



**Universidad**  
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FÍSICA

---

---

## Rayos cósmicos sobre la superficie terrestre

---

---

**Autora:**

Leire Moreno Alzate

**Directoras:**

Dra. Gloria Luzón Marco

Dra. Theopisti Dafnı́

Departamento de Fısica Teórica

Área de Fısica Atómica, Molecular y Nuclear

Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza

Diciembre 2022

## Resumen

La Tierra se ve continuamente bombardeada por partículas provenientes del Sol, de nuestra Galaxia, e incluso de fuera de esta. Dichas partículas reciben el nombre de Rayos C3smicos, y es importante monitorizar su flujo ya que pueden causar problemas en dispositivos electr3nicos e incluso en la salud, entre otros. El objetivo de este trabajo ser3 realizar un estudio del ritmo de rayos c3smicos que reciben algunas estaciones de medida situadas alrededor del globo terrestre (utilizando la base de datos NMDB) y comprobar la dependencia que tiene con la actividad solar, la altitud y la latitud/rigidez. Adem3s, se realizar3n varias simulaciones en GEANT4, en las que se lanzar3n neutrones c3smicos sobre una geometr3a que simula los detectores NM64 utilizados en las estaciones de medida de la NMDB. Estas simulaciones permitir3n una mejor comprensi3n del funcionamiento de los detectores de neutrones y de las interacciones que se dan entre los neutrones y los distintos elementos de dichos detectores.

Se mostrar3 c3mo la intensidad de rayos c3smicos detectados en la superficie terrestre se ve modulada por el ciclo de 11 a3os de actividad solar, siendo menor cuando el n3mero de manchas solares es mayor y viceversa. Adem3s, cuanto mayores sean la altitud y la latitud a la que se encuentre el detector de neutrones, recibir3 una mayor intensidad de rayos c3smicos.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Rayos Cósmicos (CR)</b>	<b>3</b>
2.1. Rayos cósmicos en la atmósfera . . . . .	5
2.2. Rayos cósmicos en la superficie . . . . .	5
<b>3. Heliosfera y campo magnético terrestre</b>	<b>7</b>
3.1. Actividad Solar y neutrones . . . . .	7
3.2. Campo magnético terrestre y rigidez . . . . .	8
<b>4. Monitores de neutrones</b>	<b>9</b>
4.1. Tipos de detectores . . . . .	10
4.2. Interacción de neutrones con la materia . . . . .	11
4.3. Interacción de los neutrones en los diferentes detectores . . . . .	12
<b>5. Simulaciones de neutrones cósmicos</b>	<b>13</b>
5.1. Descripción del detector . . . . .	13
5.2. Simulaciones . . . . .	14
5.3. Respuesta del detector . . . . .	15
<b>6. Base de datos de neutrones</b>	<b>17</b>
6.1. Análisis de datos de las estaciones antárticas . . . . .	18
6.2. Análisis de datos de las estaciones europeas . . . . .	20
6.3. Comparación entre medidas de distintas estaciones . . . . .	21
<b>7. Conclusiones</b>	<b>22</b>

# 1. Introducción

La Tierra se ve bombardeada continuamente por rayos cósmicos de diversas energías. Este flujo de rayos cósmicos varía, entre otras razones, debido a la actividad solar, lo cual hace que la monitorización de las variaciones que se producen en este flujo nos dé una información muy útil sobre dicha actividad solar. Estas variaciones podemos observarlas mediante el uso de detectores de rayos cósmicos. En concreto, este Trabajo de Fin de Grado se centrará en los monitores de neutrones, que miden los neutrones de los rayos cósmicos secundarios, producidos en las cascadas ocasionadas al incidir los rayos cósmicos primarios sobre las capas más externas de la atmósfera.

Una gran parte de estos rayos cósmicos primarios son partículas cargadas, como protones y otros núcleos más pesados, que se van a ver afectados por el campo magnético terrestre. Este campo actúa como un filtro, de forma que cuanto mayor sea la latitud, los rayos cósmicos necesitarán una energía menor para alcanzar la Tierra. Por otra parte, a mayor altitud, menos interacciones y menor pérdida de energía en la atmósfera y encontramos una gran dependencia de la energía del flujo de rayos cósmicos con el grosor de la atmósfera atravesada.

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo realizar un estudio de las diferentes estaciones de monitorización de rayos cósmicos, así como de los detectores utilizados. Para ello se utilizarán los datos de una base de datos extendida, la NMDB [1], para el estudio comparativo del flujo de rayos cósmicos en diferentes puntos de la superficie terrestre. Nos interesa conocer de qué factores depende la intensidad del flujo de rayos cósmicos. Así, analizaremos cómo varían con la actividad solar, con la altitud o la latitud.

Por otra parte, se simulará la interacción de neutrones cósmicos en detectores comúnmente utilizados en estas estaciones para entender el método de detección y cómo es la interacción de estos neutrones cósmicos que consiguen alcanzar la superficie terrestre.

## 2. Rayos Cósmicos (CR)

Los Rayos Cósmicos primarios están compuestos en su mayoría por protones, núcleos de helio y rayos gamma. Su energía va desde los pocos MeV hasta unos  $10^8$  TeV por partícula, aunque su flujo es muy bajo a tan altas energías. Los fotones nos llegan directamente de las fuentes astrofísicas (restos de explosiones de estrellas, otras galaxias, el Sol...), mientras que las partículas cargadas son producidas, y posteriormente aceleradas, en dichos objetos astrofísicos.

En la Figura 1a se puede ver el flujo de CR en función de la energía. En dicha gráfica pueden distinguirse tres regiones diferenciadas que corresponderán a distintos orígenes de los CR. En la región de más baja energía ( $10^9$  eV) se tienen CR procedentes del Sol y otras fuentes de nuestra galaxia. El espectro para estas energías está curvado debido a la acción del campo magnético del Sol. Para el resto de energías se tienen CR procedentes de fuera de la Galaxia cuyo espectro sigue una ley potencial

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{-\gamma}, \quad (1)$$

siendo  $\gamma$  la pendiente [2]. Sin embargo, se pueden observar cambios de pendiente en el espectro. Cerca de  $3 \times 10^{15}$  eV se encuentra la rodilla del espectro (*knee*) y en torno a  $10^{20}$  eV aparece el

tobillo (*ankle*). Estos cambios están relacionados con variaciones en el origen, o en las formas de aceleración de los CR, como pueden ser explosiones de Supernovas o núcleos de galaxias activos [2]. Sin embargo, aún quedan fuentes sin identificar, siendo el origen de los CR más energéticos un misterio.

Las interacciones de estas partículas con la atmósfera dan lugar a Rayos Cósmicos secundarios que pueden detectarse bajo tierra, a nivel del mar y en la atmósfera [3]. Mientras los fotones de alta energía producen partículas electromagnéticas (electrones, positrones y fotones de menor energía), las partículas cargadas producen en gran medida piones, kaones y mesones. Conforme estas partículas avanzan a lo largo de la atmósfera, se desintegran en otras, formando cascadas hadrónicas, electromagnéticas y muónicas (Figura 1b). Estas cascadas pueden detectarse por las interacciones de estas partículas secundarias y usarse para determinar la energía, dirección y composición de la partícula primaria incidente.

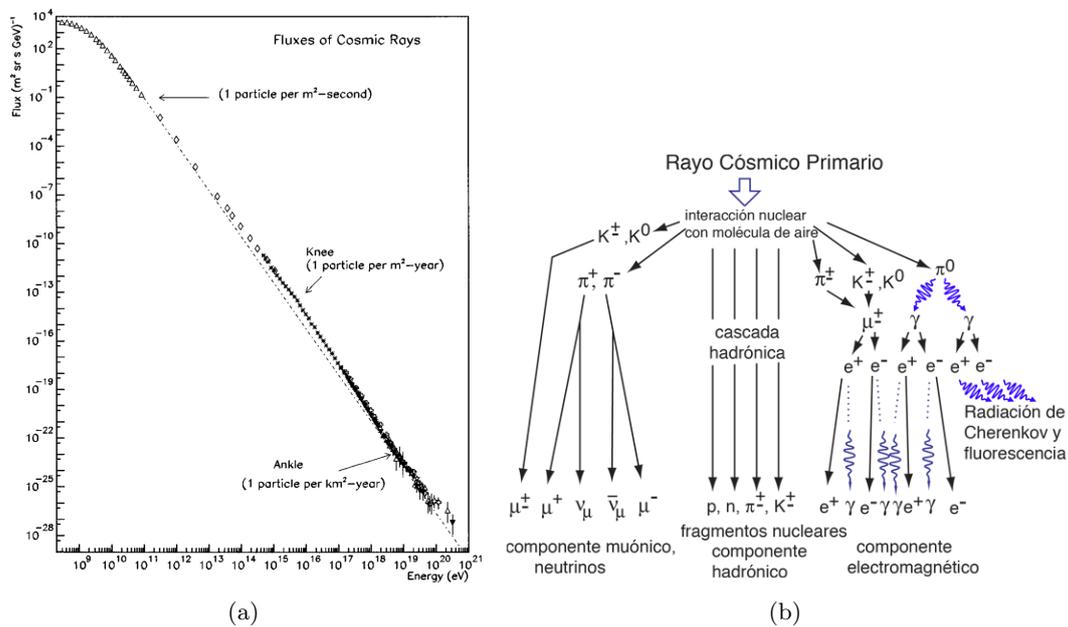


Figura 1: (a) Espectro energético de rayos cósmicos donde aparecen señalados el *ankle* y *knee*. Los ejes se encuentran en escala logarítmica [4]. (b) Cascada de rayos cósmicos con las distintas desintegraciones que se dan en la atmósfera terrestre. Pueden distinguirse la componente muónica y de neutrinos, la componente electromagnética y la componente hadrónica [5].

Las interacciones de los CR tienen consecuencias muy importantes. En la electrónica, pueden ocasionar fallos “soft errors”) en los microchips y llegar a dañar dispositivos electrónicos, causando problemas en aviones, satélites, ordenadores, sensores, marcapasos,... A nivel biológico, dependiendo de las condiciones, también pueden presentar un riesgo para la salud, ya que las partículas energéticas que constituyen los CR pueden dañar las células.

A continuación, se va a describir cómo se comportan los CR nada más entrar en la atmósfera y una vez llegan a la superficie terrestre. También se comentará cómo las características de estos varían dependiendo de la altitud, latitud y rigidez \* a la que son detectados.

\*La rigidez es la Energía/carga y tiene una cierta relación con la latitud porque es necesaria una mayor energía en el ecuador que en los polos para atravesar la atmósfera. Se hablará sobre la rigidez más adelante.

## 2.1. Rayos cósmicos en la atmósfera

La radiación cósmica incidente en la superficie de la atmósfera terrestre incluye todo tipo de partículas cargadas y núcleos estables con vidas medias del orden de los  $10^6$  años o más. La proporción de núcleos secundarios y núcleos primarios disminuye conforme aumenta la energía; este hecho suele interpretarse como que la vida media de los rayos cósmicos en la galaxia disminuye con la energía.

Como ya se ha explicado, las partículas cósmicas primarias que penetran en la atmósfera interactúan con las partículas que la componen, dando lugar a cascadas de partículas secundarias. Por esta razón, a distintas altitudes encontraremos proporciones diferentes de partículas primarias frente a secundarias. A mayor altitud, es decir, cuanto más alta sea la capa de la atmósfera en la que nos encontramos, los CR no habrán tenido tantas oportunidades de interactuar con la atmósfera y habrá una menor cantidad de partículas secundarias.

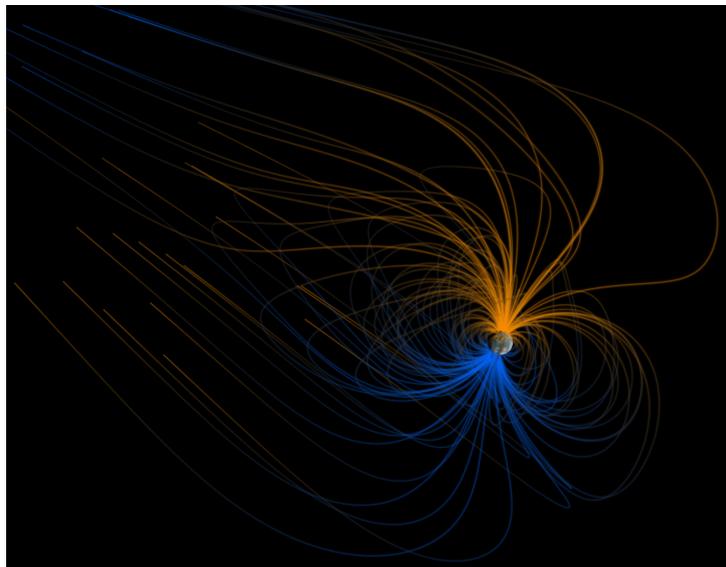


Figura 2: Líneas del campo magnético terrestre. Las naranjas señalan hacia la Tierra y las azules salen de ella [6].

Además, los rayos cósmicos de baja energía son afectados por el campo geomagnético (Figura 2), el cual deben penetrar para alcanzar la atmósfera. Así, la intensidad de cualquiera de los componentes de los CR en el rango de energía de los GeV depende de la localización y del tiempo.

Otro de los efectos del campo magnético de la Tierra son los llamados cinturones de Van Allen, en los que se concentran protones y electrones de alta energía que quedan atrapados debido a dicho campo magnético [7].

## 2.2. Rayos cósmicos en la superficie

Debido a las diferentes características que presentan las partículas cósmicas secundarias (masa, carga, etc.), sus flujos también presentarán diferentes comportamientos. Este trabajo se va a centrar en los neutrones, que constituyen alrededor del 10 % de los rayos cósmicos a nivel del mar. La importancia del estudio de estas partículas radica, como se vio al inicio de la sección, en que constituyen un peligro para la seguridad de sistemas electrónicos (son capaces de “romper”

un núcleo). También es importante conocer la contaminación ambiental de neutrones, no solo por las consecuencias generales de los rayos cósmicos ya mencionadas, sino para reducir el nivel de fondo en experimentos para la detección de partículas de Materia Oscura.

Dependiendo del ángulo con respecto al zenit con el que los rayos cósmicos accedan a la atmósfera, tendrán que recorrer más o menos distancia en esta. A menor ángulo zenital, menor distancia en la atmósfera recorrerán los CR primarios y por lo tanto tendrán una menor probabilidad de interactuar y dar lugar a CR secundarios. La distribución de la intensidad del flujo de neutrones en la superficie terrestre puede aproximarse por la expresión

$$I(\theta) = I(0^\circ) \cos^n \theta, \quad (2)$$

donde  $n = 3, 5 \pm 1, 2$  para ángulos zenitales de hasta  $60^\circ$  [8].

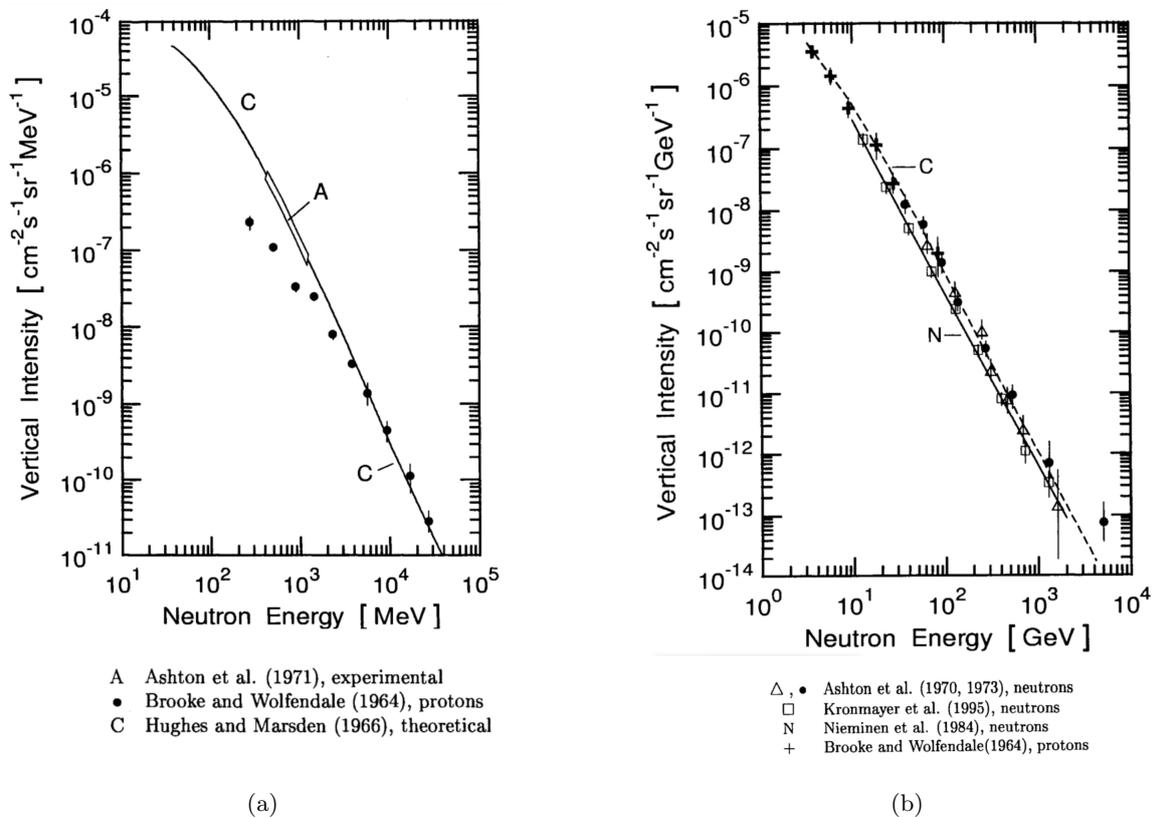


Figura 3: Espectros de protones en comparación con los de los neutrones de baja (a) y de alta (b) energía [8].

En la Figura 3 se pueden encontrar los espectros de energía de neutrones de baja y alta energía en la superficie terrestre. En el espectro de bajas energías se pueden ver los datos experimentales obtenidos por Ashton et al. (1971) correspondientes a la etiqueta A, el espectro de protones medido por Brooke and Wolfendale (1964) que corresponde a la línea de puntos y el espectro calculado por Hughes and Marsden (1966) señalado por la etiqueta C. Por otro lado, en el segundo espectro aparecen los datos de neutrones de alta energía obtenidos por Ashton et al. (1970, 1973), Kronmayer et al. (1995) y Nieminen et al. (1984), así como una comparación con datos de protones obtenidos por Brooke and Wolfendale (1964).

### 3. Heliosfera y campo magnético terrestre

#### 3.1. Actividad Solar y neutrones

Continuamente llegan rayos cósmicos solares a la Tierra y su intensidad varía dependiendo de la actividad del Sol. La corona solar, compuesta por plasma, es la capa más externa del Sol y está conformada por el campo magnético de este. Algunos de los eventos más importantes que tienen lugar en el Sol son las eyecciones de masa coronal (CME) y las fulguraciones. Dichos eventos son dependientes el uno del otro y aceleran partículas hasta alcanzar altas energías, las cuales llegan a la Tierra y forman los rayos cósmicos solares. Aún no se sabe con certeza cómo los CR que llegan a la Tierra son acelerados por las fulguraciones y las CMEs; sin embargo, sí que se sabe que dichos sucesos de partículas energéticas siempre se ven acompañados por fulguraciones y CMEs grandes y rápidas [2].

En la Figura 4 se puede observar un ejemplo de evento que tuvo lugar en la Tierra el 17 de mayo de 2012, en el ciclo solar 24, donde el número de cuentas en los monitores de neutrones aumentó notablemente.

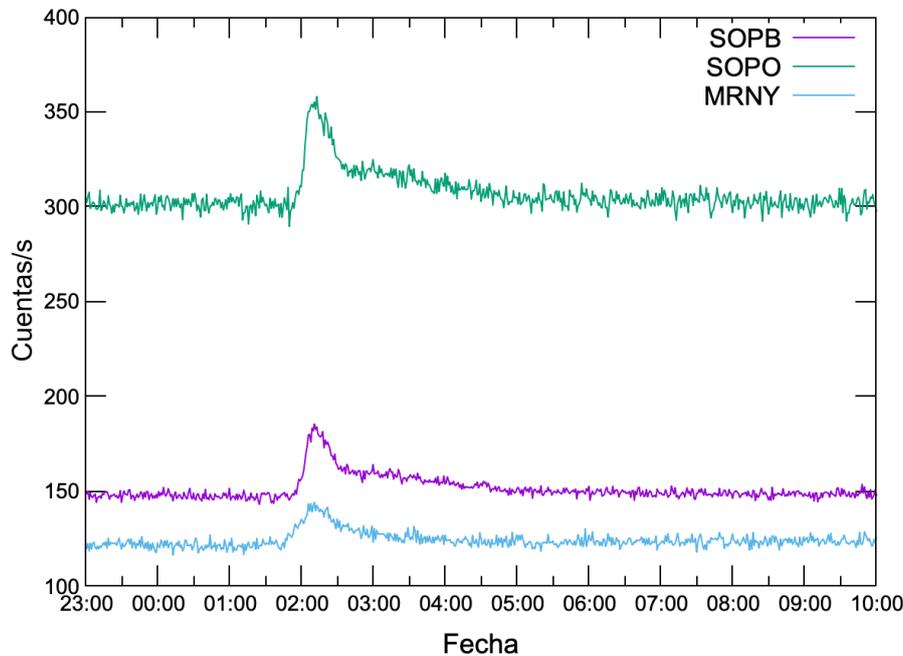


Figura 4: Evento registrado el 17 de mayo de 2012 en la Antártida. Se han escogido datos obtenidos por tres estaciones de medida de la NMDB: SOPB, SOPO, MRNY. Datos extraídos de NEST [1].

Este evento solo se registró en detectores con una baja rigidez, es decir, en aquellos de mayor latitud, como es el caso de las tres estaciones antárticas de la Figura 4. Estudios sugieren que el evento fue originado por una CME [9].

Los CR se ven modulados por el viento solar, que es el plasma que se extiende desde la corona y transporta el campo magnético del Sol. Esto decelera las partículas cósmicas, excluyendo las de menor energía y dificultando su propagación.

Las irregularidades del campo magnético solar que es arrastrado por el viento solar tienen un ciclo de unos 11 años en el que la actividad del Sol aumenta y disminuye. Esta actividad

solar puede medirse con el número de manchas solares ( $W$ ) y está implicada en la modulación de los rayos cósmicos: cuando el número de manchas solares aumenta, la intensidad de los CR disminuye y viceversa. Este hecho se debe a que en la fase de actividad solar más alta (mayor número de manchas solares), el campo magnético de la Heliosfera es más turbulento y desvía en mayor medida las partículas cósmicas.

Mientras que las fulguraciones y CMEs introducen variaciones de CR puntuales, que pueden durar unas pocas horas, la variación del campo magnético Solar, y por lo tanto del número de manchas solares, hace que los CR varíen en escalas de tiempo que van desde horas hasta milenios [2].

### 3.2. Campo magnético terrestre y rigidez

El campo magnético de la Tierra, generado por las corrientes eléctricas de su núcleo, es otro de los filtros que hace que nos llegue una mayor o menor intensidad de rayos cósmicos a la superficie. Cuanto más cerca nos encontramos del Ecuador, es decir a menor latitud, el campo magnético de la Tierra es mayor y por lo tanto las partículas cargadas de los rayos cósmicos primarios deben ser más energéticas para ser capaces de atravesarlo [8]. Por lo tanto, detectores situados a diferentes latitudes registran diferentes intensidades de rayos cósmicos. Esto nos permitirá conocer el espectro de energías y las direcciones de los CR.

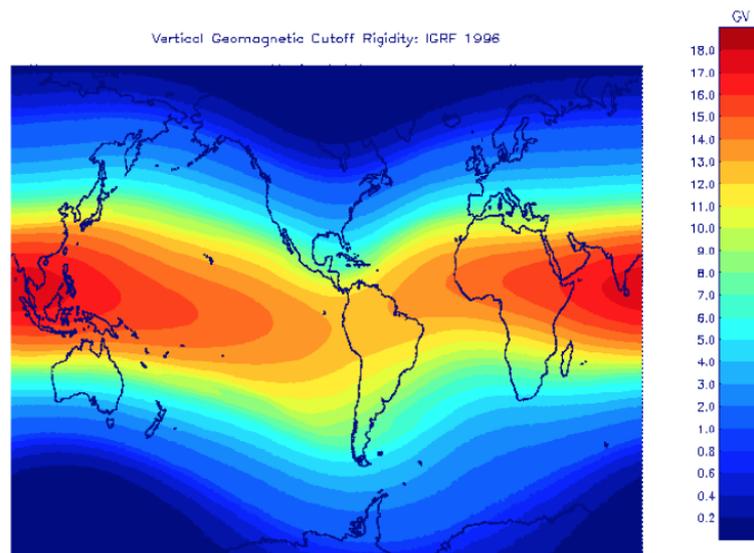


Figura 5: Rigidez geomagnética calculada a partir de simulaciones de trayectorias de partículas utilizando el modelo IGRF 1996 para el mínimo del ciclo solar número 23 [10].

El campo geomagnético tiene principalmente dos efectos en las partículas cargadas que forman los rayos cósmicos que se dirigen a la Tierra: en primer lugar, la trayectoria de dichas partículas se curva, por lo que la dirección con la que llegan es diferente a la que tendrían si no existiera campo magnético; en segundo lugar, solo las partículas con un rango de energías concreto (energía mayor que la energía de corte) podrán alcanzar la superficie terrestre. Para cuantificar estos efectos se introduce la rigidez de corte (en GV), que es el valor mínimo de rigidez (energía-momento por unidad de carga) de una partícula para que esta consiga penetrar en la Tierra desde fuera de la magnetosfera.

En la Figura 5 se puede ver claramente la distribución de la rigidez en la Tierra y cómo esta varía con la latitud. Las zonas con colores más cálidos presentarán una mayor rigidez y por lo tanto las partículas que consigan penetrar la magnetosfera en ellas tendrán un espectro de energías más alto que en las zonas azules.

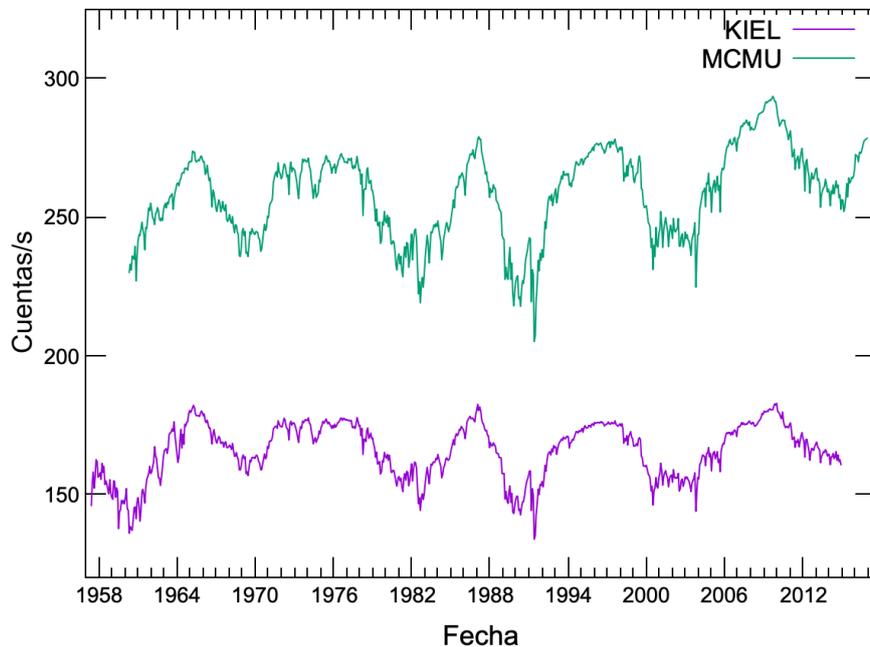


Figura 6: Ritmos detectados por la estación KIEL (2,36 GV) en morado y la estación MCMU (0,36 GV) en verde [1].

Un ejemplo del efecto de la rigidez en el ritmo de CR es la Figura 6, que muestra una representación de las cuentas/s detectadas en dos detectores situados a distintas latitudes y por lo tanto con distinta rigidez (2,36 GV para KIEL y 0,3 GV para MCMU). La estación KIEL se encuentra en Alemania y MCMU en la Antártida (puede verse su localización en la Figura 12). En dicha gráfica se puede ver claramente como el ritmo detectado por la estación MCMU es mayor que el de KIEL, debido a que la rigidez de esta última es mayor.

#### 4. Monitores de neutrones

Realizar un seguimiento de los rayos cósmicos incidentes en la superficie de la Tierra puede ser muy útil para prevenir algunos de los problemas causados por CR que se han mencionado. Para ello se utilizan los monitores de neutrones.

Por otro lado, estos monitores también pueden ayudar a establecer alertas cuando aumenta el número de partículas cósmicas de baja energía que llegan a Tierra gracias a datos de alta resolución en tiempo real. Estas son solo algunas de las aplicaciones de la detección de CR.

Los monitores de neutrones que se van a utilizar en este trabajo permiten detectar partículas provenientes de fuera de la Tierra con un rango de energías comprendido entre 0,5-20 GeV, principalmente protones y neutrones.

## 4.1. Tipos de detectores

Actualmente se pueden encontrar en operación dos tipos de monitores de neutrones: el IGY (cuyas siglas corresponden a *International Geophysical Year*), diseñado por Simpson [11] a principios de los años 50, y el NM64, creado por Carmichael [12] en 1968. El más extendido, y en el que nos vamos a centrar, es el NM64.

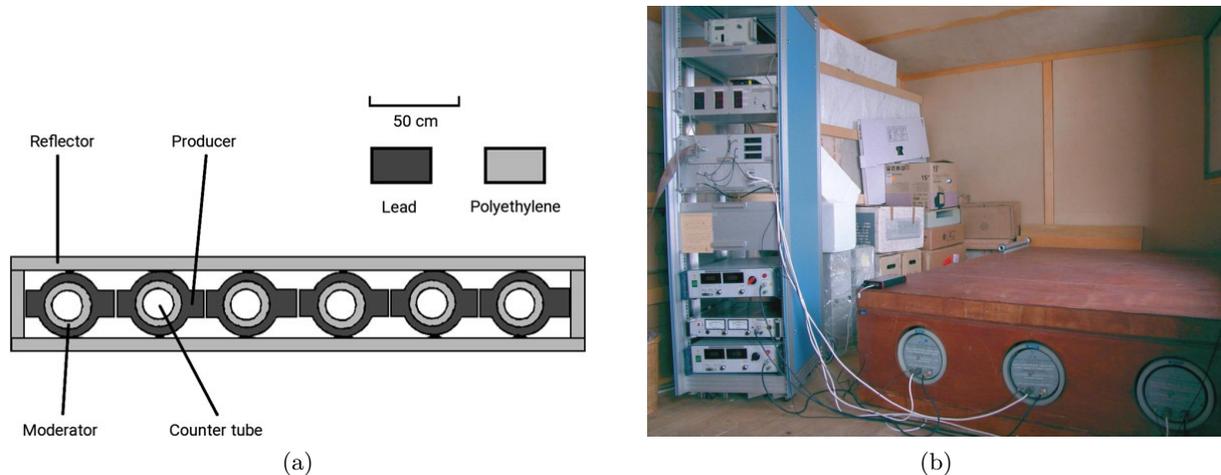


Figura 7: Detectores de neutrones NM64. (a) Esquema de un monitor de neutrones con 6 tubos contadores NM64 [13]. (b) Montaje de un monitor de neutrones donde puede distinguirse a la derecha la caja que contiene los tubos contadores y a la izquierda las fuentes de alta tensión, barómetro y electrónica necesarios para el conteo [2].

Un montaje típico de un monitor de neutrones sería el que aparece en la Figura 7, donde se puede ver una serie de tubos contadores rodeados por el moderador, el productor de neutrones y el reflector.

- **Productor de neutrones:** Los rayos cósmicos secundarios, principalmente protones y neutrones, interactúan con el plomo que compone el productor, dando lugar a neutrones de baja energía.
- **Moderador:** Se encarga de ralentizar los neutrones producidos hasta convertirlos en neutrones térmicos, ya que estos tienen una mayor probabilidad de interactuar en el tubo contador que los rápidos y por lo tanto serán más fáciles de detectar. Generalmente se utiliza polietileno o parafina.
- **Reflector:** El reflector tiene la tarea de contener los neutrones producidos en el plomo y minimizar la respuesta del detector a neutrones secundarios producidos por las interacciones de rayos cósmicos con los distintos materiales que rodean el detector. Está formado por el mismo material que el moderador.

Los neutrones tienen masa pero no carga, por lo que no pueden producir ionización directa en el detector. Es por esto que los tubos contadores contienen gases en los que los neutrones pueden interactuar, produciendo partículas cargadas que sí puedan ser detectadas. Los gases contenidos en los tubos contadores suelen ser  $\text{BF}_3$  (enriquecido en  $^{10}\text{B}$ ) o  $^3\text{He}$ .

## 4.2. Interacción de neutrones con la materia

Aunque las partículas que inciden en el detector pueden ser tanto protones como neutrones, son estos últimos los que reaccionan con el gas del tubo contador; es por eso que estos detectores reciben el nombre de monitores de neutrones. Los protones, al tener carga, presentan muchas más interacciones que los neutrones, por lo que tan solo unos pocos llegarán al detector. Además, con los pocos protones que consigan ser detectados, será muy difícil reconstruir el proceso que ha tenido lugar en el detector ya que puede haber otras partículas cargadas. Por eso la detección de neutrones será más eficiente.

Las tres interacciones principales de los neutrones son:

- Dispersión elástica (n,n): El neutrón cede parte de su energía al núcleo atómico, el cual retrocede e ioniza el medio a su paso.
- Dispersión inelástica (n,n'): El neutrón es dispersado y una fracción de la energía perdida es invertida en excitar el núcleo, el cual puede regresar a su estado fundamental emitiendo uno o varios fotones y, en menor medida, electrones de conversión interna.
- Absorción: Tal y como indica su nombre, el electrón es absorbido por el núcleo atómico. El núcleo compuesto reacciona a la captura mediante la emisión de radiación gamma (n, $\gamma$ ), de partículas cargadas (n,p), (n, $\alpha$ ), (n,d), o de neutrones (n,2n), (n,3n), ...

En este trabajo se van a estudiar reacciones con neutrones de baja energía (térmicos), en concreto la reacción de captura, (n,p), y dispersión inelástica.

Uno de los parámetros más importantes que debemos tener en cuenta a la hora de elegir nuestro detector de neutrones es la sección eficaz, que representa la probabilidad de que suceda una reacción entre las partículas y el medio en el que inciden. Tal y como se verá más adelante, el estudio se centrará en dos medios en los que los neutrones van a interactuar, el  $^{10}\text{B}$  y el  $^3\text{He}$ .

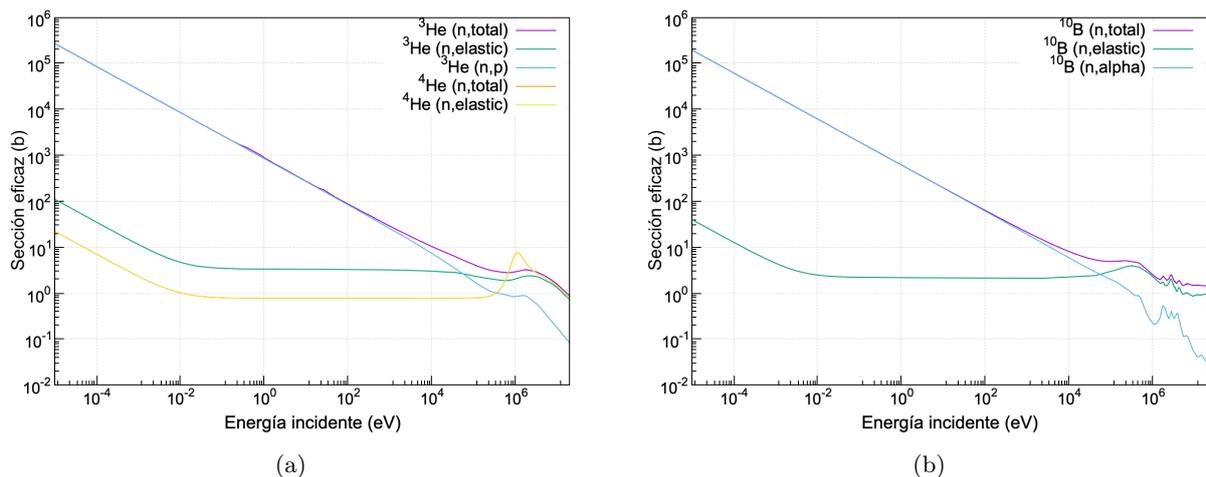


Figura 8: (a) Secciones eficaces para varios procesos de un neutrón interactuando con  $^3\text{He}$  o con  $^4\text{He}$  en función de la energía incidente del neutrón. Ambos ejes están en escala logarítmica (b) Lo mismo que en (a) pero esta vez para  $^{10}\text{B}$  [14].

La Figura 8 muestra las secciones eficaces para los procesos más importantes de los neutrones con el  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  y  $^{10}\text{B}$ . La más relevante para la detección de neutrones es la de captura, ya que

deja una señal inequívoca, al detectarse los productos de esta captura. Por esta razón, en los detectores se usan con frecuencia tanto  $^3\text{He}$  como  $^{10}\text{BF}_3$ . En el caso del  $^3\text{He}$  puede verse como, para el rango de energías más bajo, la sección eficaz total es la misma que la sección eficaz de captura. Esto es precisamente lo que se busca en el detector. Interesa que la captura del neutrón en el gas del tubo contador sea muy probable para así obtener una mayor eficiencia del detector. Para el caso del  $^4\text{He}$ , la sección eficaz total coincide con la elástica. Esto se debe a que la dispersión elástica es el único proceso que se da en este gas, por lo que no es el adecuado para la detección de neutrones. En el  $^{10}\text{B}$ , el proceso  $(n,\alpha)$  presenta una sección eficaz prácticamente igual que la sección eficaz total hasta  $10^4$  eV aproximadamente, siendo por lo tanto el proceso más importante en este gas.

### 4.3. Interacción de los neutrones en los diferentes detectores

Como ya se ha mencionado, el gas contenido por los tubos contadores de los monitores NM64 suele ser  $\text{BF}_3$  o  $^3\text{He}$ .

En el caso del  $\text{BF}_3$ , el gas suele estar enriquecido al 96 % con  $^{10}\text{B}$  a una presión de 0,27 bar. Se produce la siguiente reacción



donde en el 93 % de los casos  $Q=2,31$  MeV (suma de la energía, 1,47 MeV, que se lleva la partícula  $\alpha$  y 0,84 MeV correspondiente al núcleo de  $^7\text{Li}$ ), dejando el núcleo de  $^7\text{Li}$  en el primer estado excitado, y emitiendo una gamma de 0,48 MeV. Esta gamma puede escapar de nuestro detector y así observaremos un pico en 2,31 MeV. Si la gamma interacciona, no muy probable, el pico estará en 2,79 MeV. En el otro 7 % de las reacciones se tiene  $Q=2,79$  MeV, con el núcleo en el estado fundamental y una energía de 1,32 MeV [15]. En este caso observaremos un pico en 2,79 MeV, menos intenso que el anterior.

Cuando los neutrones interactúan con los núcleos de  $^3\text{He}$  se produce la siguiente reacción



con  $Q=764$  keV. La energía restante de la reacción se la llevarán el Tritio ( $^3\text{H}$ ) y el protón en forma de energía cinética, moviéndose en direcciones opuestas [2].

Los productos de ambas reacciones (Ecuación 3 y Ecuación 4) ionizarán el gas contenido en el tubo contador y se producirá un pulso eléctrico proporcional a la energía depositada.

Una de las desventajas del  $\text{BF}_3$  es su alta toxicidad. Por esta razón, y durante un tiempo, comenzó a utilizarse el  $^3\text{He}$  en su lugar. Sin embargo, para conseguir una eficiencia cercana a la del  $\text{BF}_3$ , los contadores de Helio requieren trabajar a una mayor presión que los de  $\text{BF}_3$ . Además, dado el alto precio del  $^3\text{He}$ , los monitores más recientes están volviendo a utilizar  $\text{BF}_3$  [13].

## 5. Simulaciones de neutrones cósmicos

Con el fin de hacer un estudio más bien cualitativo y ver cómo se comportan los neutrones al incidir en los detectores NM64, se van a realizar simulaciones para la detección de rayos cósmicos utilizando el paquete de software colaborativo *REST-for-Physics* [16, 17], creado por el Grupo de Física Nuclear y de Astropartículas (GIFNA) de la Universidad de Zaragoza, y que tiene como objetivo el estudio de las partículas y sus interacciones con la materia, así como el funcionamiento de los detectores. Consiste en un código específico basado en lenguaje C++ que realiza tanto las simulaciones como la recolección y análisis de los resultados obtenidos en ellas.

REST está basado en ROOT [18], un framework orientado a objetos desarrollado en 1994 en el CERN que es de gran utilidad en la física de partículas. Se utiliza para el análisis de datos a gran escala y ofrece todo lo necesario para el procesamiento de big data, análisis estadístico y la visualización y almacenamiento de datos. Se trata de un software libre, de código abierto, implementado principalmente en C++ que almacena los datos jerárquicamente en una estructura de árbol para optimizar los recursos de memoria y el acceso en paralelo a la información.

En cuanto a las simulaciones, REST utiliza GEANT4 (GEometry ANd Tracking 4) [19] mediante el módulo RestG4. GEANT4 consiste en un software libre implementado en C++ que nos permite realizar simulaciones de detectores y de partículas interactuando con la materia.

Con la ayuda de GEANT4 (y archivos de GDML [20]) podemos describir la geometría de nuestro detector a nuestro gusto, eligiendo su material, volumen, disposición, blindaje, etc. También permite elegir las partículas que se lanzaran, así como sus características.

Una vez lanzada la simulación, GEANT4 proporciona información sobre las trayectorias de las partículas, las interacciones que han tenido lugar y, en el caso de que las hubiera, nos da información sobre las partículas creadas.

### 5.1. Descripción del detector

Queremos replicar las reacciones que tienen lugar entre los rayos cósmicos y los monitores de neutrones descritos en el apartado anterior. Por lo tanto, para llevar a cabo las simulaciones, diseñaremos un detector con características lo más cercanas posibles a las de los monitores de neutrones utilizados en la actualidad.

Se va a basar la geometría del detector en el monitor de neutrones estándar NM64, cuyo diseño y los elementos que lo componen se concretó en la Subsección 4.1. Consiste en un conjunto de cilindros concéntricos contenidos a su vez dentro de una caja de 191 cm de largo. A continuación se describirán cada uno de los elementos del detector:

- Tubo contador: Vasija cilíndrica de 150 mm de diámetro que contiene el gas en el que se detectarán los neutrones ( $\text{BF}_3$  o  $^3\text{He}$ ). Las paredes de la vasija son de acero inoxidable.
- Moderador: Consiste en un cilindro hueco que rodea el tubo contador. Está compuesto de polietileno y tiene un grosor de 20 mm.
- Productor: Cilindro hueco que rodea al moderador, hecho de plomo y con un grosor de 50 mm.

- Reflector: Caja que contiene los cilindros anteriores. Está compuesta de polietileno y sus paredes presentan un grosor de 75 mm.

Para simular el efecto de los rayos cósmicos en nuestro detector, vamos a lanzar neutrones cósmicos desde una pared (plano XZ) situada encima del detector. La Figura 9 representa la geometría utilizada para el detector.

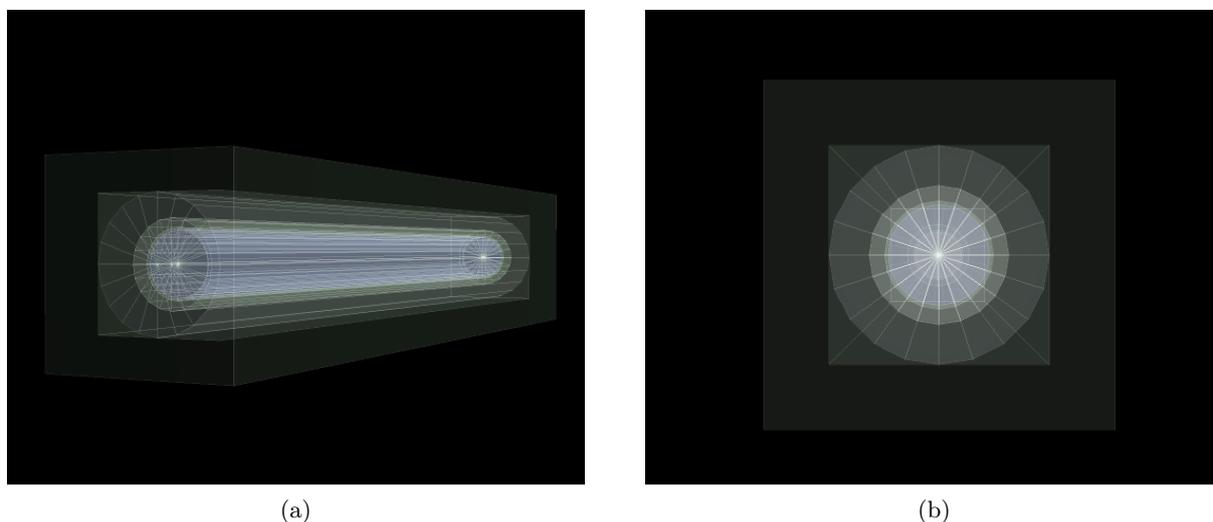


Figura 9: Geometría del detector utilizado en las simulaciones llevadas a cabo. De dentro a fuera se puede distinguir: el tubo contador, moderador, productor y reflector.

## 5.2. Simulaciones

Con la geometría del detector diseñada, se puede comenzar a lanzar los neutrones cósmicos contra él. Se van a realizar tres simulaciones distintas: utilizando  $\text{BF}_3$ ,  $^3\text{He}$  y además  $^4\text{He}$ . Todas ellas a una temperatura de 300 K y se lanzarán un total de  $10^7$  neutrones. Aunque el  $^4\text{He}$  no se utiliza en los NM64, se va a incluir en las simulaciones para compararlo con el  $^3\text{He}$ . En la Tabla 1 aparecen descritos los diferentes parámetros introducidos en cada simulación.

Gas	Densidad ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )	Presión (bar)
$^4\text{He}$	0,641	4
$^3\text{He}$	0,483	4
$\text{BF}_3$	0,733	0,27

Tabla 1: Parámetros utilizados en las simulaciones.

En la Figura 10 se muestra un evento representativo de un neutrón cósmico incidiendo sobre el detector diseñado ( $^3\text{He}$ ). En primer lugar, el neutrón atraviesa el detector hasta llegar a la capa productora de plomo, donde interacciona inelásticamente, produciendo gammas (trazas verdes), y otros neutrones secundarios, que seguirán experimentando colisiones inelásticas. En el tubo que contiene el gas puede observarse una traza roja y otra azul. Estas corresponden al protón y al Tritio,  $^3\text{H}$ , productos de la reacción de captura del neutrón que puede verse en la Ecuación 4.

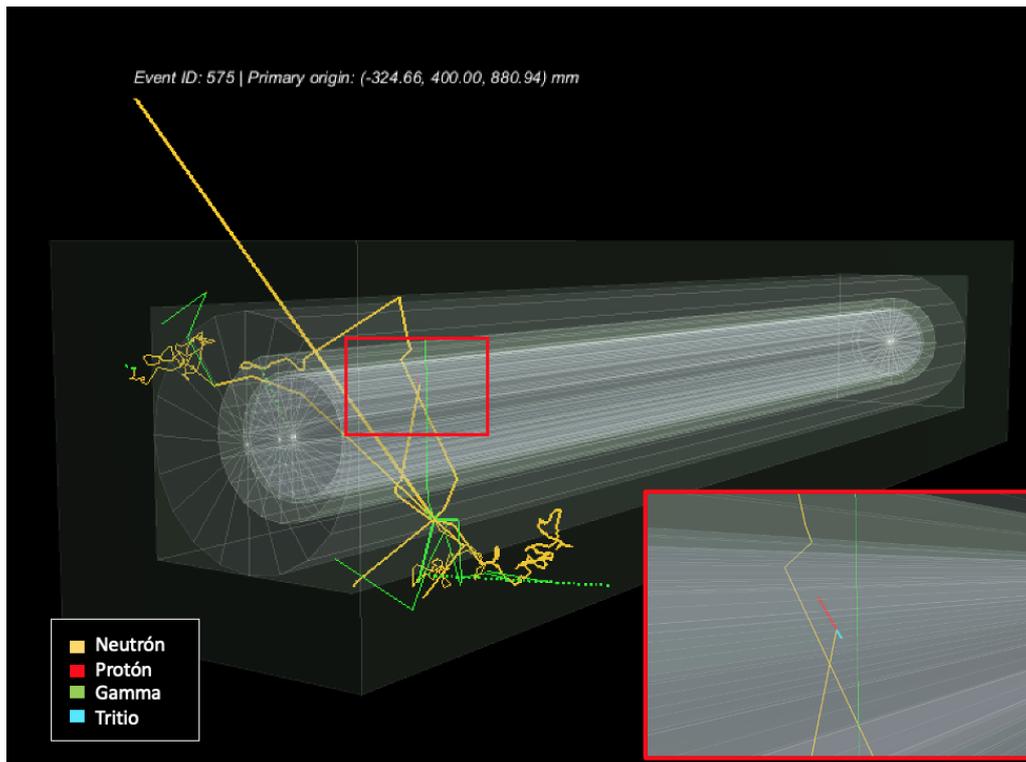


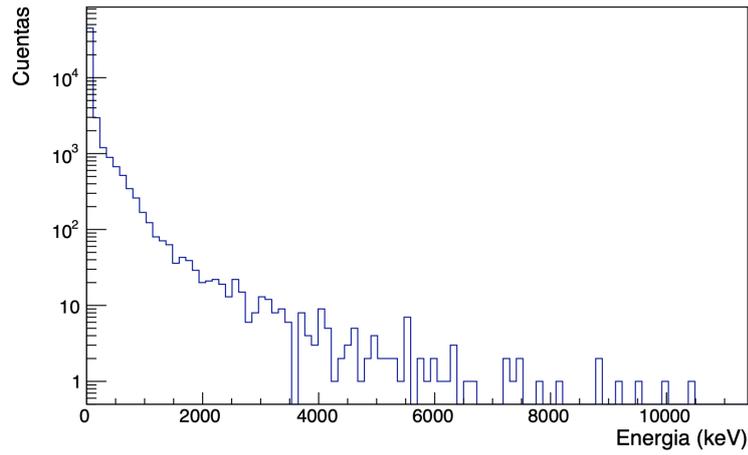
Figura 10: Ejemplo de evento producido por la incidencia de un neutrón cósmico en el detector de  $^3\text{He}$ .

### 5.3. Respuesta del detector

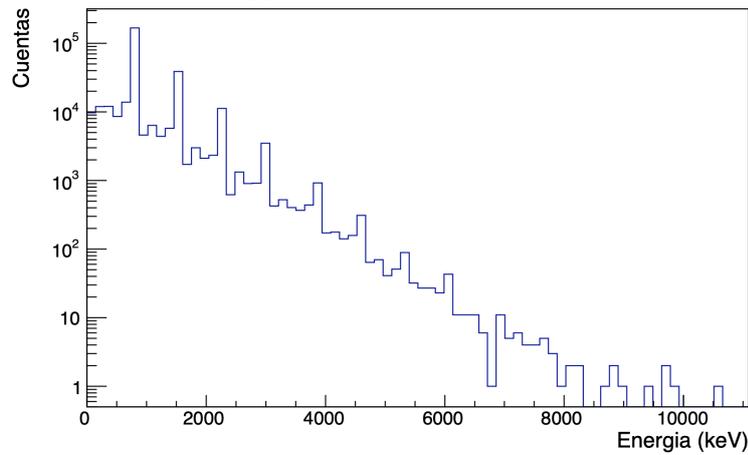
Una vez lanzados, con ejecutable restG4, los neutrones cósmicos contra los distintos detectores, se obtiene la energía que estos han depositado en el volumen del detector en formato de ROOT. Las Figuras 11a, 11b y 11c muestran esta distribución de energía.

Para el caso del contador relleno de  $^3\text{He}$  (Figura 11b), se puede encontrar un pico en torno a 764 keV, el cual se debe a la reacción de captura del neutrón, (n,p), donde tal y como se vio en la Ecuación 4, el valor de Q es  $Q=764\text{ keV}$  [21]. Aparecen picos en valores múltiples de 764 keV, indicando que ha habido más de una captura. Con el  $^4\text{He}$  no se da esta repetición de picos ya que el único proceso que tiene lugar es la dispersión elástica, lo cual explica la forma de la Figura 11a.

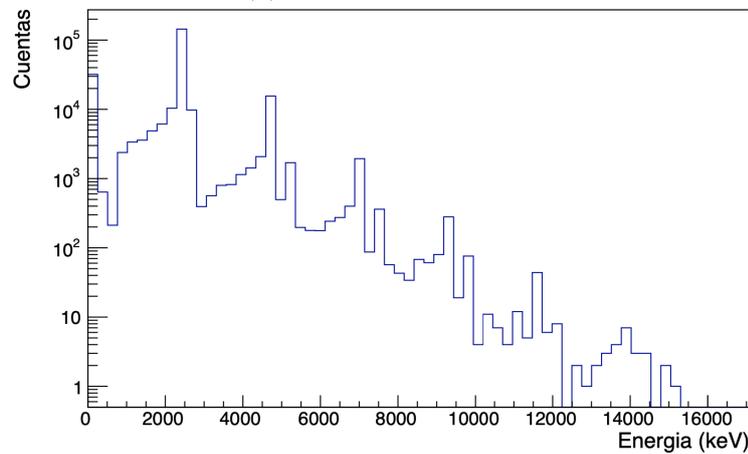
En cuanto a la energía depositada en el detector de  $\text{BF}_3$ , se pueden distinguir los picos de 2,31 MeV, más intenso, y de 2,79 MeV. Esta estructura se repite, como sucedía en el caso del  $^3\text{He}$ , para múltiples capturas.



(a) Tubo contador con  $^4\text{He}$ .



(b) Tubo contador con  $^3\text{He}$ .



(c) Tubo contador con  $\text{BF}_3$ .

Figura 11: Energía depositada en el volumen de los distintos detectores. El eje Y se encuentra en escala logarítmica. Se observa cómo el espectro del  $^4\text{He}$  corresponde a choques elásticos, mientras los otros dos espectros muestran picos, sobre el continuo de los choques elásticos, debidos a la emisión de otras partículas tras la captura de neutrones. Estos picos se repiten, indicando capturas múltiples.

Comparando las eficiencias absolutas de los distintos detectores, definidas como el cociente de los eventos registrados entre los lanzados, y dado que en el detector hay masas parecidas para todos los gases, puede verse en la Tabla 2 que la eficiencia de los detectores con los tubos

contadores llenos de  $^3\text{He}$  y  $\text{BF}_3$  supera en un orden de magnitud la del detector de  $^4\text{He}$ . Se puede por lo tanto confirmar la ineficiencia del  $^4\text{He}$  frente a los otros dos gases utilizados en los detectores comerciales NM64. <sup>†</sup> Es por esto que no se utiliza este gas para este tipo de detectores.

Gas	$\epsilon$ (%)	Masa (g)
$^4\text{He}$	0,5	21,64
$^3\text{He}$	2,3	16,30
$\text{BF}_3$	2,5	24,74

Tabla 2: Eficiencia de los distintos tipos de detectores, obtenida dividiendo los eventos detectados entre los lanzados. En la columna de la derecha puede verse la masa de cada gas utilizada en las simulaciones.

## 6. Base de datos de neutrones

Una vez entendido el funcionamiento de los distintos tipos de detectores NM64, se va a realizar un estudio de la intensidad de los rayos cósmicos que inciden en la superficie terrestre. Para ello, se utilizarán datos recopilados por la NMDB.

La NMDB (Neutron Monitor DataBase) [2] es una base de datos de alta resolución que proporciona medidas de monitores de neutrones localizados por todo el mundo y que ofrece tanto datos históricos como medidas en tiempo real de rayos cósmicos. El resultado es una red mundial de monitores de neutrones situados a distintas latitudes, altitudes y longitudes, de forma que combinando las medidas de las diferentes estaciones, se puede caracterizar muy precisamente el flujo de partículas incidentes en la Tierra con una determinada dirección y energía.

Esta red mundial, de aproximadamente cincuenta monitores, permite obtener información sobre la variación de los rayos cósmicos en función del ciclo solar, así como establecer alertas de meteorología espacial relacionadas con partículas energéticas solares o con CMEs [22].

En el siguiente apartado, se discutirán algunos datos obtenidos de la NMDB. Dado el gran número de monitores de neutrones que se pueden encontrar actualmente en la Tierra, tan solo se van a analizar los datos recogidos por una selección de ellos. En primer lugar, se hará una comparación entre las medidas tomadas por las distintas estaciones de la Antártida. Dado que todas se encuentran a latitudes parecidas, tendrán una rigidez similar. Después, se estudiarán los datos de algunas estaciones situadas en Europa, de forma que la rigidez sea un poco más elevada.

---

<sup>†</sup>En estos cálculos se han tenido en cuenta todas las interacciones. Considerando sólo las de captura, que dan una señal inequívoca, la eficiencia del  $^4\text{He}$  sería nula.

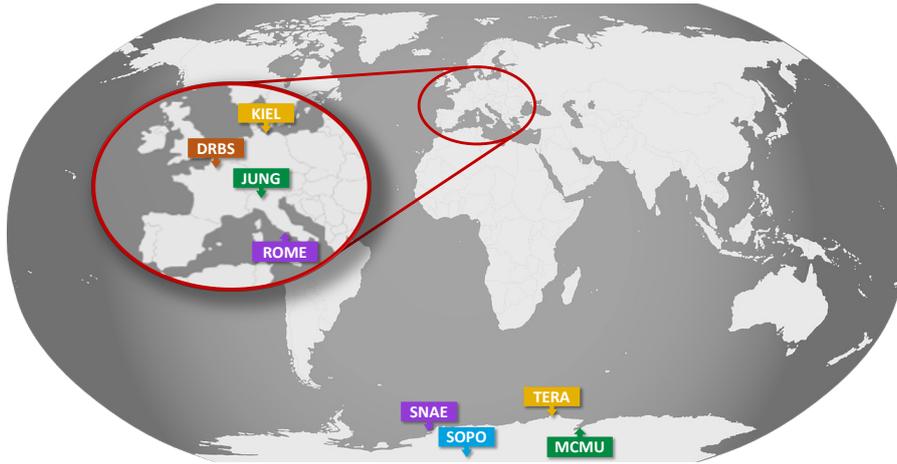


Figura 12: Localización de las estaciones cuyos datos van a ser analizados.

### 6.1. Análisis de datos de las estaciones antárticas

En esta sección se compararán las medidas tomadas por los distintos detectores de neutrones localizados en la Antártida. Uno de los motivos por los que se ha elegido esta zona del planeta para llevar a cabo la comparación, es que la latitud es máxima y por lo tanto la rigidez será mínima, obteniendo así más cuentas en los detectores. Para este análisis se han seleccionado las estaciones antárticas con una antigüedad de más de 22 años (Figura 12), es decir, dos ciclos solares. La Tabla 3 muestra la relación de estaciones antárticas con sus respectivas latitudes, altitudes, rigidez, ritmo promedio de conteo, variación promedio de cuentas entre máximos y mínimos, y por último, el tipo de detector utilizado.

Estación	Latitud	Altitud (m)	Rigidez (GV)	Ritmo promedio (cuentas/s)	Variación promedio entre máximo y mínimo (%)	Detector
South Pole (SOPO)	90,00° S	2810	0,10	298,81	21	3 detectores de $^3\text{He}$ en módulos NM64 individuales aislados.
Mc Murdo (MCMU)	77,90° S	48	0,30	258,38	14	18 detectores de $\text{BF}_3$ en 3 módulos NM64.
Sanae IV (SNAE)	71,67° S	856	0,73	160,93	15	6 detectores NM64 (no especifica el gas)
Terre Adelie (TERA)	66,65° S	32	0,01	112,62	13	9 detectores NM64 de $\text{BF}_3$

Tabla 3: Estaciones de la Antártida [2, 1].

Los monitores de neutrones presentan un diseño estandarizado, para así poder combinar los datos de estaciones situadas por todo el mundo, y además se tienen en cuenta la presión y eficiencia del detector, por lo que la presión atmosférica y otros factores que dependen de cada estación (cambios en el edificio, tipo y número de tubos contadores, etc.) están corregidos.

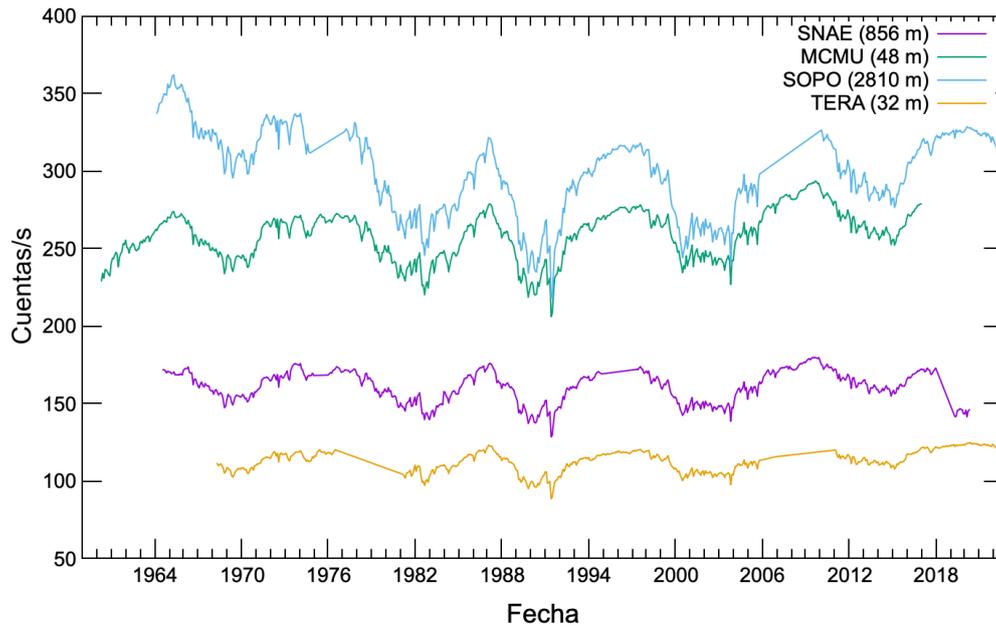


Figura 13: Datos tomados por los monitores de neutrones de la Antártida, en la que se observan los ciclo solares y una diferencia de hasta 200 cuentas/s entre las estaciones [1].

Representando el ritmo obtenido por las estaciones antárticas a lo largo de toda su historia, obtendremos la gráfica de la Figura 13. Los datos muestran claramente cómo la intensidad de neutrones sigue un ciclo periódico de unos 11 años que se corresponde con el ciclo solar, tal y como se explicó en la Subsección 3.1. Además, puede observarse como TERA, la estación que se encuentra a menor altitud, es la que menos cuentas recibe, mientras que SOPO, que es la de mayor altitud, presenta el mayor número de cuentas/s. En cuanto a las otras dos estaciones, MCMU y SNAE, se puede observar cómo la primera presenta más cuentas que la segunda a pesar de encontrarse a una menor altitud. Esto puede deberse a que MCMU presenta una rigidez menor, y por lo tanto sus detectores recibirán un mayor número de cuentas.

En la Tabla 3 también puede encontrarse la variación promedio, con respecto al ritmo medio, entre el máximo y el mínimo de cada estación. Conforme menor es el ritmo promedio, menor será la variación entre máximos y mínimos, es decir, la gráfica será más “suave”.

Si se amplía la Figura 13 en torno al mínimo más pronunciado, se puede observar una gran disminución del ritmo de detección en todas las estaciones alrededor del año 1991. Este mínimo puede verse con más claridad en la Figura 14a.

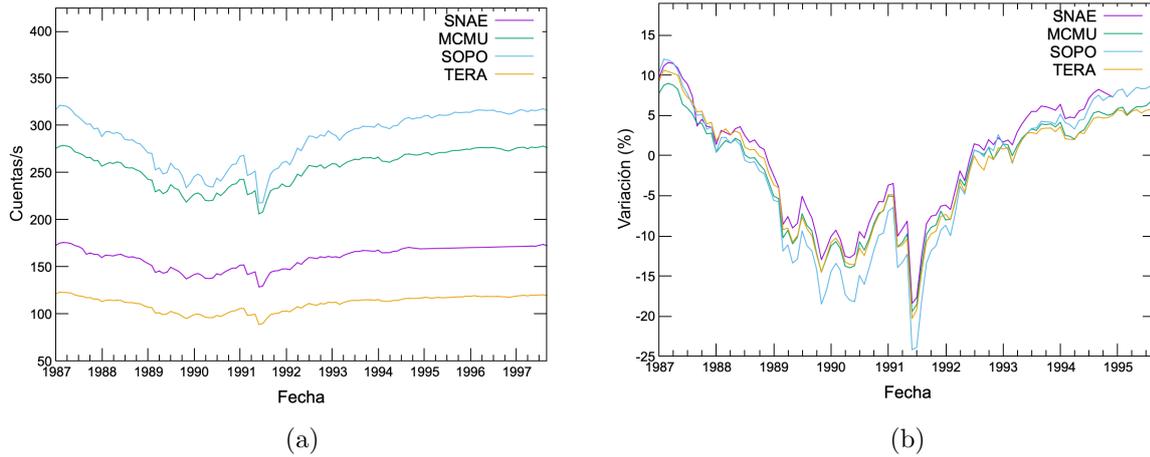


Figura 14: (a) Evento registrado en 1991. Los datos utilizados corresponden a las estaciones antárticas SNAE, MCMU, SOPO, TERA. (b) Variación con respecto del ritmo promedio para el evento de 1991 en las mismas estaciones que en (a) [1].

En algunas estaciones el pico es más pronunciado que en otras, sin embargo, para comparar la variación relativa con respecto al valor medio del ritmo de detección de cada estación, utilizaremos la escala relativa. En la Figura 14b puede verse esta variación, donde el eje Y indica la variación en % con respecto al valor medio.

Todas las estaciones presentan una variación entorno al 20 % con respecto a su valor medio. Este mínimo en el ritmo de CR corresponde al máximo de manchas solares del ciclo solar número 22 (1986-1996), siendo el segundo ciclo con mayor número de manchas solares desde que se comenzó a realizar un seguimiento de estas en 1755 [23].

## 6.2. Análisis de datos de las estaciones europeas

A continuación, se compararán las medidas tomadas por varias estaciones, tal y como hicimos para la Antártida, esta vez situadas a una latitud menor, en Europa, y por lo tanto con una rigidez mayor. Igual que en el anterior apartado, las características de cada estación aparecen en la Tabla 4 y su localización se encuentra en la Figura 12.

Estación	Latitud	Altitud (m)	Rigidez (GV)	Ritmo promedio (cuentas/s)	Variación promedio entre máximo y mínimo (%)	Detector
Rome (ROME)	41,86° N	0	6,27	139,42	25	20 detectores NM64 (no especifica el gas)
Jungfrauoch (JUNG1)	46,55° N	3475	4,50	361,82	14	3 detectores NM64 (no especifica el gas)
IGY Jungfrauoch (JUNG)	46,55° N	3570	4,50	157,31	11	18 detectores IGY (no especifica el gas)
Dourbes (DRBS)	50,10° N	225	3,18	106,05	11	9 detectores NM64 (no especifica el gas)
Kiel (KIEL)	54,39° N	54	2,36	165,66	15	18 detectores NM64 (no especifica el gas)

Tabla 4: Estaciones de Europa [2, 1].

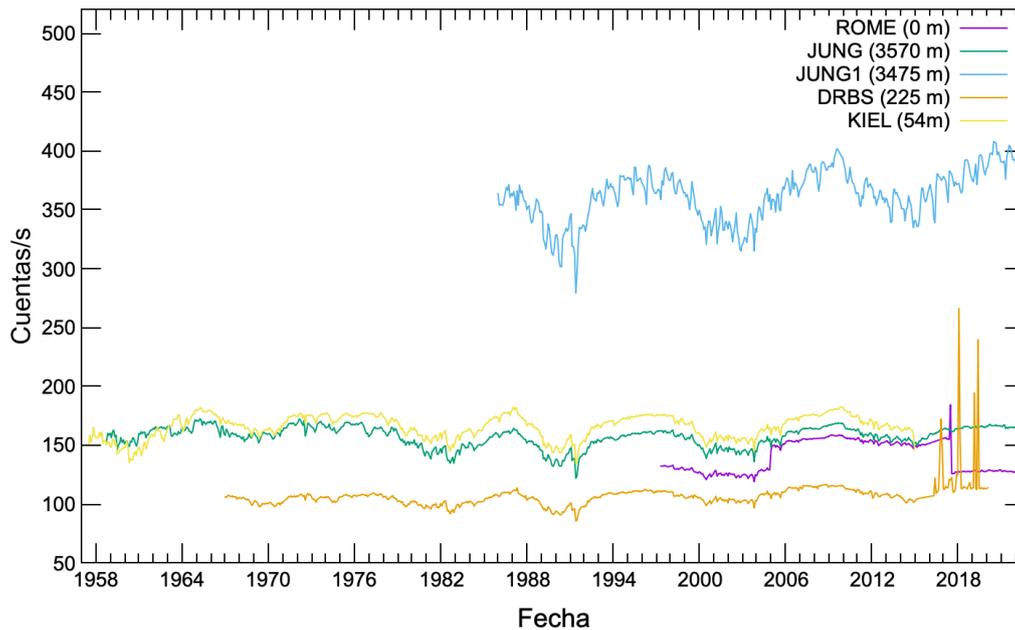


Figura 15: Estaciones de Europa [1].

En el caso de las estaciones europeas también se puede distinguir en la Figura 15 el ciclo de 11 años que siguen las cuentas y el mínimo del año 1991 que se ha discutido para el caso de las estaciones de la Antártida.

### 6.3. Comparación entre medidas de distintas estaciones

Se va a proceder a realizar una comparación entre estaciones dependiendo de los distintos parámetros que pueden hacer que la intensidad de rayos cósmicos varíe.

Si se atiende al ritmo promedio obtenido por cada estación, puede verse cómo, por lo general, en el caso de las estaciones de Europa es menor. Una excepción es la estación JUNG1, con un ritmo promedio de 361,82 cuentas/s, que supera a cualquier estación antártica. Sin embargo, esto puede justificarse con la gran altitud a la que se encuentra (3475 m), ya que la estación antártica con mayor altitud es SOPO (2810 m).

Para comprobar la dependencia del ritmo promedio con la rigidez, se van a comparar las estaciones MCMU y KIEL, las cuales presentan altitudes similares pero una rigidez distinta. Con una rigidez de 0,30 GV, MCMU recibe un ritmo promedio de 258,39 cuentas/s, superior al ritmo de KIEL, con 165,66 cuentas/s a una rigidez de 2,36 GV.

Ahora se quiere ver la correlación entre la intensidad de rayos cósmicos detectados y el número de manchas solares. La Figura 16 muestra ambas medidas, donde se ha utilizado como ejemplo la estación MCMU, ya que tan solo nos interesa la forma que sigue la intensidad de rayos cósmicos. Puede verse claramente que, cuando se tiene un máximo en el número de manchas solares, hay un mínimo en las cuentas de CR, y viceversa.

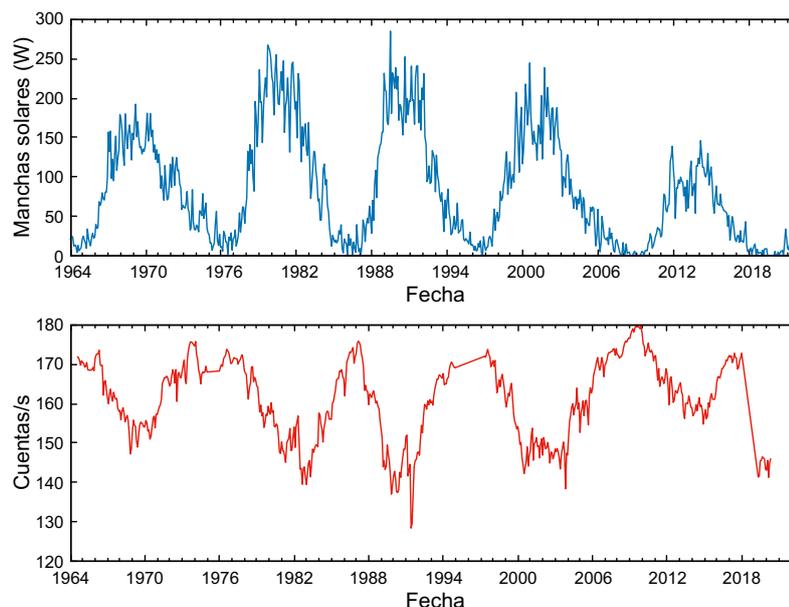


Figura 16: Comparación entre la intensidad de CR detectada en la estación MCMU y el número de manchas solares (promediado a un mes). Los datos de las manchas solares han sido obtenidos del World Data Center SILSO, Real Observatorio de Bélgica, Bruselas [23].

Además de la periodicidad con respecto al ciclo de manchas solares de los datos obtenidos, puede observarse en las Figuras 13 y 15 como la forma de los sucesivos picos varía, de forma que algunos tienen una apariencia más redondeada y otros más puntiaguda. Esto se debe a la inversión de la polarización del campo magnético de la heliosfera, la cual tiene lugar con una periodicidad de 22 años y recibe el nombre del ciclo Hale [8]. Así podemos ver como cada 11 años la forma del pico cambia.

## 7. Conclusiones

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado era realizar un estudio del comportamiento de los Rayos Cósmicos una vez han atravesado la atmósfera, en la superficie terrestre, y analizar los distintos parámetros que influyen en su intensidad.

Para ello, en primer lugar, se ha utilizado el software GEANT4, para diseñar nuestras propias geometrías. Gracias a este software se han realizado varias simulaciones lanzando neutrones cósmicos contra distintos detectores que seguían el diseño de un NM64 estándar, uno de los detectores más extendidos en la detección de neutrones cósmicos. Estas simulaciones son una forma de ver con nuestros propios ojos cómo interaccionan los neutrones incidentes, y el resto de partículas que se originan a partir de ellos, con el resto de materiales que conforman el detector, pudiendo ver las trazas que deja cada partícula y la energía que depositan. De las tres simulaciones llevadas a cabo, se ha visto cómo las que utilizaban detectores  $^3\text{He}$  y  $\text{BF}_3$  nos proporcionaban la mejor eficiencia, lo cual se corresponde con los gases utilizados en los NM64 comerciales.

Una vez comprendido el funcionamiento de los detectores utilizados, con los datos recopilados

por la NMDB, se ha podido comprobar la dependencia de la intensidad de CR con los ciclos solares de 11 años, dando lugar a una mayor intensidad cuando la actividad solar es menor y viceversa. También se ha visto cómo además de la actividad solar, los CR también están modulados por otros factores como la altitud y latitud/rigidez a la que se midan. Cuanto mayor sea la altitud y menor sean la latitud y rigidez, se obtendrá un mayor número de cuentas en los detectores.

Con todo esto, queda confirmada la importante utilidad de la NMDB, gracias a que todos los detectores de neutrones localizados a distintas longitudes, latitudes y altitudes funcionan como espectrómetro gigante. Esto tiene numerosas aplicaciones, entre las que destacan las alertas en meteorología espacial. Sin embargo, al utilizar los datos de la NMDB, debe tenerse en cuenta que cada estación de medición pertenece a una entidad distinta, por lo que el tratamiento de los datos obtenidos y el comportamiento de los dispositivos electrónicos será diferente en cada caso, pudiendo dar lugar a diferentes calidades en las medidas.

Gracias a este trabajo, he aprendido cómo el flujo de rayos cósmicos, y en concreto de neutrones, varía según algunos factores que dependen de la posición de medición en la Tierra; como son la altitud y la latitud/rigidez. También depende de factores ajenos a la Tierra; como el número de manchas solares y las CMEs y fulguraciones. Además, he visto las distintas interacciones que tienen los neutrones con la materia. Para comprenderlas mejor y poder *verlas* con nuestros propios ojos, he aprendido a diseñar geometrías en GEANT4, lanzar simulaciones de neutrones cósmicos en detectores NM64, visualizar las trazas de las partículas resultantes para entender los diferentes procesos, y analizar los resultados obtenidos con ayuda de ROOT. Por último, he visto cómo consultar y utilizar bases de datos como la NMDB, que como ya se ha mencionado, es una gran herramienta para la monitorización del flujo de Rayos Cósmicos que llegan a la superficie terrestre.

## Referencias

- [1] NMDB: NEST. Web Page. 2022. URL: <https://www.nmdb.eu/nest/>.
- [2] NMDB: Public Outreach. Web Page. 2022. URL: [https://www.nmdb.eu/public\\_outreach/es/](https://www.nmdb.eu/public_outreach/es/).
- [3] Particle Data Group y col. “Review of Particle Physics”. En: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2020.8 (2020). ISSN: 2050-3911. DOI: [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104). URL: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>.
- [4] James W. Cronin. “Cosmic rays: the most energetic particles in the universe”. En: *Reviews of Modern Physics* 71.2 (1999), S165-S172. ISSN: 0034-6861. DOI: [10.1103/revmodphys.71.s165](https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.s165).
- [5] ITeDA. *¿Qué son los rayos cósmicos?* Web Page. 2022. URL: <http://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/28>.
- [6] NASA. Web Page. 2011. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/>.
- [7] W. Li y M.K. Hudson. “Earth’s Van Allen Radiation Belts: From Discovery to the Van Allen Probes Era”. En: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 124.11 (2019), págs. 8319-8351. ISSN: 2169-9380. DOI: [10.1029/2018ja025940](https://doi.org/10.1029/2018ja025940).
- [8] Peter K.F. Grieder. *Cosmic rays at Earth*. Elsevier, 2001. ISBN: 0080530052.
- [9] Kazi A. Firoz y col. “AN INTERPRETATION OF GLE71 CONCURRENT CME-DRIVEN SHOCK WAVE”. En: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 213.2 (2014). OA status: bronze, pág. 24. ISSN: 0067-0049. DOI: [10.1088/0067-0049/213/2/24](https://doi.org/10.1088/0067-0049/213/2/24). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0067-0049/213/2/24/pdf>.
- [10] Christopher J. Mertens y col. *Atmospheric ionizing radiation from galactic and solar cosmic rays*. INTECH Open Access Publisher, 2012. ISBN: 953510196X.
- [11] J.A. Simpson. “Cosmic-radiation neutron intensity monitor”. En: *Ann. Int. Geophys. Year 4* (1957), págs. 351-373.
- [12] H. Carmichael. “IQSY Instruction Manual No. 7”. En: *London: IQSY Secretariat* (1964).
- [13] R. Bütikofer. “Ground-Based Measurements of Energetic Particles by Neutron Monitors”. En: *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis*. Springer International Publishing, 2018, págs. 95-111. ISBN: 0067-0057. DOI: [10.1007/978-3-319-60051-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60051-2_6).
- [14] NNDC — National Nuclear Data Center. Web Page. 2022. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/>.
- [15] Du Toit Strauss y col. “The mini-neutron monitor: a new approach in neutron monitor design”. En: *Journal of Space Weather and Space Climate* 10 (2020), pág. 39. ISSN: 2115-7251. DOI: [10.1051/swsc/2020038](https://doi.org/10.1051/swsc/2020038).
- [16] Konrad Altenmüller y col. “REST-for-Physics, a ROOT-based framework for event oriented data analysis and combined Monte Carlo response”. En: *Computer Physics Communications* 273 (2022), pág. 108281. ISSN: 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108281>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465521003933>.

- [17] *REST*. Web Page. 2022. URL: <https://github.com/rest-for-physics>.
- [18] *ROOT*. Web Page. 2022. URL: <https://root.cern.ch/>.
- [19] Sea Agostinelli y col. “GEANT4—a simulation toolkit”. En: *Nuclear instruments and methods in physics research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003), págs. 250-303.
- [20] *Geometry Description Markup Language (GDML)*. Web Page. 2017. URL: <https://gdml.web.cern.ch/GDML/>.
- [21] Francesco Piscitelli y col. “Verification of He-3 proportional counters’ fast neutron sensitivity through a comparison with He-4 detectors”. En: *The European Physical Journal Plus* 135.7 (2020). ISSN: 2190-5444. DOI: [10.1140/epjp/s13360-020-00600-8](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00600-8).
- [22] H. Mavromichalaki y col. “Applications and usage of the real-time Neutron Monitor Database”. En: *Advances in Space Research* 47.12 (2011), págs. 2210-2222. ISSN: 0273-1177. DOI: [10.1016/j.asr.2010.02.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.019).
- [23] SILSO World Data Center. “The International Sunspot Number”. En: *International Sunspot Number Monthly Bulletin and online catalogue* (2022).