

DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

**Estudio de la activación cosmogénica en detectores de
NaI(Tl) para la búsqueda de materia oscura en el
laboratorio subterráneo de Canfranc**

Ponente:

Álvaro Martín Miramón

Directora:

Susana Cebrián Guajardo

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	4
3. Desarrollo	4
3.1. Desintegración de los isótopos y señal	4
3.2. Estudio y selección de los datos disponibles	5
3.3. Ajustes de áreas	8
3.4. Cuantificación de la actividad inicial y del ritmo	12
3.5. Simulación de radiación en materia con Geant4	14
4. Resultados	15
4.1. Actividades iniciales y ritmos de producción	15
4.2. Efecto esperado en ANAIS	19
5. Conclusiones	20

1. Introducción

En este trabajo se ha estudiado la activación cosmogénica de los isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn en los detectores de NaI(Tl) del experimento ANAIS.

Este experimento trata de aclarar las deducciones hechas a partir de los resultados obtenidos en otro experimento, DAMA/LIBRA [1], acerca de la modulación anual de la señal de sus detectores, debida supuestamente a la materia oscura. La materia oscura es materia que no emite ni absorbe radiación electromagnética y que, de acuerdo con diversas observaciones, podría corresponder a la cuarta parte del universo. Se desconoce su naturaleza, pero podría estar constituida por los denominados WIMPs. Los WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) son partículas cuya interacción con la materia es muy débil, por lo que son muy difíciles de detectar. La dispersión elástica de los WIMPs del halo galáctico con los núcleos de un detector de radiación permitiría su detección directa, aunque los ritmos esperados son extremadamente bajos.

El experimento ANAIS (*Annual modulation with NaI(Tl) Scintillators*) se sitúa en el laboratorio subterráneo de Canfranc. Ahora mismo consta de nueve detectores de NaI(Tl) que han ido llegando en distintas fechas al laboratorio (ver tabla 1). Los detectores contienen 12,5 kg de cristal centelleador de NaI(Tl) ultrapuro cada uno. El cristal está encapsulado con cobre, dejando una ventana de polietileno tereftalato (*Mylar*) para poder calibrarlo a bajas energías. A los extremos del cristal se conectan fotomultiplicadores acoplados con ventanas de cuarzo. Esto se hizo en la sala blanca del laboratorio subterráneo de Canfranc. El blindaje para el experimento consiste en 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, 40 cm de moderador de neutrones, una caja anti radón y un sistema activo de veto de muones [2]. La distribución de los detectores y los blindajes se puede ver en la figura 1.

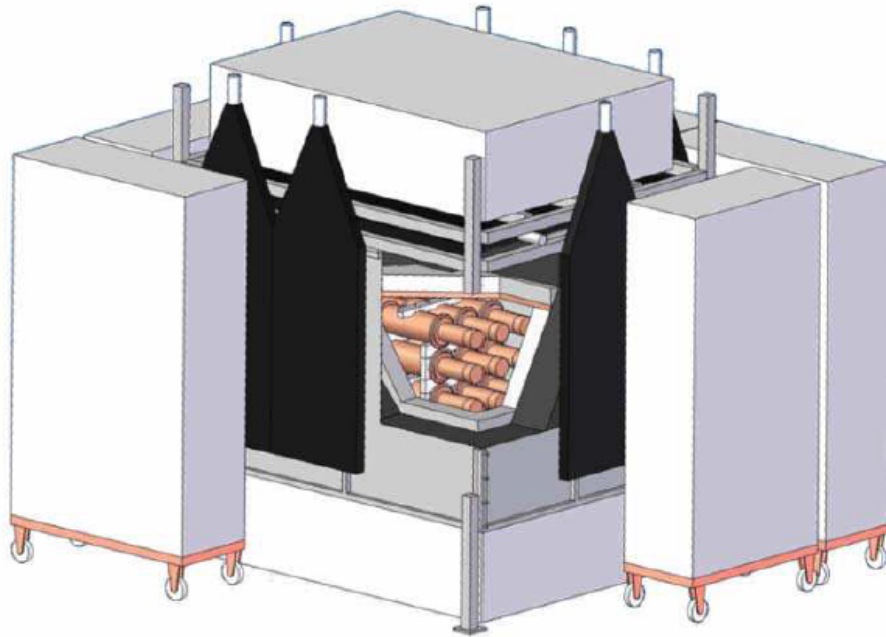


Figura 1: Representación del montaje del experimento ANAIS [3].

Detectores	Fecha de llegada
D0 y D1	28 de noviembre de 2012
D2	7 de marzo de 2015
D3	8 de marzo de 2016
D4 y D5	14 de noviembre de 2016
D6, D7 y D8	15 de marzo de 2017

Tabla 1: Fecha de llegada de los detectores del experimento ANAIS al Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Como el experimento ANAIS necesita configuración de fondo ultra bajo, se emplean distintas estrategias, principalmente tres: poner blindajes para atenuar la radiación ambiental (fotones y neutrones), controlar la radiactividad de los propios materiales del montaje y estar bajo tierra para suprimir los rayos cósmicos. Aun estando en subterráneo siguen llegando muones cósmicos, los cuales interactúan en los detectores y se vería una señal de fondo no deseada. Estas interacciones se desechan de los datos mediante un sistema de anticoincidencia. Este sistema consiste en poner una pantalla que pueda detectar cuándo pasa un muón rodeando a los detectores, de forma que en los instantes siguientes a los que se detecta la presencia de uno no se tienen en cuenta los datos detectados ya que se deben al muón que acaba de pasar. Esto no afecta de manera notable al tiempo vivo de medida del experimento, de modo que es positivo usar este sistema. [2]

La activación por neutrones se debe en algunos casos a que un núcleo atómico, en principio estable, absorbe (atrapa) al neutrón de forma que sigue siendo el mismo elemento pero con un neutrón más en su núcleo, es decir, se convierte en un isótopo del mismo elemento. En un material también se activan isótopos de elementos distintos por otros procesos como espalación, fragmentación o fisión. La razón por la que esto produce radiación en algunos elementos es porque en la naturaleza hay muchos isótopos radiactivos frente a los estables. Esta radiación emitida por los distintos isótopos activados es la que se observa en experimentos de condiciones de fondo ultra bajo, y al ser intrínseca al cristal del detector es muy difícil evitarla. De este modo, se intenta cuantificar y obtener ritmos de producción con los cuales se pueda estimar el efecto de esta activación cosmogénica. En la superficie se consideran sólo los neutrones cósmicos, ya que los protones, como tiene carga, interactúan en la atmósfera y les afecta el campo magnético terrestre, haciendo que su flujo en la superficie sea muy inferior frente al de neutrones. Los muones cósmicos también podrían producir activación en los materiales incluso estando blindados contra fotones y neutrones, pero esta activación es despreciable.

A pesar de que en el laboratorio subterráneo no lleguen neutrones cósmicos a los cristales centelleadores, la activación producida por éstos en la fabricación, almacenamiento y transporte sigue teniendo efecto en los detectores si se han producido isótopos de vida larga que emiten radiación. Cabe resaltar que en el caso del experimento ANAIS, el transporte de los cristales (fabricados en Colorado, EEUU, por la empresa Alpha Spectra Inc) se ha realizado por barcos, ya que si hubiera sido mediante aviones el flujo de los rayos cósmicos habría sido muchísimo mayor ya que aumenta de forma notable con la altura respecto a la superficie terrestre. El estudio de los isótopos activados en los cristales de NaI(Tl) ya se ha hecho con anterioridad [4] cuantificando la actividad y ritmos de producción de diversos isótopos de I y Te así como de ^{22}Na gracias a señales razonablemente fáciles de identificar; pero se ha descubierto que había dos elementos (^{109}Cd y ^{113}Sn) cuya señal no se vio inicialmente debido a otra señal mucho mayor, y cuyo estudio ha sido el objetivo de este trabajo.

En el apartado Objetivos se va a comentar el motivo principal de este trabajo, incluyendo la realización de una simulación para evaluar el efecto de los isótopos. En el apartado Desarrollo se va a explicar en primer lugar la desintegración de los isótopos

y el qué produce la señal que vemos en los detectores. Luego se va a presentar el criterio de selección de los datos disponibles y a continuación el procedimiento realizado para ajustar las áreas de los picos en los espectros analizados y la cuantificación de la actividad inicial y del ritmo. Por último, se hablará del programa usado para la simulación realizada. En el apartado Resultados se mostrarán las actividades iniciales y ritmos obtenidos y se mostrará la simulación realizada, comparando también con los datos medidos. Finalmente, se presentarán las consecuencias de este trabajo en el apartado Conclusiones.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estimar el ritmo de producción en NaI(Tl) de estos dos isótopos (^{109}Cd y ^{113}Sn) activados cosmogénicamente por los neutrones cósmicos durante la producción de los cristales de NaI(Tl) usados en los detectores. Este ritmo se obtendrá estimando una actividad inicial de cada isótopo a través del área de los picos debidos a estos núcleos a partir de los espectros obtenidos por cada detector en distintos tiempos. La actividad inicial es la actividad que tenían estos dos isótopos justo al entrar al laboratorio subterráneo (y por tanto, justo al dejar de recibir radiación de neutrones cósmicos). Con la actividad inicial de cada detector podemos obtener un ritmo de producción en cada detector haciendo ciertas estimaciones.

Además, se ha evaluado el efecto de los dos isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn en el ritmo de conteo del experimento ANAIS a través de una simulación por Monte Carlo utilizando el código Geant4 [5].

3. Desarrollo

3.1. Desintegración de los isótopos y señal

Para poder determinar qué señal producen estos dos isótopos radiactivos en el espectro de los detectores primero hay que saber las características de su desintegración. El isótopo radiactivo ^{109}Cd se desintegra únicamente por captura electrónica a ^{109}Ag [6] con un tiempo de semivida de 461,9 días. De este proceso resultan un neutrino (que es difícilmente detectable) y un átomo de ^{109}Ag con un hueco en la capa en la que estuviera el electrón que ha sido absorbido por el átomo para producir la captura electrónica. La forma en la que vamos a detectar este suceso es cuando un electrón ocupe el hueco del electrón que ha producido la desintegración, de forma que se emiten fotones o electrones Auger con energía igual a la de ligadura de un electrón en esa capa. La captura más probable es en capa K, con energía de ligadura 25,51 keV [7] aunque también se producirá en otras capas (L, M), aunque con emisiones a energías inferiores y más difíciles de detectar. De esta forma, los sucesos que se detecten en torno a estos 25 keV se deben a este proceso, por lo que midiendo el área podemos estimar la actividad. Cabe destacar que, como podemos ver en la figura 2, el ^{109}Cd se desintegra el 100 % de las veces en un estado excitado metaestable del ^{109}Ag , que acaba desexcitándose emitiendo una ener-

Montaje	Fecha inicio de medida	Fecha fin de medida	Tiempo vivo de medida (días)	Detectores
ANAIS37D2	12/3/2015	30/6/2015	111	D0, D1 y D2
ANAIS37D2	13/05/2015	18/08/2015	89,5	D2
A37D3	9/03/2016	13/07/2016	98	D2
	17/06/2016	13/07/2016	24	D3
A37D3	01/09/2016	30/10/2016	59,9	D0, D2 y D3
A37D5	24/11/2016	11/01/2017	45,16	D3, D4 y D5
ANAIS-112 (Abril)	30/03/2017	02/05/2017	29,2	Todos
ANAIS-112 (Junio-Julio)	08/06/2017	19/07/2017	30,1	Todos
ANAIS-112 (Agosto)	03/08/2017	31/08/2017	26,7	Todos
ANAIS-112 (Noviembre-Diciembre)	15/11/2017	12/12/2017	25,8	Todos
ANAIS-112 (Agosto-Diciembre)	03/08/2017	12/12/2017	124,7	Todos

Tabla 2: Fecha de inicio y fin de medida, tiempo vivo y detectores empleados en los datos considerados en la construcción de los espectros analizados en el trabajo.

gía de 88,03 keV. Esta señal es complicado analizarla ya que hay más procesos que dan energías parecidas y sería más difícil distinguirla.

El ^{113}Sn se desintegra principalmente por captura electrónica al ^{113m}In con un tiempo de semivida de 115,09 días. Después de un tiempo suficiente, el ratio de actividades de ^{113m}In y ^{113}Sn permanece constante y es 1,0006. [6] De forma análoga a lo que pasaba con el otro isótopo, la energía que vamos a detectar es la energía de ligadura de la capa K del átomo hijo de energía 27,94 keV. [7]. Igualmente, se puede ver en la figura 3 que la desintegración del ^{113}Sn también va a estados excitados del ^{113}In , por lo que al cabo de un tiempo habrá una emisión de energía adicional, que tampoco es fácilmente identificable debido a sus altos valores.

3.2. Estudio y selección de los datos disponibles

Para la realización de este trabajo se han analizado espectros medidos con cada detector para distintos rangos de tiempo. Hay alguna toma de datos en las que sólo se tienen espectros medidos por algunos detectores debido al montaje en ese momento. En particular, se han considerado datos tomados en varios montajes con solo tres detectores (denominados ANAIS37, A37D3 y A37D5, por la cantidad total de masa de NaI y los detectores usados) y datos del montaje del experimento ya completo con los nueve detectores (ANAIS-112), tanto en su fase de preparación de marzo a julio de 2017 como tras comenzar la toma de datos para la búsqueda de materia oscura desde agosto de 2017 (véase la tabla 2). Para este último período, la región por debajo de 10 keV está oculta, pues se analizará una vez finalizada la toma de datos del experimento.

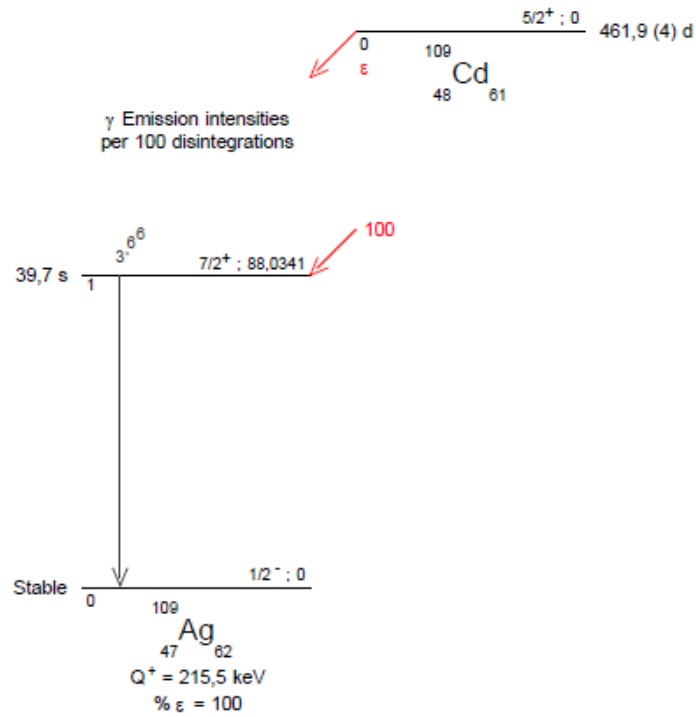


Figura 2: Esquema de la desintegración de ^{109}Cd (tomado de [6]).

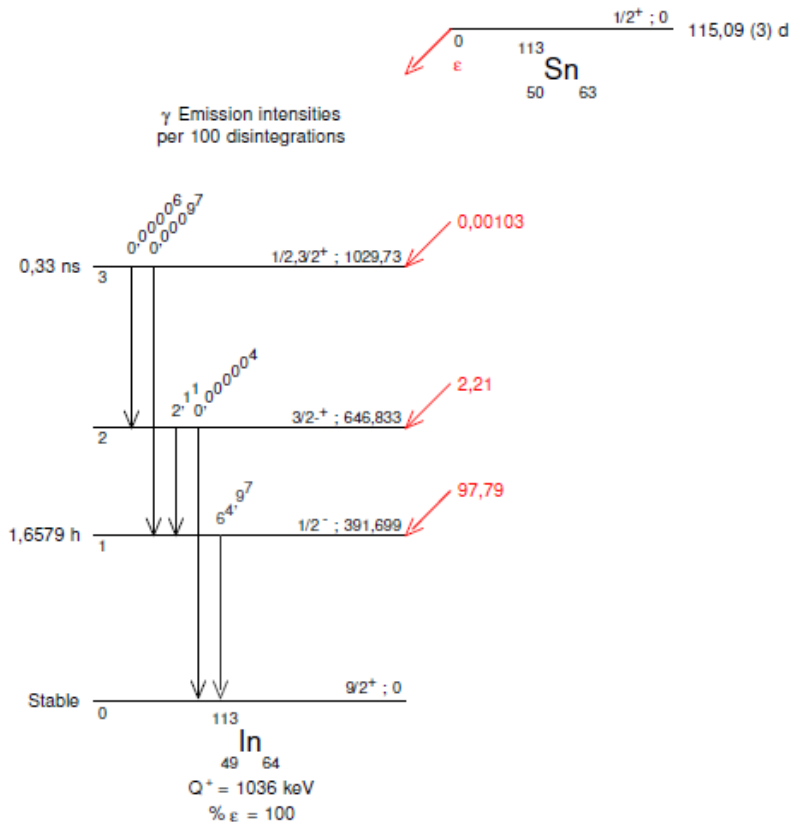


Figura 3: Esquema de la desintegración de ^{113}Sn (tomado de [6]).

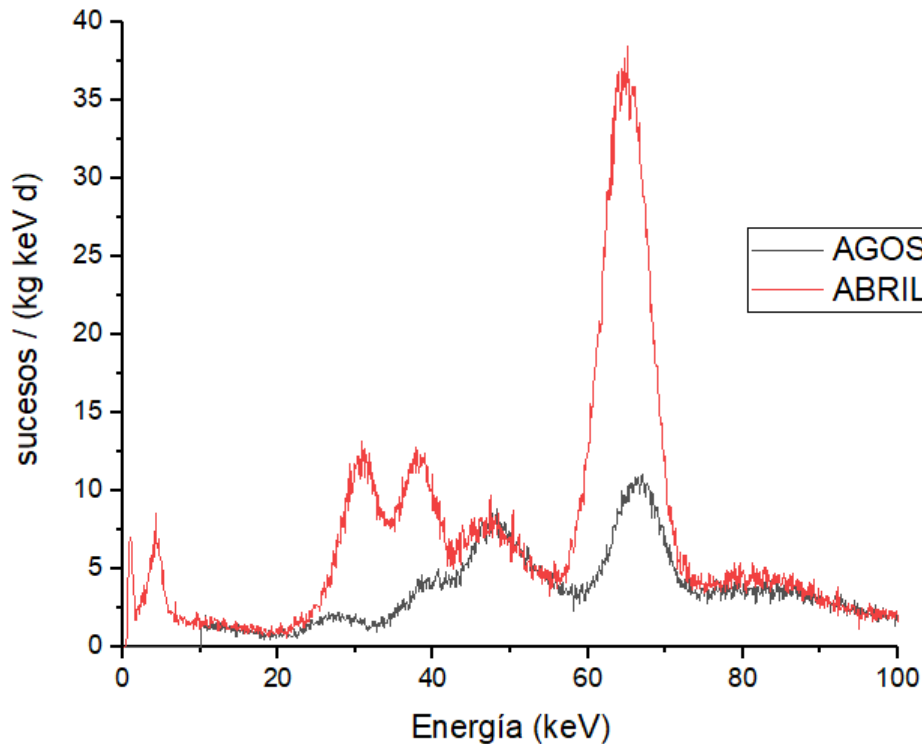


Figura 4: Espectros de energía medidos con el detector D8 en el montaje ANAIS-112 durante abril y agosto de 2017. En abril se observan picos en torno a 30, 40 y 67 keV debido a isótopos cosmogénicos de I y Te todavía presentes en el detector así como las emisiones de contaminaciones de ^{210}Pb en el cristal en torno a 50 keV. El pico debido a captura electrónica en isótopos de I y Te enmascara los de ^{109}Cd y ^{113}Sn . En el espectro de agosto el pico de I y Te ya han decaído y se puede apreciar un pico, atribuible en principio a ^{109}Cd , en torno a 27 keV.

Los espectros de energía analizados corresponden a la región de más baja energía hasta 100 keV y están comprimidos a 0,1 keV por canal, normalizados a sucesos por keV kg y día. Un ejemplo de un espectro se puede ver en la figura 4.

Para seleccionar entre todos los datos disponibles aquellos que puedan tener una mayor señal de los isótopos a estudiar, primero se hizo un cálculo de cuánto tiempo ha pasado desde que el detector llegó al laboratorio y cuándo se empezó a medir el espectro en cuestión. En función de este tiempo, se calculó cuántos periodos τ de la desintegración de cada isótopo han pasado. En principio, desechamos los espectros donde hayan pasado menos de $0,1 \tau$, ya que entonces el pico en torno a 30 keV debido a los procesos de captura electrónica en isótopos de I y Te es mucho mayor y enmascara los de ^{109}Cd y ^{113}Sn , como se aprecia en el espectro del detector D8 en la figura 4. También desechamos los espectros donde el tiempo sea mayor de 2τ , ya que la actividad ha disminuido e^{-2} (véase la figura 5) y es de esperar que el pico resulte inapreciable. Los datos seleccionados con los criterios expuestos para cada isótopo se muestran en las figuras 6 y 7.

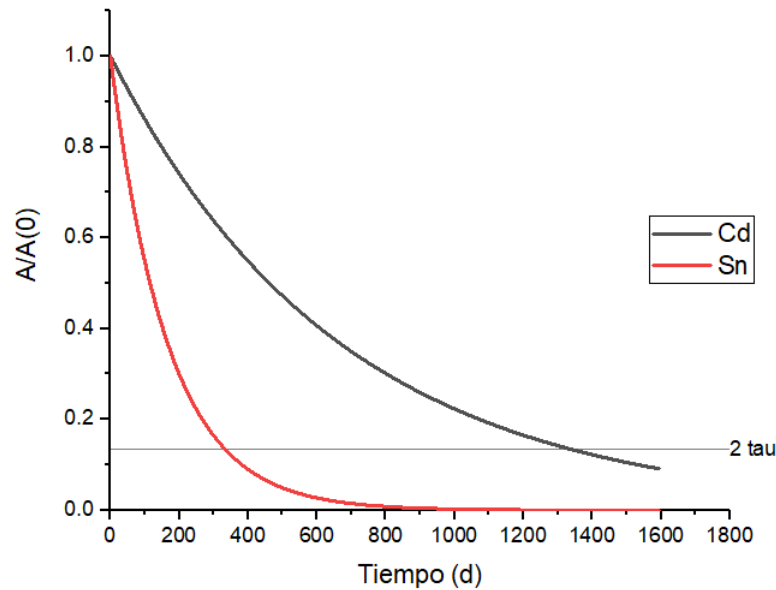


Figura 5: Actividad relativa en función del tiempo para cada isótopo. La línea horizontal marca la actividad cuando ha pasado un tiempo 2τ , de forma que se puede apreciar que ese tiempo en el ^{113}Sn es menor que el ^{109}Cd .

3.3. Ajustes de áreas

En algunos de los espectros medidos para los detectores se identificaron picos en torno a 25 y 28 keV, que han sido atribuidos a las emisiones de ^{109}Cd y ^{113}Sn , respectivamente. Para caracterizar la producción cosmogénica de estos isótopos la primera tarea ha sido obtener su actividad inicial. Para ello se ha calculado el área de los picos en las unidades de cuentas/ (kg día). Para realizar estas medidas, se han aproximado los picos a una gaussiana. En los espectros de los datos disponibles, no hay ninguno en el que se puedan apreciar los dos picos separados, ya que están cerca energéticamente y no se pueden distinguir. Así, solamente hay un pico en cada espectro a analizar al que pueden contribuir estos dos isótopos. Para ajustar este pico se probaron distintas herramientas, como el programa Origin. Los picos de los espectros de los detectores que se instalaron antes en Canfranc son demasiado pequeños y los ajustes presentaban incertidumbres muy grandes. De esta forma, se exploraron dos métodos alternativos; uno es sumar los bins que forman el pico y restarle un fondo estimado y el otro es emplear la herramienta ROOT [8] y ajustar el fondo a una parábola y el pico a una gaussiana. Finalmente se optó por el último, ya que la incertidumbre del área con este método es menor. La región considerada en el ajuste abarca de 10 a 40 keV. La figura 8 muestra a modo de ejemplo los resultados de uno de los ajustes realizados.

Ajustando entonces los picos de los espectros de los datos seleccionados a una gaussiana, se ha obtenido su área, centro y anchura para cada detector y cada espectro analizado, mostrados en la tabla de la figura 9. El centro del pico corresponde a la energía de las emisiones detectadas y la anchura, dependiente de la resolución energética del detector, puede ayudar a identificar un solapamiento de picos próximos. Con estos valores

¹⁰⁹ Cd											
			ANAIS37			A37D3			A37D3		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012	1,25	1,42	0,26				2,06	2,15	0,12
	D1	11/28/2012	1,25	1,42	0,26						
	D2	3/7/2015	0,01	0,17	0,91	0,55	0,74	0,52	0,82	0,90	0,42
	D3	3/8/2016				0,15	0,19	0,84	0,27	0,35	0,73
	D4	11/14/2016									
	D5	11/14/2016									
	D6	3/15/2017									
	D7	3/15/2017									
	D8	3/15/2017									
			3/12/2015	6/30/2015	(D0, D1, D2)	3/9/2016	7/13/2016	(D2)	9/1/2016	8/30/2016	
			5/13/2015	8/18/2015	(D2)	6/17/2016	7/13/2016	(D3)			
			A37D5			ABRIL			JUN-JUL		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012				2,38	2,43	0,09	2,48	2,54	0,08
	D1	11/28/2012				2,38	2,43	0,09	2,48	2,54	0,08
	D2	3/7/2015				1,13	1,18	0,31	1,24	1,30	0,28
	D3	3/8/2016	0,39	0,46	0,65	0,58	0,63	0,55	0,69	0,75	0,49
	D4	11/14/2016	0,02	0,09	0,95	0,20	0,25	0,80	0,31	0,37	0,71
	D5	11/14/2016	0,02	0,09	0,95	0,20	0,25	0,80	0,31	0,37	0,71
	D6	3/15/2017				0,02	0,07	0,95	0,13	0,19	0,85
	D7	3/15/2017				0,02	0,07	0,95	0,13	0,19	0,85
	D8	3/15/2017				0,02	0,07	0,95	0,13	0,19	0,85
			11/24/2016	1/11/2017		3/30/2017	5/2/2017		6/8/2017	7/19/2017	
			AGOSTO			AG-DIC			NOV-DIC		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012	2,56	2,61	0,08	2,56	2,76	0,07	2,72	2,76	0,06
	D1	11/28/2012	2,56	2,61	0,08	2,56	2,76	0,07	2,72	2,76	0,06
	D2	3/7/2015	1,32	1,36	0,26	1,32	1,52	0,24	1,48	1,52	0,22
	D3	3/8/2016	0,77	0,81	0,45	0,77	0,97	0,42	0,93	0,97	0,39
	D4	11/14/2016	0,39	0,44	0,66	0,39	0,59	0,61	0,55	0,59	0,57
	D5	11/14/2016	0,39	0,44	0,66	0,39	0,59	0,61	0,55	0,59	0,57
	D6	3/15/2017	0,21	0,25	0,79	0,21	0,41	0,73	0,37	0,41	0,68
	D7	3/15/2017	0,21	0,25	0,79	0,21	0,41	0,73	0,37	0,41	0,68
	D8	3/15/2017	0,21	0,25	0,79	0,21	0,41	0,73	0,37	0,41	0,68
			8/3/2017	8/31/2017		8/3/2017	12/12/2017		11/15/2017	12/12/2017	

Figura 6: Cálculo del número de períodos τ de ¹⁰⁹Cd transcurridos al inicio y al final de cada conjunto de datos analizados y del correspondiente factor de atenuación de la actividad. Las celdas marcadas en rojo corresponden a los datos desechados para el análisis por haber transcurrido menos de 0.1τ o más de 2τ .

¹¹³Sn			<u>ANAIS37</u>			<u>A37D3</u>			<u>A37D3</u>		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012	5,02	5,69	0,00				8,27	8,62	0,00
	D1	11/28/2012	5,02	5,69	0,00						
	D2	3/7/2015	0,03	0,69	0,70	2,22	2,98	0,07	3,28	3,63	0,03
			0,40	0,99	0,50						
	D3	3/8/2016				0,61	0,76	0,50	1,07	1,42	0,29
	D4	11/14/2016									
	D5	11/14/2016									
	D6	3/15/2017									
	D7	3/15/2017									
	D8	3/15/2017									
			3/12/2015	6/30/2015	(D0, D1, D2)	3/9/2016	7/13/2016	(D2)	9/1/2016	8/30/2016	
			5/13/2015	8/18/2015	(D2)	6/17/2016	7/13/2016	(d3)			
			<u>ABRIL</u>			<u>JUN-JUL</u>			<u>A37D5</u>		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012	9,53	9,73	0,00	9,96	10,20	0,00			
	D1	11/28/2012	9,53	9,73	0,00	9,96	10,20	0,00			
	D2	3/7/2015	4,54	4,74	0,01	4,96	5,21	0,01			
	D3	3/8/2016	2,33	2,53	0,09	2,75	3,00	0,06	1,57	1,86	0,18
	D4	11/14/2016	0,82	1,02	0,40	1,24	1,49	0,26	0,06	0,35	0,81
	D5	11/14/2016	0,82	1,02	0,40	1,24	1,49	0,26	0,06	0,35	0,81
	D6	3/15/2017	0,09	0,29	0,83	0,51	0,76	0,53			
	D7	3/15/2017	0,09	0,29	0,83	0,51	0,76	0,53			
	D8	3/15/2017	0,09	0,29	0,83	0,51	0,76	0,53			
			3/30/2017	5/2/2017		6/8/2017	7/19/2017		11/24/2016	1/11/2017	
			<u>AGOSTO</u>			<u>AG-DIC</u>			<u>NOV-DIC</u>		
	DETECTORES	LLEGADA	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$	τ inicial	τ final	$\exp(-t/\tau)$
	D0	11/28/2012	10,29	10,46	0,00	10,29	11,08	0,00	10,92	11,08	0,00
	D1	11/28/2012	10,29	10,46	0,00	10,29	11,08	0,00	10,92	11,08	0,00
	D2	3/7/2015	5,30	5,47	0,00	5,30	6,09	0,00	5,93	6,09	0,00
	D3	3/8/2016	3,09	3,26	0,04	3,09	3,88	0,03	3,72	3,88	0,02
	D4	11/14/2016	1,58	1,75	0,19	1,58	2,37	0,14	2,20	2,37	0,10
	D5	11/14/2016	1,58	1,75	0,19	1,58	2,37	0,14	2,20	2,37	0,10
	D6	3/15/2017	0,85	1,02	0,39	0,85	1,64	0,29	1,48	1,64	0,21
	D7	3/15/2017	0,85	1,02	0,39	0,85	1,64	0,29	1,48	1,64	0,21
	D8	3/15/2017	0,85	1,02	0,39	0,85	1,64	0,29	1,48	1,64	0,21
			8/3/2017	8/31/2017		8/3/2017	12/12/2017		11/15/2017	12/12/2017	

Figura 7: Cálculos análogos a los de la tabla de la figura 6 para ¹¹³Sn.

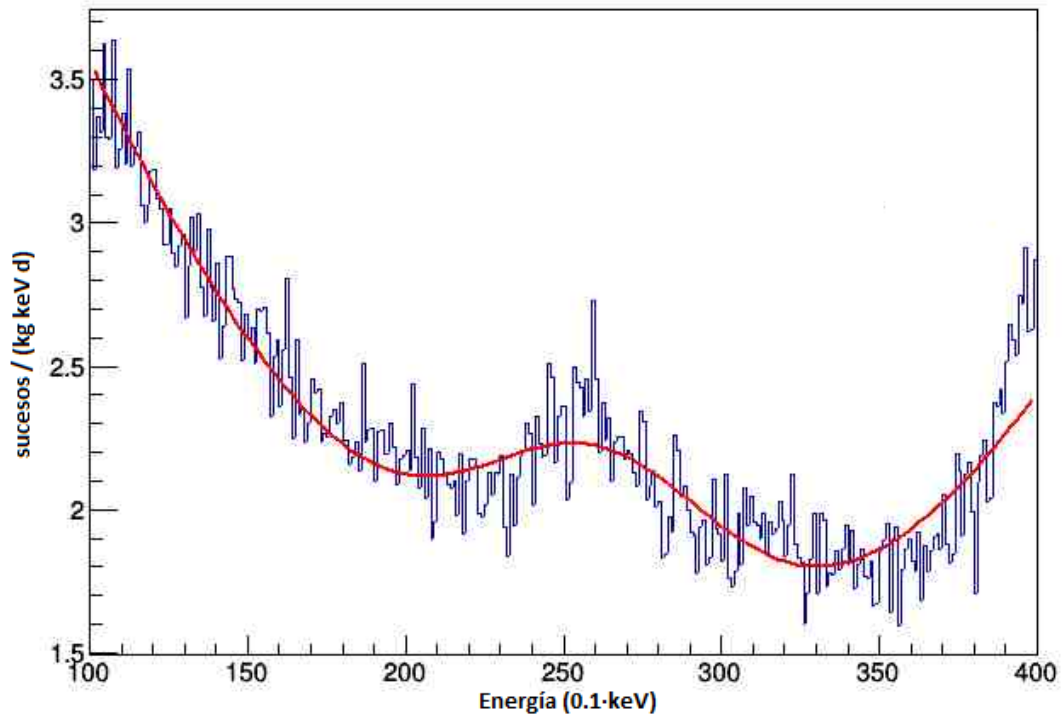


Figura 8: Ajuste de 10 a 40 keV del espectro de energía del montaje ANAIS37 del detector D1 realizado con la herramienta ROOT ajustando el fondo a una parábola y el pico de interés a una gaussiana. En este caso el pico centrado en 25 keV debe ser debido a ^{109}Cd . Los valores de los parámetros estimados se muestran en la tabla de la figura 9.

se realizará la cuantificación de la actividad inicial y del ritmo en el siguiente subapartado.

3.4. Cuantificación de la actividad inicial y del ritmo

Una vez obtenida el área de los picos en cada espectro analizado se procede a la cuantificación de la actividad inicial, a partir de las desintegraciones de los isótopos durante los intervalos de medida de cada espectro. Integrando entre t_i y t_f la variación temporal del número de isótopos radiactivos que decae exponencialmente para un isótopo con constante de desintegración λ , el número de sucesos generados es

$$C = \frac{A_0 I \epsilon [exp(-\lambda t_i) - exp(-\lambda t_f)]}{\lambda} \quad (1)$$

donde A_0 es la actividad inicial, C el área el pico generado por el isótopo en el intervalo del tiempo considerado, I la intensidad de las emisiones que generan el pico y ϵ la probabilidad de detección de las emisiones [9].

El valor de I se obtiene de los esquemas de desintegración, y es la probabilidad de que la transición de la captura electrónica vaya a un nivel por la probabilidad de que se produzca en la capa K. Así, para ^{109}Cd y ^{113}Sn se obtienen los siguientes valores:

$$I_{Cd} = 1 \cdot 0,812 = 0,812 \quad (2)$$

$$I_{Sn} = 0,9779 \cdot 0,855 + 0,0221 \cdot 0,8490 \cdot 0,075 = 0,837 \quad (3)$$

En la ecuación 3, el factor 0,075 multiplicando al segundo término se debe a la probabilidad de escape del fotón de energía igual a la diferencia de energías de la transición entre el estado excitado y metaestable, que es 255,13 keV (véase figura 3). Si este fotón no escapara, la energía que se detectaría sería la suma de la energía de este fotón más la energía de ligadura del electrón, por lo que en vez de 27,94 keV se detectarían 283,07 keV así que esa desintegración no contribuiría al pico estudiado. El valor de esta probabilidad se me ha proporcionado y se ha obtenido mediante simulación con el código que se usa en el experimento ANAIS.

El valor de ϵ se va a considerar 1 para las señales analizadas ya que las emisiones producidas van a interactuar siempre dentro del cristal debido a su baja energía y la gran densidad del cristal.

Aplicando la ecuación 1 a las áreas obtenidas anteriormente se ha estimado la actividad inicial y su incertidumbre para cada espectro medido. Como en la mayoría de detectores se han analizado varios espectros, para obtener la actividad inicial en cada uno se ha realizado un promedio. La forma óptima de promediar medidas independientes de una misma magnitud con incertidumbres distintas es realizar una media pesada por las incertidumbres [10].

La actividad inicial cuantificada en cada cristal es relevante para evaluar el fondo radiactivo de los detectores de ANAIS; pero es interesante poder además estimar el ritmo al que se han producido los isótopos en NaI, denominado ritmo de producción, a partir de la historia de exposición a los rayos cósmicos de los cristales. Conocido el ritmo de

MONTAJE		Área 1/(kg d)	Error área 1/(kg d)	Centro (0,1 keV)	Error centro (0,1 keV)	sigma (0,1 keV)	Error sigma (0,1 keV)
ABRIL	D2	50,29	61,19	262,06	14,74	36,23	23,23
	D3	39,26	37,43	270,56	14,66	29,49	16,87
	D4	67,65	24,90	267,75	5,58	20,26	6,00
	D5	61,54	21,03	263,76	5,64	19,99	5,30
JUN-JUL	D2	43,63	55,29	257,81	12,14	31,97	24,83
	D3	50,77	73,57	261,07	17,23	36,27	27,34
	D5	59,66	26,92	258,77	6,89	22,72	8,03
	D6	64,77	20,92	268,56	5,57	19,11	4,99
	D7	60,75	18,46	274,19	5,05	17,67	4,25
	D8	54,26	17,73	264,92	5,44	17,96	4,89
AGOSTO	D2	-28,68	53,82	255,90	17,94	-31,62	36,89
	D4	63,78	39,66	272,60	9,76	30,03	11,47
	D5	58,96	32,20	263,39	7,69	26,17	10,31
	D6	67,27	22,05	271,26	5,80	21,82	5,31
	D7	58,45	19,85	278,12	6,08	21,23	5,29
	D8	58,95	20,64	265,73	5,99	21,94	5,66
NOV-DIC	D4	59,71	45,86	282,48	12,43	34,41	15,58
	D5	45,89	34,14	268,72	9,83	27,83	14,73
	D6	76,74	29,75	268,80	6,13	26,46	7,33
	D7	65,28	26,40	276,37	7,49	27,60	7,57
	D8	52,29	22,04	266,17	6,71	23,69	7,32
AG-DIC	D2	30,98	52,52	260,63	16,48	32,20	33,16
	D3	39,07	64,70	266,31	21,89	36,92	30,58
	D4	55,50	35,44	276,26	10,08	28,93	11,84
	D5	56,53	32,90	265,62	8,21	27,31	11,06
	D6	69,46	25,49	270,19	6,11	24,00	6,69
	D7	58,09	20,48	277,52	6,24	22,43	5,47
	D8	56,17	21,97	266,08	6,46	23,10	6,63
A37D3	D2	64,54	35,51	277,92	9,07	31,41	10,77
	D3	42,02	21,90	279,33	8,56	17,57	8,24
A37D3	D2	44,84	34,45	282,85	12,75	32,69	15,61
	D3	43,77	24,40	281,06	9,46	22,52	9,04
A37D5	D3	36,88	28,21	276,86	13,33	25,61	12,66
ANAI537	D0	50,90	127,49	259,02	18,25	35,57	51,92
	D1	66,40	151,41	260,49	17,41	38,71	46,46
	D2	85,74	20,36	284,94	4,28	19,34	3,63

Figura 9: Parámetros de la gaussiana ajustada para cada espectro de datos seleccionado. Hay algunos espectros en los que no se ha podido realizar el ajuste debido al pequeño tamaño del pico, por lo que no aparecen todos los datos preseleccionados en las figuras 6 y 7.

producción R_p de un isótopo de constante de desintegración λ en un material puede estimarse la actividad A al cabo de un cierto tiempo de exposición t como [10]:

$$A(t) = R_p(1 - \exp(-\lambda t)) \quad (4)$$

En tiempos muy grandes, se alcanza la denominada actividad de saturación que coincide con el ritmo de producción.

Para deducir el ritmo de producción a nivel del mar de ^{109}Cd y ^{113}Sn en NaI, se va a considerar que se alcanzó la actividad de saturación en el lugar de producción de los detectores, Colorado, y que además se produjo activación a nivel del mar durante el transporte hasta España. Para ello hay que tener en cuenta el factor f , que actuará como un factor de corrección para el flujo de neutrones cósmicos a nivel del mar. El número de núcleos cosmogénicamente inducidos en saturación para un isótopo particular es $N_{sat} = fR_p/\lambda$. Si el material luego está expuesto a rayos cósmicos a nivel del mar un tiempo t , se puede derivar la siguiente ecuación : [9]

$$A(t) = R_p[1 + (f - 1)\exp(-\lambda t)] \quad (5)$$

La ecuación 5 corresponde a la actividad debida a los núcleos generados en el tiempo t a nivel del mar y a los núcleos producidos hasta la saturación en presencia del flujo mayor en un factor f que decaen durante el tiempo t .

Se puede observar que para obtener el ritmo de producción hay que estimar los valores f y t . En este trabajo se van a emplear los mismos valores que se dedujeron al estudiar el ritmo de otros isótopos para estos detectores. Estos valores son $f = 3,6 \pm 0,1$ y $t = (30 \pm 5)$ días [9]. El factor f da el aumento del flujo de neutrones cósmicos en el lugar de producción en Colorado y t corresponde aproximadamente a la duración del viaje en barco y por vías terrestres desde Colorado a Canfranc.

3.5. Simulación de radiación en materia con Geant4

Con ayuda del programa Geant4 se ha simulado la interacción de la radiación emitida por los isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn para cuantificar su efecto en los detectores del experimento ANAIS. El código utilizado ya fue desarrollado para el experimento ANAIS para simular los demás procesos que provocaban una señal de fondo, por lo que simplemente se han cambiado los parámetros de entrada con los de ^{113}Sn y ^{109}Cd . La simulación reproduce un número de desintegraciones (10^6 en este caso) para cada isótopo, suponiendo que estos están uniformemente distribuidos en el cristal. Para cada partícula generada se incluyen los procesos relevantes de interacción en la materia. En la simulación se ha considerado la geometría de ANAIS-112 con nueve detectores y se calcula cuánta energía se queda en los detectores. Los resultados obtenidos se han convertido en un espectro como el que vería un detector en el montaje del experimento.

4. Resultados

4.1. Actividades iniciales y ritmos de producción

Las tablas de las figuras 10 y 11 resumen los resultados obtenidos para las actividades iniciales en cada detector, obtenidas a partir de la ecuación 1 y considerando todos los datos seleccionados.

Como se puede ver en las tablas, el valor de energía correspondiente al centro de los picos analizados se encuentra en muchos casos entre los valores de las señales esperadas de ^{109}Cd , en torno a 25 keV, y de ^{113}Sn , sobre 28 keV, por lo que no es posible asignar el origen del pico por su energía. Para la cuantificación de ^{113}Sn , se han descartado los datos tomados cuando han transcurrido más de dos períodos. Así pues, en principio se han obtenido las actividades iniciales considerando cada pico como debido exclusivamente a cada uno de los isótopos, lo que llevará a una sobreestimación.

Con estas actividades iniciales se calculan los ritmos a partir de la ecuación 5 y con las suposiciones descritas en la sección 3.4. Se decide utilizar sólo los datos de actividades iniciales cuya incertidumbre es menor que el 100%. Con este criterio, se promedian sólo los sets de datos cuya actividad inicial no está marcada en rojo en la figura 10 y todos los mostrados en la figura 11. Para los detectores D0 y D1 no ha sido posible derivar resultados, dado que al llevar en subterráneo mucho tiempo las señales de los isótopos, incluso de ^{109}Cd , resultan imperceptibles.

Los valores de los promedios de la actividad inicial de cada detector y los ritmos de producción se pueden ver en la tabla 3. Finalmente, y dado que los valores de ritmo derivados en cada detector son compatibles teniendo en cuenta sus incertidumbres, se han promediado los ritmos realizando nuevamente una media pesada con las incertidumbres y obtenemos un ritmo de producción de cada isótopo en los cristales de NaI(Tl):

$$\text{Ritmo de producción de } ^{109}\text{Cd} = (2,38 \pm 0,20) \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

$$\text{Ritmo de producción de } ^{113}\text{Sn} = (4,53 \pm 0,40) \text{ kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

En la tabla de la figura 12 se ilustra el efecto en la incertidumbre del ritmo de los parámetros empleados para calcular los ritmos de producción. En las columnas verdes están los términos cuadráticos correspondientes a cada parámetro, de forma que la incertidumbre del ritmo de producción es la raíz cuadrada de su suma. La contribución dominante en esta incertidumbre es la del término de A_0 , procedente de la incertidumbre en el área de los picos ajustados. Las otras fuentes de error consideradas son el factor f que da el aumento del flujo cósmico en Colorado y el tiempo de viaje t de los detectores desde Colorado hasta Canfranc.

El valor que se ha determinado de los ritmos de los isótopos, con un error relativo de aproximadamente el 9%, es una estimación basada en ciertas aproximaciones pero da una idea de la magnitud de este ritmo para estos dos isótopos. Para obtener una estimación más cercana al valor verdadero, se podría haber tenido en cuenta que el pico ajustado estaba formado por los dos picos en todos los casos, pero con los espectros de medidas disponibles resulta muy complicado seleccionar cuál es la contribución de

Cd							
Montajes		Área 1/(kg d)	Error área	Centro(keV)	Error centro	A0 1/(kg d)	Error A0
ANAI5-112 (Abril)	D2	50,3	61,2	26,2	1,5	17,4	21,2
	D3	39,3	37,4	27,1	1,5	7,8	7,5
	D4	67,6	24,9	26,8	0,6	9,3	3,4
	D5	61,5	21,0	26,4	0,6	8,4	2,9
ANAI5-112 (Junio-Julio)	D2	43,6	55,3	25,8	1,2	14,0	17,7
	D3	50,8	73,6	26,1	1,7	9,4	13,6
	D5	59,7	26,9	25,9	0,7	7,6	3,4
	D6	64,8	20,9	26,9	0,6	6,9	2,2
	D7	60,7	18,5	27,4	0,5	6,4	2,0
	D8	54,3	17,7	26,5	0,5	5,7	1,9
ANAI5-112 (Agosto)	D2	-28,7	53,8	25,6	1,8	-12,9	24,2
	D4	63,8	39,7	27,3	1,0	11,3	7,0
	D5	59,0	32,2	26,3	0,8	10,5	5,7
	D6	67,3	22,0	27,1	0,6	10,0	3,3
	D7	58,4	19,8	27,8	0,6	8,7	2,9
	D8	59,0	20,6	26,6	0,6	8,7	3,1
ANAI5-112 (Noviembre-Diciembre)	D4	59,7	45,9	28,2	1,2	12,4	9,5
	D5	45,9	34,1	26,9	1,0	9,5	7,1
	D6	76,7	29,8	26,9	0,6	13,3	5,2
	D7	65,3	26,4	27,6	0,7	11,3	4,6
	D8	52,3	22,0	26,6	0,7	9,1	3,8
ANAI5-112 (Agosto-Diciembre)	D2	31,0	52,5	26,1	1,6	15,0	25,4
	D3	39,1	64,7	26,6	2,2	10,9	18,0
	D4	55,5	35,4	27,6	1,0	10,6	6,8
	D5	56,5	32,9	26,6	0,8	10,8	6,3
	D6	69,5	25,5	27,0	0,6	11,1	4,1
	D7	58,1	20,5	27,8	0,6	9,3	3,3
	D8	56,2	22,0	26,6	0,6	9,0	3,5
A37D3	D2	64,5	35,5	27,8	0,9	11,8	6,5
	D3	42,0	21,9	27,9	0,9	5,7	3,0
A37D3	D2	44,8	34,4	28,3	1,3	13,3	10,2
	D3	43,8	24,4	28,1	0,9	7,5	4,2
A37D5	D3	36,9	28,2	27,7	1,3	6,6	5,0
ANAI537	D0	50,9	127,5	25,9	1,8	24,0	60,1
	D1	66,4	151,4	26,0	1,7	31,3	71,4
	D2	85,7	20,4	28,5	0,4	11,6	2,7

Figura 10: Resultados para el área y centro de los picos obtenidos en los ajustes gaussianos realizados en cada uno de los espectros analizados, para los distintos detectores y series de datos. Se muestra también el valor de actividad inicial en cada detector deducido a partir de la ecuación 1, considerando que el pico es debido al isótopo ^{109}Cd . Los valores de la actividad inicial en rojo son aquellos cuyo error es mayor del 100 %, por lo que estos sets de datos no se han incluido en el promedio de la actividad inicial para cada detector.

Sn							
Montajes		Área 1/(kg d)	Error área	Centro (keV)	Error centro	A0 1/(kg d)	Error A0
ANAI5-112 (Abril)	D2						
	D3						
	D4	67,6	24,9	26,8	0,6	17,9	6,6
	D5	61,5	21,0	26,4	0,6	16,3	5,6
ANAI5-112 (Junio-Julio)	D2						
	D3						
	D5	59,7	26,9	25,9	0,7	20,4	9,2
	D6	64,8	20,9	26,9	0,6	10,7	3,5
	D7	60,7	18,5	27,4	0,5	10,0	3,0
	D8	54,3	17,7	26,5	0,5	9,0	2,9
ANAI5-112 (Agosto)	D2						
	D4	63,8	39,7	27,3	1,0	38,2	23,8
	D5	59,0	32,2	26,3	0,8	35,3	19,3
	D6	67,3	22,0	27,1	0,6	19,5	6,4
	D7	58,4	19,8	27,8	0,6	16,9	5,7
	D8	59,0	20,6	26,6	0,6	17,1	6,0
ANAI5-112 (Noviembre-Diciembre)	D4						
	D5						
	D6	76,7	29,8	26,9	0,6	41,5	16,1
	D7	65,3	26,4	27,6	0,7	35,3	14,3
	D8	52,3	22,0	26,6	0,7	28,3	11,9
ANAI5-112 (Agosto-Diciembre)	D2						
	D3						
	D4	55,5	35,4	27,6	1,0	44,2	28,2
	D5	56,5	32,9	26,6	0,8	45,0	26,2
	D6	69,5	25,5	27,0	0,6	26,7	9,8
	D7	58,1	20,5	27,8	0,6	22,3	7,9
	D8	56,2	22,0	26,6	0,6	21,6	8,4
A37D3	D2						
	D3	42,0	21,9	27,9	0,9	9,2	4,8
A37D3	D2						
	D3	43,8	24,4	28,1	0,9	18,3	10,2
A37D5	D3	36,9	28,2	27,7	1,3	23,0	17,6
ANAI537	D0						
	D1						
	D2	85,7	20,4	28,5	0,4	18,7	4,4

Figura 11: Resultados para el área y centro de los picos obtenidos en los ajustes gaussianos realizados en cada uno de los espectros analizados, para los distintos detectores y series de datos. Se muestra también el valor de actividad inicial en cada detector deducido a partir de la ecuación 1, considerando que el pico es debido al isótopo ^{113}Sn . Las filas en rojo corresponden a espectros tomados en tiempos en los han transcurrido más de dos periodos para el isótopo ^{113}Sn .

Detector	A_0 ^{109}Cd ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)	A_0 ^{113}Sn ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Ritmo ^{109}Cd ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Ritmo ^{113}Sn ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)
D0	–	–	–	–
D1	–	–	–	–
D2	$11,7 \pm 2,4$	$18,7 \pm 4,4$	$3,37 \pm 0,71$	$5,89 \pm 1,41$
D3	$6,5 \pm 2,1$	$11,5 \pm 4,2$	$1,86 \pm 0,60$	$3,64 \pm 1,33$
D4	$10,0 \pm 2,7$	$20,5 \pm 6,2$	$2,88 \pm 0,77$	$6,47 \pm 1,96$
D5	$9,2 \pm 2,3$	$19,2 \pm 4,6$	$2,63 \pm 0,65$	$6,06 \pm 1,45$
D6	$8,9 \pm 1,6$	$14,8 \pm 2,9$	$2,54 \pm 0,46$	$4,66 \pm 0,91$
D7	$7,9 \pm 1,4$	$13,4 \pm 2,5$	$2,26 \pm 0,40$	$4,22 \pm 0,80$
D8	$7,2 \pm 1,4$	$12,2 \pm 2,5$	$2,08 \pm 0,39$	$3,85 \pm 0,79$
Promedio	–	–	$2,38 \pm 0,20$	$4,53 \pm 0,40$

Tabla 3: Promedio de la actividad inicial en cada detector y su error (calculado con los sets de datos mostrados en las tablas de las figuras 10 y 11 y cuya actividad inicial tiene un error relativo menor del 100%) y ritmos de producción estimados para ^{109}Cd y ^{113}Sn en cada uno de los detectores y su promedio.

		Actividad inicial (1/kg d)		Parámetros supuestos				Ritmo (1/kg d)		Contribución para error Rp		
		Promedio A0	Promedio error	f	error f	t (d)	error t (d)	Rp	Error Rp	término con A0	término con f	término con t
Sn	D0											
	D1											
	D2	11,73	2,44	3,6	0,1	30	5	3,37	0,71	0,49201	0,00853	0,00025
	D3	6,50	2,07	3,6	0,1	30	5	1,86	0,60	0,35296	0,00261	0,00008
	D4	10,03	2,68	3,6	0,1	30	5	2,88	0,77	0,59287	0,00623	0,00018
	D5	9,17	2,26	3,6	0,1	30	5	2,63	0,65	0,41979	0,00520	0,00015
	D6	8,85	1,59	3,6	0,1	30	5	2,54	0,46	0,20814	0,00485	0,00014
	D7	7,89	1,39	3,6	0,1	30	5	2,26	0,40	0,15873	0,00386	0,00011
	D8	7,24	1,36	3,6	0,1	30	5	2,08	0,39	0,15231	0,00325	0,00009
Cd	D0											
	D1											
	D2	18,67	4,43	3,6	0,1	30	5	5,89	1,41	1,95650	0,02405	0,01474
	D3	11,54	4,21	3,6	0,1	30	5	3,64	1,33	1,76463	0,00918	0,00563
	D4	20,52	6,19	3,6	0,1	30	5	6,47	1,96	3,81029	0,02905	0,01781
	D5	19,20	4,55	3,6	0,1	30	5	6,06	1,45	2,06051	0,02544	0,01560
	D6	14,78	2,85	3,6	0,1	30	5	4,66	0,91	0,81062	0,01506	0,00923
	D7	13,37	2,51	3,6	0,1	30	5	4,22	0,80	0,62550	0,01232	0,00755
	D8	12,21	2,46	3,6	0,1	30	5	3,85	0,79	0,59969	0,01029	0,00631

Figura 12: Desglose de las diversas contribuciones a la incertidumbre en los ritmos de producción (descritas en el texto): la actividad inicial A_0 , el factor f y el tiempo t .

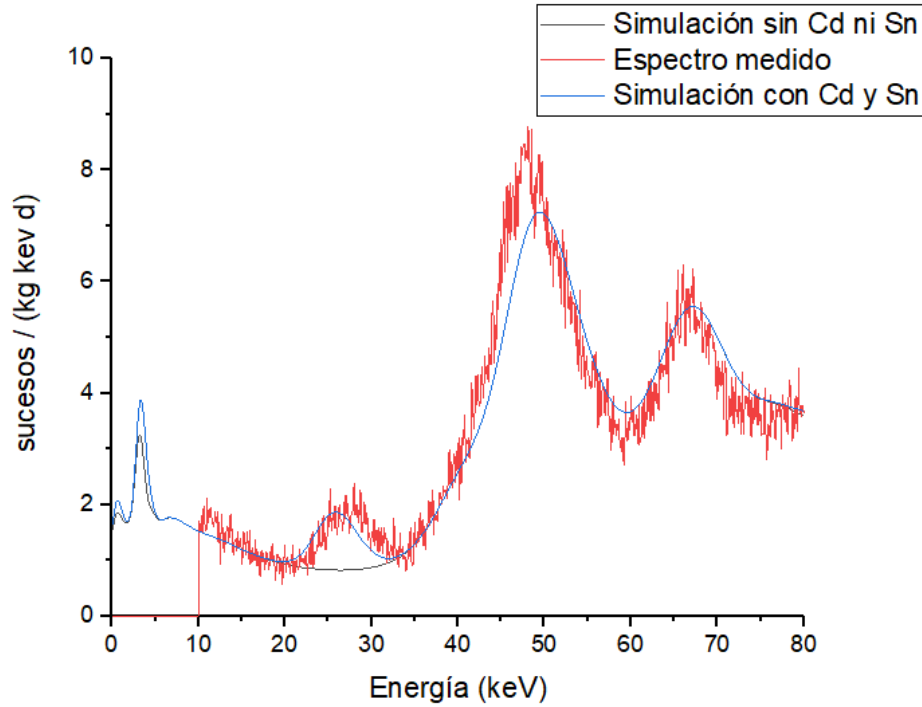


Figura 13: Comparación del modelo de fondo sin tener en cuenta los isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn y teniéndolos en cuenta con el espectro medido en ANAIS-112 (noviembre-diciembre) por el detector D6.

cada isótopo en el pico. También hay que tener en cuenta que hay parte de la incertidumbre que viene de estimar o aproximar el flujo de neutrones recibido y de cuánto tiempo ha estado expuesto el cristal; de modo que aunque el tratamiento numérico fuera lo más preciso posible, tampoco se obtendría una incertidumbre mucho menor. De hecho, al hacer el tratamiento de datos se han desechado las actividades iniciales cuyo error relativo era mayor del 100%, pero se ha comprobado que no hacerlo tampoco implicaba un error mucho mayor en el resultado final del ritmo.

4.2. Efecto esperado en ANAIS

En cuanto a la simulación realizada por Geant4, conocida la actividad de cada isótopo en los detectores, es necesario aplicar un factor de normalización a los espectros simulados para obtener el ritmo esperado en una medida. Estos factores se deben a que a partir de la simulación obtenemos sucesos/keV, y se quiere obtener el espectro que se registraría en los detectores en unidades de sucesos por keV, por kg de detector y por día. Para ello, se divide el número de sucesos en cada bin de los espectros simulados por el número de desintegraciones que hemos simulado (10^6) y multiplicamos por la actividad que tendría el isótopo en cuestión durante una medida ($A = A_0 e^{-\lambda t}$), siendo t el tiempo que ha pasado desde que el detector llega al laboratorio subterráneo hasta que se toma la medida. La figura 13 recoge el efecto de la simulación de ^{109}Cd y ^{113}Sn en el modelo de fondo de uno de los detectores de ANAIS-112.

Documento	Ritmo ^{109}Cd ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Ritmo ^{109}Cd ($\text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$)
Tesis de Wisconsin-Madison (cálculos)	4,8	9,0
(medida)	–	16
ANAIS	$2,0 \pm 0,6$	$6,8 \pm 1,6$
Este trabajo	$2,38 \pm 0,20$	$4,53 \pm 0,40$

Tabla 4: Comparación de los ritmos de producción obtenidos en este trabajo con los resultados de dos estudios previos [11] y [12].

Se puede apreciar en la figura 13 que la simulación con los isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn añadidos se ajusta bastante bien al espectro obtenido con el detector, especialmente en el pico en torno a los 27 keV. Además también se observa que los isótopos producen, además de la señal analizada, picos en la zona de interés en la búsqueda de materia oscura por debajo de 10 keV, debido a los procesos de captura electrónica en capa L.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha estimado el ritmo de producción de los isótopos ^{109}Cd y ^{113}Sn en cristales de NaI(Tl) usados en el laboratorio subterráneo de Canfranc para la búsqueda de materia oscura. El estudio se ha realizado a partir de los datos tomados por el experimento ANAIS con sus nueve detectores en diversos montajes en un rango temporal de varios años. Durante la fabricación de los detectores se produce una activación cosmogénica debida a la exposición a los rayos cósmicos en la superficie terrestre, lo que resulta en una señal de fondo intrínseca a los cristales.

La actividad inicial (al introducir los detectores en el laboratorio subterráneo de Canfranc) de cada isótopo se ha estimado analizando las señales que generan en los espectros de datos medidos por diversos detectores en distintos tiempos. Para estimar el ritmo de producción, se ha supuesto que durante la producción de los cristales se llega a la activación de saturación, de forma que mediante ciertas estimaciones como la estimación del factor de corrección para el flujo de neutrones cósmicos f en Colorado y el tiempo de transporte desde Colorado hasta Canfranc, se pueda obtener una expresión que relacione la actividad inicial de cada isótopo con el ritmo de producción. Los valores derivados para los ritmos de producción de ambos isótopos y sus correspondientes incertidumbres se muestran en la tabla 4. También se ha realizado una simulación con el programa Geant4, usando un código ya desarrollado para el experimento ANAIS, para obtener el efecto de estos isótopos y comparar la señal simulada a partir de los ritmos estimados con la medida, lo que ha ayudado a confirmar el origen de las señales analizadas.

Se pueden comparar los valores de los ritmos obtenidos en este trabajo para ^{109}Cd y ^{113}Sn con resultados previos mostrados en una tesis de la universidad de Wisconsin-Madison [11] y los primeros cálculos que se hicieron en ANAIS [12]. La tesis de Wisconsin-Madison presenta resultados del ritmo de ^{109}Cd y ^{113}Sn obtenidos mediante cálculos y el ritmo medido de ^{113}Sn . Reuniendo todos los valores en la tabla 4 se puede observar que los resultados obtenidos en ANAIS y en este trabajo son razonadamente parecidos,

pero los de la tesis de Wisconsin-Madison son superiores en al menos un factor 2.

Referencias

- [1] Bernabei R *et al*, Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1, 2013 *Eur. Phys. J. C* **73** 2648
Bernabei R *et al*, First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2. <https://arxiv.org/abs/1805.10486>
- [2] Amaré J *et al*, The ANAIS-112 experiment at the Canfranc Underground Laboratory, Proceedings de XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), <https://arxiv.org/abs/1710.03837v1>
- [3] Página web del experimento ANAIS. <http://gifna.unizar.es/anaïs>
- [4] Amaré J *et al*, Assessment of backgrounds of the ANAIS experiment for dark matter direct detection, 2016 *Eur. Phys. J. C* **76** 429
- [5] Programa de simulación Geant4, <http://geant4.web.cern.ch/>
- [6] Esquemas de desintegraciones de isótopos, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- [7] Energía de ligadura de isótopos, <https://application.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/www/atomic/bind.pdf>
- [8] Programa ROOT usado para ajustes, <https://root.cern.ch/>
- [9] Amaré J *et al*, Cosmogenic radionuclide production in NaI(Tl) crystals, 2015 *JCAP* **02** 046
- [10] Glenn F. Knoll, Radiation detection and measurement. Editorial John Wiley and sons
- [11] W. C. Pettus, Cosmogenic activation in NaI detectors for dark matter searches, Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 2015.
- [12] Villar P *et al*, Study of the cosmogenic activation in NaI(Tl) crystals within the ANAIS experiment, 2018 *IJMPA* **33**, 1843006.