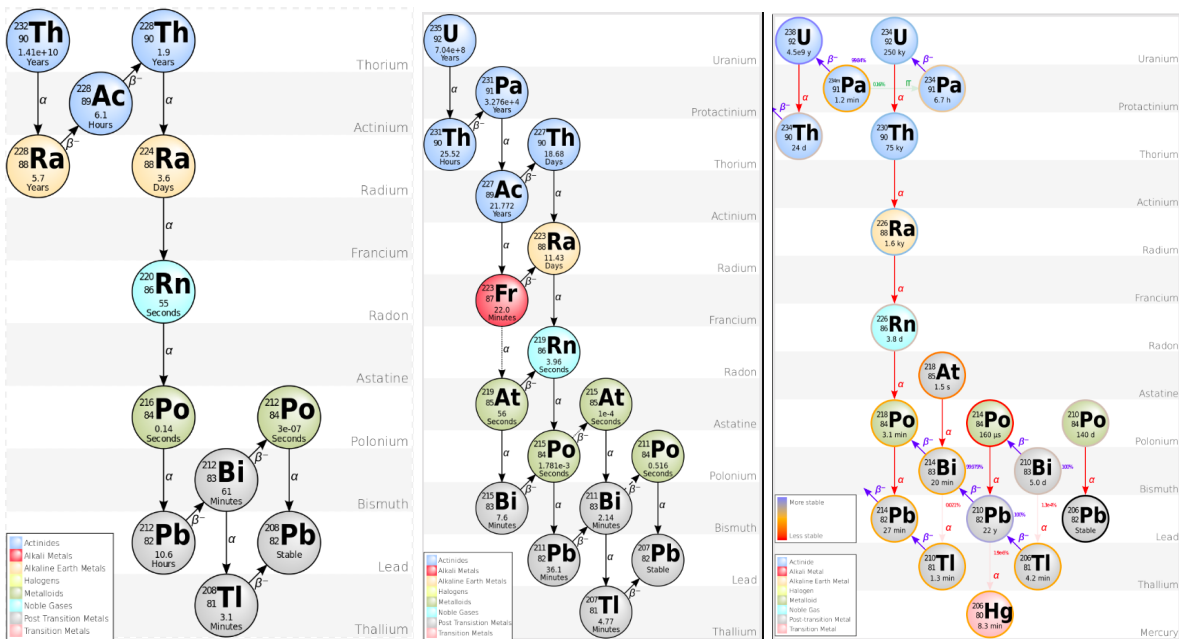


Figura 3.5: Cadena de decaimiento del  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ . Imágenes obtenidas de Wikipedia [82, 83].

# Capítulo 4

## Simulaciones y resultados

### 4.1. GEANT4 y el método de Monte Carlo

Para la resolución de problemas matemáticos en los cuales resulta complicado obtener una respuesta exacta (analítica), es conveniente buscar una solución numérica. El método de Monte Carlo es estadístico-numérico, en el que mediante la generación de números pseudoaleatorios es posible obtener un resultado al problema. La simulación por Monte Carlo es un proceso iterativo, con lo que se han de generar varias variables pseudoaleatorias para obtener una serie de posibles soluciones al problema, y así, proporcionar al final la solución con la mayor probabilidad de ocurrencia.

La simulación del paso de las partículas a través de la materia, se puede realizar por medio del software GEANT4 [84, 85, 86], el cual usa el lenguaje de programación C++ y emplea el método de Monte Carlo.

Para realizar las simulaciones en GEANT4, se requiere tener una caracterización del detector, para lo cual se necesita de un sistema de referencia global, el cual es dado por el volumen mundo (*world*). A partir del sistema de referencia global se describen las geometrías del experimento, cada una con un sistema de referencia local, a las cuales se les asignan propiedades de acuerdo a su material. Dentro del volumen mundo se definen el resto de volúmenes, dando así la jerarquía de volumen madre y volumen hija. El volumen hija va de acuerdo al sistema coordinado de su volumen madre (que en el caso global es el volumen mundo) y queda completamente contenido en él. La geometría del experimento se define empleando la clase `DetectorConstruction`, la cual consiste de volúmenes lógicos y físicos. El volumen lógico contiene la forma, dimensión, material, sensibilidad, atributos de visualización, campos magnéticos, límites y la posición de los volúmenes hijas de la geometría, mientras que el volumen físico da el posicionamiento del volumen de acuerdo con el sistema de coordenadas de su volumen madre. La definición de materiales es por medio de la clase `G4Material`, en la que se permite asociar un nombre a un material creado con las propiedades del material, como pueden ser su número atómico, masa atómica, densidad, temperatura y presión, aunque no es necesario dar todas las propiedades al definir un material.

La clase `G4VUserPrimaryGeneratorAction` controla la generación de partículas primarias, esto es, qué clase de partícula, con qué energía, cuántas partículas, su posición, su dirección, polarización y entre otras propiedades. Para satisfacer requerimientos de modelos complejos, se emplean comandos UI (*User Interface*) para utilizar `G4GeneralParticleSource` (GPS). Entre los requerimientos, se tiene la determinación de la forma de emisión, por ejemplo, puntual o plana, así como una emisión angular. GPS también da la posibilidad de que la energía cinética de las partículas primarias sea aleatoria así como el uso de distintas fuentes.

Para que en la simulación se puedan describir los procesos físicos que ocurren, se requiere de

un modelo que ha de depender del experimento. En el caso de PICO-40L, que es un detector subterráneo que opera en un rango de energías de keV hasta pocos MeV, se emplea la lista de física *shielding*. Esta lista otorga la mejor descripción para los procesos electromagnéticos y hadrónicos en las simulaciones que se realizan para PICO-40L.

La simulación de Monte Carlo usando GEANT4 para la interacción de partículas con el medio, se puede describir como un proceso iterativo donde primero se toma el camino libre medio para los procesos físicos asociados a la partícula de forma independiente del medio. En un segundo paso se considera la sección eficaz de la interacción de la partícula con el material en el que se encuentra en ese momento la partícula, convirtiendo el camino libre medio en longitudes físicas. El proceso con menor longitud física es como se transporta la partícula. Finalmente, si la partícula sobrevive después de la interacción, se repite el muestreo tomando de nuevo los caminos libres medios. Para el caso en que la partícula desaparece tras la interacción, da por terminado el proceso.

Para la realización de las simulaciones, se emplearon macros, en los cuales se especifica la cantidad de eventos a generar, su ubicación de origen ya sea un componente del detector o la roca Norita, y su espectro de energías correspondiente al componente o roca. El espectro de energías a cada componente se obtuvo por medio de datos existentes del software SOURCES 4C [87].

Para el análisis de los resultados de las simulaciones y obtención de gráficas, se empleó el software ROOT [88] escrito en C++ desarrollado para el análisis de datos científicos.

Empleando el clúster Graham de Compute Canada, se ejecutaron varios paquetes (*jobs*) en paralelo que generan los macros a ejecutar para la simulación, y así, reducir el tiempo en la generación de datos.

## 4.2. Descripción del detector

Para el presente trabajo, la geometría base del detector PICO-40L fue proporcionada por la colaboración PICO, en particular, el grupo de investigación del Instituto de Física de la UNAM es responsable de este código y coordina las actividades de simulaciones de la colaboración. Debido a esto, modificaciones realizadas a la geometría fueron menores. En la Figura 4.1 se muestra la representación del detector en GEANT4.

Lo primero, fue realizar una comparación de todos los componentes y los materiales definidos en GEANT4 con los datos que se tienen en el CAD (*computer-aided design*), con la intención de determinar cambios o actualizaciones que debían ser efectuadas en el código. El primer cambio fue la actualización del material de la caverna en SNOLAB, la roca llamada Norita. Norita consta de doce componentes ( $H, C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Mn, Fe, Ti$ ) y posee una densidad de  $2.894 \text{ g/cm}^3$ . Para las simulaciones de neutrones de la roca se consideraron los casos de dos y tres metros de grosor de Norita como se observa en la Figura 4.2, la cual es una representación de la caverna en SNOLAB donde se encuentra el detector PICO-40L.

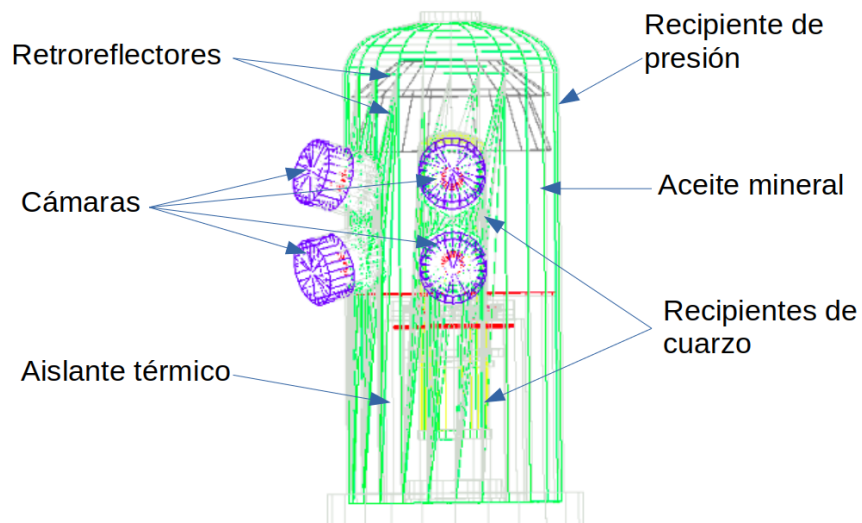


Figura 4.1: Representación del detector PICO-40L en GEANT4. En la presente representación se muestra el recipiente de presión, las cuatro cámara y parte de los componentes internos. El aceite mineral (de color verde) llena por completo al recipiente de presión, y el material activo se encuentra dentro de los recipientes de cuarzo.

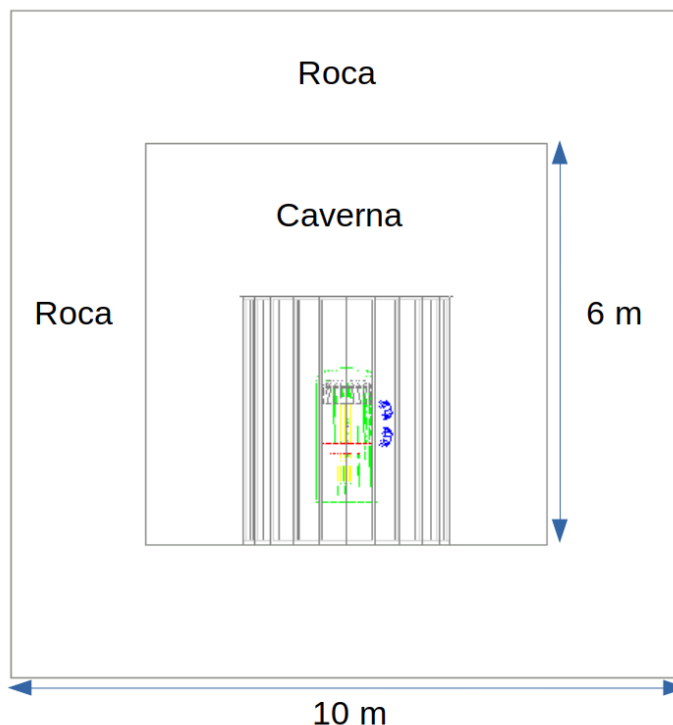


Figura 4.2: Regrepresentación de la caverna de SNOLAB con el detector PICO-40L. Se consideran dos metros de roca Norita alrededor de la caverna de  $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$  donde se encuentra el detector. En la imagen se presenta el caso de dos metros de roca Norita. El detector se ubica dentro de un tanque (de color gris).

El recipiente de presión (PV) es de acero inoxidable 304. Es definido a partir de nueve compo-



nentes,  $0.6827 Fe$ ,  $0.19 Cr$ ,  $0.095 Ni$ ,  $0.01 Si$ ,  $0.02 Mn$ ,  $0.001 N$ ,  $0.0007 C$ ,  $0.00045 P$  y  $0.00015 S$ , con una densidad de  $8 \text{ g/cm}^3$ . En el diseño del PV hay presentes cuatro espacios para el sistema óptico (las cámaras) de PICO-40L, y contiene por completo al resto de los componentes del detector.

El aceite mineral llena totalmente al recipiente de presión y posee la funcionalidad de amortiguar las expansiones y compresiones efectuadas en el detector al realizar cambios para las mediciones. También otorga un baño térmico a los componentes que se encuentran sumergidos en él. La definición del aceite mineral se empleó por medio de fracciones de sus componentes,  $0.8563\%$  de  $C$  y  $0.1437\%$  de  $H$ , con una densidad de  $0.77 \text{ g/cm}^3$ . El aceite mineral cubre por completo el recipiente de cuarzo que contiene al material activo  $C_3F_8$ , como se muestra en la Figura 4.3, así como al sistema termal, los piezoeléctricos y los retroreflectores. Como el aceite mineral llena por completo el recipiente de presión, al crear el volumen en GEANT4 se han de tener en consideración los espacios (huecos) para la colocación de las cuatro cámaras.

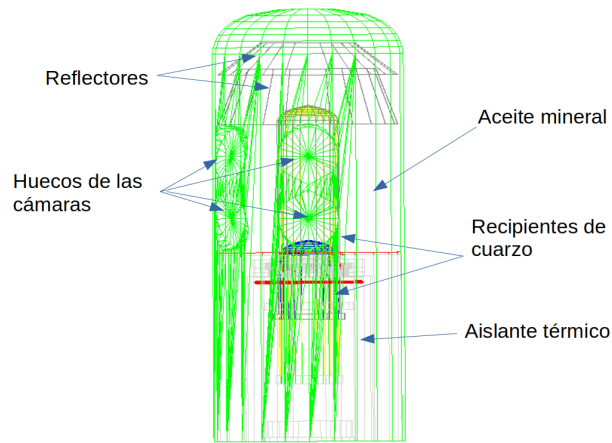


Figura 4.3: El aceite mineral representado de color verde, contiene por completo los retroreflectores, el cuarzo, los piezos y el aislante térmico. Con flechas se indican parte de los componentes.

Como se mencionó en la sección 3.2, el octafluoropropano ( $C_3F_8$ ) se encuentra separado en dos regiones, una sobrecalentada a  $\sim 15^\circ\text{C}$  que actúa como la región activa, y otra región fría a  $\sim -25^\circ\text{C}$  no activa, que se mantiene en contacto con componentes de acero inoxidable. Un recipiente de cuarzo, que permite la observación de burbujas, controlar el volumen del líquido y dar conexiones a tuberías que no introducen ruido por nucleación de burbujas, contiene la parte activa como se presenta en la Figura 4.4. El cuarzo se definió como  $SiO_2$  y con una densidad de  $2.2 \text{ g/cm}^3$ . El recipiente de cuarzo que se encuentra en el interior del octafluoropropano posee una cúpula, que es en donde se ha de realizar un corte a los datos que se analicen para no incluir eventos que ocurran en esta región, que si bien es de la parte sobrecalentada del material activo, los eventos pueden ser consecuencia de las paredes del detector.

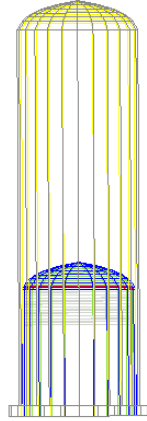


Figura 4.4: En color gris se encuentra el recipiente de cuarzo que contiene por completo la región activa del  $C_3F_8$  de color amarillo. Dentro se observa un segundo recipiente de cuarzo (color azul) que contiene aceite mineral y el control de calor interno.

El octafluoropropano es una sustancia sintética no tóxica que tiene aplicaciones en la medicina (mejora la señal de ultrasonidos y en cirugías de ojo) y en su forma gaseosa tiene un mayor impacto al efecto invernadero que el dióxido de carbono. Para la colaboración PICO, el octafluoropropano es el material activo para la detección directa de materia oscura. La parte activa del  $C_3F_8$  se encuentra sobrecalentada, y se definió con una densidad de  $1.3768 \text{ g/cm}^3$ . En la Figura 4.5 se indican las dos regiones activa y no-activa del octafluoropropano. Como se ha mencionado con anterioridad, el flúor es más sensible a interacciones dependientes del espín, por lo que se espera obtener mejores límites para esta clase de interacción. La presencia de otros elementos pesados en la región activa del detector es una fuente de ruido originado por nucleación de cascadas de Auger, que contienen electrones Auger (electrones sensibles a la autoabsorción) y rayos-X de baja energía, pero al considerar sus contribuciones en total pueden alcanzar una energía que supere el umbral de Seitz. Por este motivo es importante evitar la contaminación de la región activa con otros elementos.

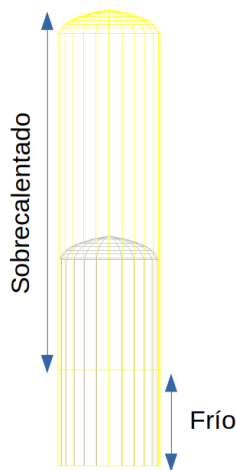


Figura 4.5: Representación del  $C_3F_8$  de color amarillo. Se indica la región activa (sobrecalentado) y la fría. Se observa también el recipiente de cuarzo contenido en el  $C_3F_8$  de color gris.

En la Figura 4.6 se muestra una representación de una cámara, la cual se encuentra dentro de agua y se aprecia el anillo con las luces LED. La cámara se definió con el material de aluminio,  $Al$ , con una densidad de  $2.7 \text{ g/cm}^3$ . Las luces LED se definieron como un compuesto de  $0.25$  de  $Al$ ,  $P$ ,  $Ga$  e  $In$  cada uno, con una densidad de  $1.75 \text{ g/cm}^3$ . El lente también es de aluminio, mientras que la ventana es de cuarzo y es sostenida por un recipiente de acero inoxidable 304.

En total, el sistema óptico es compuesto por cuatro cámaras monocromáticas Basler ace acA1920-155um emparejadas con lentes varifocales Kowa LMVZ4411, que observan al interior del detector en un ángulo de  $(+14 \pm 10)^\circ$  desde arriba y  $(-14 \pm 10)^\circ$  desde abajo. Cada cámara se encuentra encerrada en un recipiente de agua con sus anillos LED personalizados e intercambiadores de calor. El equipo de la cámara opera a temperaturas menores al tanque de agua para evitar introducir ruido térmico al detector. Las 48 luces LED (modelo XPEPHR-L1-0000-00801 de Cree) se ubican en un anillo que se encuentra equipado con difusores de luz y un sello que evitan que la luz de los LEDs ingrese de forma directa a las cámaras.

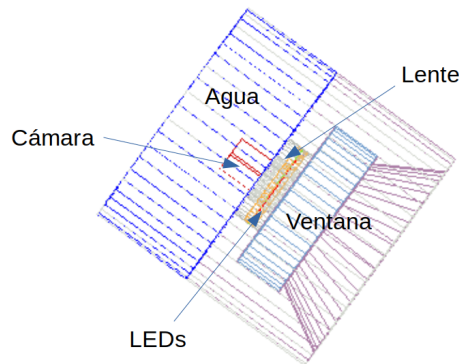


Figura 4.6: Representación de una cámara de PICO-40L donde se indican las posiciones de algunos componentes.

Para el análisis acústico se utilizan los piezoeléctricos, los cuales como se muestran en la Figura 4.7, se ubican alrededor del recipiente de cuarzo. Esto otorga la ventaja de que al haber una simetría cilíndrica, basta con estimar la contribución de ruido de fondo de un piezo y multiplicarla por doce. Los piezos son sostenidos por un recipiente cilíndrico de polietileno (PE).

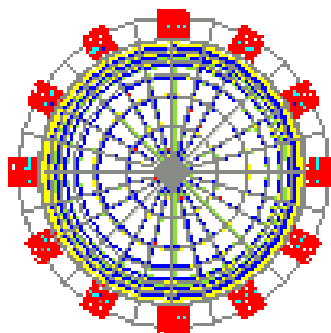


Figura 4.7: Vista desde arriba del detector para mostrar los doce piezoeléctricos que se encuentran alrededor del recipiente de cuarzo. Para que se distingan bien los piezos de color rojo, el soporte de PE para los piezos no es visible en la imagen.

Cada piezoeléctrico consta de un cilindro de cobre que contiene un disco de PCB y el piezo para realizar el análisis acústico, como se observa en la Figura 4.8. Los piezos se definieron como una composición de 0.6 *O*, 0.2 *Pb*, 0.1 *Ti* y 0.1 *Zr*, con una densidad de  $7.5 \text{ g/cm}^3$ . Notar que la presencia del *Pb* indica que también se han de realizar las simulaciones de Monte Carlo requeridas para calcular la contribución a la señal por el decaimiento del isótopo  $^{210}\text{Pb}$  que se encuentra por trazas de forma natural.

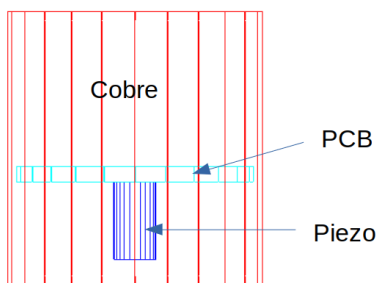


Figura 4.8: Representación de uno de los doce piezoeléctricos. EL cilindro es de cobre y en su interior por medio de flechas se indican los componentes de PCB y el piezo.

La parte trasera del recipiente de presión es cubierta por láminas retroreflectoras. Arriba del recipiente de presión también se encuentran dos secciones cónicas de láminas retroreflectoras. Las láminas retroreflectoras son de acero inoxidable, y se encargan de reflejar la luz difusa LED de regreso a las cámaras, permitiendo iluminar las burbujas por detrás.

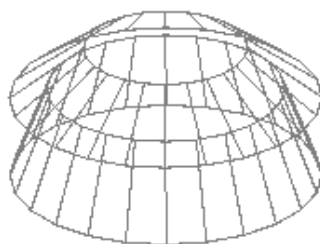


Figura 4.9: Representación de las dos secciones cónicas de retroreflectores.

El disco de cobre se encuentra dentro del aceite mineral que llena al recipiente de calor, mientras que el plato de cobre está en aceite mineral dentro de un recipiente de cuarzo. Ambos materiales son de cobre, por lo que su densidad es  $8.96 \text{ g/cm}^3$ . Estos discos se encargan de sostener al aislante térmico y el arreglo interno de los recipientes de cuarzo.

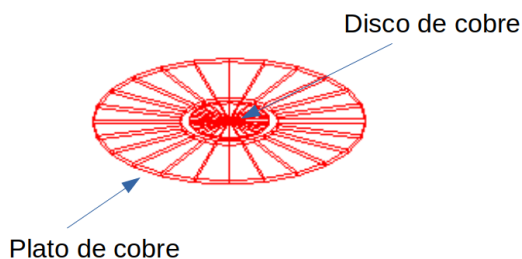


Figura 4.10: El disco y plato de cobre indicados respectivamente.

El aislante térmico se halla dentro del aceite mineral y cubre a los piezos, el recipiente de cuarzo bajo (que contiene la región fría del octafluoropropano) y parte del recipiente de cuarzo con la región activa del  $C_3F_8$ , en particular cubre hasta la cúpula del recipiente interno de cuarzo. Es de material polietileno (PE), constituido por 0.8563 de  $C$  y 0.1437 de  $H$ , con una densidad de  $0.91 \text{ g/cm}^3$ .

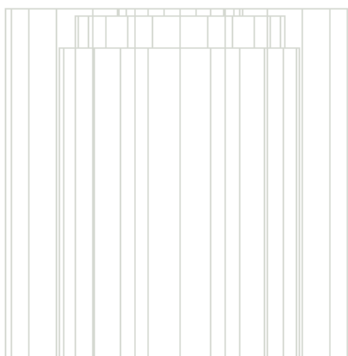


Figura 4.11: Representación del aislante térmico en GEANT4 desde una vista lateral.

Para la medición de la temperatura dentro del recipiente de presión y del agua, se emplean 54 sensores RTD (*Resistance Temperature Detectors*). En la geometría de GEANT4 los sensores no son incluidos, pero se pueden realizar las estimaciones de su contribución a la señal al simular eventos confinados en la posición de los sensores.

### 4.3. Simulaciones y análisis

Para estimar el ruido de fondo de neutrones inducido por los componentes del detector, se emplearon las cadenas del  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ . Es de importancia tener en consideración que la abundancia natural del isótopo  $^{232}\text{Th}$  en el torio es del 0.9998, la abundancia del isótopo  $^{238}\text{U}$  en el uranio es 0.9928 y la abundancia del isótopo  $^{235}\text{U}$  en el uranio es 0.0072. De este modo se obtiene información de como escalar los resultados en simulaciones considerando la abundancia de cada isótopo que se emplea. Para algunos componentes, la cadena del  $^{238}\text{U}$  fue separada en dos partes, una alta y una baja, con la intención de estudiar la cadena de decaimiento antes y después de que surja el isótopo  $^{222}\text{Rn}$ , el cual es un gas con vida media de 3.82 días, así que por los tiempos de vida, se puede romper el equilibrio radiactivo, por lo que conviene romper en dos la cadena. El hecho que el isótopo  $^{222}\text{Rn}$  sea gaseoso y con una vida media considerable, da opción a que pueda permear roca y sólidos permitiendo así que sus productos de decaimiento puedan depositar energía en el material sensible del detector.

El flujo de neutrones esperado por cada isótopo para cada componente se calcula como

$$f_n \left[ \frac{n}{yr} \right] = m[g] \times P[ppb] \times Y \left[ \frac{n}{g \cdot ppb \cdot yr} \right], \quad (4.1)$$

donde  $m$  es la masa,  $P$  la pureza y  $Y$  el rendimiento (*yield*). Las unidades para cada cantidad se indican entre los corchetes, siendo  $[n]$  unidad de número de neutrones,  $[g]$  gramos,  $[yr]$  años y  $[ppb]$  partes por mil millones ( $10^9$ ). Utilizando la información de los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3, se puede sustituir en la ecuación 4.1 y así, obtener el flujo de neutrones emitidos al año para cada componente. Como su nombre lo indica,  $f_n$  indica la cantidad estimada de neutrones que serán emitidos en un año por un componente del detector, lo cual es de importancia para las simulaciones al hacer la estimación de interacciones de neutrones con el octafluoropropano.

Una vez que se obtiene el flujo de neutrones al año, se considera el número de eventos simulados para cada componente para determinar el tiempo equivalente  $t_{eq}$ , el cual representa el tiempo de emisión simulado. Se calcula como

$$t_{eq}[yr] = \frac{e[n]}{f_n[n/yr]}, \quad (4.2)$$

con  $e$  representando la cantidad de eventos (neutrones) simulados para cada componente. Las unidades se mencionan nuevamente entre corchetes. En las simulaciones se pueden realizar una gran cantidad de eventos, lo cual permite obtener mejores estimaciones de las señales de ruido (método de Monte Carlo), pero para hacer una estimación adecuada de la contribución a la señal observada en la toma de datos producida por los ruidos de fondo, es importante conocer el tiempo simulado y el tiempo de toma de datos para así realizar las equivalencias respectivas.

Componente	Rendimiento				$\frac{n}{s \cdot g \cdot ppb}$
	$^{232}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$ alta	$^{238}\text{U}$ baja	
OV (IV)	$6.31 \times 10^{-12}$	$9.13 \times 10^{-11}$	$1.47 \times 10^{-11}$	$1.25 \times 10^{-12}$	-
PV	$6.23 \times 10^{-12}$	$2.42 \times 10^{-11}$	$1.36 \times 10^{-11}$	$8.68 \times 10^{-13}$	-
Reflector (A, B)	$8.20 \times 10^{-11}$	$1.05 \times 10^{-9}$	$1.80 \times 10^{-11}$	$1.47 \times 10^{-10}$	-
PCB (cámara)	$4.419 \times 10^{-12}$	$6.854 \times 10^{-11}$	$1.503 \times 10^{-11}$	$9.314 \times 10^{-12}$	-
Cu (disco, plato)	$7.335 \times 10^{-13}$	$1.176 \times 10^{-12}$	$1.362 \times 10^{-11}$	$5.219 \times 10^{-13}$	-
Aislante térmico	$4.10 \times 10^{-12}$	$6.34 \times 10^{-11}$	$1.49 \times 10^{-11}$	$8.63 \times 10^{-12}$	-
Al (cámara, lente)	$8.198 \times 10^{-11}$	$1.054 \times 10^{-9}$	$1.798 \times 10^{-11}$	$1.468 \times 10^{-10}$	-
LEDs	$1.284 \times 10^{-11}$	$1.655 \times 10^{-10}$	$1.362 \times 10^{-11}$	$2.317 \times 10^{-11}$	-
Aceite mineral	$3.137 \times 10^{-12}$	$4.842 \times 10^{-11}$	$1.463 \times 10^{-11}$	$6.604 \times 10^{-12}$	-
Piezo	$1.412 \times 10^{-12}$	$1.176 \times 10^{-12}$	$1.468 \times 10^{-11}$	-	$5.175 \times 10^{-8}$
RTD	$7.335 \times 10^{-13}$	$1.176 \times 10^{-12}$	$1.362 \times 10^{-11}$	-	$5.175 \times 10^{-8}$

Cuadro 4.1: Componentes y el rendimiento para cada cadena. La cadena del  $^{238}\text{U}$  está separada en alta y baja. Notar las unidades del Rendimiento, van como  $[1/s]$ , mientras que en la fórmula 4.1 se requiere que la unidad de tiempo sea en años no segundos, por lo cual es importante incluir un factor de conversión al efectuar el cálculo. Datos obtenidos de SOURCES-4C [87].

Componente	Pureza [ppb]				
	$^{232}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$ alta	$^{238}\text{U}$ baja	$^{210}\text{Pb}$
OV (IV)	$<6.268 \times 10^{-4}$	$<6.898 \times 10^{-4}$	$<6.898 \times 10^{-4}$	$<6.898 \times 10^{-4}$	-
PV	$0.77 \pm 0.13$	$5.56 \pm 1.04$	$5.81 \pm 1.51$	$0.28 \pm 0.05$	-
Reflector (A, B)	$52.51 \pm 6.87$	$50.20 \pm 53.56$	$<46.07$	$57.42 \pm 3.08$	-
PCB (piezo)	$4.94 \pm 7.01$	$28.95 \pm 48.12$	$2.25 \pm 48.66$	$17.48 \pm 3.07$	-
PCB (cámara)	$245.05 \pm 20.78$	$147.90 \pm 80.63$	$257.22 \pm 119.50$	$61.68 \pm 6.01$	-
Cu (piezo)	$0.03 \pm 1.08$	$8.35 \pm 13.03$	$18.92 \pm 14.17$	$0.35 \pm 0.44$	-
Cu (disco, plato)	$<0.21$	$<3.59$	$3.13 \pm 3.48$	$0.08 \pm 0.11$	-
Aislante térmico	$<0.12$	$<1.27$	$<0.94$	$<2.26 \times 10^{-2}$	-
Al (cámara)	$371.30 \pm 14.97$	$30.73 \pm 6.74$	$<61.13$	$151.46 \pm 6.14$	-
Al (lente)	$331.12 \pm 18.21$	$2247.52 \pm 278.43$	$1003.59 \pm 218.21$	$201.04 \pm 11.24$	-
LEDs	$<108.86$	$352.62 \pm 141.83$	$55.44 \pm 25.11$	$32.74 \pm 35.85$	-
Aceite mineral	$<0.076$	$0.205 \pm 1.141$	$<0.317$	$<0.014$	-
Piezo	$1.32 \pm 1.01$	$<0.25$	$0.22 \pm 0.29$	-	$35.413 \pm 5.28$
RTD	$<6.174$	$5.67 \pm 6.37$	$<15.67$	$<1.05$	$<96.9$

Cuadro 4.2: Componentes y su respectiva pureza para las cadenas correspondientes. Se separa la cadena del  $^{238}\text{U}$  en dos partes. Datos obtenidos en el laboratorio SNOLAB con detectores de germanio de alta pureza (HPGe) [89].

Componente	Masa [g]
OV	11630
IV	7980
PV	429098
Reflector A	166.72
Reflector B	206.25
Piezoeléctrico (PCB)	1.3
Piezoeléctrico (Cu)	46.26
Piezo	1.34
Disco de cobre	3114.51
Plato de cobre	37469.23
Aislante térmico	254920
Camera (Al )	98.6
Camera (PCB)	40.5
Lente	55
LEDs	1.92
Aceite mineral	788797.1

Cuadro 4.3: Masa de los distintos componentes simulados.

Las simulaciones se realizaron en el clúster Graham, de Compute Canada. Para ello se crearon paquetes que generen los macros correspondientes, donde se simula la emisión isotrópica de neutrones producidos por cada cadena de decaimiento desde el componente a analizar. Un ejemplo de un paquete se encuentra en el Apéndice C. En general, se mandaron 30 paquetes por cadena de componente donde se simularon 150000 eventos por paquete, por lo que al final hay  $4.5 \times 10^6$  simulaciones para cada cadena de decaimiento para cada componente. Sin embargo, no todos los macros son buenos, pues en algunos casos se presentaron violaciones de segmento o casos en los que la simulación no se terminó en el tiempo estipulado y esos eventos no se contabilizan para el análisis.

Es de importancia determinar la posición precisa de cada componente en el marco de referencia global y sus dimensiones, para así lograr confinar correctamente los eventos simulados al componente correspondiente. Considerando todo lo anterior, se realizaron las simulaciones con las cadenas de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja, para cada componente.

Para el caso de los neutrones provenientes de la roca Norita, se tuvieron en consideración dos casos. Para el primer caso se considera la ubicación del detector dentro de un tanque vacío, mientras que en el segundo caso, el tanque es llenado con agua. En el caso de los neutrones, el principal mecanismo de pérdida de energía es por la dispersión elástica, así que si  $E_0$  es la energía inicial del neutrón, la energía del neutrón dispersado  $E$  se encuentra limitada por [90]

$$\left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 E_0 < E < E_0, \quad (4.3)$$

donde  $A$  representa la masa atómica del material con el cual interactúa el neutrón. En el caso en que  $A = 1$  (interacción con un protón), se podría frenar por completo al neutrón. Debido a esto, la utilización de materiales hidrogenados, como agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) o parafina ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ) aumenta el frenado de los neutrones al interactuar con la materia. Esta justificación indica que al llenar el contenedor de agua donde se ubica el detector PICO-40L, se espera que el ruido inducido por neutrones provenientes de la roca Norita sea altamente reducido.



Las cadenas analizadas para la roca Norita fueron  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja, que como se mencionó en la sección 3.3.4, dan la principal contribución de neutrones radiogénicos.

Los resultados de las simulaciones en GEANT4 para cada componente por paquete enviado a Graham, se dan en cuatro archivos root. Los archivos se sumaron para obtener un sólo archivo root con los resultados de las simulaciones por paquete. Esto último, significa que si se enviaron 100 paquetes para un componente, al final hay 100 archivos root para el componente, los cuales a su vez se pueden sumar en un solo archivo para el análisis.

El análisis se efectuó en ROOT empleando un código, el cual lee el archivo root que va guardado indicando el componente y la cadena de decaimiento simulado. La información del componente, masa, rendimiento, pureza y número de eventos simulados para cada componente se encuentra en un archivo csv, el cual es leído por el código de análisis. Esta parte es importante tener la información actualizada del componente, pues estos valores tienen importancia para la determinación del flujo de neutrones y las razones de burbujas producidas.

Después de que el código lee la información del archivo root, determina si hubo un retroceso nuclear en el carbono o en el flúor, que en caso de ser así, se genera un número pseudo-aleatorio que se compara con la evaluación de la energía depositada por la interacción en la función de eficiencia del carbono o flúor respectivamente. Es importante señalar que en esta parte del análisis, el código no sigue el modelo de nucleación de burbujas de Seitz, ya que es un modelo incompleto. En su lugar, se emplea un modelo empírico con las eficiencias de interacción del carbono y el flúor, en ambos casos empleando una función escalonada [91]. En la Figura 4.12 se muestran las funciones del modelo empírico en función de la energía para los retrocesos en el carbono y el flúor.

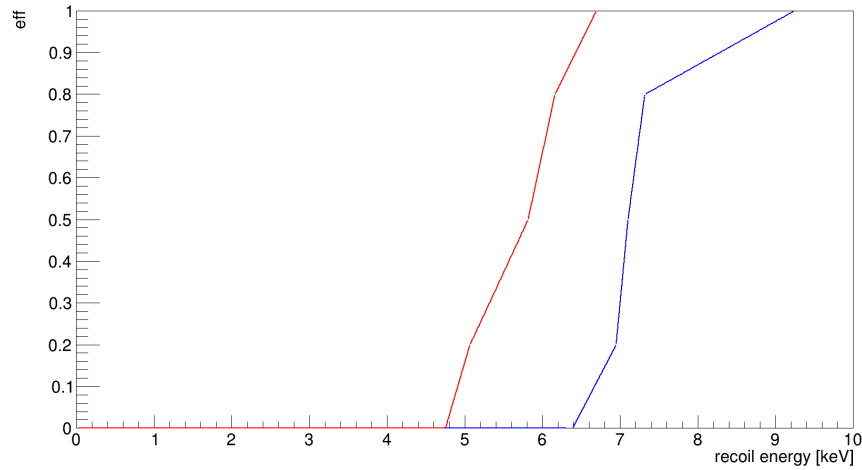


Figura 4.12: De color azul se presenta la función escalón para la eficiencia del carbono en función de la energía, mientras que de color rojo es para el flúor.

Una vez que se determinan los eventos a analizar, se cuentan la cantidad de eventos, en este caso burbujas, generados en la interacción. Para ello se inicializa primero un arreglo en el que se guarda la cantidad de burbujas y permite hacer la distinción de cuando se tiene un evento individual y cuando múltiples, para así guardar estas cantidades aparte.

Después, con la información del archivo csv, el código usa la ecuación (4.1) multiplicada por un factor de conversión de unidades de tiempo (la ecuación está en 1/años, mientras que la información del rendimiento está en 1/segundos) para la determinación del flujo de neutrones.

La cantidad de eventos individuales al año se estiman como

$$\text{individuales al año} = f_n \left[ \frac{n}{yr} \right] \times \frac{\text{eventos individuales [una burbuja]}}{\text{eventos simulados}[n]}. \quad (4.4)$$

De manera similar, la cantidad de múltiples se estiman como

$$\text{múltiples al año} = f_n \left[ \frac{n}{yr} \right] \times \frac{\text{eventos múltiples [burbujas]}}{\text{eventos simulados}[n]}. \quad (4.5)$$

Ambas estimaciones se les asocia una incertidumbre, que considera los errores por la masa, el rendimiento y la pureza, y se calcula como

$$\text{incertidumbre} = \text{individuales (múltiples) al año} \times \sqrt{(0.01)^2 + (0.1)^2 + \left( \frac{\Delta \text{pureza}}{\text{pureza}} \right)^2}. \quad (4.6)$$

El término 0.01 proviene del error en la masa, mientras que el término 0.1 viene del error en las secciones eficaces utilizadas por SOURCES-4C en la obtención de los rendimientos.

Finalmente, el código guarda los resultados en un archivo de salida. Los histogramas generados son de la producción de burbujas, así como la cantidad de eventos individuales y múltiples en función de la energía.

Un detalle a tener en consideración, es que al realizar el análisis en el código hay que implementar un corte sobre el eje z de los eventos a considerar. Como se puede apreciar en la Figura 4.5, dentro del material activo hay un recipiente de cuarzo, por lo cual eventos generados alrededor de la cúpula del recipiente no son ideales para el análisis. En la Figura 4.13 se comparan dos gráficos de Z vs R al considerar el corte o no. El corte ha de ser arriba de la cúpula del recipiente de cuarzo, por lo cual se requirió identificar la posición exacta, para así analizar solamente los eventos que ocurran en la región activa por encima del recipiente interno de cuarzo.

Cabe mencionar, que el análisis para los neutrones que llegan a la roca es diferente. En primer lugar se determinó la superficie de la caverna (216 m<sup>2</sup>), y considerando que en SNOLAB llegan 4000 n/m<sup>2</sup> al día [92], se calculó la cantidad de neutrones esperados en la caverna. Posteriormente, a través de un análisis estadístico se determinó que de la cantidad original de neutrones simulados, solo el 4.9% llegan al laboratorio. Con esta consideración se calculó el tiempo equivalente simulado empleando la ecuación (4.2). Con el código de análisis podemos determinar los eventos individuales y múltiples que ocurrieron durante el periodo simulado, lo cual al comparar con lo esperado, permite estimar la contribución proveniente por neutrones de la roca Norita.

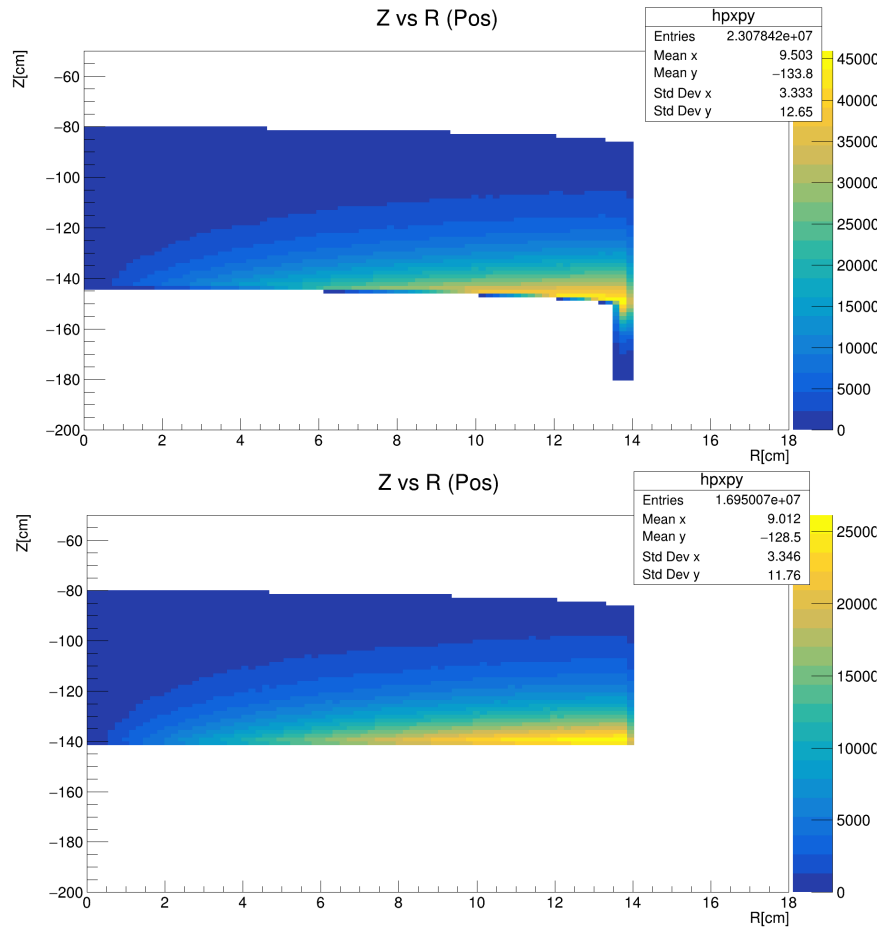


Figura 4.13: Arriba se observa un gráfico de Z vs R al no considerar el corte en el eje z, mientras que en el gráfico inferior sí es considerado el corte. Las gráficas son para el componente disco de cobre para la cadena  $^{238}\text{U}$ .

## 4.4. Resultados

### 4.4.1. Componentes

Por medio del código de análisis, se puede determinar si un evento generó una única burbuja o múltiples burbujas. Las interacciones de WIMP-nucleón generan una nucleación, es decir, se observa una única burbuja. De este modo, el interés principal radica en determinar la contribución de eventos que generan una sola burbuja debido a los componentes del detector. Al final del análisis se espera una mayor cantidad de eventos múltiples que individuales, aunque al aumentar la multiplicidad de la burbujas, se disminuye su producción. Esto se observa en la Figura 4.14, donde se presenta la multiplicidad de burbujas generadas para la cadena  $^{232}\text{Th}$  para el disco de cobre del detector.

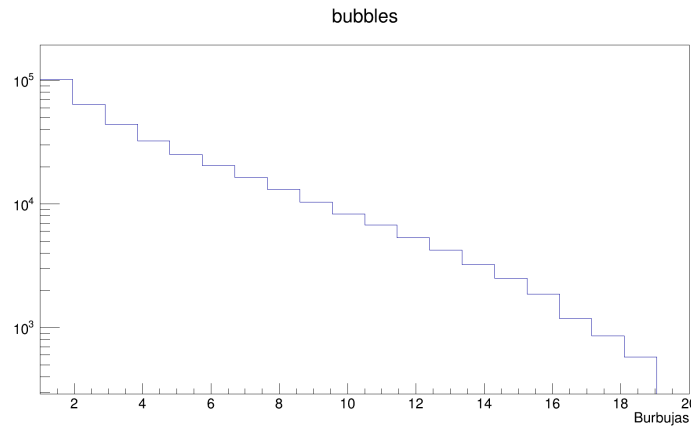


Figura 4.14: La producción de burbujas se reduce al aumentar su multiplicidad, sin embargo, al final la suma de los eventos múltiples supera a los eventos de una sola burbuja.

También es de importancia identificar la energía depositada durante la nucleación. Las gráficas en la Figura 4.15, representan el espectro de energía para los eventos de múltiples burbujas y de una sola burbuja. Al comparar ambas gráficas, se observa que efectivamente se analizan más eventos múltiples que individuales.

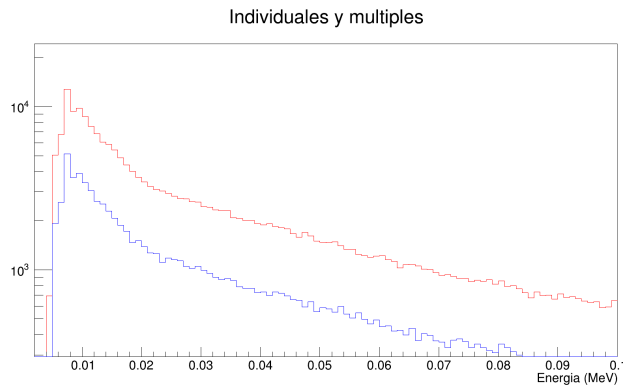


Figura 4.15: Espectro de energías de la cadena  $^{232}\text{Th}$  del componente disco de cobre del detector. De color rojo el espectro para múltiples y de azul para individuales.

En el Cuadro 4.4 se presentan los resultados de la cantidad de individuales y múltiples generados durante un año. Los números reportados son la suma de las contribuciones de las cadenas  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{210}\text{Pb}$  para los componentes indicados. La contribución a los eventos en un año procedentes de los componentes se estima

$$\begin{aligned} \text{individuales en un año} &= 4.52 \pm 0.97, \\ \text{múltiples en un año} &= 10.76 \pm 2.28. \end{aligned}$$

De un trabajo preliminar de la colaboración, empleando fuentes de calibración de neutrones, se estimó la razón de eventos individuales y múltiples del orden del 31.5% [93]. Los resultados obtenidos en el presente trabajo por medio de simulaciones, se encuentran de acuerdo con las estimaciones realizadas con fuentes de calibración. En el caso particular del piezo, la razón de los valores centrales está en el orden del 44%, sin embargo, al incluir las incertidumbres se puede encontrar en el orden del 30.8%, por lo que sigue estando en de acuerdo con el análisis preliminar realizado por la colaboración.

Componente	individuales/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
OV	0.69 $\pm$ 0.08	1.78 $\pm$ 0.23
IV	0.09 $\pm$ 0.01	0.20 $\pm$ 0.02
PV	13.78 $\pm$ 3.81	28.70 $\pm$ 7.90
Reflector A	1.45 $\pm$ 0.23	3.66 $\pm$ 0.56
Reflector B	7.97 $\pm$ 1.21	20.33 $\pm$ 3.08
Piezoeléctrico (PCB)	0.76 $\pm$ 0.30	1.73 $\pm$ 0.67
Piezoeléctrico (Cu)	18.64 $\pm$ 14.13	44.09 $\pm$ 33.41
Piezo	3577.2 $\pm$ 643.2	8394 $\pm$ 1508
Disco Cu	113.07 $\pm$ 125.84	274.64 $\pm$ 305.69
Plato Cu	98.26 $\pm$ 109.42	221.64 $\pm$ 246.85
Aislante térmico	11.31 $\pm$ 1.57	24.49 $\pm$ 3.39
Cámara (Al)	1.89 $\pm$ 0.20	5.39 $\pm$ 0.67
Cámara (PCB)	1.40 $\pm$ 0.40	3.37 $\pm$ 0.98
Lente	5.39 $\pm$ 1.15	14.53 $\pm$ 3.11
LEDs	0.003 $\pm$ 0.001	0.010 $\pm$ 0.003
Aceite mineral	569.30 $\pm$ 58.10	1472.03 $\pm$ 150.16
RTD	103 $\pm$ 10	247 $\pm$ 25
Total	4523 $\pm$ 975	10757 $\pm$ 2285

Cuadro 4.4: Estimaciones de eventos de una burbuja y múltiples esperados en un año por varios componentes.

En los resultados del Cuadro 4.4 se observa que en algunos casos el valor de múltiples o singletes esperados al año es menor a su incertidumbre. Esto es debido a que la pureza de algunos componentes solo se obtuvo por medio de límites, y que en otros la incertidumbre gobierna sobre el valor central (ver Cuadro 4.2).

Notar que la mayor contribución de eventos de una sola burbuja provienen del piezo, principalmente por la cadena del  $^{210}\text{Pb}$  en su composición. En una menor cantidad, pero como la segunda mayor contribución a eventos de una burbuja, está el aceite mineral. Estos dos componentes son los que otorgan la mayor contribución a la señal de ruido de fondo para el detector.

#### 4.4.2. Estudio de eventos esperados de la roca Norita

Para las simulaciones de la roca Norita, al tener 4000 neutrones por  $\text{m}^2$  al día en la caverna de SNOLAB, y que la superficie de la caverna son  $216 \text{ m}^2$ , se estima que en un día llegan 864000 neutrones.

Se realizaron simulaciones considerando dos escenarios diferentes. El primer escenario fue colocar el detector en un tanque vacío, mientras que el segundo caso es llenar el tanque con agua.

Para el primer caso se realizó una prueba de toma de datos, a la cual se espera la finalización de su análisis para comparar sus resultados con los obtenidos en el presente trabajo por medio de simulaciones de Monte Carlo. Esto permite determinar si el Monte Carlo funciona debidamente, pues se espera que las predicciones realizadas en este trabajo se encuentren de acuerdo con el análisis de la toma de datos. Para esa comparación, se simularon las cadenas  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja, considerando un grosor de dos y tres metros de roca Norita.

Para el segundo caso, se simularon de nuevo las cadenas  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja, solo que ahora el tanque se llenó con agua. La toma de datos correcta del detector PICO-40L será justamente con el tanque lleno de agua, pues como se mencionó anteriormente, esto puede frenar por completo a los neutrones que provengan de la roca mitigando una fuente de ruido. Por este

motivo, el análisis de los ruidos de fondo por neutrones que se presenta en este trabajo, considera el caso del detector dentro del tanque lleno de agua en los resultados finales de las estimaciones realizadas en Monte Carlo.

Al igual que en las simulaciones realizadas en los componentes, no todos los paquetes son buenos para el análisis, lo cual se ha de tener en cuenta para determinar la cantidad de eventos estimados en un año.

El Cuadro 4.5 presenta los eventos individuales y múltiples esperados en veinte días por neutrones de la roca Norita, mostrando el cambio de llenar el tanque de agua o que sea aire considerando dos y tres metros de roca. Los resultados indicados son la suma de las contribuciones de las cadenas  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja.

Roca	individuales/mes	múltiples/mes
con aire dos metros	43.9	98.64
con aire tres metros	16.87	61.83
con agua	0	0

Cuadro 4.5: Valores obtenidos para la roca al considerar dos y tres metros de grosor de Norita con el contenedor vacío y lleno de agua.

Notar que al llenar el tanque de agua, la cantidad de eventos producidos por neutrones de la roca se reducen a cero. La reducción se esperaba de lo que indica la teoría, y en las simulaciones se observa que se cumple justamente esta parte. Como no se observan eventos, se puede imponer un límite al considerar que se esperaban 2.3 eventos en total (de las tres cadenas simuladas), y así considerando el tiempo equivalente se determina al 90 % de nivel de confianza una cota para la cantidad de eventos. Esta consideración, otorga un límite de 0.72 eventos al año. Un detalle, es que en la simulación no se observaron eventos individuales ni múltiples, así que el límite impuesto sería el mismo para eventos de una burbuja que para eventos de varias burbujas.

Al comparar los eventos esperados en aire para dos o tres metros de roca, se observa que en el segundo caso hay una disminución en la cantidad de eventos. Una posible explicación a la reducción de eventos, es que al haber un mayor espacio para la generación de neutrones, aumentan las distancias a recorrer así como las interacciones, por lo que los neutrones podrían perder una mayor cantidad de energía y frenarse antes de llegar al material sensible o llegar con una energía pequeña que no genera una nucleación.

## Capítulo 5

# Conclusiones

Empleando simulaciones por método de Monte Carlo usando GEANT4, se lograron obtener estimaciones de los ruidos de fondo por neutrones generados por las cadenas del  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja, para varios componentes del detector de materia oscura PICO-40L. De este modo, se estimó la cantidad total de eventos de una sola burbuja generados en el detector durante un año debido a los componentes del mismo, así como la cantidad total de múltiples al año. Como era de esperar, hay una mayor cantidad de eventos múltiples que de eventos individuales.

Para el caso de los piezos, parte del material que los compone es  $\text{Pb}$ , por lo cual se tuvieron que desarrollar también simulaciones de la cadena del plomo por las trazas del isótopo  $^{210}\text{Pb}$  para los piezos, así que la contribución al ruido de fondo por los piezos aumenta también por los materiales que lo componen, además de que la mayor contribución de eventos del piezo justamente provienen de la cadena del  $^{210}\text{Pb}$ .

Del análisis de las simulaciones, se estima que al final en una toma de datos de un año, la contribución a la señal de eventos de una burbuja debida a ruidos de fondo por los componentes es  $4.5 \pm 0.9$ .

De los resultados obtenidos por las simulaciones, se puede determinar la influencia de los componentes en la señal obtenida para la toma de datos. Hay componentes cuya contribución es más importante que otros, con lo cual se pueden buscar desarrollar futuras modificaciones a los materiales o diseño, para reducir el ruido de fondo generado por estos componentes.

Se logró obtener una estimación de la contribución de neutrones de la roca Norita para el detector PICO-40L, empleando las cadenas de decaimiento del  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  alta y  $^{238}\text{U}$  baja. De acuerdo a como se esperaba por la teoría, el llenar el tanque con agua reduce el ruido de fondo. También se realiza una comparación al considerar dos o tres metros de grosor de Norita, lo que permite observar el efecto de la cantidad de roca que rodea la caverna donde se ha instalado el detector PICO-40L y determinar si el Monte Carlo se encuentra de acuerdo con los datos tomados en el experimento.

Al asumir dos metros de roca, se estimó 43.9 eventos individuales al mes y 98.64 múltiples al mes. En el caso de tener tres metros de roca se estimaron 16.87 eventos individuales y 61.83 múltiples al mes. Con este estudio, se espera que se termine el análisis de datos del experimento para determinar si la predicción realizada por el Monte Carlo en este trabajo se encuentra de acuerdo.

Al llenar el tanque de agua, la cantidad de eventos de una burbuja y de múltiples burbujas, se redujeron a cero. Esto indica que la implementación de llenar el tanque de agua permite reducir efectivamente una fuente de ruido, como son los neutrones producidos en la roca. Como no se observan eventos, se pueden imponer límites al asumir 2.3 eventos en el total de simulaciones. De este modo, a un nivel de confianza del 90 % se estima que la cantidad de eventos de una burbuja

en un año es menor a 0.7. El límite es impuesto tanto para eventos de una burbuja como para eventos múltiples, pues en ambos casos no se observaron eventos.

De lo anterior, se puede dar las estimaciones de eventos por ruidos de fondo en el detector PICO-40L por distintas contribuciones como se presenta en el Cuadro 5.1. Como el detector va a realizar la toma de datos con el tanque lleno con agua, la contribución total de eventos estimados toma en consideración este caso, pues como se mencionó en la sección 4.4.2, las simulaciones con el tanque vacío son para determinar si el Monte Carlo funciona adecuadamente.

Contribución	individuales al año	múltiples al año
Componentes	$4.52 \pm 0.97$	$10.76 \pm 2.28$
Roca (tanque con agua)	$<0.725$	$<0.725$
Espalación de neutrones	$<0.1$	$<0.3$
Por dispersión $\nu - X$	$\sim 0.1$	$\sim 0.3$
Retrocesos de electrón	$\sim 0.1$	$\sim 0.3$
Total	$<5.545$	$<12.385$

Cuadro 5.1: Cuadro de distintas contribuciones a la señal de eventos para el detector PICO-40L.

Para la espalación de neutrones, se consideran neutrones inducidos por muones tanto en la roca como en el agua. Los eventos inducidos por la dispersión coherente elástica  $\nu - X$  son estimados a un umbral de 2.8 keV por neutrinos solares de  ${}^8B$ . Para los retrocesos nucleares de electrón se consideran rayos gamma y beta a un umbral de 2.8 keV.

Las estimaciones de las últimas tres contribuciones mencionadas, no se calcularon en el presente trabajo y se podrá encontrar más información en un artículo que actualmente se encuentra en desarrollo. Esto es, el análisis de este trabajo va a contribuir a dos futuros artículos, el ya mencionado *The PICO-40L Detector* ([76]) que se encuentra en desarrollo, y al artículo con el análisis de resultados de la toma de datos que en estos momentos se encuentra por iniciar.

Finalmente, realizando una comparación con los ruidos de fondo esperados en PICO-60L en un tiempo de 29.95 días, se estimó  $1.0 \pm 0.4$  eventos de una burbuja. Así se puede observar que hay una reducción a la cantidad de eventos (considerando que en el tanque lleno de agua no se observó ningún evento) de una burbuja. Esto muestra la viabilidad del diseño RSU para su futura implementación en PICO-500L.



# Apéndice A

## Tablas

En este apéndice se presentan los resultados de la cantidad de eventos individuales y múltiples estimados al año para cada componente. Se muestra los resultados para las cadenas  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  y de ser el caso también de la cadena  $^{210}\text{Pb}$ .

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-2}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	0.003	$0.008 \pm 0.298$	$0.019 \pm 0.692$
$^{235}\text{U}$	0.010	$0.011 \pm 0.018$	$0.030 \pm 0.036$
$^{238}\text{U}$	37.291	$155.3 \pm 117.4$	$367.4 \pm 277.7$

Cuadro A.1: Resultados para un piezo de cobre.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-3}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	0.895	$0.554 \pm 0.788$	$1.227 \pm 1.746$
$^{235}\text{U}$	0.586	$0.364 \pm 0.607$	$0.803 \pm 1.338$
$^{238}\text{U}$	10.771	$5.397 \pm 1.092$	$12.43 \pm 2.515$

Cuadro A.2: Resultados para piezo de PCB.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-2}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	0.008	$0.006 \pm 0.004$	$0.014 \pm 0.011$
$^{235}\text{U}$	0.001	$0.0002 \pm 0.0001$	$0.0005 \pm 0.0001$
$^{238}\text{U}$	0.015	$0.007 \pm 0.01$	$0.017 \pm 0.023$
$^{210}\text{Pb}$	7758.79	$2981 \pm 536$	$6995 \pm 1257$

Cuadro A.3: Resultados para un piezo. El resultado final de la contribución de los piezos es multiplicado por doce debido a la simetría cilíndrica.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	3.296	$0.574 \pm 0.081$	$1.264 \pm 0.179$
$^{235}\text{U}$	4.624	$0.817 \pm 0.082$	$1.868 \pm 0.188$
$^{238}\text{U}$ alta	110.201	$9.905 \pm 1.404$	$21.33 \pm 3.02$
$^{238}\text{U}$ baja	3.955	$0.017 \pm 0.004$	$0.032 \pm 0.003$

Cuadro A.4: Resultados para el aislante térmico.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	0.144	$0.327 \pm 0.033$	$0.836 \pm 0.084$
$^{235}\text{U}$	0.03	$0.045 \pm 0.004$	$0.1 \pm 0.010$
$^{238}\text{U}$	41.87	$112.7 \pm 125.8$	$273.7 \pm 305.6$

Cuadro A.5: Resultados para disco cobre.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	0.173	$0.213 \pm 0.021$	$0.493 \pm 0.04.956$
$^{235}\text{U}$	0.036	$0.021 \pm 0.002$	$0.043 \pm 0.004$
$^{238}\text{U}$	50.374	$98.03 \pm 109.4$	$221.1 \pm 246.8$

Cuadro A.6: Resultados para plato cobre.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	22.639	$5.831 \pm 0.962$	$1.581 \pm 0.261$
$^{235}\text{U}$	1.995	$0.34 \pm 0.36$	$0.061 \pm 0.065$
$^{238}\text{U}$	44.379	$8.30 \pm 0.94$	$2.023 \pm 0.230$

Cuadro A.7: Resultados para reflector A.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	28.006	$3.427 \pm 0.565$	$8.472 \pm 1.398$
$^{235}\text{U}$	2.468	$0.137 \pm 0.147$	$0.345 \pm 0.370$
$^{238}\text{U}$	54.901	$4.405 \pm 0.502$	$11.51 \pm 1.311$

Cuadro A.8: Resultados para reflector B.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-3}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	1.454	$1.187 \pm 0.119$	$2.92 \pm 0.29$
$^{235}\text{U}$	0.166	$0.136 \pm 0.014$	$0.332 \pm 0.033$
$^{238}\text{U}$ alta	3.718	$3.018 \pm 0.303$	$7.479 \pm 0.752$
$^{238}\text{U}$ baja	0.316	$2.572 \pm 0.259$	$7.103 \pm 1.277$

Cuadro A.9: Resultados para OV (recipiente de cuarzo).

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-4}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	9.98	$1.815 \pm 0.182$	$4.103 \pm 0.412$
$^{235}\text{U}$	1.14	$0.638 \pm 0.064$	$1.205 \pm 0.121$
$^{238}\text{U}$ alta	25.52	$3.724 \pm 0.374$	$7.943 \pm 0.798$
$^{238}\text{U}$ baja	2.17	$3.273 \pm 0.329$	$6.723 \pm 0.676$

Cuadro A.10: Resultados para IV (recipiente de cuarzo bajo).

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-2}$	múltiples/yr $\times 10^{-2}$
$^{232}\text{Th}$	15.607	$8.667 \pm 0.871$	$20.39 \pm 2.05$
$^{235}\text{U}$	27.751	$0.154 \pm 0.109$	$0.363 \pm 0.256$
$^{238}\text{U}$ alta	115.555	$45.18 \pm 4.54$	$119.5 \pm 12.01$
$^{238}\text{U}$ baja	5.349	$2.93 \pm 0.29$	$6.95 \pm 0.70$

Cuadro A.11: Resultados para el aceite mineral.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	94.649	$11.92 \pm 1.29$	$35.99 \pm 3.90$
$^{235}\text{U}$	0.725	$0.041 \pm 0.010$	$0.158 \pm 0.038$
$^{238}\text{U}$	69.136	$6.914 \pm 0.749$	$17.73 \pm 1.92$

Cuadro A.12: Resultados para una cámara (aluminio).

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-3}$	múltiples/yr $\times 10^{-3}$
$^{232}\text{Th}$	47.083	$0.92 \pm 0.105$	$2.305 \pm 0.264$
$^{235}\text{U}$	29.583	$0.356 \pm 0.057$	$1.009 \pm 0.161$
$^{238}\text{U}$	255.536	$4.117 \pm 0.986$	$11.22 \pm 2.69$

Cuadro A.13: Resultados para una lente (aluminio).

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-2}$	singles/yr $\times 10^{-6}$	múltiples/yr $\times 10^{-6}$
$^{232}\text{Th}$	8.463	$1.965 \pm 0.197$	$5.273 \pm 0.530$
$^{235}\text{U}$	2.544	$0.275 \pm 0.011$	$0.837 \pm 0.347$
$^{238}\text{U}$	7.778	$1.709 \pm 0.793$	$4.340 \pm 2.014$

Cuadro A.14: Resultados para LEDs de una cámara.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	13.83	$5.217 \pm 0.686$	$13.210 \pm 1.737$
$^{235}\text{U}$	0.932	$0.301 \pm 0.167$	$0.972 \pm 0.539$
$^{238}\text{U}$ alta	49.377	$5.833 \pm 2.772$	$14.207 \pm 6.753$
$^{238}\text{U}$ baja	7.337	$2.631 \pm 0.368$	$5.347 \pm 0.748$

Cuadro A.15: Resultados para parte PCB de una cámara.

Cadena	flujo de neutrones	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	4.914	$3.041 \pm 0.597$	$11.11 \pm 2.183$
$^{235}\text{U}$	13.109	$0.401 \pm 0.085$	$1.134 \pm 0.2408$
$^{238}\text{U}$	1053.52	$134.4 \pm 37.4$	$274.8 \pm 76.6$

Cuadro A.16: Resultados para recipiente de presión (PV).

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-5}$	singles/yr $\times 10^{-7}$	múltiples/yr $\times 10^{-7}$
$^{232}\text{Th}$	0.361	$0.0472 \pm 0.0047$	$0.111 \pm 0.0112$
$^{235}\text{U}$	0.004	$0.00016 \pm 0.00018$	$0.00033 \pm 0.00038$
$^{238}\text{U}$	17.032	$4.282 \pm 4.303$	$9.982 \pm 1.003$
$^{210}\text{Pb}$	400093	$85740 \pm 8617$	$205600 \pm 20670$

Cuadro A.17: Resultados RTD sensor.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-2}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	0.00275	$0.00146 \pm 0.00015$	$0.00349 \pm 0.00035$
$^{235}\text{U}$	0.00005	$0.0000008 \pm 0.0000008$	$0.000014 \pm 0.000015$
$^{238}\text{U}$	2.992	$3.713 \pm 0.3731$	$8.675 \pm 0.872$
$^{210}\text{Pb}$	338975	$360700 \pm 173700$	$868800 \pm 418300$

Cuadro A.18: Resultados RTD cable rojo.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-2}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	0.00035	$0.00019 \pm 0.00002$	$0.00045 \pm 0.00004$
$^{235}\text{U}$	0.000008	$0.0000012 \pm 0.0000001$	$0.0000022 \pm 0.0000021$
$^{238}\text{U}$	0.0307	$0.03829 \pm 0.00385$	$0.08907 \pm 0.00895$
$^{210}\text{Pb}$	128061	$137300 \pm 40020$	$332100 \pm 96830$

Cuadro A.19: Resultados RTD cable blanco.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	0.1427	$0.167 \pm 0.017$	$0.396 \pm 0.040$
$^{235}\text{U}$	0.0254	$0.025 \pm 0.027$	$0.062 \pm 0.067$
$^{238}\text{U}$	1.6534	$1.662 \pm 0.167$	$3.936 \pm 0.399$
$^{210}\text{Pb}$	1531.45	$1024 \pm 493.1$	$2463 \pm 1186$

Cuadro A.20: Resultados RTD cable rojo Teflón.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	0.0183	$0.02149 \pm 0.00216$	$0.05083 \pm 0.00511$
$^{235}\text{U}$	0.0041	$0.00411 \pm 0.00391$	$0.0101 \pm 0.00961$
$^{238}\text{U}$	0.1997	$0.2014 \pm 0.02024$	$0.475 \pm 0.04773$
$^{210}\text{Pb}$	628.053	$420.9 \pm 122.7$	$1010 \pm 294.4$

Cuadro A.21: Resultados RTD cable blanco Teflón.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-4}$	múltiples/yr $\times 10^{-4}$
$^{232}\text{Th}$	39.962	$7.193 \pm 1.187$	$16.21 \pm 2.674$
$^{235}\text{U}$	3.459	$0.449 \pm 0.481$	$1.126 \pm 1.207$
$^{238}\text{U}$	9.592	$1.537 \pm 0.175$	$3.755 \pm 0.428$

Cuadro A.22: Resultados cable de Al para piezo.

Cadena	flujo de neutrones $\times 10^{-1}$	singles/yr $\times 10^{-5}$	múltiples/yr $\times 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	7.805	$5.259 \pm 0.868$	$13.64 \pm 2.25$
$^{235}\text{U}$	0.688	$0.272 \pm 0.291$	$0.87 \pm 0.932$
$^{238}\text{U}$	15.3004	$7.925 \pm 0.903$	$22.01 \pm 2.507$

Cuadro A.23: Resultados cable Al para cámara.

Cadena	singles/20 días	múltiples/20 días
$^{232}\text{Th}$	3.765	7.529
$^{238}\text{U}$ alta	14.446	36.114
$^{238}\text{U}$ baja	11.058	22.116

Cuadro A.24: Resultados para roca Norita con el tanque lleno de aire considerando dos metros de roca.

Cadena	singles/20 días	múltiples/20 días
$^{232}\text{Th}$	3.901	15.604
$^{238}\text{U}$ alta	3.725	3.725
$^{238}\text{U}$ baja	3.649	21.894

Cuadro A.25: Resultados para roca Norita con el tanque lleno de aire considerando tres metros de roca.

Cadena	singles/20 días	múltiples/20 días
$^{232}\text{Th}$	0	0
$^{238}\text{U}$ alta	0	0
$^{238}\text{U}$ baja	0	0

Cuadro A.26: Resultados para roca Norita con el tanque lleno de agua.

Cadena	singles/yr	múltiples/yr
$^{232}\text{Th}$	$<0.242$	$<0.242$
$^{238}\text{U}$ alta	$<0.242$	$<0.242$
$^{238}\text{U}$ baja	$<0.242$	$<0.242$

Cuadro A.27: Resultados para roca Norita con el tanque lleno de agua imponiendo una cota por la ausencia de eventos.

# Apéndice B

## Gráficas

Se obtuvieron gráficas de Z vs R, cantidad de burbujas y de espectros de energía para singletes y múltiples para cada componente. En este apéndice sólo se presentan los espectros de energía para eventos de una burbuja para cada componente de la cadena  $^{238}\text{U}$ .

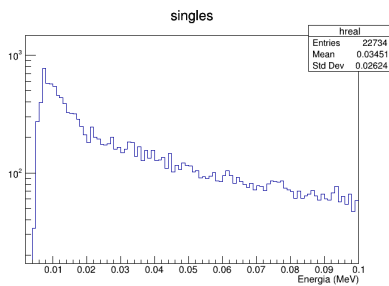


Figura B.1: Piezo.

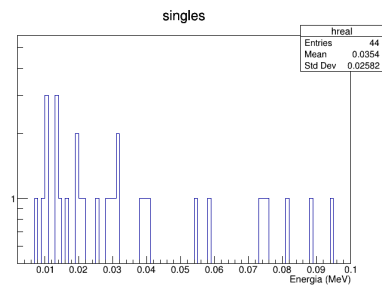


Figura B.4: PV.

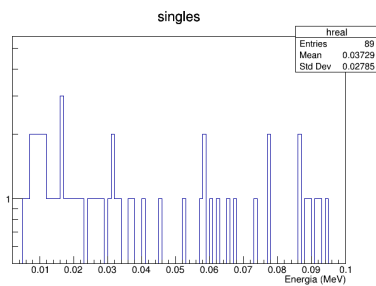


Figura B.2: Leds.

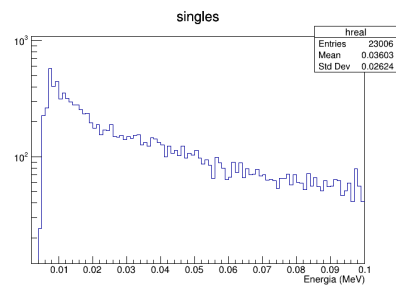


Figura B.5: Aceite mineral.

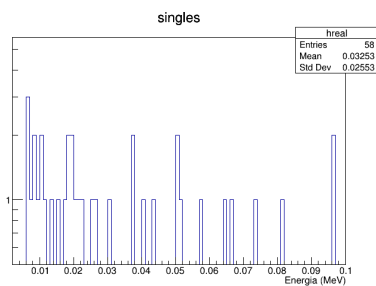


Figura B.3: Lente.

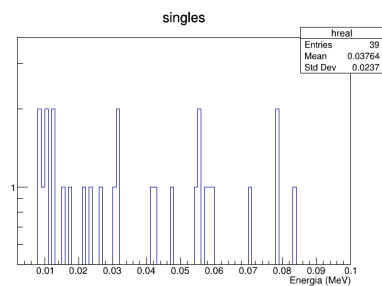


Figura B.6: Cámara.

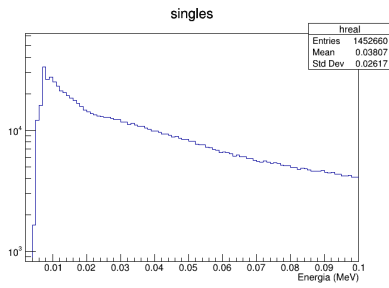


Figura B.7: OV.

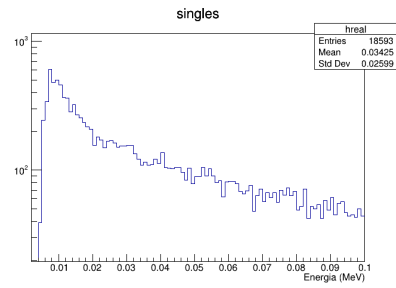


Figura B.11: Piezo parte de cobre.

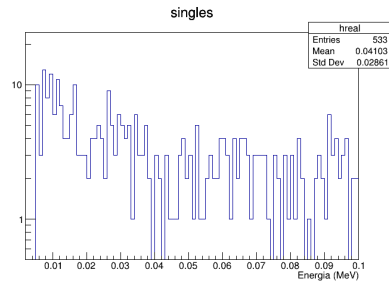


Figura B.8: Retrorreflector A.

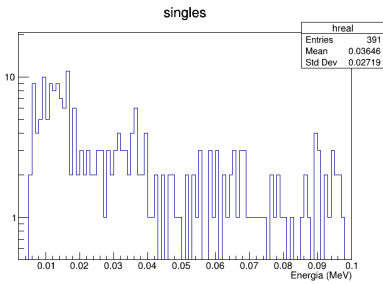


Figura B.12: Aislante térmico.

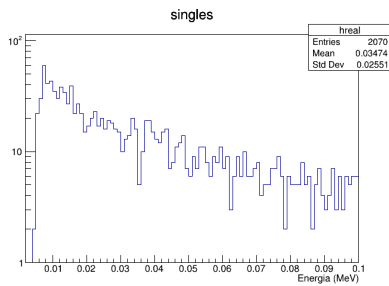


Figura B.9: Retrorreflector B.

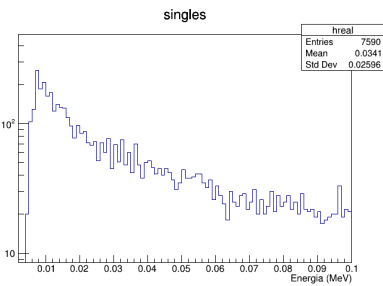


Figura B.13: Plato de cobre.

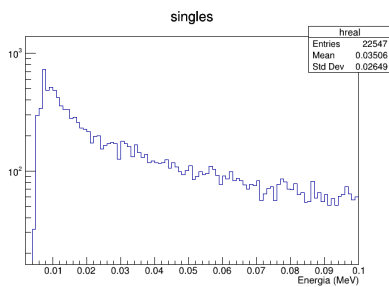


Figura B.10: Piezo parte PCB.

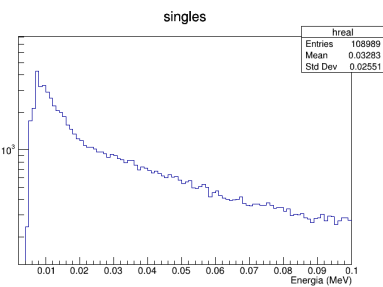


Figura B.14: Disco de cobre.

# Apéndice C

## Códigos

Se presenta un ejemplo de los paquetes utilizados para realizar las simulaciones, así como el código de análisis para la determinación de eventos individuales o múltiples y la obtención de los histogramas.

### C.1. Paquete (*job*)

Se crearon paquetes para el espectro de cada cadena por componente. Aquí se presenta un paquete para el piezo de la cadena de  $^{232}\text{Th}$ .

```
#!/usr/bin/bash

# Usage: ./send_jobs [# de jobs]
# Ex. ./send_jobs 100

export NJOBS=$1

#Nombre del job
nameJob="Piezo_232th"

#Directorio de entrada (build del proyecto)
FILEDIR=/home/aralb98/good/picoGEANT4.11.3/PICO40L/build

#Directorio de los archivos de salida
OUTDIR=/home/aralb98/good/sim/salida/Pie_232th

#Directorio desde donde ejecuto
OUTDIR1=/home/aralb98/good/picoGEANT4.11.3/PICO40L/build

#Para crear el dir de salida si no se define

if [ ! -d $OUTDIR ]; then
    mkdir $OUTDIR
fi
```



```

#comienzo del loop

COUNT=1

for ((i=1 ; i <= ${NJOBS} ; i++))
do

WORKDIR=${PWD}/${nameJob}${COUNT}

#Se crea un archivo con las especificaciones para correr en el
cluster (recursos que se necesitan).

cat > ${nameJob}${COUNT}.sh << EOF
#!/bin/bash

#SBATCH --time=01:00:00
#SBATCH --nodes=1
#SBATCH --ntasks-per-node=1
#SBATCH --cpus-per-task=4
#SBATCH --mem-per-cpu=10240M
#SBATCH --account=def-ericvj-ab

export LIBRARY_PATH=/home/fflores/projects/def-ericvj-ab/fflores/CADMesh/lib:$LIBRARY_PATH
export LD_LIBRARY_PATH=/home/fflores/projects/def-ericvj-ab/fflores/CADMesh/lib:$LD_LIBRARY_PATH
source /home/aralb98/good/picoGEANT4.11.3/geant4-v11.1.3/bin/geant4.sh

echo $WORKDIR
mkdir -p $WORKDIR
cd $WORKDIR

se ejecuta un macro en geant4, para el caso de RAT: rat -opc1 -
opc2 ${pathtothemacro}/alpha.mac, opc1/opc2 son opciones que se
pueden establecer, mas info con "rat --help")

echo '/control/verbose 1' > pie_${COUNT}.mac
echo '/run/verbose 1' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/tracking/verbose 0' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/hits/verbose 1' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/dmx/saveGamma 0' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/dmx/saveNeutron 1' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/dmx/savePmt 1' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/dmx/saveHits 1' >> pie_${COUNT}.mac

```

```
echo '/dmx/KillGammasInConcrete 0 ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/process/had/rdm/verbose 0 ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/process/had/rdm/allVolumes ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/vis/verbose 0 ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/particle neutron ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/type Volume ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/shape Cylinder ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/centre 0. 16.04 -156.2395 cm ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/radius 10.0 mm ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/halfz 20.0 mm ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/pos/confine piezo_phys ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/ang/type iso ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/ene/type Arb ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/type arb ' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 0.000E+00 0.000E+00' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.000E-02 1.195E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.000E-01 2.123E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.500E-01 2.910E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.000E-01 3.595E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.500E-01 4.155E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.000E-01 4.711E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.500E-01 5.159E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.000E-01 5.619E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.500E-01 6.118E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.000E-01 6.536E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.500E-01 6.876E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.000E-01 7.192E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.500E-01 7.539E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.000E-01 7.917E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.500E-01 8.296E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.000E-01 8.642E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.500E-01 8.908E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.000E-01 9.230E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.500E-01 9.525E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.000E+00 9.889E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.050E+00 1.016E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.100E+00 1.036E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.150E+00 1.062E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.200E+00 1.089E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.250E+00 1.120E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.300E+00 1.149E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.350E+00 1.168E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.400E+00 1.204E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.450E+00 1.245E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.500E+00 1.281E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.550E+00 1.328E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.600E+00 1.371E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.650E+00 1.402E-02' >> pie_${COUNT}.mac
```

```
echo '/gps/hist/point 1.700E+00 1.437E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.750E+00 1.478E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.800E+00 1.523E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.850E+00 1.562E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.900E+00 1.588E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.950E+00 1.600E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.000E+00 1.604E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.050E+00 1.604E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.100E+00 1.590E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.150E+00 1.585E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.200E+00 1.587E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.250E+00 1.575E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.300E+00 1.546E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.350E+00 1.522E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.400E+00 1.498E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.450E+00 1.469E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.500E+00 1.461E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.550E+00 1.456E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.600E+00 1.441E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.650E+00 1.427E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.700E+00 1.415E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.750E+00 1.407E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.800E+00 1.414E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.850E+00 1.420E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.900E+00 1.424E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 2.950E+00 1.413E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.000E+00 1.404E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.050E+00 1.398E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.100E+00 1.382E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.150E+00 1.353E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.200E+00 1.319E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.250E+00 1.280E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.300E+00 1.235E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.350E+00 1.184E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.400E+00 1.140E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.450E+00 1.091E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.500E+00 1.042E-02' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.550E+00 9.965E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.600E+00 9.509E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.650E+00 8.985E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.700E+00 8.476E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.750E+00 7.944E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.800E+00 7.427E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.850E+00 6.945E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.900E+00 6.476E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 3.950E+00 6.143E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.000E+00 5.868E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.050E+00 5.627E-03' >> pie_${COUNT}.mac
```

```
echo '/gps/hist/point 4.100E+00 5.422E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.150E+00 5.174E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.200E+00 4.929E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.250E+00 4.689E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.300E+00 4.450E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.350E+00 4.227E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.400E+00 4.018E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.450E+00 3.822E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.500E+00 3.640E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.550E+00 3.464E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.600E+00 3.295E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.650E+00 3.134E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.700E+00 2.974E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.750E+00 2.824E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.800E+00 2.675E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.850E+00 2.530E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.900E+00 2.394E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 4.950E+00 2.276E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.000E+00 2.158E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.050E+00 2.042E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.100E+00 1.934E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.150E+00 1.827E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.200E+00 1.726E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.250E+00 1.628E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.300E+00 1.540E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.350E+00 1.459E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.400E+00 1.390E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.450E+00 1.324E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.500E+00 1.261E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.550E+00 1.200E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.600E+00 1.138E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.650E+00 1.075E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.700E+00 1.013E-03' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.750E+00 9.544E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.800E+00 9.086E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.850E+00 8.705E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.900E+00 8.345E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 5.950E+00 7.964E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.000E+00 7.579E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.050E+00 7.204E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.100E+00 6.836E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.150E+00 6.468E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.200E+00 6.113E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.250E+00 5.776E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.300E+00 5.435E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.350E+00 5.073E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.400E+00 4.746E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.450E+00 4.446E-04' >> pie_${COUNT}.mac
```

```

echo '/gps/hist/point 6.500E+00 4.154E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.550E+00 3.864E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.600E+00 3.579E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.650E+00 3.303E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.700E+00 3.044E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.750E+00 2.805E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.800E+00 2.571E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.850E+00 2.369E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.900E+00 2.187E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 6.950E+00 2.006E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.000E+00 1.828E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.050E+00 1.651E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.100E+00 1.494E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.150E+00 1.341E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.200E+00 1.180E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.250E+00 1.022E-04' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.300E+00 9.049E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.350E+00 8.033E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.400E+00 7.021E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.450E+00 6.045E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.500E+00 5.272E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.550E+00 4.704E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.600E+00 4.166E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.650E+00 3.740E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.700E+00 3.543E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.750E+00 3.350E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.800E+00 3.155E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.850E+00 2.958E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.900E+00 2.760E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 7.950E+00 2.573E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.000E+00 2.388E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.050E+00 2.200E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.100E+00 2.012E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.150E+00 1.825E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.200E+00 1.637E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.250E+00 1.447E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.300E+00 1.263E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.350E+00 1.115E-05' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.400E+00 9.806E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.450E+00 9.433E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.500E+00 9.332E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.550E+00 9.001E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.600E+00 8.554E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.650E+00 8.104E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.700E+00 7.648E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.750E+00 7.188E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.800E+00 6.723E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.850E+00 6.255E-06' >> pie_${COUNT}.mac

```

```
echo '/gps/hist/point 8.900E+00 5.782E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 8.950E+00 5.310E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.000E+00 4.978E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.050E+00 4.712E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.100E+00 4.442E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.150E+00 4.168E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.200E+00 3.891E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.250E+00 3.613E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.300E+00 3.332E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.350E+00 3.049E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.400E+00 2.762E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.450E+00 2.472E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.500E+00 2.180E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.550E+00 1.886E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.600E+00 1.593E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.650E+00 1.300E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.700E+00 1.005E-06' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.750E+00 7.085E-07' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.800E+00 4.118E-07' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.850E+00 1.184E-07' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.900E+00 4.898E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 9.950E+00 4.560E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.000E+01 4.226E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.005E+01 3.892E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.010E+01 3.551E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.015E+01 3.211E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.020E+01 2.843E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.025E+01 2.486E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.030E+01 2.163E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.035E+01 1.900E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.040E+01 1.783E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.045E+01 1.683E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.050E+01 1.581E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.055E+01 1.482E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.060E+01 1.387E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.065E+01 1.288E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.070E+01 1.199E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.075E+01 1.105E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.080E+01 1.027E-09' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.085E+01 9.613E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.090E+01 9.084E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.095E+01 8.600E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.100E+01 8.091E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.105E+01 7.626E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.110E+01 7.133E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.115E+01 6.670E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.120E+01 6.203E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.125E+01 5.732E-10' >> pie_${COUNT}.mac
```

```

echo '/gps/hist/point 1.130E+01 5.224E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.135E+01 4.746E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.140E+01 4.263E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.145E+01 3.744E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.150E+01 3.254E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.155E+01 2.760E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.160E+01 2.261E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.165E+01 1.759E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.170E+01 1.235E-10' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.175E+01 7.995E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.180E+01 3.485E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.185E+01 2.734E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.190E+01 2.607E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.195E+01 2.487E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/point 1.200E+01 2.048E-11' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/gps/hist/inter Lin' >> pie_${COUNT}.mac
echo '/random/setSeeds '$RANDOM $RANDOM >> pie_${COUNT}.mac
echo '/run/beamOn 150000' >> pie_${COUNT}.mac

```

```

cp ${FILEDIR}/DMX .
cp pie_${COUNT}.mac ${OUTDIR}
./DMX pie_${COUNT}.mac

```

```

#Copia los archivos salida en nuevas carpetas

```

```

mkdir ${OUTDIR}/files
mkdir ${OUTDIR}/logs
mv ${OUTDIR1}/${nameJob}${COUNT}/Informacion.txt
${OUTDIR}/files/Informacion${COUNT}.txt
mv ${OUTDIR1}/slurm* ${OUTDIR}/logs
#rm -r ${OUTDIR}/logs

```

```

#se elimina el DIR temporal

```

```

#rm -r $WORKDIR

```

```

EOF

```

```

chmod ugo+x ${nameJob}${COUNT}.sh

```

```

sbatch ${nameJob}${COUNT}.sh

```

```

echo sent ${nameJob}${COUNT}.sh

```

```

rm ${nameJob}${COUNT}.sh

```

```

sleep 1.3s

```

```
COUNT=$((COUNT + 1))  
  
done
```

## C.2. Código de análisis

```
#include <iostream>  
#include <fstream>  
#include "TFile.h"  
#include "TTree.h"  
#include "TString.h"  
#include "TH2F.h"  
#include "TH1F.h"  
#include "TBox.h"  
#include "THStack.h"  
#include "TLegend.h"  
#include "TStyle.h"  
#include "TCanvas.h"  
#include "TPad.h"  
#include "TSystem.h"  
#include "TProfile.h"  
#include <vector>  
#include <iomanip>  
#include <fstream>  
#include <string>  
#include <cstring>  
#include "TF1.h"  
#include "Math/WrappedTF1.h"  
#include "Math/GaussIntegrator.h"  
#include <stdint.h>  
#include <stdio.h>  
#include "TMath.h"  
#include "TMinuit.h"  
#include "TCanvas.h"  
#include "TStyle.h"  
#include "TROOT.h"  
#include "TGraphErrors.h"  
#include "TRandom.h"  
#include "TGraph2D.h"  
  
//Efficiency nucleation curve for Carbon (MeV).  
double effcarbon(double recoil)  
{  
    double eff;  
    if(recoil <= 0.0063889){ eff=0.0000;}  
    else if(recoil >= 0.0092432){ eff=1.000;}  
    else if(0.0063889 < recoil <= 0.0069502){ eff=0.0000+((recoil
```



```

0.0063889)/(0.0069502-0.0063889))*(0.2000);}
else if(0.0069502 < recoil <= 0.0071038){eff=0.2000+((recoil-
0.0069502)/(0.0071038-0.0069502))*(0.3000);}
else if(0.0071038 < recoil <= 0.0073202){eff=0.5000+((recoil-
0.0071038)/(0.0073202-0.0071038))*(0.3000);}
else if(0.0073202 < recoil <= 0.0092432){eff=0.8000+((recoil-
0.0073202)/(0.0092432-0.0073202))*(0.2000);}
return eff;
}

// Efficiency nucleation curve for Fluorine (MeV).
double efffluorine(double recoil)
{
double eff;
if(recoil <= 0.0047530){eff=0.0000;}
else if(recoil >= 0.0066947){eff=1.000;}
else if(0.0047530 < recoil <= 0.0050678){eff=0.0000+((recoil-
0.0047530)/(0.0050678-0.0047530))*(0.2000);}
else if(0.0050678 < recoil <= 0.0058167){eff=0.2000+((recoil-
0.0050678)/(0.0058167-0.0050678))*(0.3000);}
else if(0.0058167 < recoil <= 0.0061628){eff=0.5000+((recoil-
0.0058167)/(0.0061628-0.0058167))*(0.3000);}
else if(0.0061628 < recoil <= 0.0066947){eff=0.8000+((recoil-
0.0061628)/(0.0066947-0.0061628))*(0.2000);}
return eff;
}

void countFromroot(const char * myinput, const char * chain)
{

// Declaration of a structure to save the component
name(component), (mass), (neutron yield), )magnitude of the
radioisotope
// contamination) and the number of simulated events (simulated).

struct Info
{
string component;
double mass;
double neutroyield;
double concentration;
double uncertainty;
double simulated;
};

```

```
Info pico40;
ifstream student;
char informationfile[1024];
sprintf(informationfile,1024,"pico40_%s.csv",chain);

// Declaration of the L (live time of the detector in seconds)
//const long int factor = 31557600;
//Factor es tiempo en segundos
const long int factor = 31536000;

double rate = 0.1;

char inputfile[1024];
sprintf(inputfile,1024,"%s_%s.root",myinput,chain);

cout << "input file " << inputfile << endl;

TFile *rootfile= new TFile(inputfile,"READ");
TTree *tree= (TTree*)rootfile->Get("tree1"); //tree1 es cuando
se guardan neutrones,
latex style, chiefly those related with the number of events
their multiplicities to 1,2,3,4,5,6 and multiple events.

ofstream output;
char outputfile[1024];
sprintf(outputfile,1024,"%s_%s.txt",myinput,chain);

the efficiency curve (bubbles)
ofstream sumbubble;
char sumbubblefile[1024];
sprintf(sumbubblefile,1024,"%s_bubble.out",myinput);

ofstream sumrates;
char sumratesfile[1024];
sprintf(sumratesfile,1024,"%s_rates.out",myinput);

Double_t Event;
Double_t VertexX;
Double_t VertexY;
Double_t VertexZ;
Double_t Element;
Double_t Edep;
Double_t Xpos;
Double_t Ypos;
Double_t Zpos;
Double_t ParentID;
Double_t StepN;
```

```

Double_t InitE;

tree->SetBranchAddresses("Event",&Event);
tree->SetBranchAddresses("VertexX",&VertexX);
tree->SetBranchAddresses("VertexY",&VertexY);
tree->SetBranchAddresses("VertexZ",&VertexZ);
tree->SetBranchAddresses("Element",&Element);
tree->SetBranchAddresses("Edep",&Edep);
tree->SetBranchAddresses("Xpos",&Xpos);
tree->SetBranchAddresses("Ypos",&Ypos);
tree->SetBranchAddresses("Zpos",&Zpos);
tree->SetBranchAddresses("ParentID",&ParentID);
tree->SetBranchAddresses("StepN",&StepN);
tree->SetBranchAddresses("InitE",&InitE);

string line;
int event=0;
double empty1=1;
double empty2=1;
double empty3=1;
double empty4=1;
double empty5=1;
double empty6=1;
double empty7=1;
double inter , element , time;
double recoil , neutron , initne;
double x,y,z;
double vx,vy,vz;

int index=0;
int singles=0;
int multiples=0;
int event_old=-10;
const int size=20;
int bubbli[size];

TH1F *hsin = new TH1F("hsin", "singles", 100, 0, 0.1);
TH1F *hmul = new TH1F("hmul", "multiples", 100, 0, 0.1);
TH1F *hrsin = new TH1F();
TH1F *hreal = new TH1F("hreal", "singles", 100, 0, 0.1);
TH1F *hbubble = new TH1F("hbubble", "bubbles", 100, 0, 20);
TCanvas *c4 = new TCanvas("c4", "My Canvas4", 700, 500);
TCanvas *c5 = new TCanvas("c5", "My Canvas5", 700, 500);
TCanvas *c6 = new TCanvas("c6", "My Canvas6", 700, 500);
TCanvas *c7 = new TCanvas("c7", "My Canvas7", 700, 500);
TCanvas *c8 = new TCanvas("c8", "My Canvas8", 700, 500);

TH2F *hvxy = new TH2F("hvxy","X vs Y

```

```

(Vertex)",100,-70,70,100,-70,70); //-350,50
TH2F *hpxpy = new TH2F("hpxpy","Z vs R
(Pos)",100,0,18,100,-200,-50);
//TGraph2D *dt = new TGraph2D();
//dt->SetTitle("Interaction; X axis; Y axis; Z axis");
TCanvas *c3= new TCanvas ("c3", "My Canvas",600, 600);
TCanvas *c2= new TCanvas ("c2", "My Canvas2",600, 600);

// Array that save the multiplicity of the events (bubbles)
for (int m=0;m<size;m++)
{
  bubbli [m]=0;
}

TRandom* r0= new TRandom(0);
r0->SetSeed(0);

Int_t entries= tree->GetEntries();
cout<<"Entries " <<entries<<endl;

for (int i=0; i<entries; i++)
{
  tree->GetEntry(i);// Se accesa a la entrada del arbol
// for (Int_t i=0; i<44;i++){
  if (Zpos<-141.265) continue;

  //hvxy->Fill (VertexX/10,VertexY/10.);
  hpxpy->Fill (sqrt ((Xpos*Xpos)+(Ypos*Ypos)), Zpos);

  //dt->SetPoint (i ,Xpos ,Ypos ,Zpos );

  //c3->Write();
  event=Event;
  element=Element;
  recoil=Edep;
  x=Xpos;
  y=Ypos;
  z=Zpos;
  vx=VertexX;
  vy=VertexY;
  vz=VertexZ;(" Colz ");
  initne=InitE;
//hvxy.DrawClone
  neutron=StepN;

  //cout << recoil << endl;

```

```

// In accordance to the efficiency nucleation curve declared
// at the begginin of the text ,
// only those lines that fulfill this prerequisite are
// analyzed .

if (element!=6000 && element!=9019) continue;
if (element==6000 && r0->Rndm()>effcarbon(recoil)) continue;
if (element==9019 && r0->Rndm()>efffluorine(recoil)) continue;

// Count how many events (bubbles) were selected .

if (event==event_old)
{
    index=index+1;
}
if (event!=event_old)
{
    singles=singles+1;
    for (int p=1; p<size;p++)
    {
        if (index==p) bubbli[p-1]=bubbli[p-1]+1;
    }
    hsin->Fill(recoil);
    hbubble->Fill(index);
    if (index==1) hreal->Fill(recoil);
    if(index>1)
    {
        multiples=multiples+1;
        hmul->Fill(recoil);
    }
    index=1;
}
event_old=event;
}

c3->cd();
hvxy->Draw(" colz ");

char outimage[1024];
snprintf(outimage,1024,"Plot.png");
c3->Print(outimage);
//hvxy->Draw("VertexZ:VertexY");
//hvxy->Fill(VertexX,VertexY);
//hpxpy->Fill(Xpos,Ypos);
//c3->Write();
//if (gROOT->IsBatch()) return;    new TBrowser ();
//tree->StartViewer();

```

```
c2->cd();
//dt->Draw(" surf1 ");
hpxpy->Draw(" colz ");

char outimage2[1024];
snprintf(outimage2,1024," Plot2.png");
c2->Print(outimage2);

c4->cd();
c4->SetLogy();
hsin->GetXaxis()->SetTitle(" Energia (MeV)");
//hsin->GetXaxis()->SetRangeUser(0,100);
hsin->Draw(" HIST");
char outimage3[1024];
snprintf(outimage3,1024," Plot3.png");
c4->Print(outimage3);

c5->cd();
c5->SetLogy();
hmul->GetXaxis()->SetTitle(" Energia (MeV)");
hmul->GetXaxis()->SetRangeUser(0.00245,0.1);
hmul->Draw(" HIST");
char outimage4[1024];
snprintf(outimage4,1024," Plot4.png");
c5->Print(outimage4);

c6->cd();
c6->SetLogy();
*hrsin = (*hsin)-(*hmul);
hrsin->Draw(" HIST");
char outimage5[1024];
snprintf(outimage5,1024," Plot5.png");
c6->Print(outimage5);

c7->cd();
c7->SetLogy();
hreal->GetXaxis()->SetTitle(" Energia (MeV)");
hreal->GetXaxis()->SetRangeUser(0.00245,0.1);
hreal->Draw(" HIST");
char outimage6[1024];
snprintf(outimage6,1024," Plot6.png");
c7->Print(outimage6);

c8->cd();
c8->SetLogy();
```

```
hbubble->GetXaxis()->SetTitle("Burbujas");
hbubble->Draw("HIST");
char outimage7[1024];
snprintf(outimage7,1024,"Plot7.png");
c8->Print(outimage7);

student.open(informationfile,ios::out);

// From the file (myinput)_(chain).csv, are extracted (mass),
(neutron yield), (concentration),(uncertainty) and (simulated)

while(!student.eof())
{

    student >> pico40.component;
    student >> pico40.mass;
    student >> pico40.neutronyield;
    student >> pico40.concentration;
    student >> pico40.uncertainty;
    student >> pico40.simulated;

    if(myinput == pico40.component)
    {

        //cout << bubbli[0] << endl;
        int realsingles=singles-multiples-1;
        bubbli[0]=realsingles;
        int single_rate=realsingles;
        int multi_rate=multiples;
        int total=multiples+realsingles;
        int double_rate=bubbli[1];
        int triple_rate=bubbli[2];
        int cuadruple_rate=bubbli[3];
        int quintuple_rate=bubbli[4];
        int sextuple_rate=bubbli[5];

        //cout << "realsingles " << realsingles << endl;
        //cout << "multi_rate " << multi_rate << endl;

        // The neutron fluence and uncertainty associated is
        calculated here
        double
        neutron_fluence=pico40.mass*pico40.neutronyield*pico40.concentra
        tion*factor;
```

```

    double simulated_events=pico40.simulated;
    double totaluncertainty = sqrt((0.01)*(0.01) + (0.1)*(0.1)
+ (pico40.uncertainty/pico40.concentration)*
(pico40.uncertainty/pico40.concentration));
    cout << "leakage probability " <<
single_rate/simulated_events << endl;

    cout << "-----"
-----" << endl;
    cout << pico40.mass << " g" << endl;
    cout << pico40.neutronyield << " /n/s/g/" << endl;
    cout << pico40.concentration <<" + " << pico40.uncertainty
<< " ppb" << endl;
    cout << pico40.simulated << " simulated events" << endl;
    cout << neutron_fluence << " Neutron fluence" << endl;
    cout << "Activity " <<
rate*simulated_events/(single_rate*pico40.mass*
pico40.neutronyield*factor) << endl;

    cout << "
" << myinput << "
" << endl;
    cout << chain <<"
" << "Singles" << "
"
<< "Double" << "
" << "Triple" <<
"
" << "Quads" << "
" << "Quints"
<< "
" << "Hexs" << "
" << "Multiples" <<
endl;

    cout << "bubbles" <<"
" << single_rate << "
" << double_rate << "
" <<
triple_rate << "
" << cuadruple_rate <<"
" << quintuple_rate <<
"
" << sextuple_rate <<"
"
<< multi_rate <<"
" << endl;

    cout << "rates"
<<"
" << setprecision (4) << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events) <<
setprecision (4) <<" + " << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

    setprecision (4) <<"
" << (neutron_fluence)*
(double_rate/simulated_events) <<
setprecision (4) <<" + " << (neutron_fluence)*
(double_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

```



```

        setprecision (4) << "      " << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events) <<
        setprecision (4) << " + " << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

        setprecision (4) <<"      " << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events) <<
        setprecision (4) << " + " << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

        setprecision (4) <<"      " << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events) <<
        setprecision (4) <<" + " << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

        setprecision (4) <<"      " << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events) <<
        setprecision (4) <<" + " << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty <<

        setprecision (4) <<"      " << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events) <<
        setprecision (4) <<" + " << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events)*totaluncertainty << endl;

    output.open(outputfile , ios::out);

    output << "\\multirow{2}{*}" << chain << "}" << endl;
    output << "& Bubbles: &" << single_rate << " &" <<
double_rate
        << " &" << triple_rate << " &" << cuadruple_rate << " &"
<<
        quintuple_rate << " &" << sextuple_rate << " &" <<
        multi_rate << " & \\\\" << endl;

    output << "& Rates: & $" <<
        setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
        setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" <<" &
        $" <<

        setprecision (3) << (neutron_fluence)*

```

```

(double_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(double_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" <<" &
$" <<

    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events) <<" \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" << " &
$" <<

    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" <<
" & $" <<

    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" <<
" & $" <<

    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" << "
& $" <<

    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events) << " \\pm " <<
    setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events)*totaluncertainty << "$" << " &
\\\\" << endl;
    output << "\\cmidrule(lr){3-3}\\cmidrule(lr){4-
8}\\cmidrule(lr){9-9}" << endl;
    output.close();

    sumrates.open(sumratesfile, ios::app);
    sumrates << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events)
    << " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(single_rate/simulated_events)*totaluncertainty

    <<" " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(double_rate/simulated_events) <<
    " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*

```

```

(double_rate/simulated_events)*totaluncertainty

        <<" " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events) <<
        " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(triple_rate/simulated_events)*totaluncertainty

        <<" " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events)
        << " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(cuadruple_rate/simulated_events)*totaluncertainty

        << " " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events)
        << " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(quintuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty

        << " " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events)
        << " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(sextuple_rate/simulated_events)*totaluncertainty

        << " " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events)
        << " + " << setprecision (3) << (neutron_fluence)*
(multi_rate/simulated_events)*totaluncertainty << endl;
        sumrates.close();

        sumbubble.open(sumbubblefile, ios::app);
        sumbubble << single_rate <<" " << double_rate << " " <<
triple_rate << " " << cuadruple_rate <<
        " " << quintuple_rate << " " << sextuple_rate << "
" << multi_rate << endl;
        sumbubble.close();

    }
}
student.close();

//input.close();
}

```

## Apéndice D

# Incertidumbres

Para la propagación de errores al realizar cálculos se emplearon las fórmulas

$$\begin{aligned} r &= xy, \\ \delta r &= x\delta y + y\delta x. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r &= x \pm y, \\ \delta r &= \delta x \pm \delta y. \end{aligned}$$

Incertidumbre a las estimaciones de eventos de una burbuja y múltiples burbujas

$$\text{incertidumbre} = \text{individuales (múltiples) al año} \times \sqrt{(0.01)^2 + (0.1)^2 + \left(\frac{\Delta\text{pureza}}{\text{pureza}}\right)^2}. \quad (\text{D.1})$$

En el caso de las simulaciones, se asocia un error al número de eventos. En el caso de valores medidos y de tablas de datos, se consideró la incertidumbre reportada en las tablas.

En el caso de límite impuesto cuando no se observaron eventos en las simulaciones, se consideró que se esperaban 2.3 eventos y se prosiguió como en los demás casos.

# Bibliografía

- [1] F. Zwicky, On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae, The Astrophysical Journal, Vol. 86 (1937).
- [2] NASA/IPAC Extragalactic Database, [https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=M31&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr\\_z=1](https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=M31&hconst=67.8&omegam=0.308&omegav=0.692&wmap=4&corr_z=1).
- [3] J. P. Ostriker & P. J. E. Peebles, A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive?, The Astrophysical Journal, Vol. 186 (1973).
- [4] V. C. Rubin, W. K. Ford & N. Thonnard, Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii, from NGC 4605 ( $R = 4$  kpc) to UGC 2885 ( $R = 122$  kpc), The Astrophysical Journal, Vol. 238 (1980).
- [5] Von K. Lundmark, Über die Bestimmung der Entfernungen, Dimensionen, Massen und Dichtigkeiten für die nächstgelegenen anagalaktischen Sternsysteme, Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Series I, Vol. 125 (1930).
- [6] R. Abuter et al., A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty, A&A, Vol. 625 (2019).
- [7] A. V. Zasov et al., Dark Matter in Galaxies, Physics-Uspekhi, Volume 60 (2017).
- [8] S. H. Hansen et al., The Temperature of Hot Gas in Galaxies and Clusters: Baryons Dancing to the Tune of Dark Matter, The Astrophysical Journal Vol., 734 (2011).
- [9] A. Einstein, Über die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie, Springer-Verlag edición 24 (2009).
- [10] A. G. Bergman et al., Gravitational Lens Models of Arcs in Clusters, The Astrophysical Journal, Vol. 350 (1990).
- [11] M. Bartelmann, Gravitational Lensing, Class. Quantum Grav. 27 (2010).
- [12] R. Lynds & V. Petrosain, Luminous Arcs in Clusters of Galaxies, The Astrophysical Journal Vol. 336 (1989).
- [13] P. de Bernardis et al., A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation, Nature Vol. 404 (2000).
- [14] R. Stompor wt al., Cosmological Implications of the MAXIMA-I High Resolution Cosmic Microwave Background Anisotropy Measurement, The Astrophysical Journal, Vol. 561 (2001).
- [15] H. Andrew et al., Recent Results from the MAXIMA Experiment, New Astron.Rev. 47 (2003).

- [16] C. L. Bennett et al., Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results, *ApJS* Vol. 208 (2013).
- [17] N. Aghanim et al., Planck 2018 Results. V. CMB Power Spectra and Likelihoods, *A&A*, Vol. 641 (2020).
- [18] N. Aghanim et al., Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters, *A&A*, Vol. 641 (2020).
- [19] A. De Angelis & M. Pimenta, *Introduction to Astroparticle Physics, Multimessenger Astrophysics with a Particle Physics Toolbox*, Springer 2da edición (2018).
- [20] M. Markevitch, Chandra Observation of the most Interesting Cluster in the Universe, arXiv: astro-ph/0511345 (2005).
- [21] K. Griest, The Nature of the Dark Matter, arXiv:astro-ph/9510089 (1995).
- [22] A. Heger et al., How Massive Single Stars end Their Life, *ApJ* Vol. 591 (2003).
- [23] K. C. Sahu et al., An Isolated Stellar-mass Black Hole Detected through Astrometric Microlensing, *The Astrophysical Journal*, Vol. 933 (2022).
- [24] C. Hamadache, The EROS2 Microlensing Study of the Galaxy, *International Astronomical Union Symposium no. 220* (2003).
- [25] C. Alcock et al., The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 years of LMC Observations, *Astrophys.J.* Vol. 542 (2000).
- [26] B. P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016).
- [27] M. Aker1 et al., Direct Neutrino-Mass Measurement with sub-Electronvolt Sensitivity, *Nature Phys.* 18 (2022).
- [28] R. Schaeffer & J. Silk, Cold, Warm, or Hot Dark Matter - Biased Galaxy Formation and Pancakes, *ApJ* Vol. 332 (1988).
- [29] A. Merle et al., Dodelson-Widrow Production of Sterile Neutrino Dark Matter with non-Trivial Initial Abundance, *JCAP04* (2016).
- [30] A. Boyarsky et al., Sterile Neutrino Dark Matter, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, Vol. 104 (2019).
- [31] N. Allemandou et al., The STEREO experiment, *JINST* Vol. 13 (2018).
- [32] H. Almazán et al., STEREO neutrino spectrum of  $^{235}\text{U}$  fission rejects sterile neutrino hypothesis, Vol. 613 (2023).
- [33] V. V. Barinov et al., Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST), *Phys. Rev. Lett.* Vol. 128 (2022).
- [34] A. A. Aguilar-Arevalo et al., Significant Excess of Electronlike Events in the MiniBooNE Short-Baseline Neutrino Experiment, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 121 (2018).
- [35] P. Abratenko et al., Search for an Excess of Electron Neutrino Interactions in MicroBooNE Using Multiple Final-State Topologies, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 128 (2022).

- [36] C. B. Adams et al., Axion Dark Matter, arXiv:2203.14923 (2022).
- [37] M. B. Smy, Hyper-Kamiokande, Phys. Sci. Forum, Vol. 8 (2023).
- [38] P. Zhenyu et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2012 (2021).
- [39] J. L. Feng, The WIMP Paradigm: Theme and Variations, SciPost Phys. Lect. Notes 71 (2023).
- [40] A. Del Popolo & M. Le Delliou, Review of Solutions to the Cusp-Core Problem of the  $\Lambda$ CDM Model, Galaxies 9 (2021).
- [41] V. Khachatryan et al., Search for Microscopic Black Hole Signatures at the Large Hadron Collider, Phys. Lett. B Vol. 697 (2011).
- [42] G. Aad et al., Search for Strong Gravity in Multijet Final States Produced in pp Collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV Using the ATLAS Detector at the LHC, JHEP Vol. 2016 (2016).
- [43] K. PETRAKI & R. R. VOLKAS, Review of Asymmetric Dark Matter, Int. J. Mod. Phys. A Vol. 28 (2013).
- [44] W. Hu, R. Barkana & A. Gruzinov, Fuzzy Cold Dark Matter: The Wave Properties of Ultra-light Particles, Phys. Rev. Lett. Vol. 85 (2000).
- [45] E. G. M. Ferreira Ultra-Light Dark Matter, arXiv:2005.03254 (2020).
- [46] R. D. Peccei & H. R. Quinn, CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles, Phys. Rev. Lett. Vol. 38 (1977).
- [47] C. Boutan et al., Axion Dark Matter eXperiment: Run 1A Analysis Details, Phys. Rev. D. 109 (2024).
- [48] Z. Ahmed et al., Search for Axions with the CDMS Experiment, Phys. Rev. Lett. Vol. 103 (2009).
- [49] E. Aprile et al., Search for New Physics in Electronic Recoil Data from XENONnT, Phys. Rev. Lett. Vol. 129 (2022).
- [50] G. Aad et al., Search for Dark Photons in Rare Z Boson Decays with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Lett. Vol. 131 (2023).
- [51] H. Abreu et al., Search for Dark Photons with the FASER Detector at the LHC, Phys. Lett. B. 848 (2024).
- [52] Z. Ahmed et al., Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment, Science Vol. 327 (2010).
- [53] I. Alkhatib et al., Light Dark Matter Search with a High-Resolution Athermal Phonon Detector Operated Above Ground, Phys. Rev. Lett. Vol. 127 (2021).
- [54] C. Amole et al., Dark Matter Search Results from the PICO-2L  $C_3F_8$  Bubble Chamber, Phys. Rev. Lett. Vol. 114 (2015).
- [55] C. Amole et al., Dark Matter Search Results from the Complete Exposure of the PICO-60  $C_3F_8$  Bubble Chamber, Phys. Rev. D 100 (2019).

- [56] J. Angle et al., First Results from the XENON10 Dark Matter Experiment at the Gran Sasso National Laboratory, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 100 (2008).
- [57] E. Aprile et al., First Dark Matter Search with Nuclear Recoils from the XENONnT Experiment, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 131 (2023).
- [58] J. Aalbers et al., First Dark Matter Search Results from the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 131 (2023).
- [59] A. Aguilar-Arevalo et al., Confirmation of the spectral excess in DAMIC at SNOLAB with skipper CCDs, *Phys. Rev. D* 109 (2024).
- [60] G. Angloher et al., Results on sub-GeV Dark Matter from a 10 eV Threshold CRESST-III Silicon Detector, *Phys. Rev. D* 107 (2023).
- [61] R. Bernabei et al., New Results from DAMA/LIBRA, *Eur. Phys. J. C* 67 (2010).
- [62] G. Adhikari et al., An Induced Annual Modulation Signature in COSINE-100 data by DAMA/LIBRA's Analysis Method, *Sci. Rep.* 13 (2023).
- [63] E. Aprile et al., Excess Electronic Recoil Events in XENON1T, *Phys. Rev. D* 102 (2020).
- [64] D. A. Smith et al., The Third Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars, *Astrophys. J.* 958 (2023).
- [65] A. Albert et al., Search for Decaying Dark Matter in the Virgo Cluster of Galaxies with HAWC, *Phys. Rev. D* 109 (2024).
- [66] H. Abe et al., Search for Gamma-ray Spectral Lines from Dark Matter Annihilation up to 100 TeV towards the Galactic Center with MAGIC, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 130 (2023).
- [67] A. Acharyya et al., Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to a Dark Matter Signal from the Galactic Centre, *JCAP* 01 (2021).
- [68] O. Adriani et al., Ten Years of PAMELA in Space, *Riv. Nuovo Cim.* 40 (2017).
- [69] A. Parenti, Latest Results from the DAMPE Space Mission, *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 51 (2023).
- [70] M. Aguilar et al., First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 110 (2013).
- [71] F. Aubin et al., Discrimination of Nuclear Recoils from Alpha Particles with Superheated Liquids, *New Journal of Physics* Vol. 10 (2008).
- [72] S. Archambault et al., Constraints on Low-Mass WIMP Interactions on 19F from PICASSO, *Phys.Lett.B* Vol. 711 (2012).
- [73] E. Behnke et al., Direct Measurement of the Bubble-Nucleation Energy Threshold in a CF3I Bubble Chamber, *Phys. Rev. D* Vol. 88 (2013).
- [74] E. Behnke et al., First Dark Matter Search Results from a 4-kg CF3I Bubble Chamber Operated in a Deep Underground Site *Phys.Rev. D* Vol. 86 (2012).



- [75] F. Seitz, *Physics of Fluids* (1958-1988) 1, 2 (1958).
- [76] C. Amole et al., The PICO-40L Detector, en desarrollo.
- [77] C. O’Lunaigh, Carrying the Weak Force: Thirty Years of the W Boson, <https://home.cern/news/news/physics/carrying-weak-force-thirty-years-w-boson> (2013).
- [78] K. Izlar, Thirty Years of the Z Boson, <https://home.web.cern.ch/news/news/physics/thirty-years-z-boson> (2013).
- [79] D. Huang et al., Search for Dark-Matter–Nucleon Interactions with a Dark Mediator in PandaX-4T, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 131 (2023).
- [80] C. Moore, Limit Updates <https://www.snolab.ca/pico-docdb/cgi/RetrieveFile?docid=5814&filename=Limit%20updates.pdf&version=1> (2024).
- [81] C. Amole et al., Data-Driven Modeling of Electron Recoil Nucleation in PICO  $C_3F_8$  Bubble Chambers, *Phys. Rev. D* Vol. 100 (2019).
- [82] Extraído de [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Decay\\_Chain\\_of\\_Uranium-238.svg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Decay_Chain_of_Uranium-238.svg), última modificación abril del 2017.
- [83] Extraído de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay\\_Chain\\_Thorium.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_Thorium.svg), última modificación diciembre del 2015.
- [84] J. Allison et al., Recent Developments in Geant4, *Nucl. Instrum. Meth. A* 835 (2016).
- [85] J. Allison et al., Geant4 Developments and Applications, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53 (2006).
- [86] S. Agostinelli et al., Geant4 - A Simulation Toolkit, *Nucl. Instrum. Meth. A* 506 (2003).
- [87] W. B. Wilson, et al., SOURCES 4C: a Code for Calculating ( $\alpha, n$ ), Spontaneous Fission, and Delayed Neutron Sources and Spectra (LA-UR-02-1839), (Jan 2002).
- [88] ROOT, CERN Root <https://root.cern/> (2024).
- [89] SNOLAB, SNOLAB World-class Underground Science Facility <https://www.snolab.ca/> (2024).
- [90] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, segunda edición, Springer 1993.
- [91] B. Ali et al., Determining the Bubble Nucleation Efficiency of Low-Energy Nuclear Recoils in Superheated  $C_3F_8$  Dark Matter Detectors, [arXiv:2205.05771](https://arxiv.org/abs/2205.05771) (2022).
- [92] SNOLAB, *SNOLAB User’s Handbook* (2006).
- [93] E. Adams, Neutron Multiplicity Ratio, <https://www.snolab.ca/pico-docdb/cgi> (2024).