



**Universidad
Zaragoza**

GRADO EN FÍSICA
TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DISEÑO DE UN BLINDAJE PARA UN DETECTOR DE
NaI OPERADO EN ARGÓN LÍQUIDO**

Autor:

Gorka Calvo González

Directoras:

María Luisa Sarsa Sarsa

Tamara Pardo Yanguas

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA

Índice

1. Introducción y objetivos	1
1.1. La Materia Oscura y el experimento DAMA/LIBRA	1
1.2. El experimento ANAIS-112	2
1.3. ANAIS+	3
1.4. Objetivos	4
2. Herramientas y Metodología	4
3. Resultados	8
3.1. Contaminaciones internas del cristal de NaI(Tl)	9
3.2. Contaminaciones del material del veto	14
3.3. Contaminaciones externas	15
3.4. Ritmos totales en anticoincidencia en el cristal de NaI	18
3.5. Eficiencia del NaI para la detección del ^{42}Ar	21
4. Conclusiones	21
Referencias	24
A. Anexo	26

1. Introducción y objetivos

1.1. La Materia Oscura y el experimento DAMA/LIBRA

Una de las mayores cuestiones sin resolver actualmente en la física es la naturaleza de la materia oscura, que compone aproximadamente el 85 % de la materia. Los primeros indicios de la existencia de materia oscura datan de los años 30. El astrónomo neerlandés Jan Hendrik Oort notó que el movimiento de las estrellas de la Vía Láctea parecía indicar la existencia de una mayor cantidad de materia que la estimada a partir de la luz observada. Según sus cálculos, las estrellas se movían a una velocidad lo suficientemente elevada como para escapar de la atracción gravitacional de la materia luminosa existente en la galaxia [1]. Atribuyó esta discrepancia a que al menos un 85 % de la luz de la galaxia estaba obstruida por polvo galáctico. Sin embargo había otra alternativa, la galaxia podía tener más masa que la visible en forma de estrellas y nubes de gas. Casi al mismo tiempo el astrónomo suizo Fritz Zwicky, estudiando las velocidades de dispersión de las galaxias en el cúmulo de Coma, obtuvo como resultado una masa total del cúmulo muy superior a la deducida a partir de su luminosidad [2], aplicando el teorema del virial que supone el sistema gravitacionalmente ligado. Esto implicaba que la mayor parte de la materia del cúmulo era no luminosa. En la década de los 70, los astrónomos estadounidenses Vera Rubin y Kent Ford midieron las velocidades de rotación de las estrellas en 60 galaxias espirales [2]. Los resultados mostraron altas velocidades de rotación de las estrellas, incluso las más alejadas del centro galáctico, que requerían de una distribución de masa en las galaxias espirales diferente de la que indicaba su luminosidad. Suponiendo una distribución de masa acorde con el perfil luminoso, la velocidad de las galaxias debía disminuir al aumentar la distancia respecto a su centro, sin embargo, la velocidad se mantenía constante. Una de las posibles explicaciones para estas observaciones volvía a ser la existencia en las galaxias de una gran cantidad de materia no luminosa, extendiéndose hasta distancias muy superiores al radio de la galaxia visible.

Hoy en día, la hipótesis de la existencia de la materia oscura es ampliamente aceptada en la comunidad científica, apoyada además por otras evidencias relevantes como las anisotropías en la radiación de fondo de microondas, las oscilaciones acústicas de bariones o las estructuras a gran escala. Sin embargo, ninguna partícula del modelo estándar de la física de partículas tiene las características adecuadas para explicar todas estas observaciones, por lo que la solución al problema de la materia oscura debe buscarse en partículas hipotéticas propuestas en el marco de nuevas teorías. Entre las partículas candidatas para explicar la materia oscura destacan los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), partículas masivas, eléctricamente neutras y que interaccionarían muy débilmente con la materia. Se han realizado numerosos experimentos en busca de los hipotéticos WIMPs pero hasta el momento, el único experimento con resultados positivos es el experimento DAMA/LIBRA. Este experimento, ubicado en el Laboratorio Nacional de Gran Sasso (LNGS), Italia, lleva registrando una modulación anual en la señal de sus detectores compatible con la que se esperaría que produjeran partículas de materia oscura [3]. Los resultados de DAMA/LIBRA no son compatibles con los de otros experimentos muy sensibles cuando se comparan en el marco de los modelos más sencillos de WIMP. Sin embargo, el resultado no se puede refutar de forma general a causa de las dependencias de la comparación con los modelos de WIMP y halo. Uno de los experimentos que busca reproducir los resultados de DAMA/LIBRA es ANAIS-112, que emplea el mismo blanco, NaI(Tl), y la misma técnica de

detección, el centelleo.

1.2. El experimento ANAIS-112

El experimento ANAIS-112 pretende confirmar o refutar los resultados positivos obtenidos por el experimento DAMA/LIBRA [4]. Dado que el objetivo del experimento ANAIS-112 es el análisis de la señal que producirían las partículas de materia oscura, el experimento tiene que trabajar aislado de cualquier posible contribución de otras partículas, tanto de la radiación ambiental como de la radiación cósmica, por lo que los detectores están protegidos por un blindaje adecuado y se alojan en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Los detectores de ANAIS-112 consisten en cristales centelleadores de NaI(Tl) acoplados a dos tubos fotomultiplicadores (PMTs) cada uno de ellos. Los centelleadores de NaI(Tl) convierten en luz parte de la energía depositada en el material por las partículas ionizantes. La luz producida es convertida en pulsos eléctricos en los PMTs. Los PMTs constan de un fotocátodo que convierte por efecto fotoeléctrico la luz incidente en fotoelectrones, que son acelerados mediante un campo eléctrico hacia una estructura de díodos. Cada dínodo debe estar a potencial mayor que el anterior y así, en cada uno de ellos, los electrones incidentes convierten la energía cinética en trabajo de extracción de electrones y multiplicación de la nube de carga. La salida del PMT en el ánodo se puede leer como corriente eléctrica o como carga (integrando la corriente eléctrica). Los PMTs permiten detectar fotones individuales, con una probabilidad de hasta un 40 % (eficiencia cuántica). Sin embargo, su sensibilidad para la detección de pequeñas cantidades de luz se ve afectada por la corriente oscura de estos dispositivos (emisión de fotoelectrones no asociada a luz).

El montaje completo de ANAIS-112 (ver Figura 1.1) consta de nueve detectores centelleadores de NaI(Tl), de 12,5 kg cada uno, con forma cilíndrica (12,065 cm de diámetro y 29,845 cm de altura) [4]. Los módulos están colocados en una matriz 3×3 . Los cristales están recubiertos por cobre OFE (Oxygen Free Electronic). Los detectores están rodeados por un blindaje consistente en 10 cm de plomo arqueológico y 20 cm de plomo de baja actividad, seguido por una caja anti-radón que se mantiene bajo sobrepresión de nitrógeno gas para evitar la intrusión de radón del aire del laboratorio. La caja está rodeada por vetos plásticos y, por último, 40 cm de un moderador de neutrones. Pese a los 800 metros de roca que protegen el Laboratorio Subterráneo de Canfranc de la radiación cósmica, algunos muones son capaces de llegar al laboratorio y tanto interactuar directamente en los detectores de ANAIS como producir otras partículas en los materiales próximos, por lo que se emplea un veto activo formado por centelleadores de plástico a los lados y por encima de la matriz de detectores para identificar los muones que logren alcanzar el dispositivo experimental y eliminar sucesos relacionados [5].

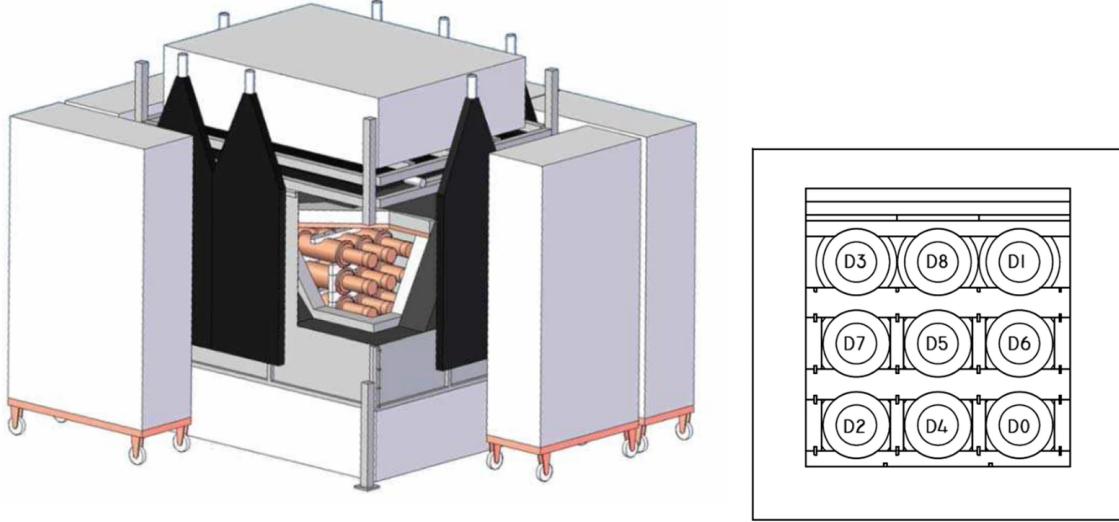


Figura 1.1: Montaje experimental de ANAIS-112 [5].

1.3. ANAIS+

El experimento ANAIS-112 está en sus últimas fases de toma de datos y, de momento, sus resultados son incompatibles con el resultado del experimento DAMA/LIBRA al no observar modulación en sus datos [6]. Sin embargo, existen algunos posibles efectos sistemáticos que pueden poner en cuestión dicha incompatibilidad, y por ello, se están desarrollando prototipos mejorados en el marco del proyecto ANAIS+, que permitirían además aumentar significativamente la sensibilidad a distintos candidatos a la materia oscura, en particular en el rango de WIMPs de bajas masas. La limitación de la sensibilidad de ANAIS-112 viene dada en primer lugar por la utilización de tubos fotomultiplicadores para la detección de la luz de centelleo del cristal de NaI y en segundo lugar por las contribuciones de fondos radiactivos. Estas contribuciones están principalmente dominadas por la contaminación del propio cristal, superior a la de los cristales de DAMA/LIBRA y la de los PMTs, ya que el blindaje de ANAIS-112 permite reducir de forma muy importante la contribución de la radiación medioambiental externa.

Para mejorar la sensibilidad en ANAIS+, se propone emplear fotomultiplicadores de silicio (SiPMs) y operar los cristales en un tanque de argón líquido, que serviría a la vez como baño térmico y veto. Respecto a los fotomultiplicadores, los SiPMs están más libres de contaminantes y funcionan con bajo voltaje, permitiendo reducir mucho contribuciones tanto de fondo radiactivo como de sucesos anómalos no asociados al centelleo del NaI(Tl), que se observan en ANAIS y pueden ser causados por el alto voltaje requerido para la operación de los PMTs. Uno de los motivos por el cual se propone operar el sistema dentro de argón líquido en lugar de otros elementos es debido a que tiene una temperatura adecuada para la operación de los SiPMs en condiciones de baja corriente oscura. Otro punto importante para el uso de argón líquido es que emite luz cuando una partícula deposita energía en él, por lo que se puede emplear como veto activo, permitiendo así discriminar algunas contribuciones del fondo y mejorando de esta manera la sensibilidad del experimento.

1.4. Objetivos

El objetivo de este trabajo es simular el fondo radiactivo que se podría alcanzar con un prototipo de ANAIS+ en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc dentro de un tanque de argón líquido y con un blindaje adecuado. También se van a obtener resultados empleando un veto de agua en lugar de argón líquido y se compararán los fondos totales que se consiguen utilizando ambos vetos.

Para lograr este objetivo se ha reproducido, en primer lugar, un dispositivo experimental similar al que se utilizará en el primer prototipo de ANAIS+, aunque simplificado. Se han valorado los isótopos radiactivos de interés, que suponen las componentes del fondo radiactivo más relevantes, y el efecto de utilizar diferentes opciones de blindaje. Finalmente, se ha elaborado un modelo de fondo del prototipo de ANAIS+.

2. Herramientas y Metodología

Teniendo claro el objetivo, ahora se procede a describir las herramientas más adecuadas para llevarlo a cabo. Estas herramientas son ROOT y Geant4, dos programas desarrollados en el CERN y de amplio uso en muchos campos, en particular en física de partículas. ROOT es un potente entorno de análisis de datos [7]. En ROOT los datos se almacenan en unas estructuras denominadas “árboles”. Estas estructuras pueden contener varias “ramas” que, a su vez, contienen “hojas” (variables) [7]. Esta disposición de datos es lo que convierte a ROOT en una excelente opción para el análisis de grandes volúmenes de datos en física de partículas.

Por otro lado, Geant4 permite la simulación de sistemas de detección y sus blindajes así como de la interacción de partículas con la materia [8]. Antes de lanzar cualquier simulación, se define en Geant4 la geometría del detector y de su entorno (blindajes, por ejemplo). Entre los diferentes volúmenes que constituyen el sistema de detección, los volúmenes definidos como sensibles son aquellos en los que se va a guardar la información que se precise sobre los depósitos energéticos de las partículas que los atraviesan.

Nuestro sistema siempre va a contar con dos elementos fundamentales, el cristal de NaI (detector) y un veto activo de argón líquido o agua, por lo que los volúmenes sensibles son el cristal de NaI(Tl) y el veto. En primer lugar se simulará un detector simplificado con sólo las dos componentes fundamentales para familiarizarse con el uso de las herramientas. A continuación se irá aumentando la complejidad del sistema buscando reproducir lo que podría ser el dispositivo empleado en ANAIS+. Se realizarán simulaciones de los isótopos que se recogen en la Tabla 2.1 que se podrían encontrar en un posible montaje de ANAIS+ como parte de la radiación ambiental o impurezas de los materiales.

Los resultados de las simulaciones se guardan en “árboles” para su posterior análisis en ROOT, en dos niveles de análisis. En el primer nivel de análisis se guardan variables de interés como la energía depositada, el tiempo en el que ocurre una interacción, el tipo de partícula, el volumen en el que ocurre dicha interacción, el número correspondiente a este evento o el proceso

que ha tenido lugar. En el segundo nivel se suman todas las energías depositadas en cada uno de los volúmenes sensibles en las interacciones que ocurren en un intervalo de tiempo equivalente a la ventana de integración de ANAIS-112 ($1 \mu\text{s}$), para reproducir el sistema de adquisición del experimento. Además, se identifican los eventos coincidentes, es decir, aquellos eventos en los que tiene lugar un depósito energético en los dos volúmenes sensibles dentro de la ventana de coincidencia, que, en el caso de ANAIS-112, coincide con la ventana de integración ($1 \mu\text{s}$). Por otro lado, los eventos anticoincidentes son aquellos en los que el depósito energético tiene lugar en un único volumen sensible. Cuando la partícula que realiza el depósito es un electrón, en este segundo nivel se guardará como energía “visible” la energía depositada sin correcciones. Sin embargo, cuando interactúan otras partículas, como neutrones o partículas α , entonces la emisión de centelleo se ve reducida y la energía “visible” en el detector es menor que la que habría correspondido a un depósito de electrones. El QF (Factor de Quenching del centelleo) permite incorporar en la simulación este efecto y en este trabajo se han tomado valores de 0,6 para las partículas α , 0,06 para el yodo y un valor dependiente de la energía, basado en la calibración proporcional obtenida de los cristales de ANAIS para el sodio. Las variables relevantes del segundo nivel son:

- Energía depositada en la ventana de integración en cada volumen sensible
- Volumen sensible
- Tiempo del evento

Los resultados que se obtienen de las simulaciones son las energías que se depositarían en un detector perfecto. Para reproducir la respuesta de un detector real hay que tener en cuenta su resolución en energía, que se puede considerar en primera aproximación dominada por las fluctuaciones poissonianas en el número de portadores de información, los fotones de centelleo. Para implementar esta corrección, se convoluciona el espectro simulado con una función gaussiana con una desviación estándar que en los detectores de ANAIS-112 se parametriza en función de la energía como: $\alpha + \beta\sqrt{E}$ [9]. Los valores de α y β varían en función del rango de energía considerado. Para $E < 150 \text{ keV}$, $\alpha = -0,08 \text{ keV}$ y $\beta = 0,378 \text{ keV}^{1/2}$ y para $E > 150 \text{ keV}$, $\alpha = -6,11 \text{ keV}$ y $\beta = 1,138 \text{ keV}^{1/2}$. Por otro lado, no se ha considerado ninguna resolución para los vetos empleados.

En este trabajo se ha usado como referencia tanto la resolución como las ventanas de integración y coincidencia correspondientes a ANAIS-112. Estos valores podrían ser diferentes para el detector de ANAIS+, sin embargo, no se espera que estos parámetros afecten de forma importante a las conclusiones extraídas de este estudio.

En la Tabla 2.1 se muestran las actividades consideradas en este trabajo para cada uno de los isótopos simulados, así como los flujos de partículas en el caso de contaminaciones externas. Estas actividades se han tomado del modelo de fondo de ANAIS-112, así como de otras fuentes [4] [5] [10] [11] [12] [13][14]. En la simulación se consideran un número N de desintegraciones de cada isótopo que habrá que corregir con un factor adecuado a la actividad correspondiente para determinar su contribución al fondo radiactivo del prototipo. Por ejemplo, para el ^{40}K se ha tomado su actividad como el promedio de la actividad de los detectores de ANAIS-112, $0,99 \text{ mBq/kg}$, y su factor de escala se ha obtenido teniendo en cuenta el número de sucesos iniciales

(10^6), la masa del cristal y el bineado empleado (1 keV). El factor de escala que se obtiene para un cristal de 0,94 kg es de 11691 keV·kg·día. Los histogramas de energía depositada obtenidos en la simulación se dividirán por este factor de escala para obtener los ritmos correspondientes a esta contribución al fondo radiactivo en cuentas/keV/kg/día. Cuando se presenten los resultados, antes de aplicar el factor de escala correspondiente, se determinarán los errores: si el número de sucesos detectados en un rango energético es N se tomará como error $\sqrt{N}$, pero si $N < 10$ se dará como resultado el límite superior correspondiente a un proceso de Poisson al 90 %.

	Volumen	Isótopo	Actividad/Flujo
Internas	Cristal de NaI	^{40}K	0,99 mBq/kg [4] [5]
		^{22}Na	0,91 mBq/kg [5]
		^{238}U	$7,56 \times 10^{-3}$ mBq/kg [4] [5]
		^{232}Th	$1,90 \times 10^{-3}$ mBq/kg [5]
		^{210}Pb	1,53 mBq/kg [4] [5]
	Agua normal	^{40}K	127 Bq/m ³ [10]
	Agua ultrapura	^{40}K	0,155 mBq/m ³ [11]
	Argón atmosférico	^{39}Ar	1400 Bq/m ³ [14]
	Argón “Underground”	^{39}Ar	1,022 Bq/m ³ [13]
Externas	Laboratorio	^{222}Rn	0,6 mBq/m ³ [5]
		^{40}K	0,33 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ [5]
		Neutrones	$20,9 \times 10^{-6}$ n/cm ² /s [12]
		^{238}U	0,71 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ [5]
		^{232}Th	0,85 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ [5]

Tabla 2.1: Actividades de los isótopos y flujos de las partículas empleados en este trabajo.

A continuación se justifica la relevancia de cada una de las contribuciones simuladas.

- ^{40}K : El potasio es abundante en la corteza terrestre, suponiendo el ^{40}K un 0.012 % del potasio natural, por lo que es una importante fuente de radioactividad ambiental, y lo podemos encontrar tanto en el cristal de NaI, ya que es afín químicamente al sodio, como en otras componentes del dispositivo experimental (veto de agua) y en la radiación ambiental. El ^{40}K tiene una vida media de $1,2504 \times 10^9$ años y sus modos de desintegración son β^- (89,25 %), β^+ (0,001 %) y captura electrónica (10,75 %) tal y como se puede ver en la Figura A.1 [15]. Se ha tomado como actividad de este isótopo 0,99 mBq/kg, calculada como el promedio de las actividades de los nueve cristales de NaI(Tl) de ANAIS-112, y simulándola homogéneamente distribuida en el cristal [4] [5]. Teniendo en cuenta que la concentración de potasio en agua dulce es de entre 1 y 8 mg/l [10], tomamos un valor medio de 4 mg/l y calculamos la concentración del ^{40}K a través de su abundancia natural (0.012 %) [16] para obtener su actividad correspondiente en el veto de agua, 127 Bq/m³ (ver Tabla 2.1). Sin embargo, la concentración de potasio en agua “ultrapura” se reduce hasta $5 \times 10^{-3} \mu\text{g/l}$ [11]. La actividad resultante de esta concentración es 0,155 mBq/m³, seis órdenes de magnitud inferior que para el caso anterior. Por último, también se ha simulado como fuente externa con un flujo de 0,33 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ [5].
- ^{22}Na : Tiene una vida media de 2,6029 años y se desintegra mediante captura electróni-

ca (9 %) y desintegración β^+ (91 %) al ^{22}Ne (ver Figura A.2) [15]. Este isótopo se produce mediante activación cosmogénica en el cristal de NaI, donde se simulará homogéneamente distribuido con una actividad de 0,91 mBq/kg (ver Tabla 2.1), acorde con la estimación realizada para los cristales de ANAIS-112 [5] nada más ser llevados al Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

- ^{238}U : El ^{238}U tiene una vida media de $4,468 \times 10^9$ años. Este isótopo inicia una cadena de desintegración (ver Figura A.3) [15]. Es un constituyente minoritario de otros minerales y tiene una abundancia de 2,5 gr/ton en la corteza terrestre [17] [18]. El cristal de NaI puede contener trazas de este elemento por lo que puede contribuir al fondo radioactivo del prototipo. También puede contribuir al fondo vía el flujo de fotones producidos en las paredes del laboratorio. Debido a esto se simulará en ambos escenarios con una actividad de $7,56 \times 10^{-3}$ mBq/kg para una distribución uniforme en el cristal y con un flujo de $0,71 \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ como fuente externa (ver Tabla 2.1) [5].
- ^{222}Rn : Se trata de un isótopo gaseoso, que forma parte de la cadena del ^{238}U , tal y como se puede apreciar en la Figura A.3, y que por emanación de las paredes o materiales de construcción que contienen ^{238}U se acumula en el aire en lugares mal ventilados. Por este motivo en estas simulaciones colocaremos este isótopo distribuido en el volumen de aire que hay entre el veto y el blindaje de plomo. Al tratarse de una cadena de desintegración, se observará la energía depositada tanto de este isótopo como de sus hijos. Tiene una vida media de 3,8232 días [15]. Se toma una actividad de 0,6 mBq/m³ (ver Tabla 2.1) [5].
- ^{210}Pb : Este isótopo tiene una vida media de 22,23 años [15]. Al igual que el ^{222}Rn pertenece a la cadena de desintegración del ^{238}U (ver Figura A.3). Este elemento es uno de los principales contaminantes de los cristales de ANAIS-112, probablemente por depósito de ^{222}Rn en algún momento del proceso de crecimiento del cristal o fabricación del detector. Se simulará uniformemente distribuido en el cristal de NaI con una actividad de 1,53 mBq/kg (ver Tabla 2.1) [4] [5]. Esta actividad es el resultado del promedio de las actividades del ^{210}Pb de los nueve cristales de NaI(Tl) de ANAIS-112.
- ^{39}Ar : El ^{39}Ar es un isótopo con una vida media de 269 años. Se desintegra al ^{39}K mediante desintegración β^- . El ^{39}Ar se produce por activación cosmogénica y su presencia es un fondo radioactivo importante en argón gas y líquido expuestos a la radiación cósmica. Este isótopo se simulará uniformemente distribuido en el veto de argón con una actividad de 1400 Bq/m³ (ver Tabla 2.1) [14]. Existe, sin embargo, argón subterráneo (“Underground Argon”) que contiene cantidades bajas de ^{39}Ar al no haberse podido activar cosmogénicamente. Este argón tiene una actividad de 0,73 mBq/kg en ^{39}Ar [13], o de manera equivalente, 1,022 Bq/m³, una actividad tres órdenes de magnitud menor que para el caso del argón atmosférico.
- ^{232}Th : El ^{232}Th es un isótopo con una vida media de $14,02 \times 10^9$ años [15]. Es el padre de una cadena de desintegración (ver Figura A.6). El ^{232}Th , al igual que el ^{238}U se encuentra habitualmente como un constituyente minoritario de otros minerales [17] y tiene una abundancia de 10 gr/ton en la corteza terrestre [18]. Se encuentra tanto como una impureza del NaI como una fuente externa. Se simulará con una actividad de $1,90 \times 10^{-3}$ mBq/kg

distribuido de manera uniforme en el cristal y con un flujo de $0,85 \text{ } \gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ como fuente externa (ver Tabla 2.1) [5].

- Neutrones: También se va a simular el fondo de neutrones ambientales, que son el resultado de reacciones de fisión espontánea del ^{238}U presente en la roca o cemento del laboratorio, o de reacciones (α, n) . El flujo empleado para los neutrones es de $20,9 \times 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ (ver Tabla 2.1) medido en el Hall B del Laboratorio Subterráneo de Canfranc [12].

3. Resultados

El primer sistema simulado constó únicamente de un cristal de NaI(Tl) de geometría cúbica y un cilindro de agua o argón actuando como veto activo a su alrededor.

Se realizaron pruebas para partículas como electrones o fotones lanzados desde el centro del cristal con diferentes energías y dimensiones de los volúmenes sensibles para familiarizarse con las herramientas. Por ejemplo, se lanzaron partículas γ de 1 MeV desde el centro del cristal. En la Figura 3.1a se puede observar que los fotones de 1 MeV no llegan a escapar del cristal de NaI(Tl) y no generan sucesos coincidentes. Los volúmenes sensibles en este caso fueron un cubo de NaI(Tl) de 100 cm de lado y un cilindro de agua de 160 cm de longitud y 90 cm de radio. Si las dimensiones del cristal hubieran sido menores, habría habido coincidencias con el veto, que no se observan en esta configuración. También se lanzaron neutrones como fuente externa (ver Figura 3.1b) a un cubo de 6,35 cm de NaI sumergido en un tanque de argón líquido de 62 cm de largo y 12,5 cm de radio.

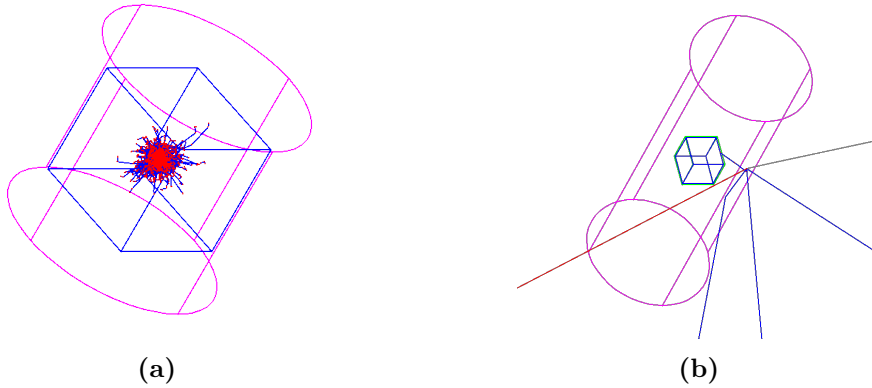


Figura 3.1: Trazas de fotones de 1 MeV emitidos desde el centro de un cristal de NaI(Tl) de 100 cm de lado dentro de un tanque de agua (a) y neutrones emitidos como fuente externa para un cubo de 6,35 cm de lado dentro de un tanque de argón líquido (b). En el (a) se muestran las trayectorias de los electrones (rojo) y γ (azul) mientras que en (b) se muestran las trayectorias de los neutrones (rojo) y las γ (azul).

A continuación, se diseñó una geometría similar a la considerada para el primer prototipo de ANAIS+: para los cristales, cubos de aproximadamente 1 kg (6,35 cm de lado) y un tanque como veto de 12,5 cm de radio y 62 cm de largo (ver Figura 3.2a). Dado que el NaI es higroscópico (se degrada con la humedad) es necesario encapsularlo herméticamente para aislarlo del entorno. El material elegido para esto fue el cobre ya que puede conseguirse de elevada radiopureza y con buenas propiedades mecánicas. Se añadió, por lo tanto, al modelo simplifi-

cado de prototipo un encapsulamiento de cobre de 1,5 mm de espesor alrededor del cristal de NaI.

De forma similar, el volumen del veto, tanto si es argón líquido como agua, debe estar contenido en un recipiente. Se eligió un recipiente cilíndrico de cobre de 1 mm de espesor. Como blindaje frente a la radiación medioambiental se utiliza plomo, con forma de paralelepípedo y espesor variable. Entre el blindaje de plomo y el cilindro de cobre hay una pequeña capa de aire de 1 mm de espesor. La Figura 3.2b muestra la geometría correspondiente a un blindaje de plomo de 10 cm de espesor.

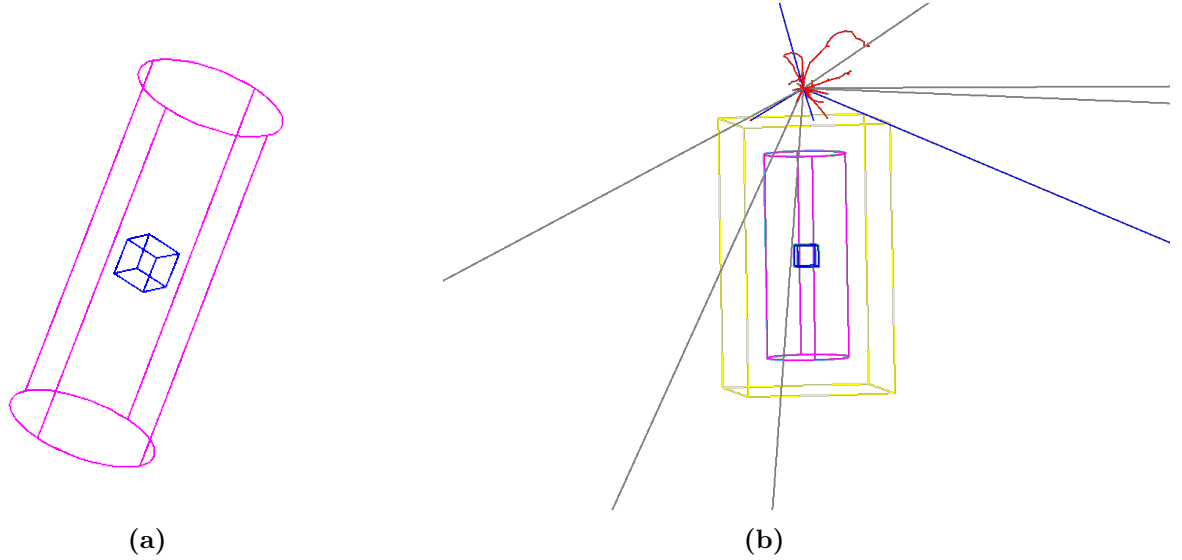


Figura 3.2: Geometrías empleadas en ANAIS+. Geometría simplificada (a) y con blindaje de plomo de 10 cm de espesor (b). En (b) se muestran también las trayectorias de neutrones (gris), γ (azul) y electrones (rojo) emitidos desde una fuente de ^{252}Cf colocada en el exterior del blindaje. Cristal de NaI (azul), veto (rosa) y plomo (amarillo).

Con esta geometría se han simulado las desintegraciones de los isótopos recogidos en la Tabla 2.1 en los diferentes volúmenes o en el entorno para evaluar el fondo que se podrá alcanzar en el prototipo de ANAIS+. Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

3.1. Contaminaciones internas del cristal de NaI(Tl)

En este trabajo, las contaminaciones internas consideradas son ^{40}K , ^{22}Na , ^{210}Pb , ^{232}Th y ^{238}U . Todas ellas se consideran uniformemente distribuidas en el volumen del cristal.

- ^{40}K

Es conveniente recordar que la actividad del ^{40}K en el cristal es de 0,99 mBq/kg (ver Tabla 2.1). No se van a encontrar eventos anticoincidentes en el veto ya que todos los sucesos tendrán algún depósito energético en el cristal. Los resultados de los ritmos de sucesos en el cristal para los casos de veto de agua y veto de argón líquido se recogen en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.3. En ellas se muestran los espectros de energía depositada en el cristal de NaI en anticoincidencia, en coincidencia con el veto, o independientemente de que haya o no un depósito energético en el veto (etiquetado como “total”). En la tabla se muestran los ritmos correspondientes a la integral de dichos espectros en todo el rango

energético (desde 0 hasta 3000 keV) y en el rango que nos interesa para la detección de materia oscura (1 a 6 keV).

^{40}K		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Rango de 0 a 3000 keV	Veto de Argón	$84,17 \pm 0,08$	$5,24 \pm 0,02$	$78,93 \pm 0,08$
	Veto de Agua	$84,22 \pm 0,08$	$4,34 \pm 0,02$	$79,88 \pm 0,08$
Rango de 1 a 6 keV	Veto de Argón	$4,57 \pm 0,02$	$2,79 \pm 0,02$	$1,78 \pm 0,01$
	Veto de Agua	$4,52 \pm 0,02$	$2,21 \pm 0,01$	$2,31 \pm 0,01$

Tabla 3.1: Ritmos en el cristal de NaI para el ^{40}K distribuido uniformemente en el cristal.

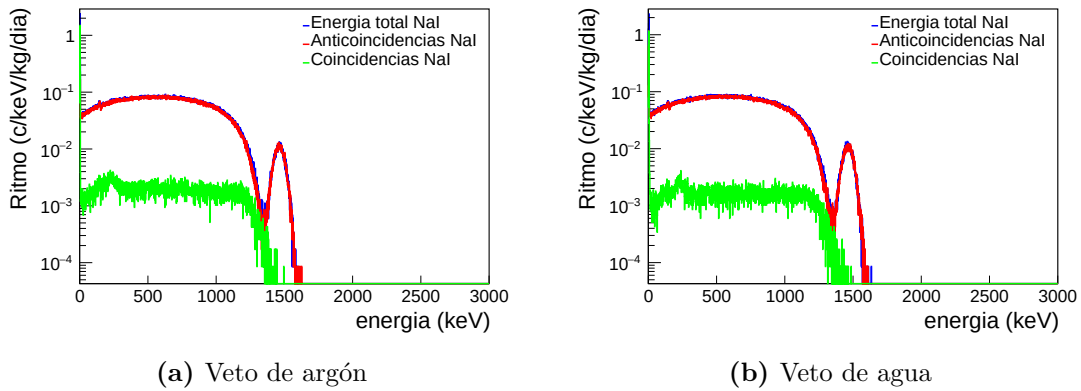


Figura 3.3: Contribuciones al fondo de ^{40}K distribuido en el cristal de NaI con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 con veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

En la Figura 3.3 se identifica el γ de 1460 keV que se absorbe por efecto fotoeléctrico en el cristal de NaI, el compton correspondiente, tanto en el cristal como en el veto, y el espectro beta (sumado con el compton, en el cristal). También se observa un ritmo en coincidencia mayor en el veto de argón, aunque sin ser una diferencia notable respecto al de agua (ver Tabla 3.1 y Figura 3.3). Esta diferencia se debe a las secciones eficaces de interacción de los fotones con argón y con agua. Para fotones en torno a 1500 keV la sección eficaz es de 3,11 barns con un recorrido libre medio de 15 cm para el argón y de 1,72 barns con un recorrido libre medio de 17 cm para el agua [19]. Estos datos y resultados indican que el veto de argón es más eficiente que el veto de agua, pero en todo caso, la mayoría de los sucesos detectados en el cristal corresponderán a anticoincidencias. En el mejor de los casos, con el veto de argón, un 6 % de los sucesos pueden ser rechazados. Sin embargo, en la región de interés para el análisis de materia oscura, de 1 a 6 keV, el efecto del veto es importante, como se puede observar en la Tabla 3.1 más de un 50 % de los sucesos en esta región podrían ser rechazados mediante las coincidencias utilizando el veto.

- ^{22}Na

La actividad del ^{22}Na es 0,91 mBq/kg (ver Tabla 2.1). Los resultados para este isótopo se muestran en la Tabla 3.2 y en las Figuras 3.4a y 3.4b. Respecto al caso del ^{40}K , se observa una mayor diferencia entre los datos en coincidencia y anticoincidencia en función del veto y que dominan las coincidencias. Este hecho se explica por el modo de desintegración

del ^{22}Na , que emite fotones de 1274 keV con probabilidad del 99,94 % frente al 10,55 % correspondiente a la emisión de fotones de 1460 keV por el ^{40}K y a que en la desintegración β^+ se emiten positrones que se aniquilan emitiendo 2 fotones de 511 keV en direcciones opuestas, que generan muchos sucesos en coincidencia.

^{22}Na		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Rango de 0 a 3000 keV	Veto de Argón	75,41±0,08	67,47±0,07	7,96±0,02
	Veto de Agua	75,58±0,08	62,49±0,07	13,11±0,03
Rango de 1 a 6 keV	Veto de Argón	1,31±0,01	0,92±0,01	0,41±0,01
	Veto de Agua	1,57±0,01	0,88±0,01	0,70±0,01

Tabla 3.2: Ritmos en el cristal de NaI para el ^{22}Na distribuido uniformemente en el cristal.

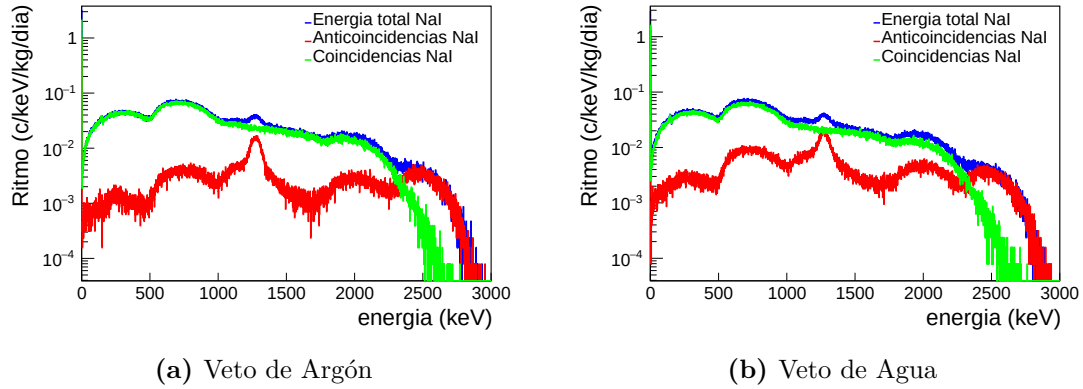


Figura 3.4: Contribuciones al fondo de ^{22}Na distribuido en el cristal de NaI con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 con veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

La Figura 3.5 muestra las coincidencias en un plot en dos dimensiones donde cada eje es la energía depositada en uno de los volúmenes sensibles. En ella se pueden observar claramente las coincidencias de un depósito de unos 1270 keV, 511 keV y 1780 keV (la suma de los anteriores) en el veto con energías en un amplio rango en el cristal.

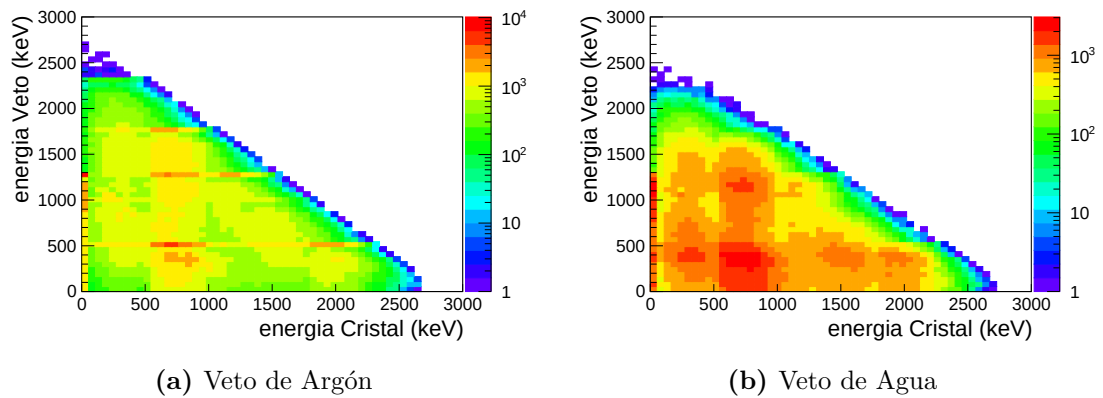


Figura 3.5: Energía depositada en el cristal frente a la energía depositada en el veto para sucesos en coincidencia. Veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

- **^{210}Pb**

La actividad del ^{210}Pb en el cristal es de 1,53 mBq/kg (ver Tabla 2.1). Dado que la energía liberada en su desintegración es muy baja (63,5 keV), tanto los electrones como los fotones (46,5 keV) se absorben en el cristal de NaI antes de alcanzar el veto (ver Tabla 3.3) [15]. Los descendientes del ^{210}Pb , tanto ^{210}Bi como ^{210}Po , se desintegran β^- y α al estado fundamental del hijo correspondiente, por lo que no emiten fotones. Tanto los electrones de 1161 keV como los α de 5400 keV emitidos en cada caso se absorben completamente en el cristal de NaI [15], ya que los electrones sólo son capaces de recorrer una distancia de 0,24 mm mientras que las partículas α recorren una distancia de $3,27 \times 10^{-2}$ mm antes de ser completamente absorbidas por el cristal de NaI [20]. Esto implica que el veto no puede detectar sucesos en coincidencia, ni por lo tanto ayudar a reducir la contribución de ^{210}Pb en el experimento, y es preciso conseguir producir los cristales de NaI con la máxima radiopureza de este isótopo. En la Figura 3.6 se puede observar el espectro β de los electrones del ^{210}Bi , acabando aproximadamente en 1,1 MeV. A energías más bajas se distingue el γ de 46,5 keV del ^{210}Pb así como el espectro β del ^{210}Pb .

^{210}Pb	Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Veto de Argón	$263,36 \pm 0,19$	$0,44 \pm 0,01$	$262,93 \pm 0,19$
Veto de Agua	$263,35 \pm 0,19$	$0,39 \pm 0,01$	$262,93 \pm 0,19$

Tabla 3.3: Ritmos para el ^{210}Pb distribuido uniformemente en el cristal de NaI.

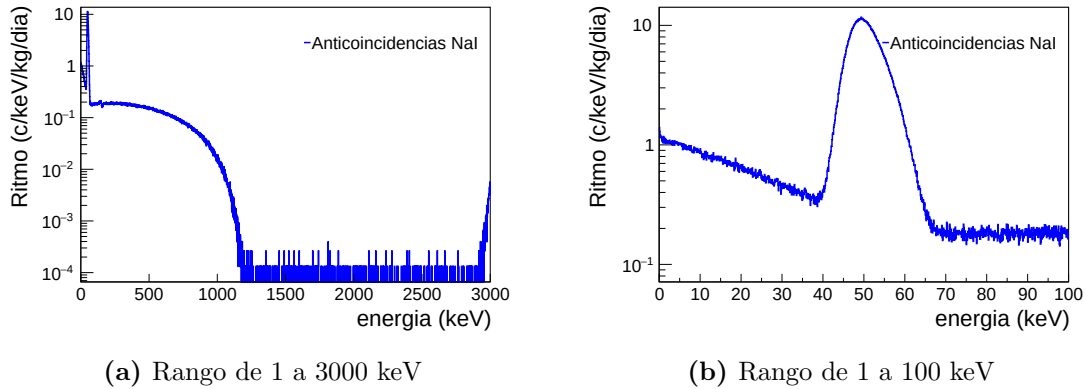


Figura 3.6: Contribuciones al fondo de ^{210}Pb distribuido en el cristal de NaI con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 con veto de argón líquido (es idéntico al obtenido con veto de agua). Rango de 1 a 3000 keV (a) y de 1 a 100 keV (b).

- **^{232}Th**

La actividad del ^{232}Th es $1,9 \times 10^{-3}$ mBq/kg (ver Tabla 2.1). Los resultados de la simulación para el ^{232}Th como impureza contenida en el cristal se pueden observar en la Tabla 3.4 y la Figura 3.7.

^{232}Th	Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Veto de Argón	$(69,86 \pm 0,11) \times 10^{-2}$	$(13,75 \pm 0,05) \times 10^{-2}$	$(56,10 \pm 0,09) \times 10^{-2}$
Veto de Agua	$(69,87 \pm 0,11) \times 10^{-2}$	$(12,97 \pm 0,05) \times 10^{-2}$	$(56,91 \pm 0,09) \times 10^{-2}$

Tabla 3.4: Ritmos en el cristal de NaI para una contaminación de ^{232}Th uniformemente distribuida en el cristal.

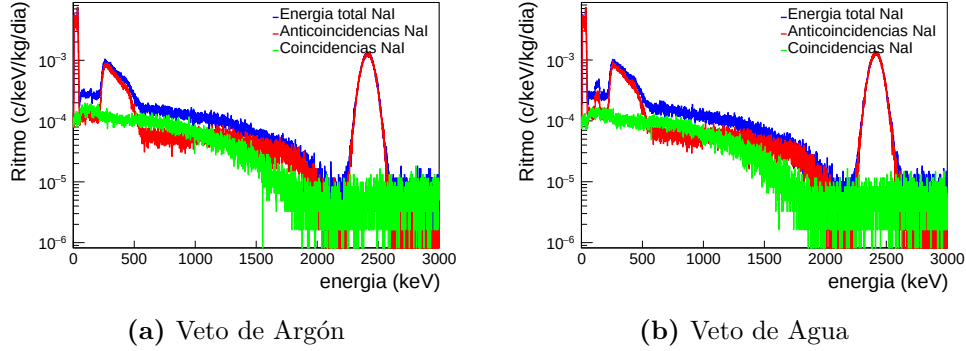


Figura 3.7: Contribuciones al fondo de ^{232}Th distribuido en el cristal de NaI con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 con veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

• ^{238}U

La actividad del ^{238}U es $7,56 \times 10^{-3}$ mBq/kg (ver Tabla 2.1). Los resultados de las simulaciones para el ^{238}U como impureza contenida en el cristal se pueden observar en la Tabla 3.5 y la Figura 3.8.

^{238}U	Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Veto de Argón	$(57,45 \pm 0,06) \times 10^{-1}$	$(1,65 \pm 0,01) \times 10^{-1}$	$(55,79 \pm 0,06) \times 10^{-1}$
Veto de Agua	$(57,45 \pm 0,06) \times 10^{-1}$	$(1,57 \pm 0,01) \times 10^{-1}$	$(55,87 \pm 0,06) \times 10^{-1}$

Tabla 3.5: Ritmos en el cristal de NaI para una contaminación de ^{238}U uniformemente distribuida en el cristal.

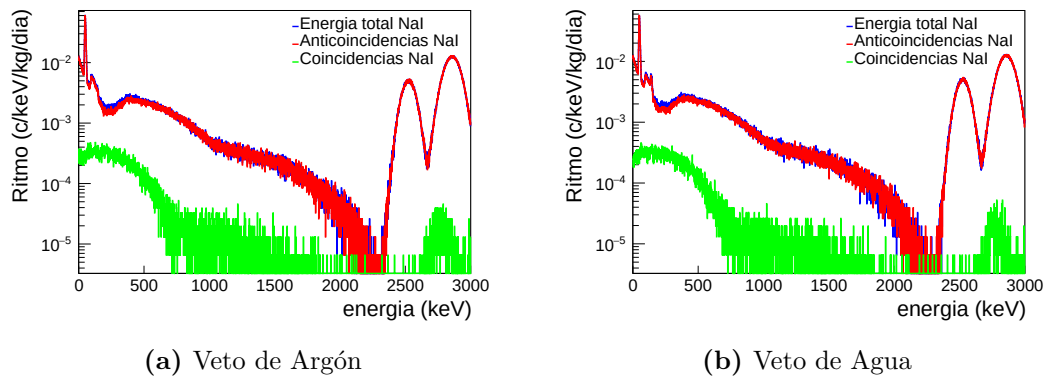


Figura 3.8: Contribuciones al fondo de ^{238}U distribuido en el cristal de NaI con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 con veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

En las Figuras 3.7 y 3.8 se observan por encima de 2 MeV los depósitos energéticos correspondientes a las partículas α emitidas en sus respectivas cadenas de desintegración.

3.2. Contaminaciones del material del veto

Suponiendo que tenemos un veto perfecto, estas contaminaciones no generan anticoincidencias en el cristal, únicamente generan coincidencias por lo que no contribuirán al espectro energético final en anticoincidencia. Sin embargo, todos los detectores tienen una energía mínima a la que son sensibles, el umbral de energía. Este hecho afecta a la definición de un suceso como coincidente. La Tabla 3.6 muestra los resultados para un veto perfecto y para un veto con umbral de 150 keV. Las contaminaciones consideradas son ^{40}K uniformemente distribuido en agua y ^{39}Ar uniformemente distribuido en el volumen de argón.

- ^{40}K

La actividad del ^{40}K uniformemente distribuido en el veto de agua es de 127 Bq/m³ (ver Tabla 2.1) y de 0,155 Bq/m³ para el agua “ultrapura”. Los resultados de las simulaciones confirman que no se registran eventos anticoincidentes en el cristal de NaI, pero un ritmo importante de sucesos en coincidencia (ver Tabla 3.6).

- ^{39}Ar

La actividad del ^{39}Ar es 1400 Bq/m³ para argón atmosférico y 1,022 Bq/m³ para “Underground Argon” (ver Tabla 2.1). Al igual que para el ^{40}K , el ^{39}Ar sólo produce coincidencias en el cristal (ver Tabla 3.6).

		Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
^{40}K en agua	Sin umbral	23,57±0,51	-
	Con umbral	15,76±0,42	7,81±0,29
^{40}K en agua ultrapura	Sin umbral	(28,76±0,62)×10 ⁻⁶	-
	Con umbral	(19,23±0,51)×10 ⁻⁶	(9,54±0,36)×10 ⁻⁶
^{39}Ar en argón atmosférico	Sin umbral	1,21±0,32	-
	Con umbral	<1,02	<1,25
^{39}Ar en “Argon underground”	Sin umbral	(8,83±2,36)×10 ⁻⁴	-
	Con umbral	<0,75×10 ⁻³	<0,91×10 ⁻³

Tabla 3.6: Ritmos en coincidencia y anticoincidencia en el cristal para el ^{40}K y el ^{39}Ar , sin y con umbral en el veto, distribuidos uniformemente en los vetos de agua y argón, respectivamente.

Se puede observar en la Tabla 3.6 que en el caso de un veto no ideal, el ^{40}K en el agua supone una contribución importante al fondo del cristal en anticoincidencia, aproximadamente igual a la contribución del ^{22}Na . En el caso del ^{39}Ar en el veto de argón, la contribución es mucho menor. En todo caso, utilizando agua ultrapura y argón subterráneo, incluso con un veto no ideal se logran contribuciones no significativas.

3.3. Contaminaciones externas

Consideramos contaminaciones externas el ^{222}Rn distribuido en el volumen de aire entre el blindaje de plomo y el recipiente del veto y los flujos ambientales de fotones y neutrones. Para estos últimos, un aspecto fundamental es la definición de la fuente desde la cual se generarán las desintegraciones. En este trabajo se han utilizado los flujos medidos en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc emitidos desde la superficie de una esfera con 1,62 m de diámetro. El plomo que blindo el cristal de la contaminación ambiental tiene un espesor variable. Se realizaron simulaciones tanto con 2 cm como con 10 cm de plomo, pero dado que en el primer caso el fondo del experimento se encontraba dominado por el flujo γ ambiental se decidió emplear 10 cm de plomo. La utilización de 10 cm de plomo implica también un aumento sustancial en el tiempo de realización de las simulaciones. Debido a ello, la estadística disponible para la presentación de los resultados es pequeña.

- ^{222}Rn

La actividad del ^{222}Rn es $0,6 \text{ mBq/m}^3$ (ver Tabla 2.1) y se distribuye uniformemente en el volumen de aire. Los resultados se muestran en la Tabla 3.7. La diferencia observada en los ritmos totales en el cristal en función del veto empleado se debe a que el argón actúa mejor que el agua como blindaje para contaminaciones externas.

^{222}Rn	Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Veto de Argón	$(5,37 \pm 0,05) \times 10^{-1}$	$(4,65 \pm 0,04) \times 10^{-1}$	$(0,72 \pm 0,02) \times 10^{-1}$
Veto de Agua	$(7,37 \pm 0,06) \times 10^{-1}$	$(5,94 \pm 0,05) \times 10^{-1}$	$(1,42 \pm 0,02) \times 10^{-1}$

Tabla 3.7: Ritmos en el cristal de NaI para una contaminación externa de ^{222}Rn .

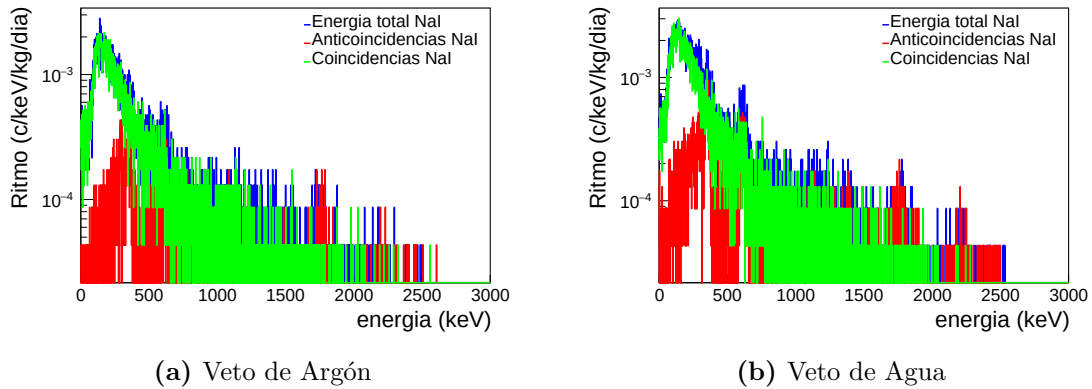


Figura 3.9: Contribuciones al fondo de ^{222}Rn distribuido en la cavidad de aire con la actividad mostrada en la Tabla 2.1 para el cristal de NaI con veto de argón líquido (a) y veto de agua (b).

Para cuantificar la contribución de γ y neutrones no se dispone de la actividad del isótopo (ver Tabla 2.1) como en los casos anteriores, sino de los flujos de partículas. Para convertir adecuadamente las simulaciones a ritmos en el cristal, por lo tanto, se tienen que considerar las transiciones γ que genera cada isótopo. El caso del ^{40}K es sencillo ya que su probabilidad de sufrir este tipo de transiciones es de 10,55 %. Para el ^{238}U y el ^{232}Th es más complicado debido

a que ambos pertenecen a cadenas de desintegración por lo que se deben tener en cuenta todos los fotones que se emiten en promedio por cada desintegración del isótopo padre. Para el ^{232}Th se pueden considerar 2,36 γ por desintegración mientras que para el ^{238}U se consideran 1,86 γ por desintegración.

- ^{40}K

El flujo γ de potasio empleado es 0,33 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ (ver Tabla 2.1). Se van a mostrar los resultados empleando 2 y 10 cm de plomo (ver Tabla 3.8).

^{40}K		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Pb 2 cm	Veto de Argón	908,7 $\pm$ 24,5	754,1 $\pm$ 22,3	153,9 $\pm$ 10,1
	Veto de Agua	1036,8 $\pm$ 82,7	818,8 $\pm$ 73,5	217,9 $\pm$ 37,9
Pb 10 cm	Veto de Argón	<9,5	<8,7	<3,1
	Veto de Agua	<9,5	<9,5	<2,0

Tabla 3.8: Ritmos en el cristal de NaI con 2 cm y 10 cm de plomo para ^{40}K como fuente externa.

La utilización de un blindaje de 2 cm de plomo o uno de 10 cm de plomo implica una diferencia de entre 2 y 3 órdenes de magnitud en los ritmos del cristal de NaI en anticoincidencia para ambos vetos. Como ya se ha comentado, los resultados están estadísticamente limitados y sería preciso poder programar simulaciones más largas en el futuro para evaluar mejor la necesidad de blindajes con mayor espesor de plomo.

- ^{232}Th

El flujo del ^{232}Th es 0,85 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ (ver Tabla 2.1). Tal y como se puede observar en la Tabla 3.9, la utilización de 10 cm de plomo provoca una reducción de, aproximadamente, dos órdenes de magnitud en el ritmo en el cristal de NaI, pero incluso así, la contribución del ^{232}Th externo sigue siendo importante.

^{232}Th		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Pb 2 cm	Veto de Argón	93537 $\pm$ 799	77244 $\pm$ 726	16293 $\pm$ 334
	Veto de Agua	107050 $\pm$ 2704	80066 $\pm$ 2339	26984 $\pm$ 1358
Pb 10 cm	Veto de Argón	1139 $\pm$ 114	865 $\pm$ 99	273 $\pm$ 56
	Veto de Agua	1435 $\pm$ 313	1161 $\pm$ 282	<625

Tabla 3.9: Ritmos en el cristal de NaI con 2 cm y 10 cm de plomo para ^{232}Th como fuente externa

- ^{238}U

El flujo del ^{238}U es 0,71 $\gamma/\text{cm}^2/\text{s}$ (ver Tabla 2.1). Al igual que para el caso del ^{232}Th , el empleo de 10 cm de plomo provoca una reducción de, aproximadamente, dos órdenes de magnitud en el ritmo en el cristal de NaI.

^{238}U		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Pb 2 cm	Veto de Argón	76895±746	63326±677	13576±314
	Veto de Agua	93693±2604	71827±2281	21867±1258
Pb 10 cm	Veto de Argón	772±97	688±91	<159
	Veto de Agua	869±251	<1137	<561

Tabla 3.10: Ritmos en el cristal de NaI con 2 cm y 10 cm de plomo para ^{238}U como fuente externa

Como dejan claros los resultados mostrados en las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10, el blindaje de plomo de al menos 10 cm de espesor es imprescindible para no estar totalmente dominados por el flujo γ ambiental.

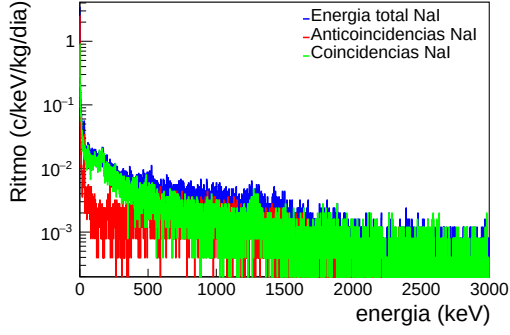
• Neutrones

El flujo de los neutrones es $20,9 \times 10^{-6}$ n/cm²/s (ver Tabla 2.1). A diferencia del blindaje del experimento ANAIS-112, en nuestras simulaciones no se han incluido moderadores de neutrones en el montaje ya que su inclusión supondría un aumento sustancial en el tiempo de realización de las simulaciones. La comparación entre el uso de 2 cm o de 10 cm de plomo se puede ver en la Tabla 3.11, mientras que la Figura 3.10 muestra los resultados del ritmo en el cristal de NaI para 10 cm de plomo en los rangos de 0 a 3000 keV y de 0 a 100 keV, respectivamente.

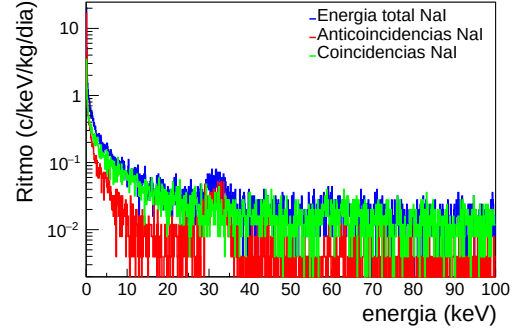
Neutrones		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Coincidencia (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Pb 2 cm	Veto de Argón	14,39±0,08	9,92±0,06	4,47±0,04
	Veto de Agua	5,84±0,05	4,75±0,04	1,08±0,02
Pb 10 cm	Veto de Argón	11,66±0,07	8,09±0,05	3,57±0,03
	Veto de Agua	4,23±0,04	3,50±0,04	0,73±0,02

Tabla 3.11: Ritmos en el cristal de NaI con 2 cm y 10 cm de plomo para un flujo externo de neutrones.

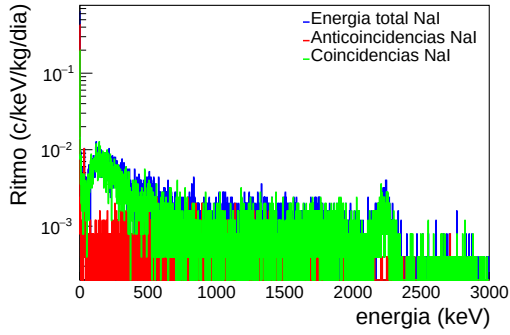
En la Tabla 3.11 se observa como el ritmo de los neutrones no varía de manera sustancial al aumentar la cantidad de plomo, confirmando que el efecto del plomo no es relevante como moderador de los neutrones y tampoco tiene un efecto de multiplicación de los mismos. Sin embargo, sí se observa diferencia entre el efecto del veto de argón y el de agua en el ritmo, que confirma que el agua es un mejor moderador, resultando en una contribución menor al ritmo total y al ritmo en anticoincidencia.



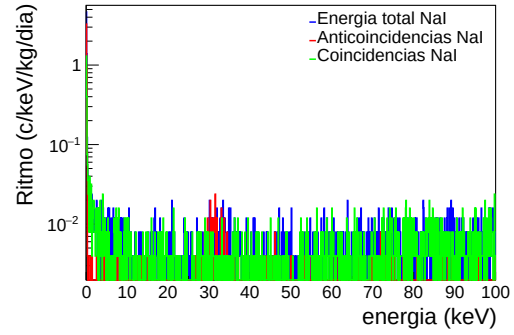
(a) Rango de 0 a 3000 keV con veto de Argón



(b) Rango de 0 a 100 keV con veto de Argón



(c) Rango de 0 a 3000 keV con veto de Agua

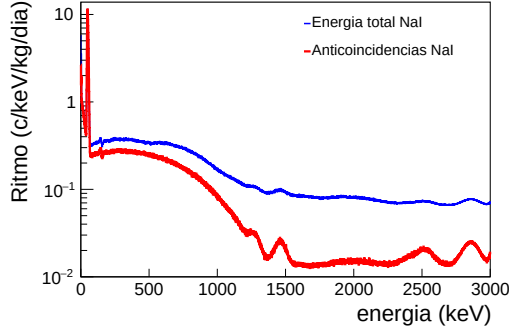


(d) Rango de 0 a 100 keV con veto de Agua

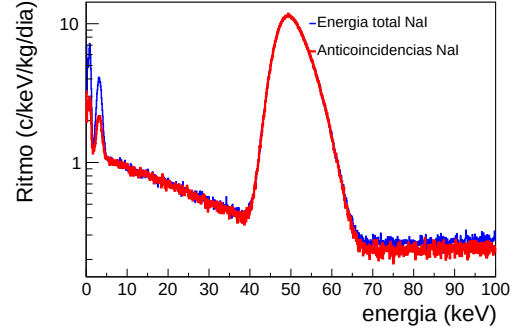
Figura 3.10: Contribuciones al fondo de neutrones externos con el flujo mostrado en la Tabla 2.1 en el cristal de NaI. Veto de argón líquido (a) y (b) y veto de agua (c) y (d).

3.4. Ritmos totales en anticoincidencia en el cristal de NaI

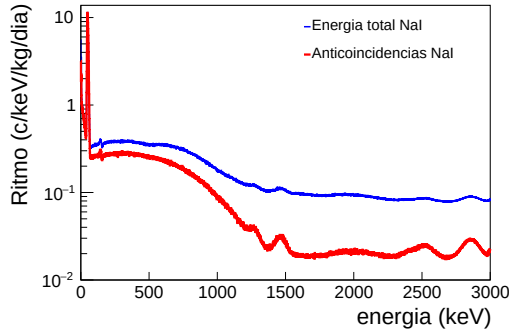
Una vez vistos los resultados para cada caso, se procede a mostrar el ritmo de detección en anticoincidencia en el NaI considerando todas las contribuciones, tanto en el rango completo de energías analizadas (0 a 3000 keV) como en el rango de baja energía que es de interés para los experimentos de detección directa de materia oscura (1 a 100 keV) y de 1 a 6 keV, que es particularmente interesante para ANAIS. Debido a la poca estadística de las simulaciones correspondientes a las fuentes externas, se han combinado todas ellas y promediado como un fondo constante en las regiones energéticas consideradas en las representaciones gráficas (ver Figura 3.12, por ejemplo). Para las contaminaciones externas se ha considerado el espesor de 10 cm de plomo, y dado que solo se han podido obtener límites superiores a esta contribución para la mayoría de sus componentes, los ritmos se muestran en esta sección en las tablas desglosados en fondo total y en anticoincidencia “sin contribuciones externas” (aunque se incluyen los neutrones) y “contribuciones externas” para las que solo hay un límite.



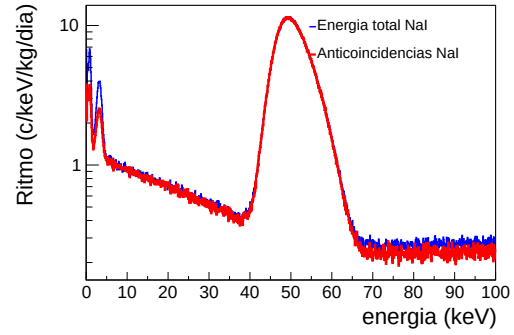
(a) Rango de 0 a 3000 keV con veto de argón



(b) Rango de 0 a 100 keV con veto de argón



(c) Rango de 0 a 3000 keV con veto de agua



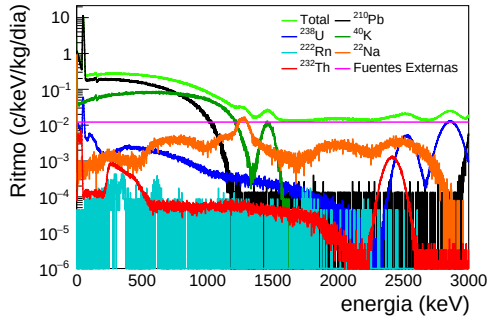
(d) Rango de 0 a 100 keV con veto de agua

Figura 3.11: Energía depositada conjunta de todas las contribuciones de las actividades y flujos en el cristal de NaI. Veto de argón líquido (a) y (b) y veto de agua (c) y (d).

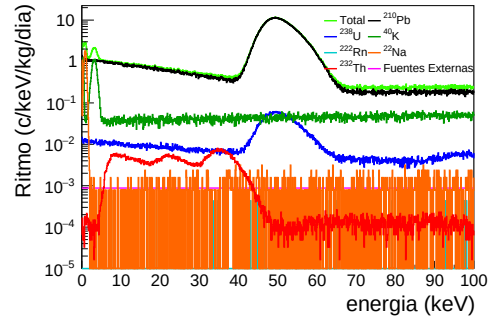
Rangos	Vetos	Sin contribuciones externas		Con contribuciones externas	
		Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)	Ritmo Total (c/kg/día)	Ritmo en Anticoincidencia (c/kg/día)
Rango de 1 a 3000 keV	Veto de Argón	441,05±0,22	359,53±0,21	<2362,02	<797,95
	Veto de Agua	433,83±0,22	362,82±0,21	<2747,59	<1551,68
Rango de 1 a 6 keV	Veto de Argón	12,44±0,04	7,93±0,03	<84,68	<80,17
	Veto de Agua	11,47±0,04	8,34±0,03	<435,01	<431,88

Tabla 3.12: Ritmos totales en el cristal de NaI de las diferentes contribuciones al fondo, sin incluir las contribuciones externas para las que solo hay límites superiores, o incluyéndolas y dándolas en este caso como límites superiores.

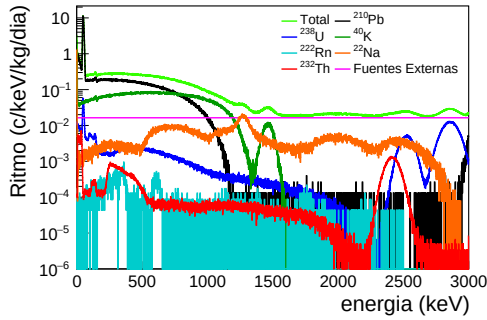
En la tabla 3.12 se puede observar que el veto de agua es menos eficaz que el de argón. Para ver el efecto que cada componente tiene en la contribución total se muestran en la Figura 3.12 todas las contribuciones del ritmo en anticoincidencia por separado y el ritmo total en anticoincidencia en el cristal, ambos empleando el veto de argón, para los rangos de alta y media-baja energía. En la Tabla 3.13 se muestran los ritmos correspondientes.



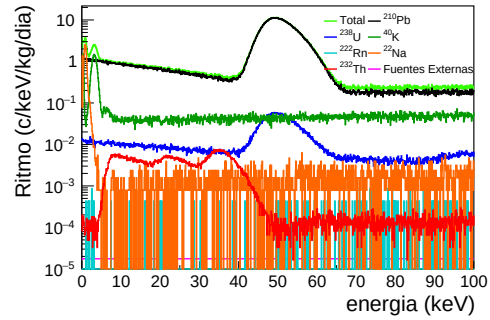
(a) Rango de 0 a 3000 keV con veto de argón



(b) Rango de 0 a 100 keV con veto de argón



(c) Rango de 0 a 3000 keV con veto de agua



(d) Rango de 0 a 100 keV con veto de agua

Figura 3.12: Desglose de los ritmos en anticoincidencia en el cristal así como su suma para altas y medias-bajas energías. Veto de argón líquido (a) y (b) y veto de agua (c) y (d).

	Ritmo en Anticoincidencia (1-3000 keV)		Ritmo en Anticoincidencia (1-6 keV)	
	(c/kg/día)	(%)	(c/kg/día)	(%)
^{40}K	$78,93 \pm 0,08$	21,95	$1,78 \pm 0,01$	22,45
^{22}Na	$7,96 \pm 0,02$	2,21	$0,41 \pm 0,01$	5,17
^{238}U	$(55,79 \pm 0,06) \times 10^{-1}$	1,55	$(0,56 \pm 0,01) \times 10^{-1}$	0,71
^{232}Th	$(56,10 \pm 0,09) \times 10^{-2}$	0,16	$(0,156 \pm 0,005) \times 10^{-2}$	0,02
^{210}Pb	$262,93 \pm 0,19$	73,13	$5,21 \pm 0,03$	65,70
Neutrones	$3,57 \pm 0,03$	0,99	$0,47 \pm 0,01$	5,93
Total sin contribuciones externas	$359,53 \pm 0,21$	100	$7,93 \pm 0,03$	100
Otras fuentes externas	$< 797,95$	-	$< 80,17$	-

Tabla 3.13: Contribuciones desglosadas al ritmo en anticoincidencia para los rangos de 1 a 3000 keV y de 1 a 6 keV con el veto de argón.

Del desglose se puede determinar que, a bajas energías las componentes dominantes son el ^{210}Pb , el ^{40}K y el ^{22}Na . En particular, de 1 keV a 6 keV, domina la emisión de rayos X y electrones Auger tras la desintegración por captura electrónica del ^{40}K y del ^{22}Na presentes en el cristal. De 1 a 100 keV el ^{210}Pb es la contaminación dominante. En el rango de altas energías, se puede comprobar que las fuentes externas siguen siendo una contaminación relevante incluso con 10 cm de plomo como blindaje, por lo que sería conveniente optar por un diseño experimental

con mayor espesor de plomo para ANAIS+. Para el veto de agua el comportamiento es análogo con la diferencia de que el ritmo es mayor.

3.5. Eficiencia del NaI para la detección del ^{42}Ar

El ^{42}Ar es un isótopo que se produce por activación cosmogénica en argón. Este isótopo no se ha añadido en la Tabla 2.1 debido a que no se va a incluir en la gráfica conjunta de los ritmos de detección de las diferentes contribuciones, ya que no es un fondo relevante para ANAIS+, pero sí puede serlo para otros experimentos que utilizan argón como medio de detección o veto (DarkSide, LEGEND...). En este trabajo se ha simulado este isótopo para evaluar el potencial de ANAIS+ para medir la radiopureza del argón del veto en este isótopo. Tiene una vida media de 32,9 años y se desintegra mediante desintegración β^- al ^{42}K (ver Figura A.9). Su actividad estimada es de 0,128 Bq/m³ en argón atmosférico [21], 4 órdenes de magnitud inferior a la actividad de ^{39}Ar en argón atmosférico. Como se puede observar en la Figura 3.13, el ritmo de coincidencias del cristal en la configuración de fondo seleccionada, es superior por varios órdenes de magnitud a la contribución esperada del ^{42}Ar con su actividad nominal. Esto permite concluir que ANAIS+ no sería sensible para aportar cotas relevantes a la presencia de este isótopo ni en argón atmosférico ni subterráneo.

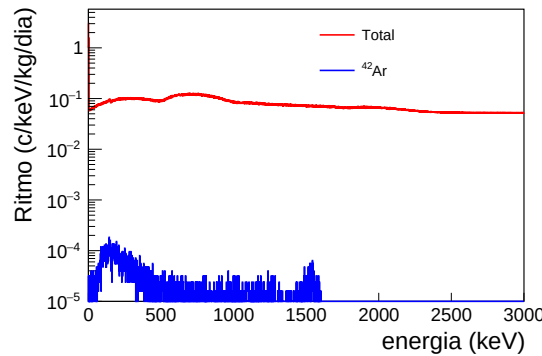


Figura 3.13: Energía depositada en el cristal para la contribución total en coincidencias y para una contaminación de ^{42}Ar uniformemente distribuido en el veto de argón.

4. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo era simular el fondo radioactivo que se podría llegar a alcanzar en un prototipo de ANAIS+. Es interesante comparar los resultados obtenidos con los datos recopilados del fondo de ANAIS-112 durante sus 6 años de funcionamiento. En la Figura 4.1 se observa cómo el ritmo en anticoincidencia empleando el veto de argón es en todo momento menor que el del fondo de ANAIS-112 si no se tienen en cuenta las fuentes externas. Para el caso del agua el ritmo es menor en la ventana de 1-6 keV, sin embargo el efecto del veto para el pico del ^{22}Na es menor, reduciendo la sensibilidad en la zona más próxima al umbral. En la Tabla 4.1 se ve la falta clara de estadística al tener que emplear el límite superior de Poisson para las contribuciones externas.

	Ritmo sin contribuciones externas (c/kg/día)	Ritmo con contribuciones externas (c/kg/día)
ANAIS+ con veto de Argón	$7,93 \pm 0,03$	$< 80,17$
ANAIS+ con veto de Agua	$8,34 \pm 0,03$	$< 431,88$
ANAIS-112	$14,951 \pm 0,004$	

Tabla 4.1: Ritmos en el rango de 1 a 6 keV para ANAIS-112 y ANAIS+ sin contribuciones externas, con contribuciones externas y con veto de argón y veto de agua.

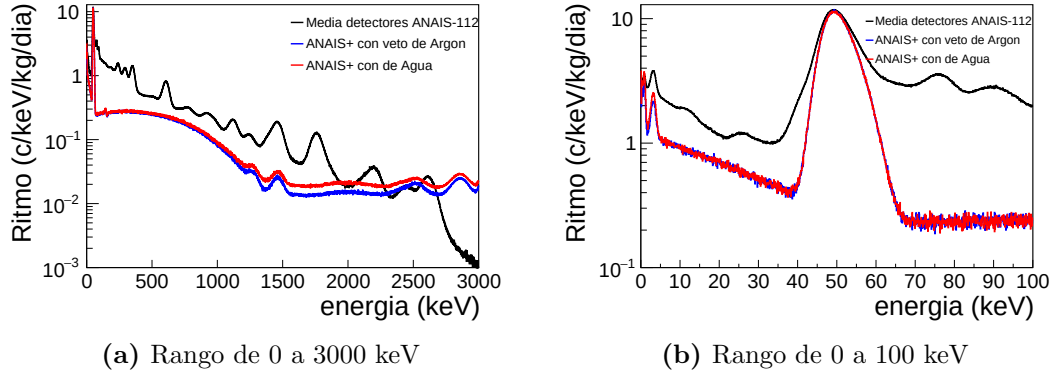


Figura 4.1: Comparación entre el fondo promedio de los detectores de ANAIS-112 y el fondo en anticoincidencia en el cristal de NaI para el veto de argón y el veto de agua simulado en este trabajo.

A pesar de que los resultados muestran una mejoría respecto a ANAIS-112 si se excluyen las componentes externas, hay que tener varios aspectos en cuenta. En primer lugar se ha de considerar la falta de estadística para las fuentes externas debido al tiempo que requieren estas simulaciones. Por otro lado, en ANAIS-112 hay un blindaje de 30 cm de plomo y también existe un moderador de 40 cm de neutrones. Para las simulaciones sólo se han empleado 10 cm de plomo y no se ha utilizado ningún moderador de neutrones. En el diseño del montaje experimental de ANAIS+ se deberá valorar si puede resultar interesante incorporar un mayor blindaje de plomo. Sería preciso, para ello, hacer simulaciones más largas para evaluar mejor la dependencia con la energía de estas contribuciones al fondo, aunque su efecto no parece que vaya a ser importante en la región de interés.

Aunque los ritmos esperados en el cristal de NaI asociados a la contaminación en ^{42}Ar en argón atmosférico son muy inferiores al fondo en coincidencia, considerando un umbral de análisis en el veto suficientemente elevado, se podría mejorar la capacidad de identificar este isótopo frente al resto de los fondos radiactivos.

Otro aspecto a comentar, es que se han tomado como referencia los valores de las actividades de ANAIS-112 para los cristales de NaI, que son la principal fuente de fondo en la región de interés, pero no se han tenido en cuenta algunas contribuciones, como por ejemplo el tritio, que no genera anticoincidencias, pero puede ser un fondo importante en la región de interés. Los cris-

tales que se vayan a emplear en ANAIS+ podrían ser de una calidad diferente. De hecho, se está trabajando para que su radiopureza sea superior, y por ejemplo, no tengan tritio, que se produce cosmogénicamente, si el crecimiento de los cristales se lleva a cabo en instalaciones subterráneas.

Una diferencia importante que se observa en la comparación entre ANAIS-112 y las simulaciones de este trabajo es la desaparición de una contribución muy importante al fondo debida a los tubos PMTs, que producen muchos de los picos observados en el fondo de ANAIS-112 como se ve en la figura 4.1a. Los SiPMs que usará ANAIS+ se espera que sean muy radiopuros, pero sería necesario incorporar en pruebas futuras su posible contribución al fondo.

Además, en este trabajo se han considerado los parámetros experimentales del cristal de NaI idénticos a los de ANAIS-112 (resolución en energía, ventana de integración y de coincidencia). Es posible que los parámetros de ANAIS+ sean diferentes. Sería una continuación de este trabajo evaluar el efecto de otros parámetros en el fondo en anticoincidencia que mediría ANAIS+.

En el caso del veto, se ha considerado el efecto de que no funcione de forma ideal, introduciendo un umbral en energía de 150 keV. Este hecho no resulta en una contribución relevante para el veto de argón, cuyo isótopo considerado, el ^{39}Ar , tiene un ritmo en anticoincidencias de $0,69 \pm 1,25$ c/kg/día. Si se emplease un veto de agua la contribución podría ser relevante, resultando un ritmo en anticoincidencia del ^{40}K distribuido uniformemente en agua de $7,81 \pm 0,29$ c/kg/día. Si el umbral en energías del veto en la implementación experimental fuera superior, habría que revisar esta contribución, que sería mayor. Dado que la emisión de luz por parte del agua se limita a radiación Cherenkov, es de esperar que los umbrales de un veto de agua sean superiores a 150 keV, y por lo tanto, el veto de agua puede ser un problema para los objetivos de ANAIS+, no así en el caso del argón, que es un buen centelleador y por lo tanto, la mejor opción como veto para ANAIS+.

En conclusión, sin mejoras importantes en la calidad de los cristales de ANAIS y con un montaje sencillo se puede obtener un fondo mejor que el de ANAIS-112 sin contar con las contribuciones externas. Disponiendo del tiempo suficiente, no se requeriría el uso del límite superior de Poisson, lo que conllevaría un fondo competitivo. En el caso de tener cristales con un menor contenido de ^{40}K y de ^{210}Pb sobre todo, se podría llegar a fondos competitivos. Por ejemplo, si se quisiera $0,1$ c/keV/kg/día en la región de interés, esto implicaría un ritmo de $0,5$ c/kg/día en esa región por lo que se deberían reducir las contribuciones del ^{40}K y del ^{210}Pb en un factor de 4 y un factor de 10, respectivamente.

Referencias

- [1] Katherine Garrett y Gintaras Dūda. “Dark Matter: A Primer”. En: *Advances in Astronomy* 2011.1 (2011), pág. 968283. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/968283>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2011/968283>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2011/968283>.
- [2] J. G. de Swart, G. Bertone y J. van Dongen. “How dark matter came to matter”. En: *Nature Astronomy* 1.3 (mar. de 2017), pág. 0059. ISSN: 2397-3366. DOI: [10.1038/s41550-017-0059](https://doi.org/10.1038/s41550-017-0059). URL: <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0059>.
- [3] R. Bernabei et al. “The DAMA project: Achievements, implications and perspectives”. En: *Progress in Particle and Nuclear Physics* 114 (2020), pág. 103810. ISSN: 0146-6410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103810>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641020300570>.
- [4] J Amaré et al. “The ANAIS-112 experiment at the Canfranc Underground Laboratory”. En: *Journal of Physics: Conference Series* 1342.1 (ene. de 2020), pág. 012056. DOI: [10.1088/1742-6596/1342/1/012056](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012056). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012056>.
- [5] J Amaré et al. “Analysis of backgrounds for the ANAIS-112 dark matter experiment”. En: *The European Physical Journal C* 79 (2019), págs. 1-22.
- [6] Julio Amaré et al. *Towards a robust model-independent test of the DAMA/LIBRA dark matter signal: ANAIS-112 results with six years of data*. 2025. arXiv: [2502.01542](https://arxiv.org/abs/2502.01542) [astro-ph.IM]. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.01542>.
- [7] I. Antcheva et al. “ROOT — A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization”. En: *Computer Physics Communications* 180.12 (2009). 40 YEARS OF CPC: A celebratory issue focused on quality software for high performance, grid and novel computing architectures, págs. 2499-2512. ISSN: 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.08.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465509002550>.
- [8] S. Agostinelli et al. “Geant4—a simulation toolkit”. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003), págs. 250-303. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [9] J. Puimedón et al. “Performance of ANAIS-112 experiment after the first year of data taking”. En: *The European Physical Journal C* 79 (2019), págs. 1-22. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-6697-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6697-4). URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6697-4>.
- [10] World Health Organization et al. *Potassium in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Inf. téc. World Health Organization, 2009.
- [11] Thomas Ehmann et al. “Monitoring the Quality of Ultra-Pure Water in the Semiconductor Industry by Online Ion Chromatography”. En: *Microchimica Acta* 154.1 (2006), págs. 15-20. ISSN: 1436-5073. DOI: [10.1007/s00604-005-0427-3](https://doi.org/10.1007/s00604-005-0427-3). URL: <https://doi.org/10.1007/s00604-005-0427-3>.

- [12] Nil Mont Geli et al. “Status of the HENSA collaboration at the Canfranc Underground Laboratory: results from two years measurements of the neutron flux in hall B”. En: *PoS TAUP2023* (2023), pág. 312. DOI: [10.22323/1.441.0312](https://doi.org/10.22323/1.441.0312).
- [13] P. Agnes et al. “DarkSide-50 532-day dark matter search with low-radioactivity argon”. En: *Phys. Rev. D* 98 (10 nov. de 2018), pág. 102006. DOI: [10.1103/PhysRevD.98.102006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.102006). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.102006>.
- [14] D. Acosta-Kane et al. “Discovery of underground argon with low level of radioactive ^{39}Ar and possible applications to WIMP dark matter detectors”. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 587.1 (2008), págs. 46-51. ISSN: 0168-9002. DOI: [10.1016/j.nima.2007.12.032](https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.12.032). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207024692>.
- [15] Laboratoire National Henri Becquerel. *Application Nucléide*. URL: <http://www.lnhb.fr/accueil/donnees-nucleaires/module-lara/>.
- [16] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*. <https://webbook.nist.gov/>. Accedido el 14 de abril de 2025. 2024.
- [17] P. Chiozzi et al. “Laboratory application of NaI(Tl) -ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics”. En: *Applied Radiation and Isotopes* 53.1 (2000), págs. 127-132. ISSN: 0969-8043. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00123-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804300001238>.
- [18] M Ragheb. *Thorium resources in rare earth elements*. 2011.
- [19] M. J. Berger et al. *XCOM: Photon Cross Sections Database*. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD. 2010. URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.
- [20] National Institute of Standards and Technology. *Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*. <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>. Accessed: 2025-04-17. 2025.
- [21] A S Barabash, R R Saakyan y V I Umatov. “On concentration of ^{42}Ar in liquid argon”. En: *Journal of Physics: Conference Series* 718.6 (mayo de 2016), pág. 062004. DOI: [10.1088/1742-6596/718/6/062004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/718/6/062004). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/718/6/062004>.

A. Anexo

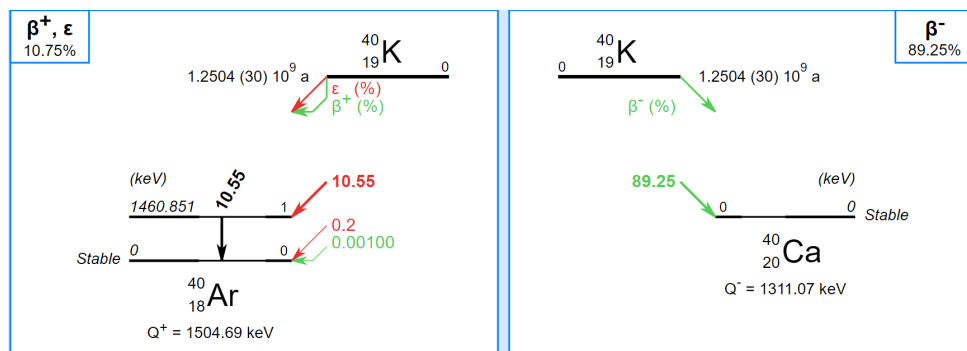


Figura A.1: Esquema de desintegración del ^{40}K [15]

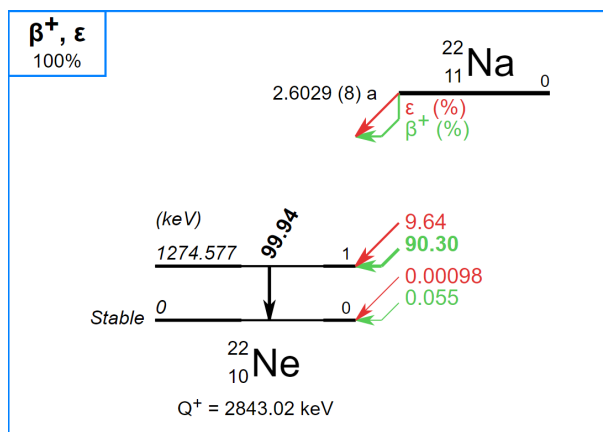
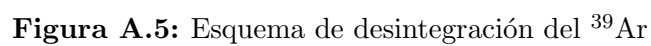
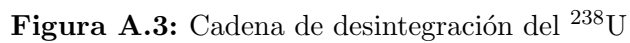


Figura A.2: Esquema de desintegración del ^{22}Na [15]



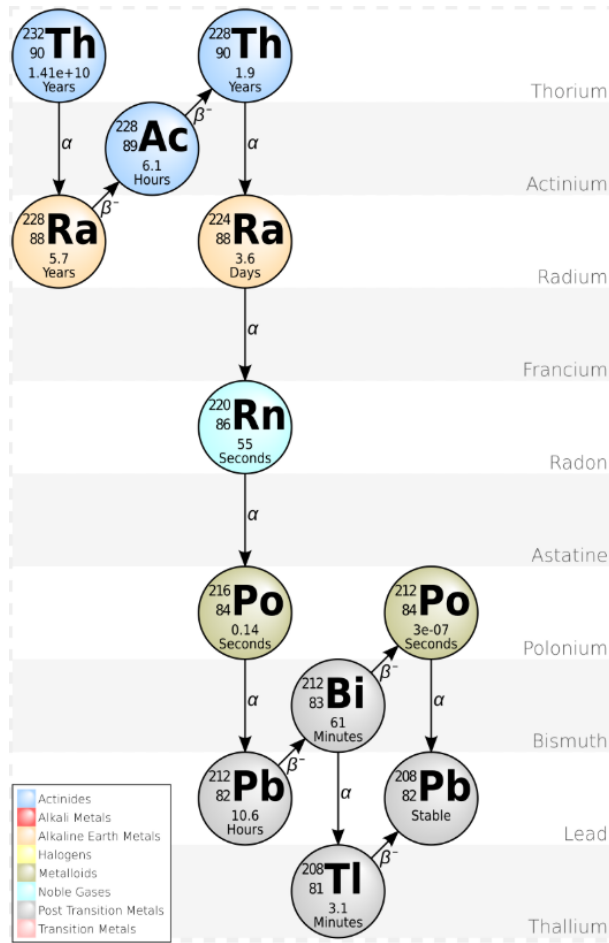


Figura A.6: Cadena de desintegración del ^{232}Th

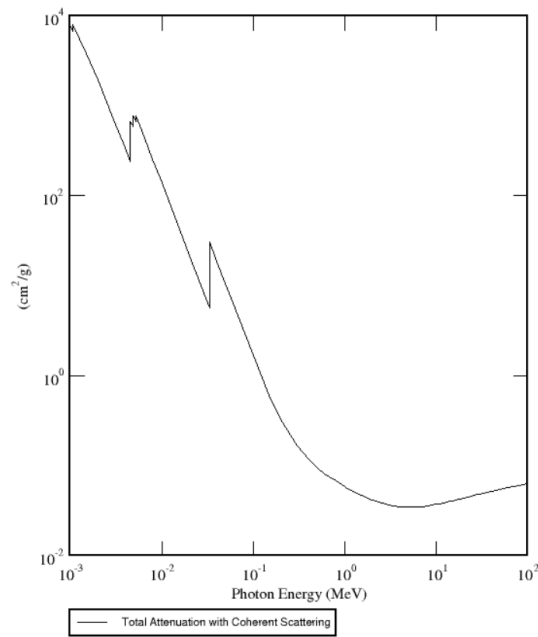


Figura A.7: Coeficiente de atenuación másico de la interacción de fotones con argón [19].

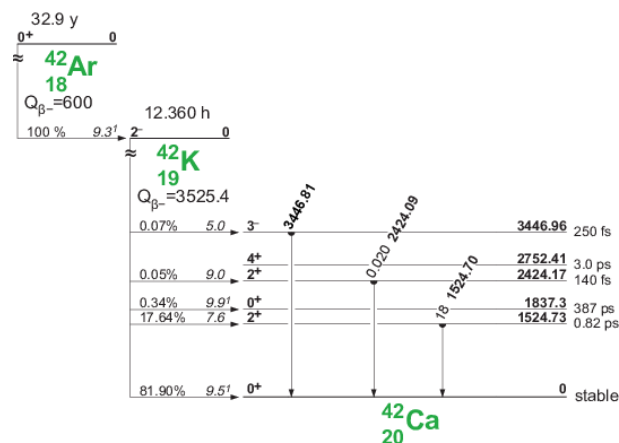


Figura A.9: Esquema de desintegración del ^{42}Ar

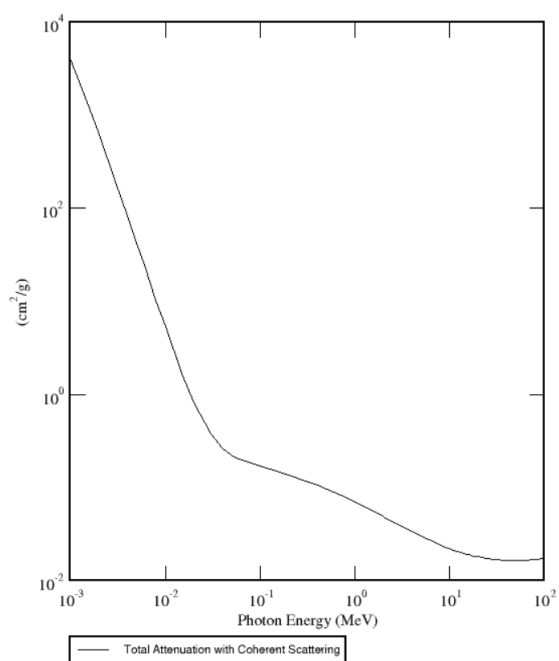


Figura A.8: Coeficiente de atenuación másico de la interacción de fotones con agua [19].