

# Rayos cósmicos

## Activación en materiales debida a neutrones cósmicos

Autor:  
David Cintas González

Dirección:  
Gloria Luzón Marco  
Javier Galán Lacarra

Departamento de física teórica  
Área de física atómica, molecular y nuclear

Facultad de ciencias (Universidad de Zaragoza)  
Curso 2015-2016

14 de septiembre de 2016

**Sumario** Muchos experimentos para la búsqueda de sucesos extraños en física de partículas (como la búsqueda de materia oscura o desintegraciones doble beta sin neutrinos) requieren un nivel de fondo en la detección muy bajo. En este trabajo se estudian los fenómenos de activación por parte de rayos cósmicos del material usado como detector o de materiales que habitualmente se utilizan en los blindajes, y que pueden perjudicar la medida de estos experimentos. Se han comparado los resultados de dos tipos de códigos de simulación de la activación: ACTIVIA y Geant4.



# Índice de contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Rayos cósmicos y activación cosmogénica</b>	<b>5</b>
2.1	Producción de neutrones en la atmósfera . . . . .	5
2.2	Mecanismos de activación por neutrones . . . . .	6
2.3	Activación de materiales . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Simulación con el programa ACTIVIA</b>	<b>7</b>
3.1	Procedimiento en la simulación . . . . .	7
3.2	Simulación con neutrones cósmicos . . . . .	8
3.2.1	Activación en el plomo . . . . .	8
3.2.2	Activación en el cobre . . . . .	9
3.2.3	Activación en el mylar . . . . .	10
3.2.4	Activación en el xenon . . . . .	10
3.2.5	Activación en el argon . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Simulación con el programa Geant4</b>	<b>13</b>
4.1	Instrucciones del programa . . . . .	13
4.2	Efectos de los isótopos producidos . . . . .	14
4.3	Definición del espacio para la comparación con ACTIVIA . . . . .	14
4.4	Activación de materiales con neutrones cósmicos . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Comparación de los datos obtenidos</b>	<b>17</b>
5.1	Comparando ACTIVIA y Geant4 . . . . .	17
5.2	Comparación con datos externos . . . . .	19
5.2.1	Comparando con otras simulaciones . . . . .	19
5.2.2	Comparando con datos experimentales . . . . .	21
5.3	Conclusiones . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Activación con neutrones de radiactividad natural</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Geometría de IAXO</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones finales</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Modelización del programa ACTIVIA</b>	<b>29</b>
<b>B</b>	<b>RestSoft</b>	<b>30</b>
B.1	ROOT . . . . .	30
B.2	Geant4 . . . . .	31
<b>C</b>	<b>Efectos de los isótopos producidos</b>	<b>36</b>
C.1	Efectos de la activación en el argon . . . . .	36
C.2	Efectos de la activación en el xenon . . . . .	36
C.3	Efectos de la activación en el cobre . . . . .	39
C.4	Efectos de la activación en el mylar y en el plomo . . . . .	39

C.5 Conclusiones . . . . .	41
<b>D Experimento IAXO</b>	<b>41</b>
<b>E Flujos de neutrones utilizados</b>	<b>42</b>

# 1 Introducción

Actualmente se requieren muy bajos niveles de fondo en los detectores de experimentos que buscan sucesos raros. Ejemplos de este tipo de experimentos pueden ser la búsqueda de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMP) o axiones, unos buenos candidatos como materia oscura, o la búsqueda de una señal que corresponda a una desintegración doble beta de un cierto isótopo y que nos de información sobre la masa del neutrino. Así, el estudio y control de las fuentes de fondo es fundamental. La radiación ambiental se disminuye sustancialmente colocando blindajes en los detectores. Por ejemplo, materiales con alto contenido en hidrógeno frenan muy bien las radiaciones hadrónicas como protones o neutrones. Otros, detienen a fotones y electrones por su gran densidad. El plomo suele situarse en las capas externas del detector, prefiriendo el cobre en el interior por su mayor nivel de pureza.

Con esto se tiene una estructura de blindaje a nivel terrestre, pero aún no se ha eliminado la radiación cósmica. Ésta está formada en la mayor parte por neutrones, muones y protones (en orden de intensidad) de muy alta energía. La forma de atenuar esta radiación es colocar el detector en un blindaje natural de gran tamaño; es decir, colocarlo bajo tierra (como el LSC en Canfranc o Gran Sasso en Italia). También los materiales durante su estancia en la superficie terrestre han estado expuestos a un gran flujo de partículas cósmicas que han producido isótopos radiactivos que colocaremos, en la mayoría de los casos sin remedio, en nuestro detector o muy cerca de él, siendo más relevantes aquellos con una vida media larga y fotones de alta energía, o todos los que se encuentren en la región de detección.

Todo esto conlleva un intenso proceso de modelización, simulación, análisis de datos y selección de isótopos molestos en los experimentos. Así, en primer lugar, hablaremos de los rayos cósmicos, la producción de neutrones en la atmósfera y los procesos de activación cosmogénica. Seguidamente, mostraremos los resultados obtenidos con los códigos ACTIVIA y Geant4, así como una comparación entre ambos y datos experimentales. Finalmente, recogeremos los datos de activación en un experimento real: IAXO; y terminaremos con unas conclusiones.

## 2 Rayos cósmicos y activación cosmogénica

El espacio exterior esta lleno de radiación que proviene de una gran variedad de fuentes. Las estrellas como nuestro Sol, explosiones de Supernovas y nebulosas son algunas las principales fuentes de radiaciones, y emiten gran cantidad de partículas que llegan a la Tierra. La gran mayoría de esta radiación es detenida por la atmósfera terrestre o desviada en el campo magnético, pero algunas llegan hasta la superficie. Éstas son producto de la interacción sucesiva de las partículas cósmicas con la atmósfera.

De esta forma, al llegar una partícula de muy alta energía a la atmósfera, fundamentalmente nucleones o núcleos ligeros, produce cascadas de partículas más ligeras y de menor energía. De este modo, nos encontraremos en la superficie con una radiación que estará formada en su mayor parte por muones, electrones, neutrinos, protones y neutrones. Son estas últimas las que más nos interesan porque son las que producen la activación de los materiales de la superficie.

### 2.1 Producción de neutrones en la atmósfera

Los procesos fundamentales por los que pueden producirse los neutrones cósmicos son la espalación ( $a + B \rightarrow C + D + \dots + (k)n$ ) y la transmutación ( $a + B \rightarrow C^* \rightarrow C + n$ ). El primer

proceso, el de espalación, se debe a la llegada de una partícula cósmica muy energética que rompe el núcleo en varias partes, libera otras partículas como núcleos de tritio, partículas  $\alpha$ , deuterones, protones, núcleos más pesados y, como no, neutrones. El número de neutrones emitidos depende del tipo de núcleo con el que chocan las partículas y de la energía que tuvieron antes de colisionar.

Los procesos de transmutación se producen para partículas menos energéticas que las anteriores, que son absorbidas por los núcleos, emitiendo otra partícula tras la estabilización del nuevo núcleo creado. Los mecanismos por los cuales los neutrones activan los materiales de la superficie son similares.

## 2.2 Mecanismos de activación por neutrones

Los neutrones son partículas sin carga eléctrica, cuyas únicas reacciones con la materia (y la única forma de detectarlos, de forma indirecta) se producen en el núcleo de los átomos: interacciones dispersivas e interacciones no dispersivas. En el primer caso, el neutrón que llega al núcleo es el mismo que el que sale; de esta forma, el neutrón puede ceder parte de su energía al núcleo pero no es capturado por él ni produce un cambio de isótopo. Estas reacciones pueden ser elásticas ( $n + A \rightarrow n + A$ ), o inelásticas ( $n + A \rightarrow n + A^*$ ), en las que el núcleo queda excitado. En las reacciones no dispersivas el tipo de isótopo cambia al interactuar con el neutrón, pudiéndose liberar otra partícula o núcleo en procesos como transmutación, captura radiativa, espalación y fisión. La transmutación cambia el elemento, de forma que se libera en cada proceso una única partícula cargada positivamente como puede ser protones, partículas  $\alpha$ , deuterones o núcleos de tritio. Por ejemplo  $n + Cu63 \rightarrow Co60 + \alpha$ .

En la captura radiativa, el elemento inicial es el mismo que el final, cambiando de isótopo y liberándose un fotón con la diferencia de niveles de energía entre ambos estados (un ejemplo es  $n + Xe132 \rightarrow Xe133 + \gamma$ ). El proceso de espalación es el mismo que habíamos visto antes: si la energía del neutrón es suficientemente elevada (habitualmente mayor que los 100 MeV), el neutrón puede liberar del núcleo pequeños trozos de partículas usualmente ligeras. Por último, el proceso de fisión produce la rotura en dos partes del núcleo con el que colisiona. La combinación más probable entre los dos núcleos producidos es que uno tenga un tercio del número másico y el otro los otros dos tercios. Como los núcleos tienen mayor proporción de neutrones que de protones cuanto más masivos son, se liberan también neutrones en la reacción. Estos son los principales procesos de activación por neutrones a considerar cuando se hagan predicciones sobre los posibles isótopos activados en cada material.

## 2.3 Activación de materiales

Con el flujo de neutrones, los materiales se activan siguiendo la siguiente ley:

$$\frac{dN}{dt} = A - \lambda N \quad (1)$$

Donde  $A$  es la activación del material,  $N$  es el número de isótopos y  $\lambda = 1/\tau$  es la constante de desintegración. Como resultado, si el material ha estado expuesto al flujo de neutrones un tiempo de exposición  $t_E$  y, posteriormente, se deja decaer un tiempo de decaimiento  $t_D$ , el número de isótopos activados es, pasado un tiempo  $t = t_E + t_D$ :

$$N(t_E + t_D) = \frac{A}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t_E})e^{-\lambda t_D} \quad (2)$$

Por lo tanto, si suponemos que el tiempo de exposición al flujo de neutrones es mucho mayor que la vida media de los isótopos activados ( $t_E \gg \tau$ ), la activación ha llegado a la saturación, y el número de isótopos activados  $N_o$  que hay en el material una vez se deja de exponer al flujo de neutrones ( $t_D = 0$ ) es:

$$N = A/\lambda e^{-\lambda t_D} \rightarrow N_o = N(t_D = 0) = A/\lambda = A \cdot \tau \quad (3)$$

Una representación del número de isótopos en un material activado en función del tiempo puede verse en la figura 1.

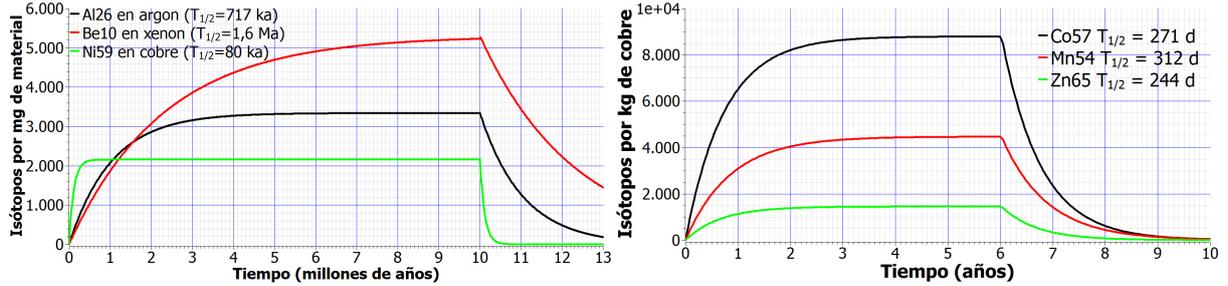


Figura 1: Número de isótopos activados en función del tiempo. A la izquierda se expone por miligramo de material para el Al26, el Be10 y el Ni59. El tiempo de exposición al flujo de neutrones es de  $t_E = 10$  millones de años, y el tiempo de decaimiento (en el que el detector puede registrar las desintegraciones de estos isótopos) es de  $t_D = 3$  millones de años. A la derecha se expone por kilogramo de material para el Co57, Mn54 y Zn65. El tiempo de exposición al flujo de neutrones es de  $t_E = 6$  años, y el tiempo de decaimiento de  $t_D = 4$  años. Es posible ver así que hay muchos isótopos que jamás dejarán de estar presentes en los materiales, además, a mayor vida media, mayor es su producción total (tal como se muestra en la ecuación 3), y más tiempo estarán presentes en el detector, de ahí que sean más relevantes.

### 3 Simulación con el programa ACTIVIA

#### 3.1 Procedimiento en la simulación

Como se presenta en el apéndice A (Modelización teórica de ACTIVIA), hay unos pocos parámetros que debemos introducir al programa para lanzar la simulación. Es fácil observar que es algo limitado, ya que la parametrización utilizada en el espectro de energías de los neutrones cósmicos no se adecuaba perfectamente a mediciones concretas (como puede verse en la figura 21 [4] [6] del apéndice E). Además el programa se basa en una fórmula semi-empírica para el cálculo de secciones eficaces de activación, y no utiliza ningún tipo de geometría para definir las interacciones, algo que habría que tener en cuenta si se quiere hacer un estudio más detallado como lo hace Geant4, del que se hablará más adelante.

Los parámetros significativos que hay que introducir al programa para conocer la producción de radioisótopos en un material dado son: el número atómico del material, los isótopos estables que tiene, cada uno con su número másico y su proporción en la naturaleza, las energías máxima y mínima del flujo de neutrones incidente y el paso en los incrementos de energías que deseamos utilizar. Por último se le ha de dar el tiempo de exposición al que están expuestos los materiales y el tiempo de decaimiento en el que se dejan bajo tierra.

Con todo esto el programa nos proporciona información de la actividad de los isótopos producidos por kilogramo de material y por día junto con los datos de sus vidas medias y las secciones eficaces de producción a partir de cada isótopo del material de partida. Como el tiempo que se encuentran los materiales en superficie puede ser arbitrario, para poder comparar supondremos que el tiempo de exposición de los materiales a los neutrones es suficiente como para que todas las producciones lleguen a la saturación. Como conocemos las vidas medias de los isótopos producidos haremos una estimación de la importancia de cada isótopo en el material considerando el tiempo de decaimiento en profundidad.

A partir de aquí comenzamos con el análisis que nos proporciona el programa para obtener los radioisótopos de los distintos materiales del blindaje y detector. Para las simulaciones de neutrones cósmicos de baja energía (que denotaremos como LE "low energy") se introdujo una energía entre 10 MeV y 1 GeV, un paso de energías de 10 MeV, y un tiempo de exposición de  $10^9$  años<sup>1</sup>. Para estudiar la activación por neutrones cósmicos de alta energía (que denotaremos como HE "high energy") se introdujo una energía entre 1 GeV y 10 GeV, un paso de energías de 100 MeV. Tras el aporte de datos por parte del programa, es necesario hacer una selección de los isótopos contaminantes para saber cuáles son relevantes.

Para los materiales que se encuentran en el blindaje solo se estudiarán los isótopos que se desintegren emitiendo fotones o positrones. Los fotones serán las únicas partículas que tendrán recorrido como para llegar al medio detector. Los positrones, productos de la desintegración  $\beta^+$ , se aniquilarán con los electrones del medio emitiendo dos fotones de 511 keV. Los que se desintegran alfa o  $\beta^-$  (emitiendo electrones) solo serán visibles si se han desintegrado en el gas.

## 3.2 Simulación con neutrones cósmicos

Como ya se ha mencionado, vamos a considerar la activación en plomo, cobre, mylar, y en gases como argon o xenon.

### 3.2.1 Activación en el plomo

El plomo natural esta formado por [2]: Pb204 (1,4%), Pb206 (24,1%), Pb207 (22,1%) y Pb208 (52,4%). Según los datos aportados por ACTIVIA, el isótopo relevante que más se produce es el Bi208, con una emisión de fotones de 2614 keV que puede producir un fondo Compton y con una vida media de 370.000 años. Los isótopos más relevantes se muestran en la tabla 1 y su sección eficaz en la figura 2. El proceso que da lugar al Bi208 es la captura radiativa: un neutrón es capturado por un núcleo de Pb208 que se convierte en Pb209, se desintegra  $\beta^-$  a un estado excitado del Bi209, que se convierte en el Bi208 tras emitir un neutrón. El proceso de captura es predominante a bajas energías, mientras que el proceso de fisión que produce el Pm143 y el Nb91 ocurre para neutrones más energéticos.

En general, los isótopos activados para neutrones de altas energías son parecidos a los producidos para bajas energías. En este caso, el Bi208 disminuye en un factor 147 su producción debido a que la captura de neutrones domina a bajas energías. Por otra parte, a más altas energía aumentan el Pm143 o el Rh102, producidos ambos por fisión. Los cambios se producen por la disminución del flujo de neutrones de alta energía respecto a los de baja energía y por el cambio de las secciones eficaces de producción para diferentes energías.

---

<sup>1</sup>En la mayoría de los casos se llega a la saturación en unos pocos años

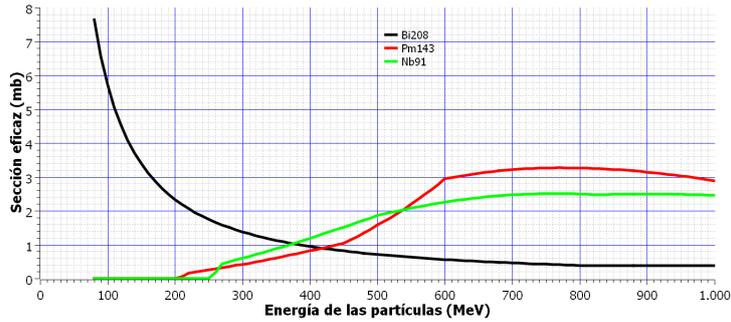


Figura 2: Sección eficaz proporcionada por el programa ACTIVIA de producción de los isótopos más molestos presentes en el plomo natural.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desintegración	LE	HE	Total	$E_{\gamma}$ (keV)[2]	Activación
Bi208	367 ka	$\gamma, \beta^+, CE$	2,94	0,02	2,96	2615	Captura
Pm143	265 d	$\gamma, \beta^+, CE$	0,03	0,31	0,34	742	Fisión
Nb91	680 a	$\beta^+, CE$	0,17	0,12	0,29	—	Fisión
Sn113	115 d	$\gamma, \beta^+, CE$	0,13	0,16	0,29	391	Fisión
Rh102	2,9 a	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	0,06	0,11	0,17	556	Fisión
Mn54	312 d	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	0,14	0,03	0,17	835	Fisión

Tabla 1: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del plomo según los datos aportados por ACTIVIA. La activación se expone en núcleos/kg/día.

### 3.2.2 Activación en el cobre

En el cobre, los isótopos que se encuentran en la naturaleza son [2]: Cu63 (69,13%) y Cu65 (30,83%). Solo si el cobre se encuentra en componentes cercanos al volumen activo, los electrones podrían ser relevantes, y aún en este caso, el uso de un corte fiducial eliminaría esta contribución. Siguiendo con este razonamiento, los isótopos que molestan son el Ni59, el Co57, el Co60 y el Mn54. El Co60 es el más preocupante por su vida media de más de 5 años y por tener dos picos de emisión bastante energéticos: 1173 keV y 1333 keV que aportarán un fondo Compton muy elevado en una zona muy cercana al detector. En este caso es todavía más preocupante, pues el cobre se encuentra muy cerca de la región de detección mientras que el plomo se suele colocar en capas más externas, con lo que la atenuación es más probable. La lista de isótopos activados más peligrosos en el cobre se muestra en la tabla 3, y las secciones eficaces de producción en la figura 3.

La producción de isótopos en el material es similar a altas energías que a bajas energías. Los procesos que dan lugar al Ni59 y al Co57 son de tipo espalación. En el caso del Co60 el proceso es algo parecido, solo que siempre se libera una partícula  $\alpha$ . Como bien es sabido, a la partícula  $\alpha$  debe tener una energía inicial mínima para poder escapar del núcleo (energía que es aportada por el neutrón), de ahí que solo se produzca el proceso para energías mayores que un umbral. Para energías mayores dominan otros efectos como la fisión u otros tipos de espalación, de ahí que la producción de Co60 se vea reducida.

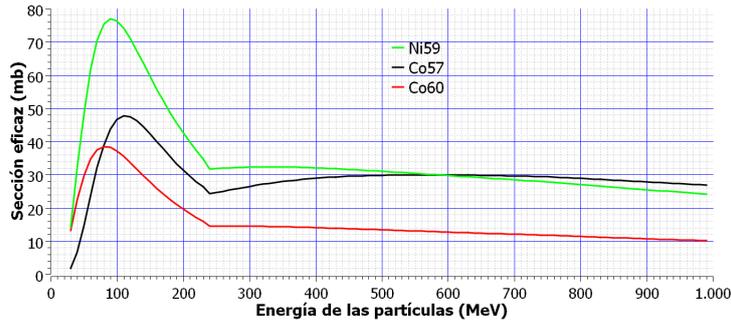


Figura 3: Sección eficaz proporcionada por el programa ACTIVIA de producción de los isótopos más molestos presentes en el cobre natural.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desintegración	LE	HE	Total	$E_{\gamma}$ (keV)[2]	Activación
Ni59	80 ka	$\beta^+, CE$	48,80	2,54	51,34	—	Espalación
Co57	271 d	$\gamma, CE$	29,42	3,03	32,45	122	Espalación
Co60	5,3 a	$\gamma, \beta^-$	25,03	1,03	26,06	1173, 1333	Transmutación
Mn54	312 d	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	11,42	2,91	14,33	835	Espalación
Zn65	244 d	$\gamma, \beta^-$	5,92	0,03	5,95	1116	Captura
Na22	2,6 a	$\gamma, \beta^+, CE$	0,06	0,25	0,31	1275	Fisión

Tabla 2: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del cobre según los datos aportados por ACTIVIA. La activación se expone en núcleos/kg/día.

### 3.2.3 Activación en el mylar

El mylar es un ejemplo de los materiales que frenan bien las radiaciones hadrónicas por su alto contenido en hidrógeno. Al no ser un elemento químico sino un compuesto debemos tener en cuenta los isótopos de cada elemento que lo forma, en este caso  $H, O$  y  $F$ , y los isótopos son [2]:  $H$  (4,195%),  $D$  (0,001%),  $O16$  (33,222%),  $O17$  (0,013%),  $O18$  (0,067%) y  $F19$  (62,502%).

La activación de estos materiales solo produce isótopos que se desintegran beta como el  $Be7$ , el  $Be10$  o el  $C14$ , o estables como el  $B11$  además este material nunca está en contacto con el gas detector salvo si se pone en el interior una pequeña cantidad como soporte o aislante. La figura 4 muestra las secciones eficaces de producción de los isótopos inestables. El único de todos ellos que puede producir fondo en el detector es el que menor periodo de semidesintegración tiene (de tan solo 53 días), es el  $Be7$ , con lo cual, no podemos considerar que haya isótopos activados molestos en el material.

En estos isótopos de bajo número másico nos encontramos que un proceso de espalación puede ser también considerado una fisión o una transmutación, es por eso que las secciones eficaces son permanentemente crecientes, pues los nucleos se descomponen más cuanto mayor es la energía del neutrón incidente. Existe una disminución debida al menor flujo de neutrones.

### 3.2.4 Activación en el xenon

La activación en el gas xenon es muy relevante, ya que es del propio medio detector. Debido a eso hay que considerar también los isótopos que se desintegren emitiendo electrones. Para empezar, los isótopos estables del xenon presentes en la naturaleza son los siguientes [2]:  $Xe124$

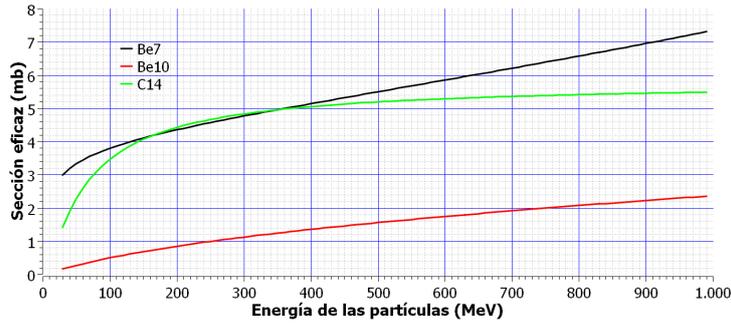


Figura 4: Sección eficaz proporcionada por el programa ACTIVIA de producción de los isótopos inestables presentes en el mylar.

(0,10%), Xe126 (0,09%), Xe128 (1,91%), Xe129 (26,4%), Xe130 (4,10%), Xe131 (21,2%), Xe132 (26,9%), Xe134 (10,4%), Xe136 (8,90%).

La mayoría de los isótopos de mayor producción en esta ocasión son los que tienen números atómicos y másicos cercanos a los del xenon natural como son el Xe127 o el I125, pero sus vidas medias son de unos pocos meses. Aquellos que tienen una vida suficientemente alta y producen desintegraciones beta son el Cs134, el Cs135 y el tritio. En la tabla 3 se exponen los isótopos más molestos de activación en el xenon. La figura 5 muestra las secciones eficaces de producción de estos molestos isótopos. El tritio se produce por espalación, mientras que el Cs134 y el Cs135, son producidos por capturas. En estos procesos, un núcleo de Xe134 o Xe136 captura un neutrón y posteriormente se desintegra  $\beta^-$  a un estado excitado del Cs135 o Cs137 que posteriormente se desexcitan emitiendo neutrones, que dejan una señal parecida a la de un WIMP.

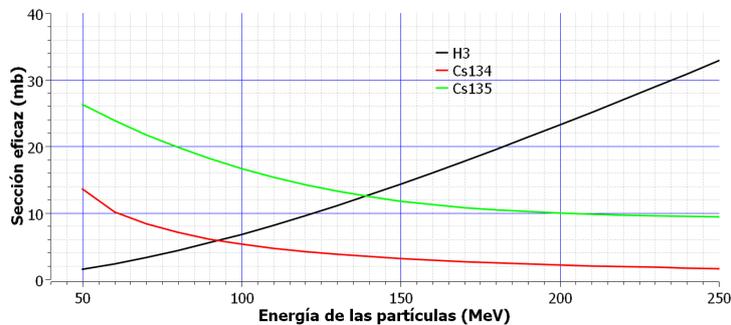


Figura 5: Sección eficaz proporcionada por el programa ACTIVIA de producción de los isótopos inestables presentes en el xenon. En esta gráfica se ha disminuido el rango máximo de energías porque las curvas siguen una evolución constante a mayores energías.

### 3.2.5 Activación en el argon

Al igual que en el caso del xenon, la activación del gas argon contribuirá fuertemente al fondo de nuestro detector. Para empezar, los isótopos estables del argon presentes en la naturaleza son los siguientes [2]: Ar36 (0,34%), Ar38 (0,06%), Ar40 (99,60%). Los isótopos que se producen en mayor medida, que tienen una vida suficientemente alta y producen desintegraciones beta son el Ar39, el Cl36 y, de nuevo, el tritio. El tritio en concreto es una fuente de emisión de electrones de baja energía que siempre vamos a encontrar en los detectores gaseosos activados. La tabla 4 muestra los isótopos más activados de este material. La figura 6 muestra las secciones eficaces

Isótopo	$T_{1/2}$	Desint.	LE	HE	Total	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]	Activación
H3	12,3 a	$\beta^-$	12,75	18,39	31,15	19*	Espalación
Cs135	2,3 Ma	$\beta^-$	21,73	0,55	22,28	269*	Captura
Cs134	2,1 a	$\gamma, \beta^-, CE$	7,56	0,02	7,58	604, 795	Captura
Be10	1.6 Ma	$\beta^-$	5,52	0,79	6,31	556*	Transmutación
Cd109	1,2 a	$\gamma, CE$	1,36	1,73	3,09	88, 126*	Fisión
Rh101	3,3 a	$\gamma, CE$	0,39	1,04	1,43	198, 215*	Fisión
Nb91	680 a	$\beta^+, CE$	0,12	0,69	0,81	1253*	Fisión
C14	5722 a	$\beta^-$	0,04	0,59	0,63	156*	Espalación

Tabla 3: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del xenon según los datos aportados por ACTIVIA. La activación se expone en núcleos/kg/día.

de producción de estos isótopos.

El tritio se produce más a altas energías por un proceso de espalación, mientras que el Ar39 es producido por un proceso de transmutación: el Ar40 absorbe un neutrón y expulsa otros dos neutrones, dando lugar al proceso Ar40(n,2n), este proceso es predominante a bajas energías. El Cl36 puede producirse a bajas energías por un proceso de transmutación, el Ar36 o el Ar38 capturan un neutrón y emiten un protón o un núcleo de tritio, respectivamente. A mayores energías la producción de este isótopo sucede por espalación del Ar40.

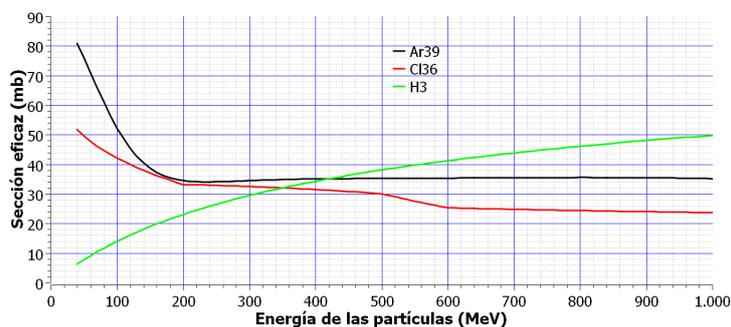


Figura 6: Sección eficaz proporcionada por el programa ACTIVIA de producción de los isótopos inestables presentes en el argon.

En general vemos que la mayor activación de un material se produce para isótopos de número atómico y másico cercanos, esto se debe a la alta sección eficaz de procesos a baja energía combinado con el aumento de flujo de neutrones para este rango energético. Estos procesos son fundamentalmente los de transmutación y captura radiativa. A mayores energías, la producción de tritio aumenta en todos los procesos por espalación, así como los isótopos que son producto de fisiones (como el Pm143 en el plomo, el Na22 en el cobre o el Nb91 en el xenon).

Finalmente hemos terminado el estudio de la activación de materiales por rayos cósmicos a través del programa ACTIVIA. Estos últimos datos serán de interés más adelante para ver las diferencias con Geant4 y saber cuáles de estas producciones coinciden con las que se producen realmente, comparando también con datos experimentales y otras simulaciones.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desintegración	LE	HE	Total	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]	Activación
Ar39	269 a	$\beta^-$	85,3	7,72	93,02	565*	Captura
Cl36	301 ka	$\beta^+, \beta^-, CE$	64,14	5,36	69,50	708*, 1142*	Espalación
H3	12,3 a	$\beta^-$	30,83	14,61	45,44	19*	Espalación
Na22	2,6 a	$\gamma, \beta^+, CE$	7,71	1,48	9,19	1275	Fisión
Al26	717 ka	$\gamma, \beta^+, CE$	7,30	1,49	8,79	1808	Fisión
C14	5722 a	$\beta^-$	3,61	0,75	4,36	156*	Fisión
Be10	1,6 Ma	$\beta^-$	0,45	1,52	1,97	556*	Fisión
Si32	150 a	$\beta^-$	1,25	0,49	1,74	225*	Espalación

Tabla 4: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del argón según los datos aportados por ACTIVIA. La activación se expone en núcleos/kg/día.

## 4 Simulación con el programa Geant4

Los resultados que se han obtenido con la simulación de ACTIVIA van a ser contrastados con un programa de simulación más completo, utilizando un código específico RestSoft que se ocupa de la simulación, toma de datos y análisis de resultados. Este código, basado en C++ y ROOT, utiliza Geant4 para la simulación de la interacción de partículas con los materiales. A continuación vamos a ver las principales diferencias entre ambos códigos de simulación, explicando además cómo funciona este nuevo programa.

### 4.1 Instrucciones del programa

En este programa se puede estudiar el comportamiento de cualquier detector adaptándolo al montaje de cada experimento concreto (ver, por ejemplo, geometría IAXO, capítulo 6). Debido a eso, es mucho más completo y en esta ocasión solo se va a utilizar para simular la activación y observar sus efectos en la detección. Más información en el apéndice B. Los materiales se definen a partir de sus componentes atómicos, su densidad y la presión y temperatura en el caso de los gases. El programa tiene incorporadas de librerías donde se exponen las interacciones de esos isótopos con una gran cantidad de partículas: Gammas, electrones, positrones, protones, neutrones, etc...

En la geometría se deben definir los volúmenes y posiciones que ocupan todos los componentes que queremos que tenga nuestro montaje de detector más blindaje. Una vez completa la geometría del detector, es necesario definir una partícula inicial (o un isótopo radiactivo) desde un volumen definido, desde un punto o desde una superficie, con una dirección cualquiera, como una fuente isótropa o como se desee. A las partículas que se lanzan se les puede asignar una distribución de energías y distribución angular.

El programa posee una serie de datos de salida que dan múltiples informaciones al usuario, como son el espectro de energías que las partículas han dejado en el volumen sensible de detección (habitualmente un gas), la distribución angular con la que llegaron esas partículas, etcétera. Con todo esto, podemos analizar el problema que nos atañe y ver qué información complementaria o adicional nos puede dar el programa en nuestro estudio.

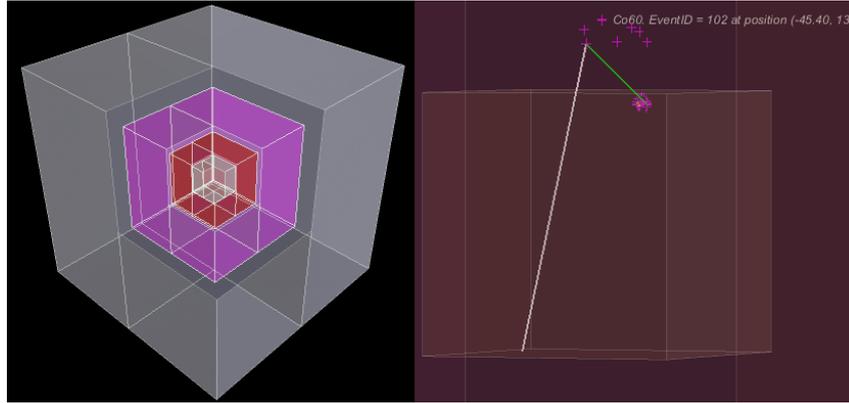


Figura 7: A la izquierda, la geometría del detector. El gas (medio detector) se encuentra en un recipiente cúbico de cobre cuya anchura es de 20 cm, alrededor del cual un blindaje hecho de una capa de mylar de 40 cm de espesor y sobre esta, una capa de plomo de 80 cm. A la derecha, un evento producido por la desintegración de un isótopo de Co60. En blanco se observa un neutrino, que no ha depositado energía, en verde un fotón de la desitegración del Co60 y las cruces moradas son los depósitos de energía de un electrón liberado en el gas por efecto fotoeléctrico.

## 4.2 Efectos de los isótopos producidos

Para entender el depósito de energía de los isótopos activados en cada material en el volumen activo se realizaron varias simulaciones de las que podemos sacar algunas conclusiones (ver con más detalle en el apéndice C), se utilizó una geometría cúbica de la figura 7. Los isótopos más relevantes se introducen en el volumen que ocupa cada material en el que se han activado, y se registran los depósitos de energía en el gas (volumen activo).

Tras realizar las simulaciones podemos afirmar que las emisiones de los isótopos presentes en los materiales de las capas alejadas al volumen de detección son prácticamente absorbidas en el propio blindaje. Por el contrario, las contaminaciones en el gas contribuyen fuertemente al fondo. Las emisiones de fotones del cobre producen de igual modo una importante contribución al espectro de energías que tarda muchos años en ser eliminada, como en el caso del Co60, cuya abundancia en el cobre tarda más de 24 años en reducirse al 1% de la inicial. Esto significa que un detector deberá estar formado por un cobre que lleve décadas bajo tierra para haberse reducido hasta este nivel de radiación, en caso contrario se observará predominantemente esta contaminación. Actualmente se intenta producir cobre electroformado en las propias instalaciones de laboratorios subterráneos para evitar la activación del Co60. Se pueden ver los espectros de energía por los isótopos activados en el argon en las figuras 12 (Ar39) y 13 (Cl36), en el xenon en las figuras 14 (Cs134), 15 (Cs135) y 16 (Be10), y en el cobre en las figuras 17 (Co57) y 18 (Co60).

## 4.3 Definición del espacio para la comparación con ACTIVIA

Este código presenta numerosas ventajas respecto a ACTIVIA para el cálculo de las activaciones de los materiales. La definición de una geometría para el detector y una distribución angular para las partículas que se lanzan son algunas de ellas. Por otro lado, podemos elegir el espectro de energías inicial de los neutrones y adaptarlo al lugar donde se han almacenado los materiales.

Como ACTIVIA trabaja con flujos por unidad de superficie y hace los cálculos de las secciones eficaces utilizando estos, la mejor geometría que podríamos definir es una lámina cuadrada de superficie  $S=1\text{ m}^2$  y un espesor de 10 cm de cada tipo de material a la que más adelante le vamos a hacer llegar los neutrones cósmicos.

En el programa ACTIVIA se utilizan tanto los protones como los neutrones para hacer la simulación de la activación y considera que las secciones eficaces de interacción con los isótopos de los materiales no dependen del tipo de partículas, por lo que vamos a lanzar solo neutrones cósmicos sobre la lámina del material. La distribución angular que tienen los neutrones cósmicos tiene una dependencia con el  $\cos^2(\theta)$  debido a la interacción que tienen con los átomos de la atmósfera. Definidos estos parámetros se puede proceder a la simulación de la activación. Utilizando un script a través del programa ROOT podremos seleccionar los isótopos que se han activado y obtener la información de cuánto se ha activado cada uno.

Integrando el flujo en energías conocemos directamente el número de neutrones que llegan por unidad de superficie en un intervalo de energías dado. Sabiendo esto, solo haciendo una transformación en superficie podemos saber cuántos neutrones llegarían a nuestra lámina cada día. Como a la lámina se le ha puesto un espesor de 10 cm, sabemos la masa que tiene solo con su volumen y densidad. Así también podemos saber la activación por kilogramo de material. Dividiendo el número de trazas (activaciones) por la masa de la lámina y la proporción de neutrones que han llegado a ella respecto a las que llegan en un día, tenemos directamente el valor que nos interesa, producción por día y por kilogramo de material.

#### 4.4 Activación de materiales con neutrones cósmicos

Se realizan las simulaciones correspondientes para los mismos dos rangos de energías que se estudiaron en ACTIVIA: Neutrones cósmicos de baja energía (entre 10 MeV y 1 GeV) y de alta energía (de 1 GeV a 10 GeV) para los mismos materiales. La figura 23 del apéndice E muestra los espectros introducidos. Procedemos a realizar las simulaciones con las características antes especificadas para cada material. El resultado de la activación es muy extenso y en la mayoría de los casos se producen isótopos o con vidas medias muy cortas (menos de un día) o son estables. Los que no coinciden con estas vidas medias deben tener una desintegración  $\gamma$  o  $\beta^+$  en el plomo, mylar y cobre y de cualquier tipo en el gas de xenon y argon <sup>2</sup>.

Los isótopos más molestos activados para el plomo se muestran en la tabla 5, para el cobre en la tabla 6, para el xenon en la tabla 7, y para el argon en la tabla 8. De nuevo se muestran sus periodos de semidesintegración  $T_{1/2}$ , sus formas de desintegración, sus producciones en cada rango de energías, las principales emisiones de fotones, y los procesos por los que se activan.

En el mylar, el único isótopo que se activa con una vida media relativamente alta y emite  $\gamma$  es el Be7, con una vida media de 53 días, se producen 26,40 núcleos/kg/día a baja energía, 10,31 núcleos/kg/día a alta energía y un total de 36,71 núcleos/kg/día en el rango total de energías. Podemos ver que la activación es muy variada. Algunos de los isótopos son los ya conocidos por la simulación con el programa ACTIVIA pero otros no coinciden.

Podemos ver algunos ejemplos de procesos de activación mencionados anteriormente, en el Tl204 la transmutación puede venir producida de múltiples formas:  $\text{Pb204}(n,p)$ ,  $\text{Pb206}(n,H3)$ . Este es un ejemplo de como un isótopo puede ser producido de diferentes formas en una trans-

---

<sup>2</sup>Supondremos que los gases se encuentran a 293 K y a una presión de 10 atm, condiciones que pueden tener cuando se encuentren dentro del detector.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desintegración	LE	HE	Total	$E_\gamma$ (keV)[2]	Activación
Tl204	3,8 a	$\beta^+, \beta^-, CE$	15,16	0,44	15,59	-	Transmutación
Bi207	32 a	$\beta^+, \gamma, CE$	0,70	0,13	0,82	570, 1064	Captura
Bi208	368 ka	$\beta^+, \gamma, CE$	0,43	0,00	0,43	2615	Captura
Nb94	20,3 ka	$\gamma, \beta^-$	0,21	0,06	0,28	703, 871	Fisión
Co60	5,27 a	$\gamma, \beta^-$	0,05	0,06	0,11	1173, 1333	Fisión
Tc98	4,2 Ma	$\gamma, \beta^-$	0,11	0,00	0,11	652, 745	Fisión

Tabla 5: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del plomo según los datos aportados por Geant4. La activación se expone en núcleos/kg/día.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desintegración	LE	HE	Total	$E_\gamma$ (keV)[2]	Activación
Ni59	76 ka	$\beta^+, CE$	60,46	3,02	63,48	-	Espalación
Co57	272 d	$\gamma, CE$	46,36	2,86	49,22	122	Espalación
Co60	5,3 a	$\gamma, \beta^-$	35,04	1,11	36,15	1173, 1333	Transmutación
Mn54	312 d	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	11,45	0,71	12,16	835	Espalación
V50	14000 Ta	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	2,64	0,63	3,27	1554	Espalación
K40	1,28 Ga	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	0,27	0,48	0,75	1461	Fisión

Tabla 6: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del cobre según los datos aportados por Geant4. La activación se expone en núcleos/kg/día.

Isótopo	$T_{1/2}$	Desint.	LE	HE	Total	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]	Activación
H3	12,3 a	$\beta^-$	38,65	17,24	55,89	19*	Espalación
I129	15,7 Ma	$\gamma, \beta^-$	53,00	0,86	53,86	40, 157*	Transmutación
Te123	10 Ta	$\gamma, CE$	7,73	1,72	9,45	53*	Espalación
Te128	$2,2 \cdot 10^{24}$ a	$\beta^-$	7,73	1,29	9,02	-	Transmutación
Te130	$7,9 \cdot 10^{20}$ a	$\beta^- \beta^-$	4,42	0,00	4,42	-	Transmutación
Sb125	2,8 a	$\gamma, \beta^-$	2,21	0,43	2,64	303*	Espalación
Cd109	1,3 a	$\gamma, CE$	0,00	1,29	1,29	88, 126*	Fisión
Rh101	3,3 a	$\gamma, CE$	0,00	0,86	0,86	198, 215*	Fisión

Tabla 7: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del xenon según los datos aportados por Geant4. La activación se expone en núcleos/kg/día.

mutación, otro ejemplo del mismo proceso puede ser la activación del Te128 en el xenon, que puede proceder de: Xe129(n,p), Xe130(n,d), o Xe131(n,H3). En los procesos de espalación ocurridos en la activación de isótopos en el cobre puede liberar multitud de combinaciones de partículas para dar el mismo isótopo, como es el caso del Ni59 que puede producirse por Cu63(n,p4n), Cu63(n,d3n), etcétera.

En la lista nos encontramos con algunos isótopos que nos van a ser relevantes durante un corto periodo de tiempo o solo si el experimento se encuentra en superficie, como el S35 en la activación del argon o el Cd109 en el xenon. Siguen predominando los procesos de captura y transmutación para bajas energías frente a los de espalación y fisión que ocurren para energías

Isótopo	$T_{1/2}$	Desint.	LE	HE	Total	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]	Activación
S35	87 d	$\beta^-$	111,85	21,75	133,60	167*	Espalación
Cl36	301 ka	$\beta^+, \beta^-, CE$	92,89	31,96	124,85	708*, 1142*	Espalación
Ar39	269 a	$\beta^-$	60,66	36,85	97,51	565*	Captura
H3	12,3 a	$\beta^-$	51,18	39,07	90,25	19*	Espalación
Al26	717 ka	$\beta^+, \gamma, CE$	5,69	11,10	16,79	1808	Fisión
Si32	150 a	$\beta^-$	7,58	2,22	9,80	225*	Espalación
Na22	2,6 a	$\gamma, \beta^+, CE$	0,00	3,55	3,55	1275	Fisión
K40	1,28 Ga	$\gamma, \beta^+, \beta^-, CE$	0,00	0,89	0,89	1461	Captura

Tabla 8: Isótopos que pueden resultar más molestos en la activación del argon según los datos aportados por Geant4. La activación se expone en núcleos/kg/día.

Isótopo	LE (AC - G4)	HE (AC - G4)	Total (AC - G4)
Tl204	17,06 - 15,16	0,43 - 0,44	14,28 - 15,29
Bi208	2,94 - 0,43	0,02 - 0,00	2,96 - 0,43
Bi207	0,00 - 0,70	0,00 - 0,13	0,00 - 0,82
Nb94	0,10 - 0,21	0,03 - 0,06	0,13 - 0,28
Co60	0,04 - 0,05	0,01 - 0,06	0,05 - 0,11
Tc98	0,03 - 0,11	0,10 - 0,00	0,13 - 0,11

Tabla 9: Comparaciones en cada rango de energías para la activación en el plomo. La activación se expone en núcleos/kg/día.

más altas. Como se ha dicho, hay algunas diferencias importantes entre los datos aportados por ACTIVIA y Geant4. A continuación analizaremos estas diferencias con más detalle.

## 5 Comparación de los datos obtenidos

### 5.1 Comparando ACTIVIA y Geant4

Una vez analizados los resultados de la activación de materiales en los dos programas podemos proceder a compararlos. Es evidente que hay muchos puntos en común en los materiales de número atómico bajo (mylar, Argón y cobre). Sin embargo, en el xenon y en el plomo hay unas diferencias sustanciales en la activación. Uno de los principales problemas a la hora de poner en común los datos de los dos programas es que en ACTIVIA solo se dan una cierta cantidad de posibles isótopos de activación mientras que en Geant4 tiene en cuenta un mayor número de productos. Vamos a analizar la activación de cada material por separado entendiendo los procesos que ocurren en él.

La comparación en la activación del plomo se muestra en la tabla 9. Vemos que concuerda el hecho de que a bajas energías es cuando se produce mayor cantidad de este isótopo, y que su producción difiere en un factor 50 por la captura de neutrones. Ahora ya comenzamos a ver algunas similitudes entre los dos programas. Salvo el Bi207, todos aparecen activados en las dos simulaciones y algunos (como el Tl204) con una coincidencia bastante alta en las predicciones.

Isótopo	LE (AC - G4)	HE (AC - G4)	Total (AC - G4)
H3	12,75 - 38,65	18,39 - 17,24	31,15 - 55,89
Cd109	1,36 - 0,00	1,73 - 1,29	3,09 - 1,29
Rh101	0,39 - 0,00	1,04 - 0,86	1,43 - 0,86

Tabla 10: Comparaciones en cada rango de energías para la activación en el xenon. La activación se expone en núcleos/kg/día.

En el gas xenon (tabla 10), entre los más relevantes solo hay tres coincidencias: el tritio, uno de los principales peligros de activación del xenon, el Cd109 y el Rh101. Vemos que ambos programas coinciden en que el proceso de espalación que produce el tritio da lugar a una activación bastante alta, pero no coinciden en que se activa más para mayores energías. Esto puede deberse a una posible diferencia en ambos programas del espectro de neutrones cósmicos introducido, pues si para una misma sección eficaz, Geant4 supone que hay menos neutrones a mayores energías, la producción puede disminuir. En cuanto al Cd109 y Rh101, ambos coinciden en que, al ser procesos de fisión, son más producidos a energías mayores.

Podemos ver que Geant4 no predice la activación de Cs134 y Cs135, dos de los isótopos más dañinos previstos por ACTIVIA. Ambos isótopos se producen por captura de neutrones, si en un programa se activan y en el otro no debe ser por una diferencia sustancial en el cálculo que hace cada uno en la sección eficaz de producción. Esta diferencia tan grande no se aprecia en la activación de ningún otro isótopo en nuestro estudio. Estos dos materiales son en los que más diferencias hay, como veremos ahora los otros tres coinciden razonablemente bien. En el cobre (tabla 11) coinciden todas las activaciones salvo el V50 y el K40 en ACTIVIA y el Na22 en Geant4. Vemos que hay un acuerdo razonable en la activación de los isótopos más molestos del cobre.

Isótopo	LE (AC - G4)	HE (AC - G4)	Total (AC - G4)
Ni59	48,80 - 60,46	2,54 - 3,02	51,34 - 63,48
Co57	29,42 - 46,36	3,03 - 2,86	32,45 - 49,22
Co60	25,03 - 35,04	1,03 - 1,11	26,06 - 36,15
Mn54	11,42 - 11,45	2,91 - 0,71	14,33 - 12,17
Zn65	5,92 - 0,47	0,03 - 0,08	5,95 - 0,55

Tabla 11: Comparaciones en cada rango de energías para la activación en el cobre. La activación se expone en núcleos/kg/día.

En el argon (tabla 12) coinciden todas las activaciones salvo el C14 en Geant4 y el K40 en ACTIVIA. En este caso, hay poca coincidencia en cuanto a valores de activación pero, por otra parte, en la mayoría hay un acuerdo entre las activaciones a diferentes rangos de energías. En los dos programas, el proceso de captura que da lugar al Ar39 es mucho más activado a energías más bajas, pero en cada rango hay una desviación muy alta, a través de los cálculos de las secciones eficaces de cada proceso, se compensan las diferencias y da un resultado similar.

En el mylar (tabla 13) solo se activan cuatro isótopos en el programa ACTIVIA, los cuales se activan también en Geant4. El único de todos ellos que puede producir fondo en nuestro detector es el Be7, como ya se ha explicado anteriormente. Ponemos en común los datos de

Isótopo	LE (AC - G4)	HE (AC - G4)	Total (AC - G4)
Ar39	85,30 - 60,66	7,72 - 36,85	93,02 - 97,51
Cl36	64,14 - 92,89	5,36 - 31,96	69,50 - 124,85
H3	30,83 - 51,18	14,61 - 31,07	45,44 - 90,25
S35	2,35 - 111,85	20,07 - 21,75	22,42 - 133,60
Na22	7,71 - 0,00	1,48 - 3,55	9,19 - 3,55
Al26	7,30 - 5,69	1,49 - 11,10	8,19 - 16,79
Be10	0,45 - 0,00	1,52 - 0,44	1,97 - 0,44
Si32	1,25 - 7,58	0,49 - 2,22	1,74 - 9,80

Tabla 12: Comparaciones en cada rango de energías para la activación en el argon. La activación se expone en núcleos/kg/día.

ambos programas:

Isótopo	LE (AC - G4)	HE (AC - G4)	Total (AC - G4)
B11	2060,54 - 198,03	327,95 - 360,71	2388,49 - 558,74
Be7	845,60 - 26,40	193,57 - 103,06	1039,17 - 129,46
C14	358,75 - 100,78	77,78 - 25,77	436,53 - 126,55
Be10	74,53 - 69,53	38,98 - 25,77	113,51 - 95,30

Tabla 13: Comparaciones en cada rango de energías para la activación en el mylar. La activación se expone en núcleos/kg/día.

## 5.2 Comparación con datos externos

La última parte del proceso de análisis es comparar con los datos tomados en otras investigaciones que trabajan con los mismos programas de simulación, y con datos experimentales que miden las desintegraciones de estos isótopos en los rangos de emisión de energía propios de cada isótopo.

### 5.2.1 Comparando con otras simulaciones

Así pues, compararemos nuestros datos con los tomados por *C. Zhang et. al.* [6]. La diferencia que veremos a continuación radica en la geometría utilizada en el programa Geant4. En nuestra simulación utilizamos una lámina de un metro cuadrado para hacer las comparaciones con ACTIVIA más fácilmente, pero en el caso del artículo con el que hacemos la comparación, vemos que utilizaron una geometría más realista para el estudio. En este estudio también se hizo una comparación con los datos aportados por ACTIVIA, pero esta coincide a la perfección con los nuestros porque este programa no tiene en cuenta los cambios de la geometría.

En el estudio se supuso que el gas xenon se encontraba encerrado en un cilindro de acero inoxidable de 30,48 cm de diámetro, 127 cm de longitud y 0,762 cm de anchura. Se supuso que la densidad era de 67 atm y la temperatura de 293 K. Mientras que nosotros supusimos que la presión era de 10 atm y una lámina de 1 m<sup>2</sup> y 10 cm de anchura. Además, el flujo de neutrones se ve ligeramente reducido en la simulación de *C. Zhang et. al.* porque el gas se encuentra dentro del acero inoxidable que absorbe parte de los neutrones. Por otra parte, las partículas

que surjan del acero por las desintegraciones de los núcleos serán detectadas en la activación total, pudiendo incluso producir nuevas reacciones dentro del propio gas.

Además de estas diferencias, también hay una importante divergencia en los espectros utilizados por ambos programas. Mientras que en esta simulación se han utilizado neutrones cósmicos de no menos de 10 MeV, en esta otra simulación se han introducido neutrones cósmicos con una energía mínima de 4 MeV. Esta diferencia sustancial significa un gran aumento en la cantidad de neutrones que llegan a la geometría, y cambian la activación de los mismos. Además de eso, también en ese rango de energías podríamos encontrar neutrones que son producidos por la desintegración de los materiales del entorno, con lo que estos cálculos podrían verse menos realistas por el solapamiento de ambos espectros. Todas estas diferencias son las que se aprecian en la tabla 14.

Isótopo	Este trabajo (Geant4)	Producción <i>C. Zhang et. al.</i> [6]
H3	55,89	28,92
Cd109	1,29	1,37
Sn113	11,42	6,50
Sb124	2,40	1,59
Sb125	2,64	1,45
Te121	10,37	20,60
Te123	9,45	17,93
I125	18,77	76,14
I129	53,86	76,23
Xe127	32,64	228,8
Xe133	13,25	58,58
Xe135	14,79	56,19

Tabla 14: Activaciones del xenon en las dos simulaciones para los isótopos aportados por el artículo de *C. Zhang et. al.*, la activación se expone en núcleos/kg/día.

La producción de algunos isótopos como el tritio o el Sn113 se ven reducidos en torno a la mitad respecto de nuestra simulación porque su producción es más importante para mayores energías y el blindaje de acero inoxidable o el propio gas han frenado o disminuido el flujo de neutrones para ese rango de energías. Por otro lado, otros isótopos más cercanos al xenon natural como son los isótopos de xenon y el yodo, se han visto aumentados por la incorporación del flujo de neutrones cósmicos para energías menores de 10 MeV. En energías más bajas, los procesos de captura y transmutación son más probables, dando lugar a una mayor producción de estos isótopos. Para el estudio de la activación en el cobre, se utilizó una geometría de tipo cilindro con 10 cm de diámetro y 10 cm de longitud. De nuevo nos encontramos con las mismas diferencias entre simulaciones que en el caso anterior, de ahí que se observen las desviaciones en la tabla 15.

Al igual que en la simulación con el xenon, hay una gran diferencia en la producción de isótopos cercanos al cobre por el mismo efecto: la incorporación en la simulación de neutrones de baja energía produce un aumento de los procesos de captura y transmutación, que dan lugar a algunos de los isótopos más molestos activados en el material, como es el Co60 (producido por una reacción  $(n, \alpha)$  del Cu63), que aumenta en un 75%. En todos los casos, las activaciones

Isótopo	Este trabajo (Geant4)	Producción <i>C. Zhang et. al.</i> [6]
Si32	0,08	0,06
K40	0,75	0,48
Sc46	0,55	1,05
Sc47	0,16	0,98
Ti44	0,21	1,72
V50	3,28	3,32
Cr51	7,09	15,20
Mn54	12,17	11,68
Fe55	25,04	53,66
Fe59	2,81	8,56
Fe60	1,01	4,91
Co56	23,23	9,71
Co57	49,22	64,33
Co58	68,83	55,52
Co60	36,15	63,12
Zn65	0,55	1,80

Tabla 15: Activaciones del cobre en las dos simulaciones para los isótopos aportados por el artículo de *C. Zhang et. al.*, la activación se expone en núcleos/kg/día.

coinciden con los datos aportados por *C. Zhang et. al.* en el orden de magnitud.

### 5.2.2 Comparando con datos experimentales

El proceso final para sacar conclusiones sobre la veracidad de un programa respecto al otro es comparar con datos de activación experimentales. La relación entre los datos medidos y los simulados se puede hacer a través de la selección de una ventana de energía para los detectores que esté centrada en las zonas donde cada isótopo emite. Hemos visto que los distintos isótopos emiten en distintas energías características al desintegrarse, ya sea emitiendo fotones, electrones o positrones. Contando las desintegraciones en cada rango de energías para un material se puede saber la actividad que tiene y esto no es otra cosa que lo que ya habíamos visto antes para la activación. La actividad en un material es (supuesto un tiempo de exposición muy largo y un tiempo de decaimiento muy corto frente a la vida media del isótopo):

$$A(\mu Bq/kg) = \frac{R}{86400} \cdot 10^6 \quad (4)$$

Donde R es la producción de isótopos por kilogramo de material y por día de exposición que hemos dado anteriormente. Así pues, todos los valores que se dan más adelante se exponen en unidades de  $\mu Bq/kg$ . Entonces, podemos usar datos de activación como los proporcionados por *Xenon100* [7] para intentar saber qué programa se adecúa mejor a la activación real de los isótopos, haremos esto para el gas xenon y el cobre por ser los más involucrados en la detección de cosmoisótopos. En el experimento de *Xenon100* para medir la activación del xenon, se utilizó una botella de un litro de acero inoxidable donde se colocó el xenon a 100 atmósferas y 293 k. Para el cobre se utilizaron 10,35 kg del mismo. La tabla 16 muestra lo que ocurre en el xenon:

Isótopo	ACTIVIA	Geant4	Xenon100 data [7]
Zr88	6,7	5,0	< 52
Rh99	8,3	5,0	< 120
Rh101	17	10	$1420^{+970}_{-850}$
Ag110	0,9	13	< 49
Sn113	51	132	< 55
Sb125	0,2	31	$590^{+260}_{-230}$
Te121	299	120	< 1200
Te123	15	109	< 610
I126	246	62	$175^{+94}_{-87}$
I131	110	244	< 190
Xe127	405	378	$1870^{+290}_{-270}$
Xe129	240	965	< 8700
Xe131	241	506	< 36000
Xe133	83	153	< 120000
Cs132	118	100	< 120

Tabla 16: Datos de activación en el xenon aportados por las dos simulaciones para los isótopos medidos por *Xenon100* y *LNGS* con las mismas mediciones. La activación se expone en  $\mu\text{Bq/kg}$ .

En los datos aportados por *Xenon100* podemos ver la dificultad para determinar experimentalmente la activación de ciertos isótopos cuando el fondo es muy alto. Para medir la actividad de estos isótopos hay que hacerlo cuando están recién activados, pues algunos tienen una vida media tan corta que en seguida desaparecerían del gas.

Como consecuencia, el fondo sobre el que se mide cada ventana de detección es muy alto y los datos experimentales son muy imprecisos, teniendo unas desviaciones del mismo orden que el valor aportado, o incluso solo pudiendo dar el dato máximo de la actividad que pudiera presentar el isótopo activado. Este valor máximo viene limitado únicamente por fondo de detección, de este modo, no hay muchos isótopos en los que podamos comparar los datos de ACTIVIA y Geant4. Para el cobre podemos comparar con los datos de *Xenon100* [7] y los datos de *LNGS* [8]. Esta comparación se muestra en la tabla 17.

Isótopo	ACTIVIA	Geant4	Xenon100 data [7]	LNGS data [8]
Sc46	36,2	6,4	$27^{+11}_{-9}$	$25,2 \pm 8,6$
Mn54	165,9	140,9	$154^{+35}_{-34}$	$364 \pm 29$
Fe59	49,1	32,5	$47^{+16}_{-14}$	$57 \pm 14$
Co56	101,0	268,9	$108^{+14}_{-16}$	$110 \pm 14$
Co57	375,6	569,7	$519^{+100}_{-95}$	$860 \pm 190$
Co58	655,2	796,6	$798^{+62}_{-58}$	$786 \pm 43$
Co60	301,6	418,4	$340^{+82}_{-68}$	$1000 \pm 90$

Tabla 17: Datos de activación en el cobre aportados por las dos simulaciones para los isótopos medidos por *Xenon100* y *LNGS* con las mismas mediciones. La activación se expone en  $\mu\text{Bq/kg}$ .

En este caso podemos ver que la desviación en los datos experimentales es bastante menor, lo

que nos puede dar, en principio, una estimación de la validez de cada programa para predecir las activaciones. Podemos ver que, en general, los valores de los datos aportados por los programas se adecúan bastante bien con los datos experimentales aportados por *Xenon100*[7], y algo menos en los aportados por *LNGS*[8]. Por ejemplo, en el caso del Mn54 vemos un acuerdo bastante bueno entre los dos programas y los datos de *Xenon100*, mientras que en ellos hay un factor dos respecto a los de *LNGS*. Vemos que ACTIVIA se adecúa mejor en los isótopos Co60 y Co56, este último con una concordancia muy alta entre los dos datos experimentales. Por otro lado, la predicción en el Co57 y, sobretodo, en el Co58, es llamativamente parecida, con una desviación de tan solo el 0,2%.

Vemos pues, que hay la misma cantidad de aciertos y fallos en los dos programas y estos son similares en un cómputo global. Teniendo en cuenta únicamente los datos de la activación en el cobre, ACTIVIA se acerca más a los datos de *Xenon100* en todos salvo en Co57 y Co58, y Geant4 está más cerca en a los datos experimentales de estos dos, y del Co60 en los datos de *LNGS*. Globalmente, el que menos se aleja en número de isótopos es ACTIVIA, pero, en promedio, es Geant4 quien aporta mejores resultados para la actividad global de los isótopos que se muestran, esto se debe a la gran exactitud que hay en el Co58 y el Co57. La tabla 18 muestra la media del valor absoluto de las desviaciones de cada programa con cada grupo de datos experimentales.

Datos	ACTIVIA	Geant4
Xenon100	50,7	48,5
LNGS	220	187

Tabla 18: Media del valor absoluto de las desviaciones de cada programa con cada grupo de datos experimentales. Se observa que, en la activación de los isótopos medidos, las predicciones de Geant4 son ligeramente más cercanas al valor estimado por los dos experimentos.

### 5.3 Conclusiones

Finalmente se puede decir que sabemos que Geant4 es más completo que ACTIVIA en lo que se refiere a las diferentes situaciones estudiadas. Tiene un sistema muy completo de interacción entre todo tipo de partículas y un método de simulación muy bueno. En cambio, ACTIVIA es más sencillo, es por eso que no puede representar lo que ocurre en una situación en particular tan completamente como Geant4 y por lo que, en principio, podríamos pensar que predice peor las activaciones. Como conclusión diremos que no tenemos suficientes datos experimentales como para demostrar que un programa sea especialmente mejor que el otro. Haría falta medir muchos más isótopos y la activación de muchos otros materiales (como el argon, el mylar o el plomo) para concluir este hecho.

## 6 Activación con neutrones de radiactividad natural

La radiactividad natural es fácilmente eliminable si blindamos el detector, pero en esto también hay que tener en cuenta que los neutrones procedentes de esta radiactividad pueden activar nuestros materiales e inducir cierto fondo en la detección. Desde el principio este ha sido nuestro

estudio, debido a ello ahora nos proponemos ver qué tipo de activaciones se presentan en los materiales por neutrones emitidos alrededor del detector, que serán los únicos en profundidad.

Al contrario que los neutrones cósmicos, también importan aquellos que tengan vidas medias cortas, pues al desintegrarse (aunque sea instantáneamente) estarán emitiendo partículas dentro de nuestro detector a un flujo prácticamente constante; además, las vidas medias de la mayoría de estos isótopos es corta, por lo que se desintegran nada más crearse por activación. Lo que permanece igual es el tipo de desintegración que tiene que tener un isótopo para que sea detectable, pues las capas de nuestro detector van a seguir siendo las mismas. El programa utiliza el espectro de energías (mostrado en la figura 22 del apéndice E) para los neutrones que son productos de desintegraciones naturales. La geometría que se ha utilizado en la simulación consiste de nuevo en una lámina cuadrada de un material. Todas las producciones se exponen en número de isótopos por kilogramo de material y por año de exposición. La flujo de este tipo de neutrones es conocido para el LSC, medido como  $3,82 \cdot 10^{-2} n/m^2/s$ .

Isótopo	Producción	Desintegración	Activación
Pb209	0,17	$\beta^-$	Captura
Pb205	0,16	$CE$	Pb206(n,2n)

Tabla 19: Activación en el plomo por neutrones liberados en la radiación natural. Estos dos isótopos no pueden dejar cuentas en el detector, y sus desintegraciones son al Tl205 y al Bi209, ambos estables. La activación se expone en núcleos/kg/año.

En el plomo (tabla 19) solo tiene dos isótopos activados, producto de la absorción de neutrones por parte de dos de los isótopos estables del plomo (el Pb204 y el Pb208), algo que ocurría con menor frecuencia en los neutrones de mayor energía.

Isótopo	Producción	Desintegración	Activación	$E_\gamma$ (keV)[2]
Cu64	14,06	$\gamma, \beta^+, CE$	Captura	1345
Cu66	3,79	$\gamma, \beta^-$	Captura	1039
Co60	0,15	$\gamma, \beta^-$	Cu63(n, $\alpha$ )	1173, 1333
Ni65	0,03	$\gamma, \beta^-$	Cu65(n,p)	1482

Tabla 20: Activación en el cobre por neutrones liberados en la radiación natural. La activación se expone en núcleos/kg/año.

Veamos ahora qué ocurre con la activación del cobre (tabla 20). Los isótopos dañinos de la activación del cobre serán el Cu64, el Cu66, el Co60 y el Ni65, por orden de prioridad. De nuevo, volvemos a encontrarnos con un isótopo conocido en la activación del cobre, el Co60 producido por una reacción (n, $\alpha$ ) del Cu63.

En el mylar (tabla 21) sucede algo curioso respecto a lo visto anteriormente. Al contrario que en las anteriores simulaciones con neutrones de alta energía, con estos neutrones aparecen nuevas reacciones de activación. Los isótopos que pueden molestar en nuestro detector son el N16, el F20, el O19 y el C15, todos ellos emiten fotones de alta energía y sus productos de desintegración no producen más emisiones nocivas.

En el xenon (tabla 22), solo se activa el Xe133 que se desintegra  $\beta^-$  al Cs133, estable. De este modo, este es el único isótopo molesto en su activación por neutrones de desintegración

Isótopo	Producción	Desint.	Activación	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]
N16	21,49	$\gamma, \beta^-$	O16(n,p), F19(n, $\alpha$ ), O18(n,H3)	6128, 4290*
F20	3,93	$\gamma, \beta^-$	Absorción	1633, 5391*
O19	1,40	$\gamma, \beta^-$	Absorción, F19(n,p)	197, 3267*
C15	0,26	$\gamma, \beta^-$	O18(n, $\alpha$ )	5298, 4473*
H3	0,09	$\beta^-$	O18(n,H3)N16, O17(n,H3)N15	19*

Tabla 21: Activación en el mylar por neutrones liberados en la radiación natural. Todos los isotopos dan lugar a un isótopo estable tras su desintegración, con lo que no dejan más señal en el detector por cadenas radiactivas. La activación se expone en núcleos/kg/año.

Isótopo	Producción	Desintegración	Activación	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]
Xe133	0,43	$\gamma, \beta^-$	Captura, Xe134(n,2n)	81, 346*

Tabla 22: Activación en el xenon por neutrones liberados en la radiación natural. La activación se expone en núcleos/kg/año.

natural.

Isótopo	Producción	Desintegración	Activación	$E_\beta$ (keV)[2]
Cl36	0,30	$\beta^+, \beta^-, CE$	Ar36(n,p), Ar38(n,H3)	708, 1142

Tabla 23: Activación en el argon por neutrones liberados en la radiación natural. La activación se expone en núcleos/kg/año.

Estas activaciones no parecen muy importantes para los niveles actuales de fondo en los experimentos de materia oscura, entorno a 1 cuenta/kg/keV/día. Sin embargo, lo pueden ser en experimentos de doble beta que requieren fondos más bajos. El Xe136 es uno de los isótopos que puede sufrir una desintegración doble beta. Los neutrones liberados por desintegración natural producen una activación en el mismo del isótopo Xe137 que tiene una emisión beta de alta energía ( $E_\beta = 4173$  keV), y una emisión  $\gamma$  de 455 keV. La activación que se produce es de 584 núcleos/tonelada/año, suficiente como para poder enturbiar el fondo de detección, ya que el mínimo fondo con el que se debe trabajar en este experimento es de 1 cuenta/tonelada/año. Estudios de contaminación de fondo pueden reducir esta contribución.

En el argon (tabla 23) pasa algo parecido, el único isótopo que se produce es el Cl36 que se desintegra el 98,1% de las veces al Ar36 y el 1,9% de las veces al S36, ambos estables. Hemos realizado, por lo tanto, un estudio de la activación de los materiales naturales por los neutrones que se desprenden del entorno por radiación natural y ya sabemos lo que podemos esperar obtener como producto de esta activación. A pesar de esta activación, es posible comprobar que es despreciable en los experimentos de materia oscura.

## 7 Geometría de IAXO

Podemos terminar nuestro estudio con la activación de un detector cuya geometría pertenece a un experimento real como es IAXO (figura 8), el telescopio internacional de axiones (más detalles

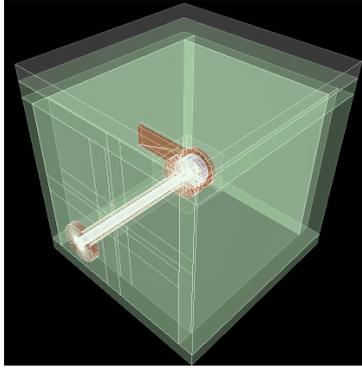


Figura 8: Geometría de la región de detección de IAXO.

en el apéndice D). Este experimento siempre se va a encontrar en superficie, en contacto con los neutrones cósmicos. La producción de los mismos será constante (porque el flujo así lo es) sin un tiempo de decaimiento.

Los isótopos activados que nos molesten serán, al igual que los que se producían por radiación natural, los que emitan fotones de alta energía o positrones en las capas externas y cualquiera en los medios de detección, tengan la vida media que tengan. Vamos a lanzar neutrones tanto de baja energía como de alta energía al detector y presentaremos los datos en forma de producción de isótopos por día de exposición a los neutrones cósmicos en toda la geometría. Podemos dividir la activación en dos regiones, la activación en el plomo (el detector tiene dos coberturas de plomo cúbicas concéntricas), la activación en el resto del detector. Los materiales que lo forman son: cobre, argon, Isobutano, mylar y Kapton. Veamos los principales isótopos molestos por la activación en el plomo (tabla 24).

Isótopo	LE	HE	Total	Desintegración	$E_\gamma$ (keV)[2]
Pb203	22680	400	23080	$\gamma, CE$	279
Pb201	11840	300	12140	$\gamma, \beta^+, CE$	331
Pb200	10100	340	10440	$\gamma, \beta^+, CE$	148
Pb199	6470	220	6690	$\gamma, \beta^+, CE$	367
Pb198	4290	200	4490	$\gamma, \beta^+, CE$	290
Tl199	4300	50	4350	$\gamma, \beta^+, CE$	455
Tl200	4160	160	4320	$\gamma, \beta^+, CE$	368
Tl202	3730	130	3860	$\gamma, \beta^+, CE$	440

Tabla 24: Activación en el plomo por neutrones cósmicos en el experimento IAXO. La activación se expone en núcleos/kg/día.

De los isótopos producidos, el Pb198, el Pb199, el Pb200 y el Pb201 se desintegran en isótopos inestables que vuelven a producir desintegraciones  $\gamma, \beta^+$  y  $CE$ , todos ellos llegan a isótopos estables del Mercurio. Veamos lo que sucede con el cobre (tabla 25)

Todos los isótopos producidos se desintegran a isótopos estables. En la tabla 26 se muestra lo que sucede con el resto de materiales del detector (que pertenecen a la región de detección).

Como se puede apreciar, la producción de isótopos radiactivos en este detector es bastante alta e imposible de eliminar a primera vista. Se producen isótopos muy molestos en gran

Isótopo	LE	HE	Total	Desintegración	$E_\gamma$ (keV)[2]
Cu64	3230	50	3280	$\gamma, \beta^+, CE$	1345
Cu62	1060	20	1080	$\gamma, \beta^+, CE$	1172
Cu66	760	10	770	$\gamma, \beta^-$	1039
Co58	270	20	290	$\gamma, \beta^+, CE$	811
Cu61	250	20	270	$\gamma, \beta^+, CE$	656
Ni59	220	10	230	$\beta^+, CE$	-
Co57	170	10	180	$\gamma, CE$	122
Co60	160	10	170	$\gamma, \beta^-$	1173, 1333

Tabla 25: Activación en el cobre por neutrones cósmicos en el experimento IAXO. La activación se expone en núcleos/kg/día.

Isótopo	LE	HE	Total	Desintegración	$E_\gamma$ $E_\beta^*$ (keV)[2]
H3	4580	1900	6480	$\beta^-$	19*
C11	1320	30	1350	$\beta^+, CE$	1983*
C14	800	200	1000	$\beta^-$	156*
Be7	490	190	680	$\gamma, CE$	478, 862*
Be10	370	250	620	$\beta^-$	556*
C10	60	420	480	$\gamma, \beta^+, CE$	718, 2929*
B12	360	50	410	$\gamma, \beta^-$	13369*
Li8	170	170	340	$2\alpha, \beta^-$	12964*

Tabla 26: Activación por neutrones cósmicos en los materiales que se encuentran en la región de detección, en el experimento IAXO. La activación se expone en núcleos/kg/día.

cantidad, pero podemos saber cómo reconocerlos. A través de un estudio semejante podremos sabremos qué espectro de energías esperar para una situación en particular.

## 8 Conclusiones finales

Finalmente hemos concluido el estudio de la activación de materiales. Los programas que se han utilizado (sobretudo Geant4) permiten un estudio muy amplio de las posibles activaciones de distintos detectores en cualquier situación en la que puedan estar. El programa ACTIVIA está especialmente diseñado para calcular la activación de materiales, mientras que Geant4 permite un estudio mucho más completo de los posibles procesos ocurridos en un experimento. Es posible que quizá ACTIVIA esté más optimizado para este tipo de cálculos, ya que para conocer la sección eficaz de activación de los isótopos se basa en una fórmula semiempírica que puede mejorarse con el paso del tiempo a base de realizar más medidas. Por otro lado, Geant4 no tiene una especialización completa, pero tampoco tiene limitaciones en cuanto a la situación simulada.

En este trabajo se ha hablado de los rayos cósmicos, entendiendo la producción de neutrones en la atmósfera y los procesos de activación cosmogénica. Se ha estudiado la activación de materiales que son habitualmente utilizados en blindajes de detectores (plomo, cobre y un ma-

terial con alto contenido en hidrógeno como el mylar), y medios de detección gaseosos (argon y xenon). El estudio se ha realizado a través de los códigos ACTIVIA y Geant4, de esta forma se ha podido comparar entre ambos resultados, comprendiendo los procesos físicos para los que se produce cada tipo de isótopo, y comparando con datos experimentales. Así, se ha comprendido la completitud del programa Geant4 frente a la de ACTIVIA y las similitudes y diferencias entre las predicciones de cada uno de ellos. Por último, se ha realizado un estudio de la activación en un experimento real: IAXO, un estudio fundamental para comprender el fondo de detección en dicho experimento.

Este puede ser un punto de partida importante para un estudio mucho más detallado en el campo de la activación de materiales por rayos cósmicos. Se podrían contrastar los resultados ofrecidos por los programas con mediciones de activación realizadas en experimentos centrados en aumentar nuestro conocimiento en este campo, ya que es importante para determinar las contaminaciones en el detector y con ello conseguir reducir el fondo en los experimentos de búsqueda de sucesos raros.

## Bibliografía

- [1] S. N. Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection* "Properties and Sources of Radiation" págs. 1–57, "Interaction of Neutral Particles with Matter" págs. 137–143, "ROOT" págs. 575–582, (2007) ISBN-10: 0-12-045581-1
- [2] S. Y. F. Chu et. al. *The Lund/LBNL Nuclear Data Search* <http://nucleardata.nuclear.lu.se> (1999)
- [3] [www.nndc.bnl.gov](http://www.nndc.bnl.gov) *National Nuclear Data Center* BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY
- [4] J. F. Ziegler, *Terrestrial cosmic rays* IBM J. RES DEVELOP. VOL. 40 NO. 1 JANUARY (1996)
- [5] J.J Back et. al. *ACTIVIA: Calculation of isotope production cross-sections and yields*, Department of Physics, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, United Kingdom, arXiv:0709.3472 (2008).
- [6] C. Zhang et. al. *Cosmogenic Activation of Materials Used in Rare Event Search Experiments*, arXiv:1603.00098 (2016).
- [7] Laura Baudis et. al. *Cosmogenic Activation of xenon and cooper*, arXiv:1507.03792 (2015).
- [8] M. Laubenstein and G. Heusser, *Appl. Rad. Isot.* 67, 750 (2009).
- [9] Miguel A. Cortés-Giraldo *GEANT4 Introductory Course*, "Short Guide to Choosing a Physics List" Instituto de Estudos Avançados ? Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José Dos Campos, Brazil (2014).
- [10] Geant4 Collaboration *Introduction to Geant4*, CERN (2015).
- [11] Geant4 Collaboration *Geant4: Physics Reference Manual*, CERN (2015).
- [12] J. K. Vogel et.al. *IAXO - The International Axion Observatory*, arXiv:1302.3273 (2013).