



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio por Monte Carlo de la sensibilidad a la  
modulación anual del experimento ANAIS-112

Autor

Gracia Sedano Escudero

Directores

María Martínez Pérez

María Luisa Sarsa Sarsa

Departamento de Física Teórica

FACULTAD DE CIENCIAS

2021

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos de este trabajo</b>	<b>4</b>
<b>3. Experimento ANAIS-112</b>	<b>4</b>
<b>4. Estudio de la sensibilidad de ANAIS-112 mediante simulaciones de Monte Carlo</b>	<b>7</b>
4.1. Resultados para un fondo constante . . . . .	10
4.2. Resultados para un fondo exponencialmente decreciente . . . . .	12
4.3. Comparación de los resultados para ambos modelos de fondo . . . . .	14
<b>5. Estudio de algunos efectos sistemáticos</b>	<b>17</b>
5.1. Distribución de tiempo vivo . . . . .	18
5.2. Eficiencia de detección del experimento . . . . .	20
<b>6. Conclusiones</b>	<b>22</b>
<b>Referencias</b>	<b>25</b>

# 1. Introducción

Durante las últimas décadas, uno de los retos dentro del ámbito de la física de partículas y la cosmología se ha centrado en buscar soluciones a las carencias que tiene el actual modelo estándar de la física de partículas, ya que es incapaz de explicar en qué consiste el 95 % del Universo.

Para encajar en el modelo cosmológico estándar las observaciones del Universo correspondientes a distintas escalas de distancias y realizadas con varias técnicas se requiere que éste esté formado en un 5 % por materia bariónica, y el 95 % restante formado por materia (25 %) y energía oscuras (70 %) de naturaleza desconocida [1]. Para poder estudiar más a fondo las propiedades y los comportamientos de la materia oscura es necesario conocer su distribución en el universo. Las simulaciones de formación de estructura a gran escala apoyan una distribución de las partículas de materia oscura en torno a las galaxias en forma de halos. El modelo de halo más sencillo, denominado "SHM" (Standard Halo Model) es esférico e isoterma, sin rotación, con una densidad inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro galáctico. De acuerdo con las observaciones, la densidad de materia oscura de este halo en la posición del Sistema Solar es de  $0.4 \text{ GeV}/\text{cm}^3$ , aunque este valor tiene una importante incertidumbre asociada [1].

La presencia de materia oscura se observa en sus efectos gravitatorios en el Universo a distintas escalas, pero se conoce poco de su naturaleza. Es razonable asumir que el comportamiento dinámico de la materia ordinaria en la galaxia (estrellas y nubes de gas y polvo) esté dominado por el efecto gravitatorio del halo de materia oscura, por lo que determinando con precisión la distribución de velocidades de un amplio campo estelar, se podrá inferir la forma en que la materia oscura se distribuye en nuestra galaxia. Este es uno de los objetivos del satélite Gaia, el cual ha estudiado distintas poblaciones de estrellas y ha permitido determinar que el halo estelar está formado por dos componentes, en primer lugar una quasi-esfera rotando ligeramente, formada por estrellas con pocos metales en su composición, y una estructura plana formada por estrellas con alta metalicidad, confirmando que el halo de nuestra galaxia tiene subestructuras, y que, por lo tanto, la distribución de la materia oscura en la Vía Láctea no estará bien descrita por un modelo tan sencillo como el SHM. Las medidas de Gaia permitirán a lo largo de los próximos años conocer mejor la estructura del halo de materia oscura y la distribución de velocidades de las partículas que lo constituyen. Entretanto, en el marco de este trabajo se va a emplear el modelo de halo estándar.

En cuanto a la naturaleza de la materia oscura, es poco lo que se puede decir. Las partículas de materia oscura no tienen carácter bariónico, su carga es neutra y su interacción con el resto de la materia es muy débil. La metodología experimental en la que se va a centrar este trabajo es la detección directa de las partículas de materia oscura en detectores adecuados, y teniendo

en cuenta que se asume el comportamiento del Modelo de Halo Estándar, las estimaciones de sensibilidad de estos experimentos a la materia oscura se basarán en la distribución de velocidades y la densidad local de materia oscura determinadas dentro de dicho modelo.

Existen muchos posibles candidatos a materia oscura, todos ellos fuera del marco de las teorías actuales. Muchos de estos candidatos pueden interactuar con la materia convencional, aunque muy débilmente. Si interactuaran fuertemente ya los habríamos detectado. Otros, sin embargo, pueden interactuar solo gravitatoriamente y por tanto no podríamos detectarlos en experimentos de detección directa. Los WIMP's (*Weakly Interacting Massive Particles*) son unos de los candidatos a materia oscura y conforman una categoría de partículas que interactúan débilmente con la materia convencional, siendo posible por tanto detectarlos de forma directa en nuestros laboratorios empleando detectores adecuados. Es necesario tener en cuenta que estas partículas tienen secciones eficaces de interacción con la materia convencional muy pequeñas, por lo que los ritmos de interacción esperados en los detectores serán muy pequeños.

Por ello, los experimentos que emplean esta técnica de detección requieren una gran masa de detección y niveles de fondo muy pequeños para ser capaces de observar las interacciones de los WIMP's con la materia, por lo que es imprescindible instalarlos en laboratorios subterráneos para evitar la radiación cósmica y protegerlos con blindajes adecuados de todas las formas de radiación. La detección directa se basa en la dispersión de los WIMP's con los núcleos del detector apropiado, de forma que si se produce transferencia de energía, los núcleos sufrirán un retroceso. La energía transferida por el WIMP al núcleo depende de la velocidad relativa entre ellos. Si se considera que el detector está situado en la Tierra, se moverá a través del halo de materia oscura con una velocidad formada por dos componentes [2]:

$$v_E = v_{\odot} + v_{\oplus} \cos(\theta) \cos[\omega(t - t_0)] \quad (1)$$

Siendo  $v_{\odot} = 232 \text{ km/s}$  la velocidad del Sol en torno al centro de la Galaxia y  $v_{\oplus} = 30 \text{ km/s}$  la velocidad de la Tierra en torno al Sol,  $\omega$  es la frecuencia correspondiente a un periodo de un año,  $\theta = 60^\circ$  es el ángulo de inclinación entre la órbita de la Tierra y el plano galáctico (ver figura 1), y la fase  $t_0$  corresponde al 2 de junio [3].

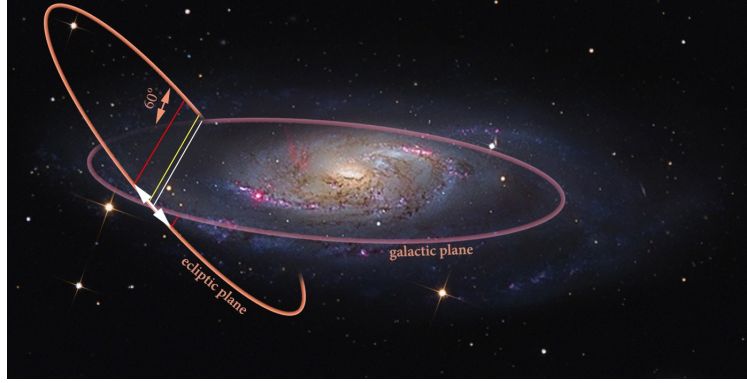


Figura 1: Diagrama en el que se muestra la intersección del plano de la elíptica (que contiene a la órbita de la Tierra en torno al Sol) con respecto al plano galáctico [4].

De acuerdo con la ecuación (1) la velocidad relativa entre los WIMP's del halo y los núcleos de un detector será máxima en junio, cuando las velocidades del Sol y la velocidad de rotación de la Tierra alrededor del Sol llevan el mismo sentido y por tanto ambas componentes se sumarán, mientras que en diciembre será mínima, cuando las velocidades van en sentidos opuestos y por tanto los términos se restarán. A consecuencia de esta variación periódica de la velocidad relativa, el ritmo de interacción de los WIMP's con un detector también mostrará una modulación:

$$S(t) \approx S_0 + S_m \cos(\omega(t - t_0)) \quad (2)$$

que resulta de desarrollar en serie de potencias  $S(t)$  en función del parámetro  $v_E(t)$  hasta el primer orden. La amplitud de esta modulación viene determinada por las características de la partícula WIMP considerada.

Existen multitud de experimentos de detección directa, aunque únicamente el experimento DAMA/LIBRA ha sido capaz de medir la modulación anual; DAMA está situado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso en Italia y lleva tomado datos desde 1995, primero con 100 kg de NaI(Tl) y desde 2003 hasta hoy en día con 250 kg de NaI(Tl). Se han desarrollado otros experimentos, cuyos resultados excluyen la señal determinada por DAMA/LIBRA de forma muy significativa. Sin embargo, los resultados de estos experimentos no son directamente comparables con los obtenidos por el experimento italiano puesto que utilizan núcleos blanco diferentes y para comparar los resultados con los de DAMA/LIBRA debemos asumir un modelo de WIMP y de su distribución en el halo galáctico. Por lo tanto, para poder realizar esta comparación de forma independiente del modelo es necesario un experimento cuyo material blanco sea el mismo que el de DAMA/LIBRA, y este será precisamente el objetivo del experimento ANAIS-112, situado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

En los experimentos de detección directa de materia oscura se utilizan una gran variedad de mecanismos de detección y materiales blanco. ANAIS-112 y DAMA/LIBRA, anteriormente

mencionados, y COSINE-100 emplean cristales centelleadores de NaI; el experimento KIMS empleó cristales centelleadores de CsI; además también se emplean cristales centelleadores a muy bajas temperaturas para medir simultáneamente luz y calor (técnica híbrida de detección), como es el caso del experimento CRESST. Por otra parte, los experimentos EDELWEISS y SuperCDMS han sido pioneros en el uso de detectores semiconductores a baja temperatura para la medida simultánea de ionización y calor. El experimento XENON-1T emplea detectores de Xenon líquido mientras que DarkSide-50 emplea Argón líquido que permiten aplicar técnicas de rechazo de fondo muy eficaces y lideran en la actualidad la sensibilidad a WIMP's en un amplio rango del espacio paramétrico permitido. Por último, cabe mencionar el experimento PICO, el cual emplea una cámara de burbujas como detector [3].

## 2. Objetivos de este trabajo

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la sensibilidad a la modulación anual de ANAIS-112 mediante la generación por el método de Monte Carlo de distribuciones de datos similares a las obtenidas por ANAIS, a las que se denominarán pseudo-experimentos, que permitirán estudiar dicha sensibilidad en función del tiempo y analizar la influencia de alguno de los posibles errores sistemáticos que pueden afectar a la toma de datos de ANAIS.

El experimento ANAIS-112 está analizando sus datos en dos regiones energéticas, de 1 a 6 keV y de 2 a 6 keV, como hizo DAMA/LIBRA, para facilitar la comparación entre los resultados de los dos experimentos. Por eso, en este trabajo también se considerarán estas dos regiones. A partir de la evolución del fondo radiactivo del experimento en cada una de ellas se estimará la amplitud de la modulación anual que, en función del tiempo, podría ser observada. La validez de esta modelización será comprobada mediante la comparación con los resultados ya presentados por el experimento ANAIS-112 [5] y con las predicciones de un modelo analítico [6], de tal forma que proporcionará una herramienta para evaluar la sensibilidad del experimento en el transcurso de los próximos años.

## 3. Experimento ANAIS-112

La infraestructura de ANAIS está formada por múltiples elementos. Como detectores se emplean nueve cristales centelleadores cilíndricos de yoduro de sodio dopado con talio ( $NaI(Tl)$ ) acoplados a dos fotomultiplicadores cada uno. La masa individual de cada cristal es de 12.5 kg, siendo la masa total 112.5 kg [5]. Estos detectores están blindados por distintas capas de plomo, en total 30 cm de espesor, para atenuar la radiación gamma. Además se emplea una caja anti-radón herméticamente cerrada para evitar que el aire del laboratorio, que contiene radón, penetre

en el interior del blindaje puesto que al ser un gas radiactivo los productos de su desintegración influirían en los datos recogidos por los detectores.

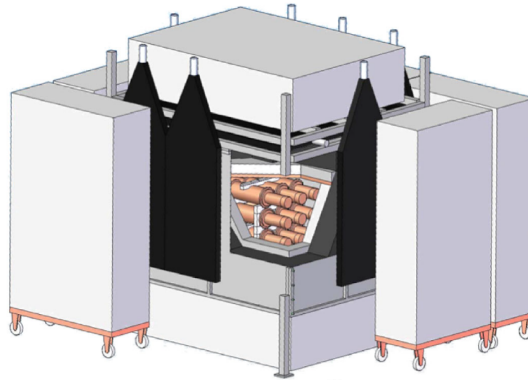


Figura 2: Esquema de ANAIS-112

A su vez se emplea un sistema de veto consistente en 16 centelleadores plásticos que identifica a los muones que atraviesan el experimento y permite posteriormente eliminar los sucesos asociados a su paso. La capa más externa del blindaje consiste en 40 cm de agua y polietileno que moderan los neutrones. En la figura 2 [5] se muestran cómo están colocados los nueve detectores y el blindaje que los aísla y protege de la radiactividad medioambiental. ANAIS-112 está tomando datos en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc desde el 3 de agosto de 2017. Los datos ya analizados y publicados [5] corresponden a 3 años, hasta agosto de 2020 y son los que se considerarán en este trabajo.

El 95 % del tiempo ha sido tiempo “vivo”, durante el cual el experimento ha estado tomando datos de forma “activa”. El 5 % restante del tiempo se reparte entre tiempo “muerto”, durante el cual la toma de datos sigue en marcha pero el sistema no es capaz de registrar interacciones de partículas porque está ocupado realizando otras tareas, y tiempo en el que no se están tomando datos, por ejemplo porque se está calibrando la respuesta del experimento utilizando para ello fuentes radiactivas. Ocasionalmente se han producido pequeñas incidencias en la operación del experimento, como cortes de luz, que se contabilizan también en esta última categoría.

En este trabajo será importante tener en cuenta la fracción de tiempo de operación que proporciona datos utilizables para el estudio de la modulación anual. Partiendo del 95 % del tiempo antes comentado, además se debe considerar que aproximadamente un 3 % se elimina al vetar los sucesos asociados a interacciones de muones en los vetos. En los tres años de medida analizados, equivalentes a 1106.0 días, el tiempo considerado por ANAIS para el análisis de la modulación anual han sido 1018.6 días, lo que supone el 92 % del tiempo transcurrido [5].

DAMA/LIBRA observa modulación solo a energías inferiores a 6 keV. En este rango energético los detectores de ANAIS-112 están afectados por altos ritmos de sucesos que en su

mayoría no están asociados con un depósito energético en los cristales de yoduro de sodio. Este tipo de sucesos deben ser filtrados antes del análisis de la modulación anual, aplicando criterios de selección cuidadosamente diseñados. Algunos de estos criterios consisten en rechazar aquellos sucesos cuya forma del pulso no es compatible con el centelleo del yoduro de sodio, aquellos con interacciones simultáneas en varios detectores o los producidos por los muones atravesando el experimento. Esta selección de sucesos tiene asociada una eficiencia que mide el porcentaje de sucesos “buenos” que pasan todos los criterios de selección y que debe ser determinada con cuidado a partir de poblaciones que no contengan sucesos anómalos que se desean eliminar [5]. Una vez aplicados los criterios de selección hay que corregir el espectro resultante con dicha eficiencia. Esto es especialmente relevante por debajo de 3 keV ya que en esta región la eficiencia se reduce fuertemente (figura 3).

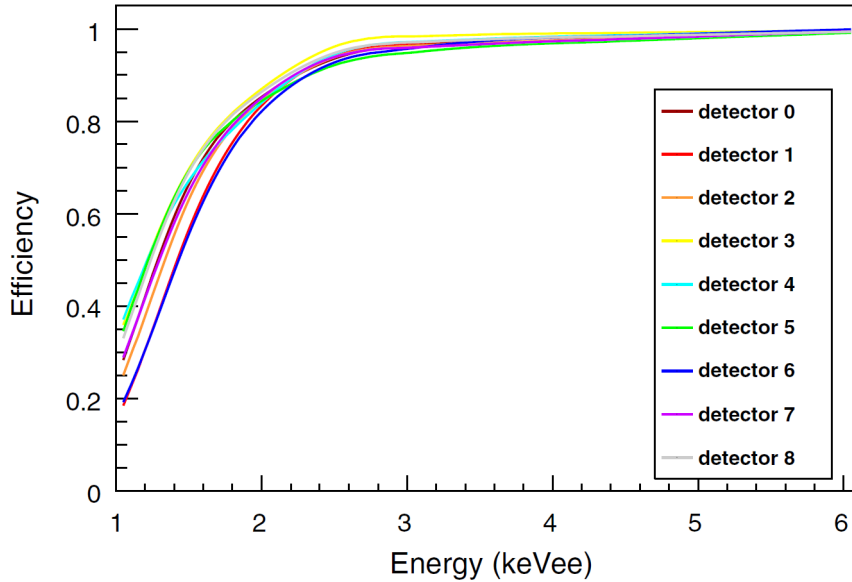


Figura 3: Eficiencia de los criterios de selección de sucesos para cada detector de ANAIS-112 en función de la energía. Gráfica extraída de [5].

En este trabajo se consideran las eficiencias promedio para todos los detectores en las dos regiones energéticas, y como hemos comentado, esta eficiencia disminuye considerablemente por debajo de 3 keV, siendo este efecto especialmente relevante para energías cercanas a 1 keV por lo que se verá reflejado en la eficiencia del rango [1-6] keV, la cual es inferior a la de [2-6] keV. Los valores experimentales con los que se va a trabajar se muestran en la Tabla 1 [6].

	<b>Eficiencia <math>\epsilon</math></b>
<b>[1-6]keV</b>	0.7026
<b>[2-6]keV</b>	0.9463

Tabla 1: Eficiencia promedio de los detectores de ANAIS en 3 años para ambos rangos de energía. Estos valores han sido extraídos a partir de la figura (3).

Por último, también se va a trabajar con la exposición  $MT$  del experimento, calculada como el producto de la masa total de los detectores y el tiempo durante el cual éstos están “activos” y que para los 3 años considerados es de 313.95 kg·año [5].

#### 4. Estudio de la sensibilidad de ANAIS-112 mediante simulaciones de Monte Carlo

En la sección 2 se ha mencionado que el objetivo es determinar la sensibilidad del experimento a la modulación anual. Para poder estudiar la sensibilidad se va a realizar un muestreo del ritmo de detección de sucesos que se espera observar en un experimento similar a ANAIS en función del tiempo, y para llevarlo a cabo se va a introducir un proceso de Monte Carlo de forma que para cada intervalo de tiempo se simularán 10000 pseudo-experimentos.

En primer lugar se parte de la suposición de que no se observa ninguna señal de materia oscura y que el ritmo de detección de los detectores de ANAIS corresponde a depósitos energéticos de partículas emitidas en desintegraciones radiactivas de isótopos inestables presentes en los materiales del entorno o en los propios detectores, pero que, sin embargo no se pueden distinguir de las que habrían producido partículas de materia oscura interaccionando en el detector. Este tipo de sucesos constituyen el denominado “fondo” del experimento.

Los pseudo-experimentos deben reproducir la evolución temporal del número de eventos que se observan en cada una de las regiones energéticas consideradas por los nueve detectores de ANAIS. Para simplificar, se consideran los nueve detectores como si fuesen uno solo, por lo que la masa que tomaremos será  $m_{detectores} = 112,5$  kg de NaI(Tl). Durante todo el procedimiento se agrupan los resultados en bins temporales de 10 días, por lo que se define la variable  $binday = 10$  días.

Para la generación de los pseudo-experimentos se supone que los sucesos observados por ANAIS ( $N_{obs}$ ) siguen una estadística de Poisson, que se aproximará a una distribución de Gauss debido al elevado número de sucesos. Por tanto se muestrea el número de sucesos producidos en cada bin temporal a partir de una distribución de Gauss centrada en  $N_{obs}$  y cuya anchura ( $\sigma$ ) viene dada por la raíz cuadrada de  $N_{obs}$ .

Para el cálculo del número de sucesos  $N_{obs}$  en función del tiempo se van a considerar dos modelos distintos de comportamiento para el fondo del experimento. En primer lugar se realizará una aproximación empleando un fondo constante en el tiempo y posteriormente se considerará una distribución más realista y acorde con los resultados obtenidos por ANAIS.

La variable  $Maxday$  representará el número de días durante los cuales se van a realizar las medidas, teniendo en cuenta que durante todo el tratamiento de los datos recogidos se trabajará

con bins de 10 días, tal y como se ha mencionado anteriormente. Por simplicidad se van a fijar periodos de meses completos como unidades temporales, considerando todos los meses iguales y formados por 30,416 días.

En la sección 3 se ha mencionado que el tiempo durante el cual se toman datos es una fracción del tiempo real y en concreto para tres años de medida se han estado tomando datos de forma activa únicamente el 92 % del tiempo. En la simulación se considera, en primer lugar, que este porcentaje de tiempo útil para el análisis de la modulación anual es constante en el tiempo. En esa misma sección se ha introducido a su vez la eficiencia de detección promedio  $\epsilon$ , cuyos valores experimentales en ambos rangos de energía se muestran en la tabla (1) y que también se considera constante en el tiempo en esta simulación por el momento.

Para cada pseudo-experimento generado por Monte Carlo se buscará la posible presencia de una modulación anual ajustando la distribución a una función:

$$R(t) = R_0 + S_m \cdot \cos(\omega \cdot (t + \phi)) \quad (3)$$

Siendo en esta función  $R_0$  el valor promedio del ritmo de detección de sucesos,  $S_m$  la amplitud de la modulación,  $\omega = \frac{2\pi}{365} = 0,0172 \text{ rad/d}$  correspondiente a un periodo de un año, y  $\phi = 153 \text{ d}$  la fase que corresponde al máximo el 2 de junio tomando  $t=0$  el 1 de enero.

Realizando el ajuste de los eventos obtenidos a la función de la ecuación (3) se obtienen los valores del ritmo  $R_0$  y de la amplitud de modulación  $S_m$  al igual que sus incertidumbres tal y como se muestra en la figura 4 para un pseudo-experimento concreto:

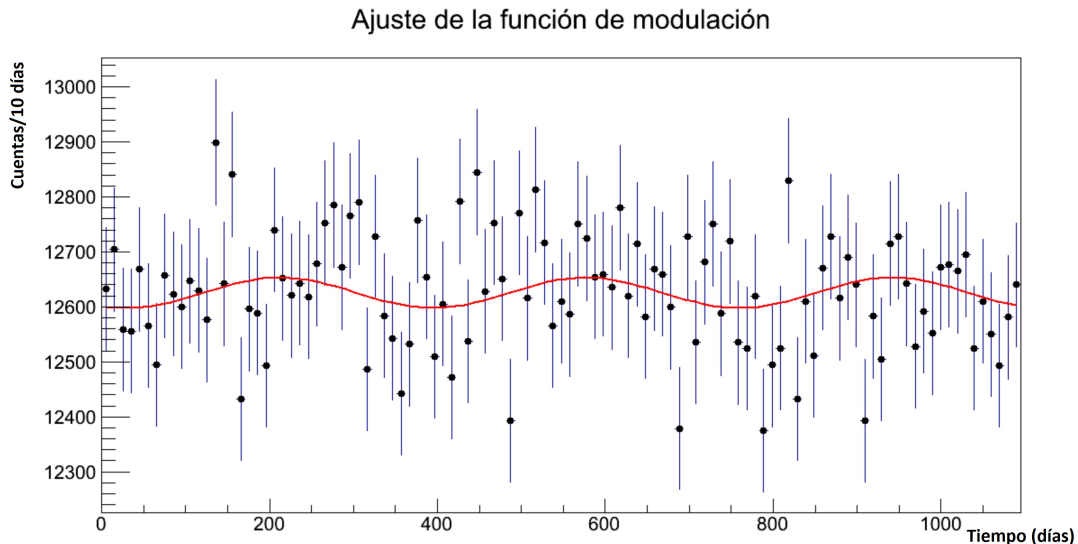


Figura 4: Ajuste de los eventos de un pseudo-experimento a la función de la modulación (3) empleando el modelo de fondo constante en el tiempo para [2-6] keV para el cual se ha obtenido una amplitud de modulación de  $S_m = -0,0032 \pm 0,0038$  cuentas/keV/kg/d siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 4.1.

El ajuste que se muestra en la figura 4 ha sido calculado empleando el modelo de fondo constante en el tiempo para 3 años con los parámetros que se explican en el subapartado (4.1). La amplitud de la modulación obtenida se da en (cuentas/10 días), por lo que es necesario realizar una normalización dividiendo por  $binday \cdot \Delta E \cdot \epsilon \cdot MT \cdot t_{vivo}$  para así obtener la amplitud de la modulación anual como (cuentas/keV/kg/d). Se deben tener en cuenta los rangos de energías en los que se trabaja [2], es decir,  $\Delta E = 5$  keV para [1-6] keV y  $\Delta E = 4$  keV para [2-6] keV.

El procedimiento consiste en ir guardando en un histograma los valores de  $S_m$  obtenidos para cada pseudo-experimento de Monte Carlo con la misma configuración de parámetros. En ausencia de modulación, la representación de este histograma debería mostrar una distribución gaussiana centrada en cero cuya desviación estándar representa la sensibilidad experimental a la modulación, suponiendo sólo las contribuciones estadísticas, es decir, la fluctuación estadística que se espera en el ritmo de detección de sucesos. Dicha desviación estándar nos proporciona una medida de la amplitud de la modulación que podría estar oculta en los datos del experimento, cuando no se observa ninguna. Por tanto, una mayor desviación estándar significa una menor sensibilidad experimental a la modulación anual.

En la figura 5 se muestra el histograma de las amplitudes de la modulación anual que se extraen de cada pseudo-experimento y su ajuste a una función gaussiana de la que se obtiene la desviación estándar:

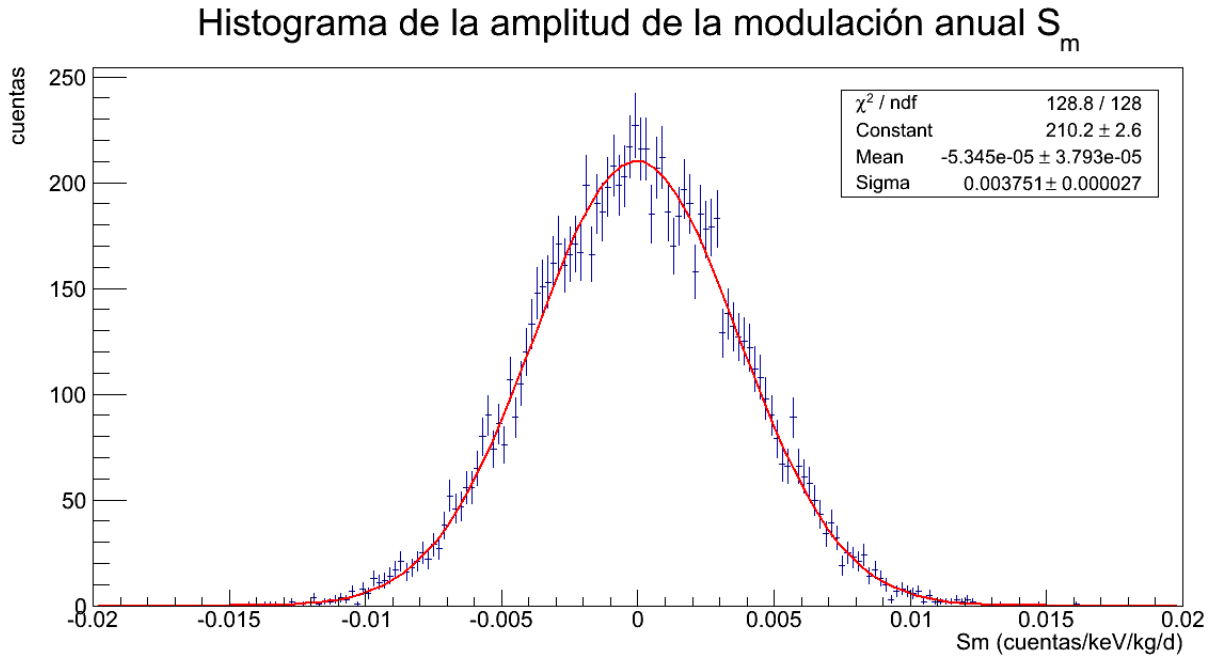


Figura 5: Histograma de la amplitud de la modulación anual  $S_m$  calculado realizando 10000 pseudo-experimentos empleando el modelo de fondo constante para 3 años de toma de datos en el rango energético de [2-6] keV.

Tras el ajuste del histograma de la figura 5 a la función gaussiana se obtiene una desviación

estándar de la amplitud de la modulación de  $\sigma_{Sm} = 3,75 \cdot 10^{-3}$  cuentas/keV/kg/d. Se observa que la gaussiana está prácticamente centrada en cero, lo cual concuerda con la hipótesis planteada de una amplitud de modulación nula. Además el ajuste a la ecuación (3) no está sesgado.

Tal y como se ha comentado anteriormente, este proceso se va a aplicar en dos escenarios distintos; en primer lugar se obtendrán estos valores considerando un fondo constante en el tiempo y posteriormente se considerará el fondo como una función exponencialmente decreciente en el tiempo, lo cual se asemeja mucho más al fondo real de ANAIS [5].

#### 4.1. Resultados para un fondo constante

En primer lugar se debe calcular el número de eventos que se producirán en cada intervalo de tiempo a estudiar, que en este caso se distribuirán aleatoriamente en el tiempo con un valor medio constante.

Es necesario tener en cuenta previamente el nivel de fondo  $B_{tot}$  (cuentas/keV/kg/d) del experimento, que en este escenario se considera constante e igual al valor promedio del fondo de ANAIS-112 durante los 3 años de toma de datos (Tabla 2) [5].

	$B_{tot}$ (cuentas/keV/kg/d)
[1-6]keV	3.605
[2-6]keV	3.145

Tabla 2: Valores de  $B_{tot}$  en ambos rangos de energía obtenidos a partir de 3 años de toma de datos de ANAIS-112 [5].

El valor de  $N_{obs}$  se calcula como:

$$N_{obs} = B_{tot} \cdot \epsilon \cdot t_{vivo} \cdot \Delta E \cdot MT \quad (4)$$

Donde  $B_{tot}$  (cuentas/keV/kg/d) es el nivel de fondo,  $\epsilon$  es la eficiencia de detección promedio (0.7026 en [1-6] keV y 0.9463 en [2-6] keV), la exposición  $MT$  se obtiene como  $MT = m_{detectores} \cdot Maxday$  (kg-d), el rango de energías  $\Delta E$  (keV) y por último la fracción de tiempo vivo  $t_{vivo} = 0,92$ , habiéndose mencionado todos estos parámetros previamente en la sección 3.

Estos eventos se distribuyen aleatoriamente en el intervalo de tiempo considerado y una vez se ha realizado el ajuste de dichos eventos a la función de modulación de la ecuación 3 se obtiene la amplitud de la modulación  $S_m$  (cuentas/10días), tal y como se muestra en la figura 4, por lo que es necesario realizar la normalización que se ha mencionado anteriormente de forma que se guardará la amplitud de la modulación como (cuentas/keV/kg/d).

Los valores de la desviación estándar de la amplitud se calcularán para tiempos de medida entre 1 mes y 5 años, con incrementos de 1 mes y se compararán con los resultados de ANAIS-

112 para 18, 24 y 36 meses. Además se realizarán los cálculos para las dos regiones energéticas de [1-6] keV y [2-6] keV.

Realizando 10000 pseudo-experimentos de Monte Carlo para cada intervalo temporal y ajustando el histograma de la amplitud de modulación a una gaussiana se obtiene la variación de la desviación estándar de la amplitud de modulación en función del tiempo de medida. En las figuras 7 y 8 se muestran las desviaciones estándar de la amplitud de la modulación anual calculada en intervalos temporales entre 1 mes y 5 años para ambos rangos energéticos.

En particular, para los periodos de medida en los que el experimento ANAIS ha presentado resultados (1.5 [7], 2 [8] y 3 años [5]) se obtienen los siguientes valores de la desviación estándar para ambos rangos de energía y se comparan con los resultados obtenidos experimentalmente por ANAIS y con las estimaciones del modelo analítico [6]:

	$\sigma_{Sm}$ (cuentas/keV/kg/d) [1 – 6] keV		
	Simulación	ANAIS-112	Modelo Analítico
<b>18 meses</b>	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
<b>24 meses</b>	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$5,40 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$
<b>36 meses</b>	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$

Tabla 3:  $\sigma_{Sm}$  calculadas para fondo constante en [1-6] keV y comparadas con los resultados de ANAIS y las estimaciones del modelo analítico.

	$\sigma_{Sm}$ (cuentas/keV/kg/d) [2 – 6] keV		
	Simulación	ANAIS-112	Modelo Analítico
<b>18 meses</b>	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$
<b>24 meses</b>	$4,65 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$
<b>36 meses</b>	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4:  $\sigma_{Sm}$  calculadas para fondo constante en [2-6] keV y comparadas con los resultados de ANAIS y las estimaciones del modelo analítico.

Se observa que los valores obtenidos a partir de la simulación se asemejan más a los obtenidos por ANAIS conforme aumenta el tiempo. Para la simulación correspondiente a 3 años, es decir, 36 meses, en el rango de [1-6] keV se obtiene una desviación estándar de la amplitud de modulación anual de  $4,25 \cdot 10^{-3}$  cuentas/keV/kg/d, y si se compara con el valor de ANAIS se obtiene una desviación entre ambas magnitudes del 3,4%. Por otra parte, el valor obtenido por la simulación para el rango de [2-6] keV es  $3,82 \cdot 10^{-3}$  cuentas/keV/kg/d, y comparándolo con el valor de ANAIS se obtiene una desviación entre ambos valores del 2%. Si se comparan con los resultados de modelo analítico, la desviación entre las magnitudes es incluso menor, siendo 2,1% en [1-6] keV y 1% en [2-6] keV.

Se puede concluir por tanto que los resultados de la simulación en ambas regiones energéticas reproducen más que razonablemente la sensibilidad del experimento ANAIS y las estimaciones correspondientes al modelo analítico en los dos rangos energéticos considerados.

## 4.2. Resultados para un fondo exponencialmente decreciente

A continuación se va a plantear un modelo de fondo más similar al registrado por ANAIS-112. En el apartado anterior se ha trabajado con una aproximación del fondo que lo supone constante en el tiempo; sin embargo, el fondo es exponencialmente decreciente en el tiempo y por tanto se espera que los eventos muestren una evolución de acuerdo con la siguiente función:

$$B(t) = R_0 \cdot \left(1 + f \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5)$$

Los valores de los parámetros  $R_0$ ,  $f$  y  $\tau$  han sido obtenidos a partir de los últimos resultados experimentales de ANAIS.

	[1-6] keV	[2-6] keV
$R_0$ (cuentas/keV/kg/d)	3.142	2.82
$f$	0.24	0.21
$\tau$ (d)	1034	821

Tabla 5: Parámetros para el fondo exponencialmente decreciente en ambos rangos energéticos obtenidos a partir de los últimos resultados experimentales de ANAIS-112 [5].

Para calcular el número de eventos que se van a simular, en primer lugar se evalúa de la ecuación (5) en el intervalo de tiempo considerado para obtener el nivel de fondo. Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, el número de eventos se calcula siguiendo la ecuación (4) en cada bin temporal y la distribución de sucesos resultante se ajustará a la función de modulación planteada en la ecuación (6), la cual tiene un término del fondo dependiente con el tiempo (ecuación 5) y otro término que depende de la modulación, para así obtener la amplitud de modulación anual  $S_m$ :

$$R(t) = R_0 \left(1 + f \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + S_m \cdot \cos(\omega \cdot (t + \phi)) \quad (6)$$

En la figura 6 se muestra dicho ajuste para un pseudo-experimento:

Ajuste de la función de modulación

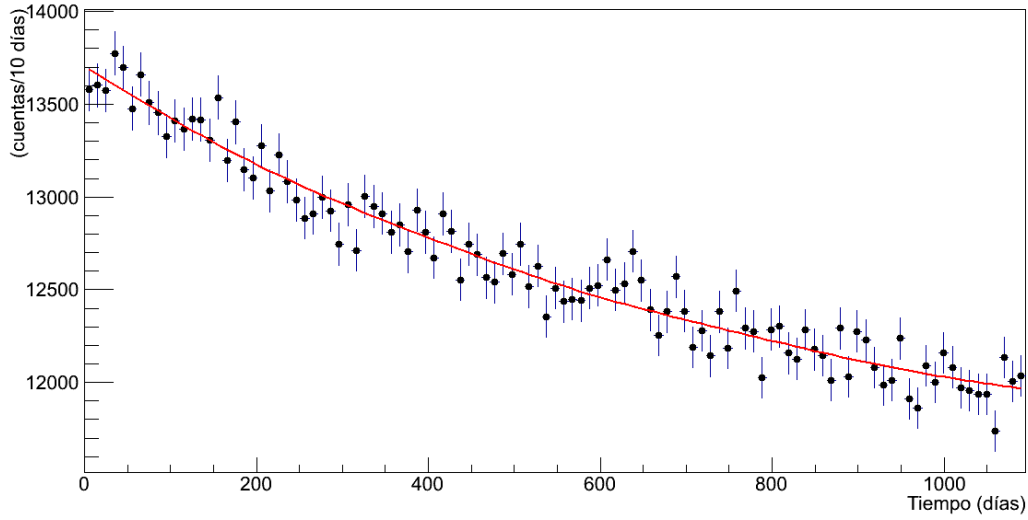


Figura 6: Ajuste de los eventos de un pseudo-experimento a la función de la modulación (6) empleando el modelo de fondo exponencialmente decreciente en el tiempo para el rango energético de [2-6] keV y 3 años de medidas para el cual se ha obtenido una amplitud de modulación  $S_m = -0,0012 \pm 0,0038$  cuentas/keV/kg/d.

Realizando 10000 pseudo-experimentos de Monte Carlo en cada intervalo temporal para ambos rangos de energías, ajustando la distribución de eventos en cada pseudo-experimento a la ecuación (6) para obtener su amplitud de la modulación  $S_m$ , realizando la normalización que se ha comentado en la introducción del apartado (4), y posteriormente ajustando el histograma de las amplitudes de la modulación anual a una función gaussiana se han obtenido los siguientes resultados para la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual  $S_m$ :

	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d) [1-6] keV		
	Simulación	ANAIS-112	Modelo Analítico
<b>18 meses</b>	$6,70 \cdot 10^{-3}$	$6,30 \cdot 10^{-3}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
<b>24 meses</b>	$5,51 \cdot 10^{-3}$	$5,40 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-3}$
<b>36 meses</b>	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$

Tabla 6:  $\sigma_{S_m}$  para fondo exponencialmente decreciente en [1-6] keV.

	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d) [2-6] keV		
	Simulación	ANAIS-112	Modelo Analítico
<b>18 meses</b>	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$5,80 \cdot 10^{-3}$	$5,65 \cdot 10^{-3}$
<b>24 meses</b>	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$
<b>36 meses</b>	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$

Tabla 7:  $\sigma_{S_m}$  (cuentas/kg/keV/d) para fondo exponencialmente decreciente en [2-6] keV.

Se observa que los resultados obtenidos se asemejan bastante a los datos de ANAIS en ambos rangos energéticos. En el caso de 3 años, es decir, 36 meses, las desviaciones de las amplitudes de modulación obtenidas son  $4,26 \cdot 10^{-3}$  cuentas/keV/kg/d y  $3,85 \cdot 10^{-3}$  cuentas/keV/kg/d para [1-6] keV y [2-6] keV respectivamente. Estos valores muestran una desviación del 0,38 % en el primer caso y 1,28 % en el segundo. Si se comparan con los resultados obtenidos según el modelo analítico de estimación de la sensibilidad [5], se obtiene una desviación entre ambas magnitudes de 4,8 % para [1-6] keV y 0,26 % [2-6] keV. Por tanto, los resultados de la simulación en ambos intervalos energéticos reproducen suficientemente bien la sensibilidad de ANAIS y las estimaciones del modelo analítico.

### 4.3. Comparación de los resultados para ambos modelos de fondo

Teniendo en cuenta ambos modelos para tratar el fondo y comparando los valores obtenidos (Tabla 8) se determina que aunque la diferencia entre ambos es muy pequeña en ambas regiones energéticas, se obtienen sistemáticamente peores sensibilidades con el fondo exponencialmente decreciente que con el fondo constante. Por otra parte, el fondo exponencialmente decreciente reproduce mejor los datos experimentales.

	$\sigma_{Sm}$ [1-6] keV		$\sigma_{Sm}$ [2-6] keV	
	Fondo Plano	Fondo Decreciente	Fondo Plano	Fondo Decreciente
<b>18 meses</b>	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$
<b>24 meses</b>	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$5,51 \cdot 10^{-3}$	$4,65 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$
<b>36 meses</b>	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$

Tabla 8: Resultados obtenidos para la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual (cuentas/keV/kg/d) para fondo constante y fondo exponencialmente decreciente en las dos regiones energéticas consideradas.

En las figuras 7 y 8 se representan los resultados obtenidos para ambos modelos del fondo en los dos rangos de energías junto con los datos experimentales obtenidos por ANAIS:

### Evolución temporal de $\sigma_{Sm}$ para [2-6] keV

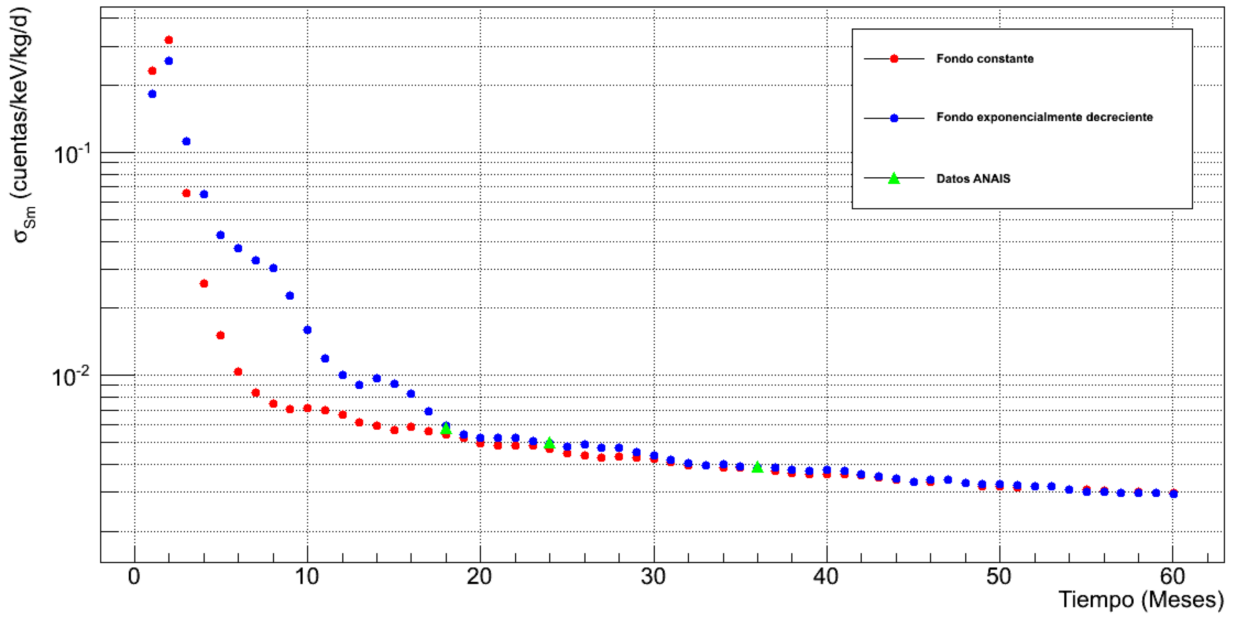


Figura 7: Estimación de la evolución en el tiempo de la sensibilidad de ANAIS-112 a la modulación anual en [2-6] keV para un tiempo máximo de toma de datos de 5 años. Se muestran asimismo los resultados obtenidos en el experimento ANAIS-112 en los análisis realizados con 1.5, 2 y 3 años de datos [7], [8], [5].

### Evolución temporal de $\sigma_{Sm}$ para [1-6] keV

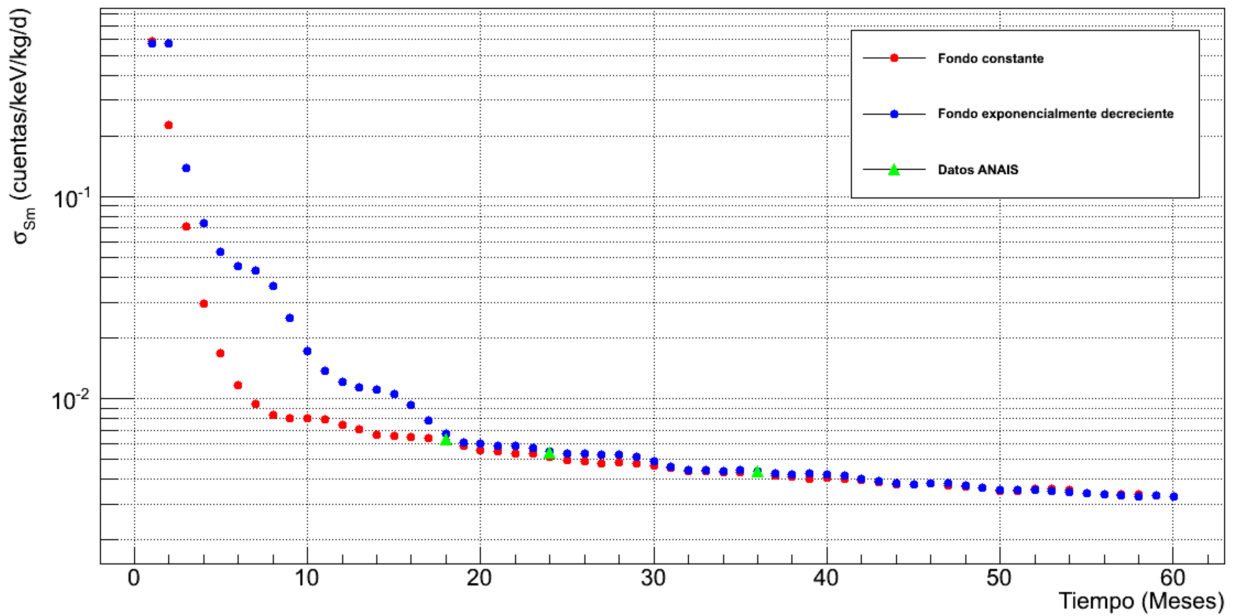


Figura 8: Estimación de la evolución en el tiempo de la sensibilidad de ANAIS-112 a la modulación anual en [1-6] keV para un tiempo máximo de toma de datos de 5 años. Se muestran asimismo los resultados obtenidos en el experimento ANAIS-112 en los análisis realizados con 1.5, 2 y 3 años de datos [7], [8], [5].

Estas gráficas han sido representadas empleando escala logarítmica en el eje Y de forma que se puede apreciar mejor la evolución en el tiempo de la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual, ya que disminuye al menos dos órdenes de magnitud. Se observa una clara mejora de la sensibilidad de ANAIS a la modulación anual con respecto del tiempo con ambos modelos de fondo, aunque la mejora es mucho más rápida en caso de que el fondo sea constante. Para tiempos bajos las diferencias entre ambos modelos de fondo son considerables, pero al ir aumentando el tiempo durante el cual se realiza la toma de datos estas discrepancias entre los modelos van disminuyendo y se puede concluir que el efecto de considerar un fondo plano o exponencialmente decreciente no resulta un factor muy relevante para la estimación de la sensibilidad en el análisis de la modulación anual para tiempos de medida superiores a dos años.

Las estimaciones de la sensibilidad de ANAIS a la modulación anual que han sido obtenidas en este trabajo reproducen razonablemente los resultados experimentales de dicho experimento. En la tabla 9 se muestran los valores de la amplitud de modulación anual medidos por DAMA/LIBRA tras más de 20 años de toma de datos. Se observa que los valores medidos por DAMA/LIBRA son mayores que la sensibilidad estimada para ANAIS. Para comparar un experimento como ANAIS, que no observa ninguna modulación en sus datos, con DAMA/LIBRA, que observa una modulación clara, se puede calcular el número de veces mayor que es la amplitud de la modulación observada por DAMA/LIBRA con respecto a la amplitud de la modulación a la que es sensible ANAIS. Este número se puede interpretar como el nivel de confianza, C.L. (en  $\sigma$ ) de la incompatibilidad entre ambos experimentos. La señal de DAMA/LIBRA corresponde a 2.5 veces la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual de ANAIS-112 en la región de [1-6] keV y 2.7 veces en la región de [2-6] keV para tres años de datos, por lo que se puede concluir que la sensibilidad actual del experimento a la señal de DAMA/LIBRA es de  $2.5\sigma$  C.L. en [1-6] keV y  $2.7\sigma$  C.L. en [2-6] keV.

	$S_m$ (cuentas/keV/kg/d)
[1-6] keV	$10,5 \cdot 10^{-3} \pm 1,1 \cdot 10^{-3}$
[2-6] keV	$10,2 \cdot 10^{-3} \pm 0,8 \cdot 10^{-3}$

Tabla 9: Amplitud de la modulación anual  $S_m$  observada por el experimento de DAMA/LIBRA [9].

Dado que los resultados de la simulación reproducen satisfactoriamente los resultados obtenidos por el experimento ANAIS, se emplean estas simulaciones para estimar la sensibilidad a la modulación anual del experimento en 5 y 10 años de medida con similares condiciones experimentales. Estos resultados se muestran en la Tabla 10.

	[1-6] keV		[2-6] keV	
	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d)	C.L.( $\sigma$ )	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d)	C.L.( $\sigma$ )
<b>Fondo constante</b>	$3,27 \cdot 10^{-3}$	3,21	$2,97 \cdot 10^{-3}$	3,43
<b>Fondo decreciente</b>	$3,25 \cdot 10^{-3}$	3,23	$2,93 \cdot 10^{-3}$	3,48

Tabla 10: Estimaciones de la sensibilidad a la amplitud de la modulación anual (cuentas/keV/kg/d) de un experimento similar a ANAIS-112 en ambos rangos energéticos para 5 años de toma de datos y expresión de la señal de DAMA/LIBRA en función de dicha  $\sigma$ , que indica el nivel de confianza.

	[1-6] keV		[2-6] keV	
	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d)	C.L.( $\sigma$ )	$\sigma_{S_m}$ (cuentas/keV/kg/d)	$(S_m)_{DAMA/LIBRA}$
<b>Fondo constante</b>	$2,21 \cdot 10^{-3}$	4,75	$2,15 \cdot 10^{-3}$	4,74

Tabla 11: Estimaciones de la sensibilidad a la amplitud de la modulación anual (cuentas/keV/kg/d) de un experimento similar a ANAIS-112 en ambos rangos energéticos para 10 años de toma de datos y expresión de la señal de DAMA/LIBRA en función de dicha  $\sigma$ , que indica el nivel de confianza.

Los valores obtenidos tras 5 años de toma de datos son muy similares para ambos modelos de fondo, por lo que sólo se realiza la estimación de la desviación estándar tras 10 años de medidas empleando el modelo de fondo constante en el tiempo. Para 5 y 10 años la desviación estándar de la amplitud de modulación anual sigue disminuyendo, tal y como se observa. Teniendo en cuenta que los resultados calculados anteriormente para 18 meses, 2 años y 3 años son muy similares a los obtenidos por ANAIS, estos valores obtenidos para 5 y 10 años son una buena estimación de los valores reales que ANAIS podrá alcanzar en un futuro. Si se expresa la señal de DAMA/LIBRA en función del número de desviaciones estándar de la amplitud de la modulación anual que se derivan de estos cálculos, se obtiene para 5 años en el caso de [1-6] keV una sensibilidad de  $3,21\sigma$  para el fondo constante y  $3,23\sigma$  para el fondo exponencialmente decreciente. En el caso de [2-6] keV, las sensibilidades que se obtienen son de  $3,43\sigma$  para el modelo de fondo constante en el tiempo y  $3,48\sigma$  para el modelo de fondo exponencialmente decreciente. Para 10 años, los valores obtenidos para el fondo constante en el tiempo son  $4,75\sigma$  en [1-6] keV y  $4,74\sigma$  en [2-6] keV. Por lo tanto, el experimento ANAIS-112 podrá poner a prueba el resultado de DAMA/LIBRA con casi  $5\sigma$  de sensibilidad en 10 años de medida.

## 5. Estudio de algunos efectos sistemáticos

Reproduciendo el procedimiento descrito en la sección anterior se van a estudiar algunos posibles efectos sistemáticos y su influencia en el resultado de la sensibilidad del experimento ANAIS a la modulación anual. Las simulaciones anteriores han sido realizadas considerando que el porcentaje de tiempo vivo en la toma de datos del experimento es constante, al igual que la

eficiencia promedio de la detección de sucesos. Sin embargo estos parámetros no son constantes en un experimento real, por lo que se van a tener en cuenta sus dependencias con el tiempo de forma individual para ver cómo influye cada uno en los resultados finales de la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual.

### 5.1. Distribución de tiempo vivo

Hasta ahora se había considerado el porcentaje del tiempo vivo constante; sin embargo, tal y como se ha comentado, en el experimento es necesario hacer calibraciones y se pueden producir cortes de luz tanto programados, como no programados, lo cual implica que tras un periodo de toma de datos se habrán perdido un determinado número de horas o días no distribuidos de forma homogénea, durante los cuales el experimento no recoge información.

El porcentaje de tiempo vivo dependerá del intervalo de tiempo considerado, por lo que en este apartado, en lugar de considerarlo constante, se va a trabajar con un histograma que contiene el porcentaje de tiempo vivo en cada uno de los bins de 10 días con los que trabaja el proceso de Monte Carlo. Los datos que se van a emplear se han obtenido de los resultados experimentales de ANAIS; el experimento monitoriza de forma continua el tiempo vivo. La distribución día a día de los valores de tiempo vivo ha sido el punto de partida para construir el siguiente histograma, agrupando los datos cada 10 días. En la figura 9 se muestra el histograma de la fracción de tiempo vivo para los 3 años durante los cuales el experimento ha estado en activo:

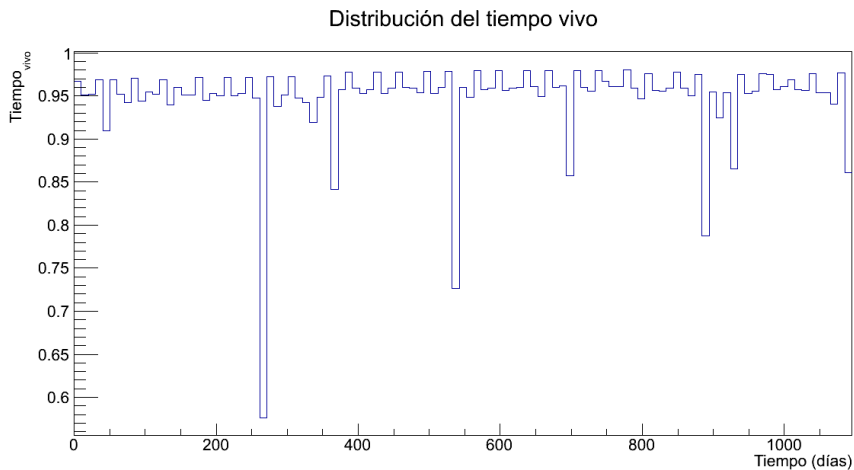


Figura 9: Histograma del tiempo vivo en ANAIS-112 para 3 años de toma de datos para un bineado de 10 días.

Es llamativo el hecho de que cada 100 o 200 días se produce un periodo de tiempo en el cual el porcentaje de tiempo vivo disminuye, siendo éste destacable en torno al día 260 de la toma de datos, cuando el porcentaje fue inferior al 60%. Sin embargo, no se trata de ningún

efecto periódico, sino de acontecimientos fortuitos que han implicado la "pérdida" de varios días de datos, en general por problemas con el suministro eléctrico en el laboratorio, el fallo de algún equipo, etc.

Se va a considerar el caso del fondo exponencialmente decreciente en el tiempo y, al igual que se ha hecho en el apartado (4.3), en primer lugar es necesario calcular el número de eventos que se producen en el intervalo temporal estudiado y cómo están distribuidos en dicho intervalo. Sin embargo, el procedimiento para hacerlo es algo distinto, puesto que ahora es necesario emplear histogramas e ir trabajando bin a bin.

Se calcula el nivel del fondo  $B_{tot}$  evaluando la ecuación (5) en cada bin temporal de 10 días y guardando dicha información en forma de histograma. Se calculará el número de eventos siguiendo la ecuación (4) mediante el producto de los histogramas de tiempo vivo y de  $B_{tot}$ , por lo que se obtendrá un histograma con la distribución de los eventos en función del tiempo. En los procedimientos llevados a cabo en el apartado (4) se ha realizado la normalización después de haber realizado el ajuste de la distribución de eventos a la función (3); sin embargo, en este caso, para realizar correctamente el tratamiento estadístico de los errores, es necesario hacer en primer lugar la normalización del histograma de los eventos comentada en la sección (4) y posteriormente se procederá a hacer el ajuste a la función de la modulación anual (6) para determinar la amplitud de la modulación anual  $S_m$ .

Introduciendo un proceso de Monte-Carlo en el cual se realizan 10000 pseudo-experimentos se construye un histograma de la amplitud de la modulación anual y se realiza su ajuste a una función gaussiana obteniendo finalmente la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual. Se muestran en la tabla 12 los resultados obtenidos para la desviación estándar de la amplitud de la modulación tras 3 años de toma de datos y se comparan con los obtenidos considerando el porcentaje del tiempo vivo constante y con los resultados experimentales de ANAIS:

	$\sigma_{S_m}$ [1-6] keV	$\sigma_{S_m}$ [2-6] keV
<b>Tiempo vivo "experimental"</b>	$4,24 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-3}$
<b>Tiempo vivo constante</b>	$4,26 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-3}$
<b>ANAIS-112</b>	$4,40 \cdot 10^{-3}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$

Tabla 12: Desviación estándar de la amplitud de modulación (cuentas/keV/kg/d) para 3 años de toma de datos teniendo en cuenta el tiempo vivo experimental y comparando los resultados para la hipótesis de tiempo vivo constante.

Los resultados obtenidos considerando la distribución del tiempo vivo durante el periodo de medida apenas difieren de los obtenidos considerando el porcentaje del tiempo vivo constante. Por tanto se puede concluir que la distribución de tiempo vivo "no constante" que afecta al experimento ANAIS no supone una reducción de la sensibilidad del experimento a la modulación

anual, y que de mantenerse las condiciones de medida en los próximos años, las estimaciones de sensibilidad realizadas con el modelo de tiempo vivo constante deberían ser válidas.

## 5.2. Eficiencia de detección del experimento

En la sección (3) se ha definido la eficiencia de detección de los sucesos  $\epsilon$  y se ha mostrado cómo ésta es una función de la energía [2]. A partir de los datos experimentales de ANAIS se han determinado los valores en promedio de la eficiencia de detección en ambos rangos de energía. En el rango de [2-6] keV el error sistemático es prácticamente despreciable, mientras que en el rango [1-6] keV el error sistemático es del orden del 2% o 3% [6], lo cual puede suponer una reducción en la sensibilidad.

En este último apartado se va a estudiar la influencia de la eficiencia, su error sistemático y su posible variación a lo largo del periodo de medida del experimento en el cálculo de la sensibilidad de ANAIS a la modulación anual. Lo haremos únicamente en el intervalo [1-6] keV, ya que de [2-6] keV la incertidumbre sistemática calculada es despreciable. Para llevar esto a cabo se va a considerar la eficiencia como una variable aleatoria distribuida en torno a su valor promedio con desviaciones estándar de distinta magnitud; en el caso de los errores sistemáticos determinados en el análisis de ANAIS-112 podrían ser del 2-3%, como se ha comentado. Empleando el modelo de fondo exponencialmente decreciente en el tiempo, en primer lugar se construye un histograma de las eficiencias promedio durante 3 años de toma de datos. El valor de la eficiencia en cada bin del histograma se calcula generando un número aleatorio distribuido según una gaussiana centrada en el valor promedio de la eficiencia y con una desviación estándar específica.

En la figura 10 se muestra el histograma de la eficiencia de detección para [1-6] keV calculado empleando una desviación estándar de la eficiencia del 1%:

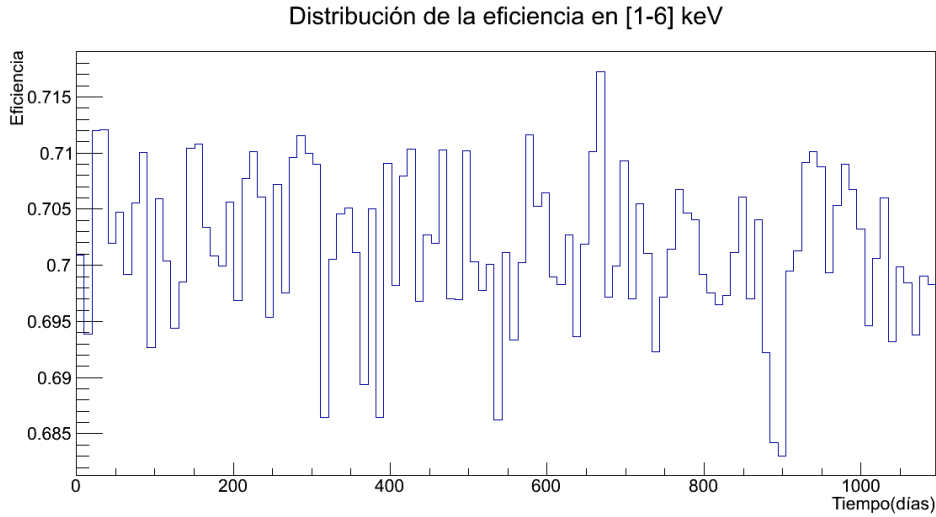


Figura 10: Histograma de la eficiencia de detección en [1-6] keV calculado empleando una desviación estándar de la eficiencia de 1% para 3 años de medidas

El procedimiento es el mismo que el seguido en el apartado anterior 5.1 con el histograma del tiempo vivo. Realizando un proceso de Monte Carlo de 10000 pseudo-experimentos se obtienen los resultados para la desviación estándar de la amplitud de la modulación empleando distintas desviaciones estándar de la eficiencia  $\sigma_\epsilon$  que se muestran en la Tabla 13.

$\sigma_\epsilon$ (%)	$\sigma_{Sm}$ (cuentas/keV/kg/d)
0	$4,20 \cdot 10^{-3}$
0.1	$4,24 \cdot 10^{-3}$
1.0	$4,25 \cdot 10^{-3}$
10.0	$4,28 \cdot 10^{-3}$
20.0	$4,48 \cdot 10^{-3}$

Tabla 13: Desviación estándar de la amplitud de la modulación anual para 3 años de medidas considerando distintas desviaciones estándar de la eficiencia  $\sigma_\epsilon$ .

En la figura 11 se representan las desviaciones estándar de la amplitud de la modulación anual en función de las desviaciones estándar de la eficiencia  $\epsilon$ :

Evolución de  $\sigma_{Sm}$  frente a la desviación estándar de la eficiencia

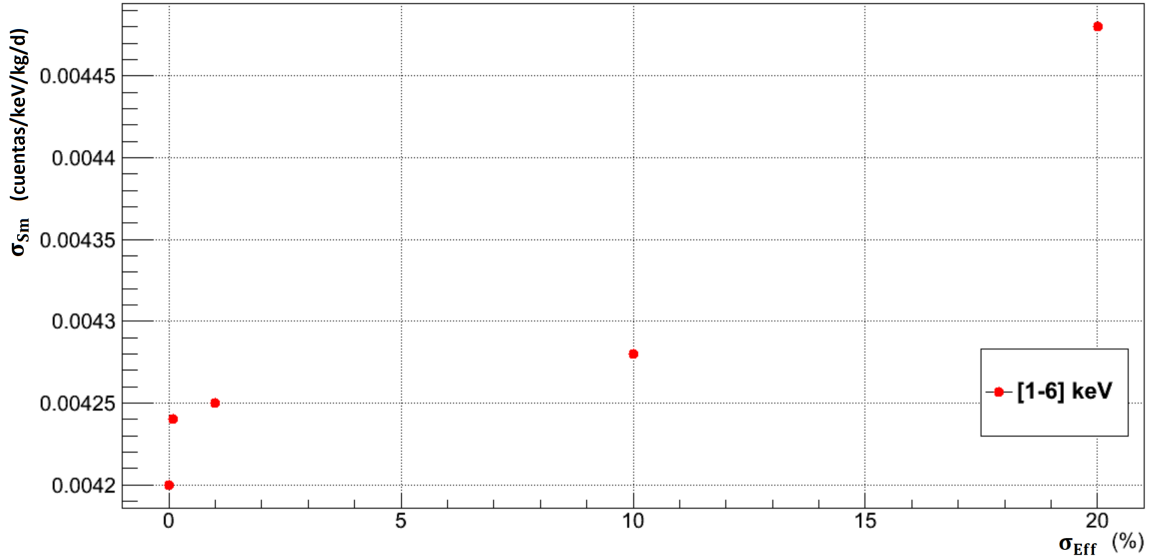


Figura 11: Desviación estándar de la amplitud de la modulación anual frente a la desviación estándar de  $\epsilon$  para 3 años de medidas.

Tal y como se observa, al aumentar la variación aleatoria que se le permite a la eficiencia (medida por la desviación estándar de la eficiencia  $\sigma_\epsilon$ ), la desviación estándar de la amplitud de la modulación anual  $\sigma_{Sm}$  aumenta considerablemente. El efecto de la eficiencia es por tanto relevante, aunque dado que no se espera que fluctúe más allá de un 3%, el empeoramiento de la sensibilidad que se tendría en ANAIS-112 no es demasiado importante. Sin embargo, si las fluctuaciones superan el 10% el efecto sería claramente apreciable y debería haberse observado en los resultados obtenidos para 3 años de toma de datos.

## 6. Conclusiones

El primer objetivo de este trabajo era realizar el estudio de la sensibilidad de un experimento similar a ANAIS-112 mediante un proceso de Monte Carlo. Los cálculos se han realizado empleando dos modelos de fondo distintos; en primer lugar se ha supuesto una aproximación con un fondo constante en el tiempo y posteriormente se emplea un fondo dependiente del tiempo más similar al observado por ANAIS. Comparando ambos modelos de fondo (Tabla 8) se ha determinado que empleando el modelo exponencialmente decreciente se obtiene peor sensibilidad a la modulación anual para las estimaciones realizadas en tiempos cortos si se comparan con las obtenidas para el fondo constante, aunque la evolución temporal indica que el modelo exponencialmente decreciente obtiene mejor sensibilidad para tiempos mayores. Aún así, para tiempos de medida superiores a 2 años las diferencias entre ambos modelos de fondo son pequeñas y se puede concluir que en estas condiciones los dos modelos de fondo son equivalentes

para realizar estimaciones de la sensibilidad de ANAIS-112 a la modulación anual. Los valores obtenidos para el fondo constante (Tablas 4 y 5) y para el fondo exponencialmente decreciente (Tablas 6 y 7) se comparan con los resultados de ANAIS-112 y con las estimaciones del modelo analítico, concluyendo que ambos modelos de fondo en ambas regiones energéticas reproducen más que razonablemente la sensibilidad de ANAIS a la modulación anual y son muy similares a las estimaciones realizadas por el modelo analítico.

Como la simulación desarrollada en este trabajo reproduce satisfactoriamente los resultados de ANAIS, se puede emplear para realizar estimaciones de los valores de la sensibilidad del experimento a la modulación anual en los próximos años. En concreto se muestran en la Tabla 10 las estimaciones realizadas para 5 años de medidas empleando ambos modelos de fondo. Dado que los resultados para el fondo constante y el fondo exponencialmente decreciente difieren mínimamente, se realizan las estimaciones de la sensibilidad para un periodo de tiempo de 10 años empleando el modelo de fondo constante (Tabla 11). Así, expresando la señal de DAMA/LIBRA en función del número de desviaciones estándar de la amplitud de la modulación anual que observaría ANAIS se obtiene que en ambos rangos de energías y para ambos modelos de fondo ANAIS logrará una sensibilidad a la modulación anual observada por DAMA/LIBRA superior a 3 y a  $4,7\sigma$  en 5 y 10 años respectivamente.

Respecto al estudio de algunos efectos sistemáticos se han llevado a cabo dos análisis. En las estimaciones anteriormente calculadas se había considerado el tiempo vivo constante; sin embargo, en el experimento real el tiempo vivo es distinto cada día, por lo que se estudia la influencia de la distribución del tiempo vivo en la simulación empleada para calcular la sensibilidad del experimento a la modulación anual. Se ha concluido que la consideración de la distribución de tiempo vivo que se da en el experimento ANAIS no supone una disminución de la sensibilidad, por lo que las estimaciones realizadas anteriormente empleando el tiempo vivo constante seguirán siendo válidas.

Por último se ha estudiado la influencia de la desviación estándar de la eficiencia en el cálculo de la sensibilidad del experimento. Dado que en el rango de [2-6] keV el error sistemático de la eficiencia es prácticamente despreciable se ha procedido a realizar este estudio únicamente en el rango energético de [1-6] keV. Empleando distintos valores de la desviación estándar de la eficiencia se determina una fluctuación aleatoria en la eficiencia de detección de ANAIS puede afectar a la sensibilidad del experimento a la modulación anual. Para desviaciones estándar de la eficiencia pequeñas el efecto es imperceptible; sin embargo, para fluctuaciones mayores del 10% la influencia sí es relevante y debería haberse observado su contribución en los resultados de ANAIS. Al no ser así, se puede considerar que la eficiencia de ANAIS en el rango de [1-6] keV no fluctúa aleatoriamente de forma importante en torno a su valor promedio y las estimaciones de sensibilidad realizadas considerando una eficiencia de detección constante son válidas.

En conclusión, en este trabajo se ha desarrollado una simulación Monte Carlo que permite estimar la sensibilidad de un experimento de detección directa de materia oscura a la modulación anual. Esta simulación está basada en parámetros experimentales como la distribución del tiempo vivo del experimento, la eficiencia de selección de sucesos y el fondo del experimento en la región de interés. Se han considerado dos formas de modelizar el fondo, un modelo de fondo constante y otro modelo de fondo exponencialmente decreciente en el tiempo, y se han realizado dos análisis a dos de los posibles efectos sistemáticos, el tiempo vivo y la eficiencia de detección del experimento. Todo este procedimiento se ha aplicado a un experimento concreto, ANAIS-112, comprobando que esta simulación reproduce satisfactoriamente los resultados del análisis de modulación que se ha llevado a cabo con los datos de ANAIS correspondientes a 1,5, 2 y 3 años. Se ha determinado que la sensibilidad de ANAIS-112 a la modulación anual mejora en el tiempo, por lo que se ha empleado esta simulación para estimar la sensibilidad de ANAIS-112 a la modulación anual observada por DAMA/LIBRA tras 5 y 10 años de datos, confirmando que ANAIS-112 alcanzará  $3\sigma$  C.L. en 5 años, y casi  $5\sigma$  C.L. en un periodo de medida de 10 años. Según estas estimaciones, la amplitud de modulación anual observada por el experimento DAMA/LIBRA es mayor que la modulación que podría estar oculta en los datos de ANAIS-112.

## Referencias

- [1] P.A. ZYLAE ET AL.(PARTICLE DATA GROUP), *Cosmological Parameters*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 083C01
- [2] P.A. ZYLAE ET AL.(PARTICLE DATA GROUP)*Dark matter*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2020**, 083C01
- [3] JULIEN BILLARD, *et al.*, *Direct Detection of Dark Matter – APPEC Committee Report*, [arXiv:2104.07634v1](https://arxiv.org/abs/2104.07634v1) [hep-ex]
- [4] <https://medium.com/starts-with-a-bang/ask-ethan-37-the-earths-motion-through-the-galaxy-a4787fd46d4b>
- [5] J. AMARÉ *et al.*, *Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112*, *Phys. Rev.* **103**, 102005 (2021)
- [6] I. COARASA *et al.*, *ANAIS-112 sensitivity in the search for dark matter annual modulation*, *Eur. Phys. J. C* (2019) 79:233
- [7] J. AMARÉ *et al.**Phys. Rev. Lett.* 123, 031301 (2019)
- [8] J. AMARÉ *et al.*, *Journal of Physics: Conference Series 1468*, **(2020) 012014**
- [9] R. BERNABEI, P. BELLI, A. BUSSOLOTTI ET AL.*Progress in Particle and Nuclear Physics*, 114 (2020) 103810