



**Universidad Zaragoza**

TRABAJO FIN DE GRADO

---

ANÁLISIS DE DATOS DEL EXPERIMENTO  
ANAIIS—112 CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN  
DE DATOS MEJORADO.

---

GRADO EN FÍSICA

Autor:

**Diego Miguel Pascual**

Directores:

**Dr. Iván Coarasa Casas**

**Dra. María Lucía Martínez Pérez**

Curso 2023-2024

# Índice

<b>1. Introducción.</b>	<b>3</b>
<b>2. El experimento ANAIS–112.</b>	<b>4</b>
<b>3. Nuevo sistema de adquisición de datos: ANOD.</b>	<b>5</b>
<b>4. Selección de sucesos.</b>	<b>6</b>
4.1. Variables de discriminación. . . . .	7
4.2. Selección de sucesos de centelleo en ANAIS. . . . .	7
4.2.1. Corte en PSV. . . . .	8
4.2.2. Corte en $n_0$ y $n_1$ . . . . .	8
4.2.3. Corte conjunto. . . . .	9
4.3. Selección de sucesos de centelleo en ANOD. . . . .	9
4.3.1. Análisis de pulsos de ruido electrónico y otros sucesos problemáticos. . . .	9
4.3.2. Representación $P_1^{ANOD}$ vs $\log(\mu_p^{ANOD})$ . . . . .	12
4.3.3. Corte en $\log(\mu_p^{ANOD})$ . . . . .	16
<b>5. Calibración de neutrones.</b>	<b>20</b>
<b>6. Conclusiones y líneas de mejora.</b>	<b>24</b>
<b>Referencias</b>	<b>26</b>

## 1. Introducción.

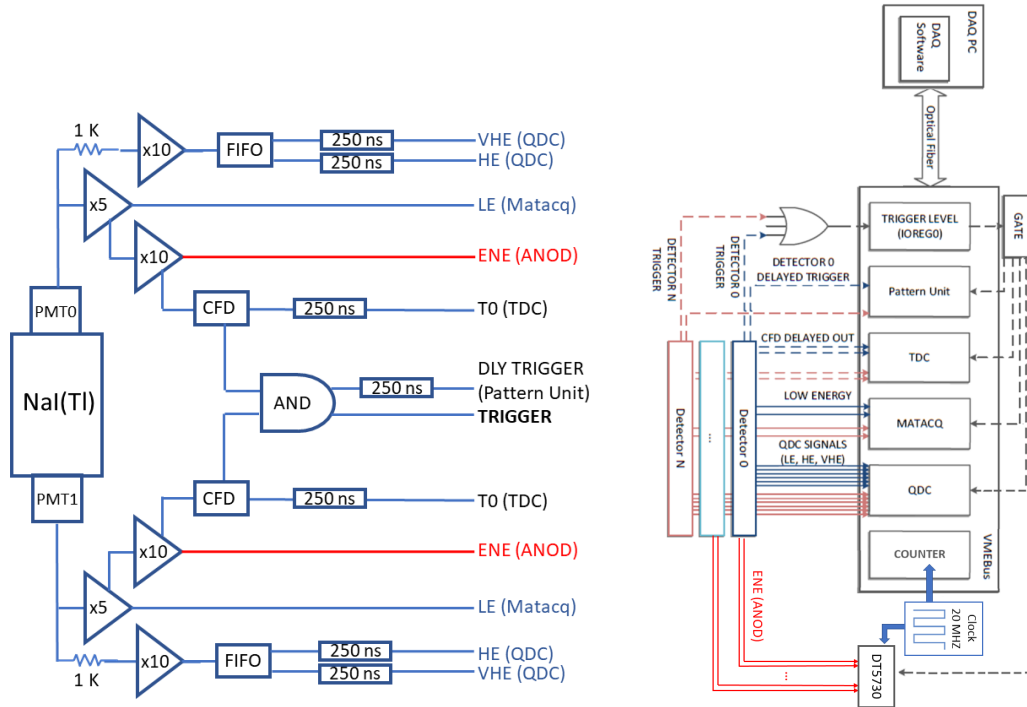
La composición del universo ha sido siempre una cuestión objeto de estudio. Actualmente, se considera que este está integrado, en un 5 %, por materia ordinaria y, en un 95 %, por energía y materia oscuras [1], pues existen una serie de fenómenos físicos que no logran ser explicados teniendo en cuenta, únicamente, la materia visible. No obstante, la Materia Oscura sigue constituyendo uno de los principales problemas abiertos de la física fundamental. De hecho, son innumerables las teorías y, consiguientemente, experimentos, que han tratado (y tratan) de caracterizar o de ofrecer una explicación para la existencia de este tipo de materia. Uno de los candidatos propuestos son los denominados WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), es decir, partículas más allá del Modelo Estándar que se caracterizan por ser estables y neutras, por tener masas del orden de los  $\text{GeV}/c^2$  o los  $\text{TeV}/c^2$  y por interactuar en la escala de las interacciones débiles. Esto hace, por tanto, que la detección de este tipo de partículas sea considerablemente complicado. Concretamente, se espera que los WIMPs interactúen preferentemente con los núcleos del detector, produciendo retrocesos nucleares de energías menores que 100 keV [2, 3].

Durante más de 20 años, el experimento DAMA/LIBRA, situado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (Italia) y que utiliza 250 kg de NaI(Tl), sugiere haber observado una señal compatible con la existencia de materia oscura: la modulación anual del ritmo de detección a baja energía (1-6 keV) [4]. Esto reside en que, debido a la traslación de la Tierra en torno al Sol, se esperaría que el ritmo de interacción entre los WIMPs, distribuidos en un halo en torno a la Vía Láctea, y los núcleos de los átomos que constituyen los detectores, experimentase una variación anual en la región de baja energía. Por otro lado, sin embargo, existen otros experimentos que han descartado esta señal, pero que, al utilizar distintos blancos, requieren de la asunción de distintas hipótesis sobre los modelos de interacción entre los WIMPs y los núcleos así como sobre la distribución de velocidades de los WIMPs en el halo galáctico, para poder llevar a cabo una correcta comparación. De esta manera, ANAIS-112 surge como un experimento de detección de Materia Oscura cuyo objetivo es el de tratar de contrastar de forma directa, empleando la misma técnica de detección y el mismo material blanco (NaI(Tl)), los resultados obtenidos por DAMA/LIBRA.

ANAIS-112 lleva tomando datos desde 2017 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC) con un sistema de adquisición de datos (DAQ) que presenta algunas limitaciones a la hora de distinguir los sucesos de centelleo de muy baja energía de ciertos sucesos producidos por otros mecanismos de emisión de luz [5]. En el último año, se ha instalado un nuevo sistema de adquisición sin tiempo muerto (ANOD: **ANAIS No Dead-time**) con potencial para mejorar esta discriminación de sucesos. Este trabajo se centrará en el análisis de los datos registrados por este nuevo sistema de adquisición y en el desarrollo de protocolos de selección de sucesos de centelleo basados en variables definidas a partir de la forma de los pulsos registrados.

## 2. El experimento ANAIS–112.

El experimento ANAIS–112 está constituido por nueve cristales centelleadores cilíndricos de NaI(Tl) (tiempo de centelleo  $\sim 230$  ns) de 12.5 kg cada uno. Estos cristales están dispuestos de forma matricial en el interior de un sistema de blindaje constituido por 10 cm de plomo romano, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja anti-Radón, en la que se inyecta un flujo continuo de Nitrógeno libre de Radón; y un sistema de veto de muones, el cual consiste en 16 centelleadores plásticos dispuestos alrededor. Todo ello se encuentra rodeado por un moderador de neutrones, integrado por tanques de agua y bloques de polietileno de unos 40 cm de espesor, y está situado bajo 800 m de roca, lo que constituye un blindaje frente a la radiación cósmica equivalente a 2450 m.w.e. (metros equivalentes de agua). En lo referente a los cristales, cada uno de ellos está acoplado, mediante ventanas de cuarzo, a dos fotomultiplicadores (PMT) Hamamatsu R12669SEL2 de alta eficiencia cuántica. Cada dos semanas, gracias a que su encapsulado presenta una pequeña ventana de mylar, se lleva a cabo una calibración de 3-4 horas de duración con fuentes de  $^{109}\text{Cd}$  (energías 11.9, 22.6 y 88.0 keV). A partir del segundo año de toma de datos, se incorporó un décimo módulo sin cristal en un blindaje de plomo independiente (denominado módulo blank) para, de esta manera, poder observar y caracterizar las señales de luz generadas por el fotomultiplicador y que no están vinculadas a ningún centelleo.



**Figura 1:** Esquema de la cadena de adquisición ANAIS y ANOD (marcado en rojo) para un solo detector (izda) y para el sistema completo (dcha).

Respecto a la cadena de adquisición, la señal de cada PMT se procesa de forma independiente (ver Figura 1, panel izquierdo). Concretamente, el disparo (trigger) de cada PMT se lleva a cabo mediante un discriminador de fracción constante CFD (CAEN N843) que presenta un umbral

suficientemente bajo como para disparar de forma efectiva al nivel del fotoelectrón. De esta manera, el disparo de cada detector se realiza mediante el AND lógico de las señales de ambos PMTs con una ventana de coincidencia de 200 ns. Esto inicia el proceso de adquisición. La salida de cada PMT se divide en varias señales con diferentes ganancias para cubrir los rangos de alta y baja energía y el digitalizado es llevado a cabo por un módulo CAEN V792 convertidor de carga a digital (QDC), para la alta energía; y uno MATACQ-CAEN V1729A para la baja (ver [Figura 1](#), panel derecho). Este último efectúa un muestreo constante de la señal a una frecuencia de 2 GS/s con una resolución de 14 bits y almacena estos datos en buffers circulares de 2520 puntos que, seguidamente, serán transferidos a un ordenador. Este último proceso, así como la transferencia de los datos de los QDCs de alta energía, está regido por el OR lógico de los 9 detectores. De este modo, un suceso de ANAIS se compone de dos trazas de datos de  $1.25 \mu\text{s}$  (una por cada PMT) por cada detector que ha disparado. Asimismo, para cada uno de estos sucesos, un módulo CAEN V977 I/O Register (IOREG0) genera una ventana que inhibe la generación de nuevos disparos cuando el DAQ está ocupado en la transferencia de datos y, por tanto, no está disponible para la adquisición de nuevos sucesos. Este tiempo muerto es del orden de unos 4 ms por suceso.

### 3. Nuevo sistema de adquisición de datos: ANOD.

El DAQ de ANAIS-112 ha funcionado sin problemas durante 7 años de toma de datos. No obstante, este presenta una serie de limitaciones que dificultan entender mejor aquellos sucesos no vinculados al centelleo: el sistema presenta un tiempo muerto y el tamaño de su ventana de adquisición no permite observar las colas de los pulsos. Por ello, durante el sexto año de medidas se planteó la instalación de un sistema paralelo que no presentase dichos problemas (ANOD).

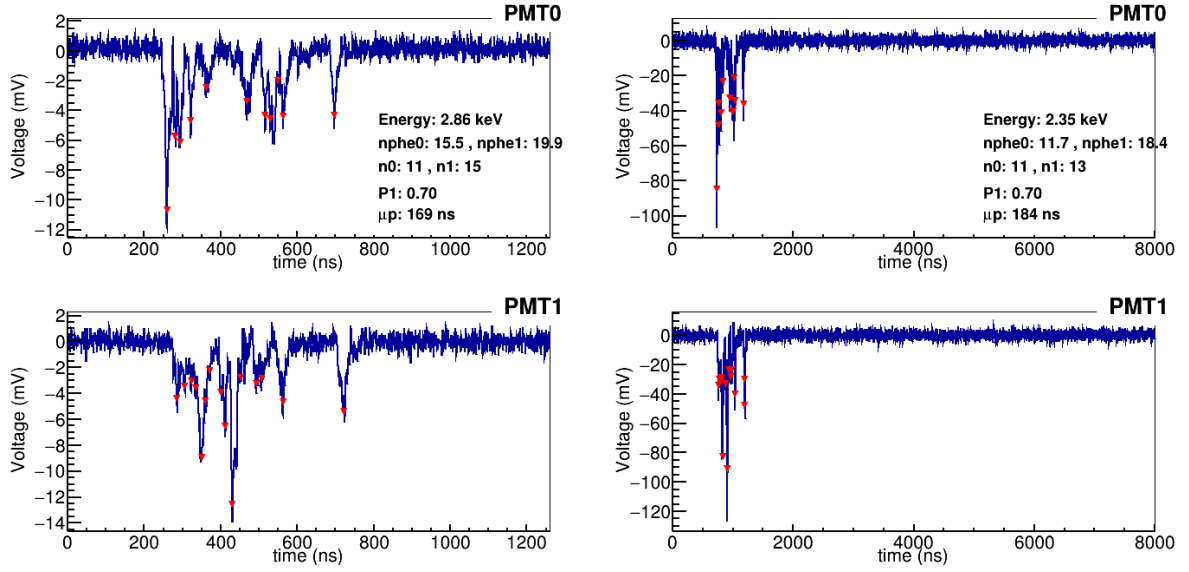
En ANOD la señal de baja energía se lleva a una digitalizadora del tipo CAEN DT5730, la cual se caracteriza por la ausencia de tiempo muerto, ya que tiene un buffer interno de 640 KS/canal que permite almacenar la información para su lectura asíncrona por parte del PC. Respecto al tamaño de la ventana, hasta ahora, tal y como se ha comentado, para cada pulso se adquirirían 2520 puntos, de los cuales 500 pertenecían a tiempos anteriores al pulso (pretrigger) y eran empleados para cálculos de la línea de base, a una frecuencia de 2 GS/s, lo que supone la adquisición de una ventana de 1260 ns (inicio del pulso más frecuente en torno a 233 ns) con una resolución temporal de 0.5 ns/punto. Con ANOD, sin embargo, se adquieren 4000 puntos (357 de pretrigger) a una frecuencia de 500 MS/s siendo, por tanto, la ventana de adquisición de 8000 ns (715 ns de pretrigger) con una resolución temporal de 2 ns/punto (Ver [Tabla 1](#)). Igualmente, se introduce también una diferencia de ganancia de, aproximadamente, un factor 10 entre ambas adquisiciones.

Cabe mencionar que la sincronización entre estas basa su funcionamiento en un reloj común. En la [Figura 2](#), se puede observar la diferencia en la adquisición del mismo suceso de centelleo mediante los dos sistemas DAQ.

Durante la realización de este trabajo, la adquisición ANOD sólo estaba disponible para los detectores 0, 2, 5 y 8 del experimento ANAIS-112.

	ANAIS	ANOD
Puntos adquiridos	2520	4000
Anchura de la ventana (ns)	1260	8000
Resolución temporal (ns)	0.5	2
Inicio del pulso más habitual (ns)	233	715
Tiempo muerto (ms)	3 – 4	—

**Tabla 1:** Comparación entre la adquisiciones ANAIS y ANOD.



**Figura 2:** Representación de un mismo suceso de centelleo adquirido con ANAIS (izda) y con ANOD (dcha). Los triángulos rojos son el resultado de un algoritmo de identificación de picos.

#### 4. Selección de sucesos.

Tal y como se ha podido entrever, en el experimento ANAIS–112 resulta de vital importancia la correcta identificación de sucesos de centelleo producidos en el cristal de NaI(Tl), especialmente en la denominada región de interés (ROI), es decir, entre 1 y 6 keV, pues es en esta región energética donde se espera que aparezcan los centelleos asociados a las interacciones con los WIMPs. Estos sucesos se caracterizan porque la evolución temporal de la luz de centelleo sigue una forma exponencial con una constante de decaimiento de aproximadamente 230 ns. En la región de baja energía, según la recogida de luz de ANAIS–112 (de aproximadamente 15 fotoelectrones por keV de energía depositada en cada módulo), pueden llegar a observarse fotoelectrones individuales. Un ejemplo de este tipo de pulsos puede verse en la [Figura 2](#). Esta ROI, no obstante, está dominada por sucesos no vinculables al centelleo. Concretamente, se distinguen tres grandes tipos: pulsos rápidos, mayoritariamente ligados a emisiones Cherenkov en los fotomultiplicadores; pulsos con centelleos demasiado largos con respecto a lo esperado según la constante de caída del NaI(Tl), probablemente relacionados con constante más lentas de NaI(Tl), con la emisión de luz en otros materiales con constantes de tiempo largas (centelleos lentos o fosforescencias) o con sucesos muy energéticos, los cuales, por su larga duración (de in-

cluso varios segundos), disparan varias veces la adquisición, de tal manera que los pulsos lentos que se observan podrían constituir parte de la cola de estos sucesos y no pulsos independientes; y pulsos asimétricos, de origen incierto, aunque vinculados, probablemente, a luz producida en un PMT, o cerca, y que llega débilmente al otro PMT, la cual podría estar originada por fosforescencias en el cristal del PMT o por destellos en los electrodos debido al alto voltaje. Resulta necesaria, por tanto, una correcta identificación de los distintos pulsos adquiridos.

#### 4.1. Variables de discriminación.

Para tratar de discriminar los pulsos por su forma se definen una serie de variables. Estas, al ser representativas de cada suceso, se calculan con el pulso suma de las señales de los dos PMTs. Las más empleadas son:

$$P_1 = \frac{\sum_{100\text{ ns}}^{600\text{ ns}} A(t)}{\sum_{0\text{ ns}}^{600\text{ ns}} A(t)}, \quad (1)$$

donde  $A(t)$  es la amplitud del pulso a un tiempo  $t$  después del trigger ( $t_0$ ) —esta variable representa el porcentaje de pulso que está en la cola ([100-600] ns) con respecto al pulso total en la ventana de [0-600] ns—;

$$P_2 = \frac{\sum_{0\text{ ns}}^{50\text{ ns}} A(t)}{\sum_{0\text{ ns}}^{600\text{ ns}} A(t)}, \quad (2)$$

que estima el porcentaje de pulso en la cabecera de este; y

$$\mu_p = \frac{\sum_i A_i t_i}{\sum_i A_i}, \quad (3)$$

donde  $i$  recorre los picos identificados en el pulso mediante un algoritmo de búsqueda de picos (ver triángulos rojos en la [Figura 2](#)). Esta variable, denominada primer momento, representa la media pesada con la amplitud de la posición temporal de los picos.

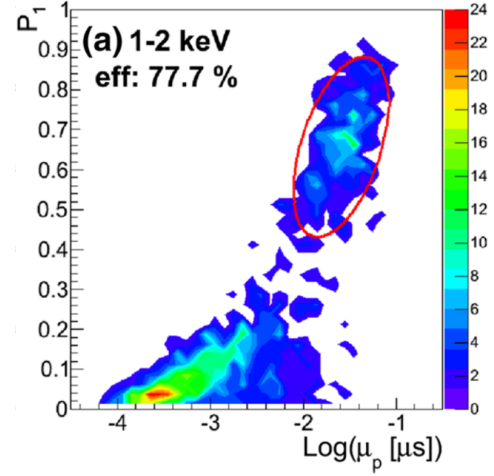
En la adquisición de ANOD,  $P_1$  y  $P_2$  permanecen prácticamente iguales, únicamente sujetas a posibles variaciones asociadas al cambio de resolución, mientras que la suma en  $i$  del primer momento ( $\mu_p$ ) pasa a extenderse a todos los picos de la ventana. Con el objetivo de facilitar la comprensión, las variables de ANOD se denominarán con el superíndice ANOD:  $P_1^{ANOD}$ ,  $P_2^{ANOD}$  y  $\mu_p^{ANOD}$ .

#### 4.2. Selección de sucesos de centelleo en ANAIS.

La selección de sucesos en la ROI para la adquisición de ANAIS se realiza, fundamentalmente, a partir de dos cortes: uno relacionado con la forma del pulso, que elimina los pulsos rápidos y algunas fosforescencias en el cristal; y otro sobre los sucesos asimétricos que aparecen en las medidas de fondo por debajo de 2 keV.

#### 4.2.1. Corte en PSV.

Respecto del primero, este se introduce partiendo de la representación de la variable  $P_1$  frente a  $\log(\mu_p)$ . Al representar esto para la denominada población de coincidencias<sup>1</sup> (Figura 3) se observa como los sucesos de centelleo se concentran en una región con forma de elipse centrada en  $(P_1 \sim 0.65, \log(\mu_p [\mu s]) \sim -1.5)$  debido a la correlación existente entre ambas variables. Así mismo, se puede apreciar también, como, en esta representación, los denominados pulsos rápidos quedan considerablemente concentrados en una región asociada a un valor de  $P_1 < 0.4$ . Esto permite definir, por tanto, una cierta variable:



**Figura 3:** Representación de  $P_1$  frente a  $\log(\mu_p [\mu s])$  para la población de coincidencias de ANAIS [5].

$$PSV = (x - \mu)^T V^{-1} (x - \mu), \quad (4)$$

donde  $x$  viene dado por:

$$x = \begin{pmatrix} P_1 \\ \log(\mu_p) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

De esta forma, asumiendo que para los sucesos de centelleo la variable  $x$  sigue una distribución Gaussiana (2D) con media  $\mu$  y matriz de covarianza  $V$ , es posible fijar un valor de PSV ( $PSV_{CUT}$ ) a partir del cual establecer un primer corte de selección de sucesos.

#### 4.2.2. Corte en $n_0$ y $n_1$ .

Si una vez fijadas estas restricciones se analizan los sucesos que pasan dicho corte para las medidas de fondo, se observa como, por debajo de los 2 keV, aparecen los denominados pulsos asimétricos. Para tratar de filtrarlos se recurre al número de picos detectados para cada una de las señales de los dos PMTs:  $n_0$  y  $n_1$  para el PMT0 y PMT1, respectivamente; pues se observa cómo estos sucesos se caracterizan por presentar una distribución muy asimétrica, con muy pocos picos en uno de los dos PMTs. Concretamente, y en base a lo que puede verse en [5] se establece como corte un número mínimo de picos (4) para cada una de las señales de los PMTs:  $n_0 > 4$  y  $n_1 > 4$ .

<sup>1</sup>Sucesos de centelleo de baja energía, correspondientes a una desexcitación atómica tras una captura electrónica de un contaminante interno ( $^{40}\text{K}$  y  $^{22}\text{Na}$ ): el núcleo hijo queda en un estado excitado y, en su desexcitación, emite un rayo gamma que alcanza otro cristal. Estos sucesos pueden ser identificados, por tanto, por coincidencias entre dos cristales.



#### 4.2.3. Corte conjunto.

La selección de sucesos en ANAIS se efectúa, por tanto, mediante los siguientes cortes:

$$Pulsos\ seleccionados \equiv \begin{cases} PSV < PSV_{CUT} = 3 \\ n_0 > 4; n_1 > 4 \end{cases} \quad (6)$$

donde la eficiencia (proporción de pulsos de centelleo que se conservan tras el corte) del primero y del corte conjunto, estimada tal y como se especifica en [5], puede verse en [Figura 13](#) (panel izquierdo). En esta es posible observar como la eficiencia del corte conjunto disminuye notablemente en la región de baja energía debido, sobre todo, al corte en el número de picos. En esta misma figura (panel derecho) se representan los espectros de fondo resultantes de la aplicación de estos cortes (azul (PSV) y verde (PSV+picos)) junto con el modelo de fondo (negro) correspondiente al séptimo año del experimento [6], el cual está elaborado mediante una simulación por Monte Carlo efectuada a partir de las contribuciones radioactivas conocidas del experimento. Es posible apreciar como, por debajo de 3 keV, los espectros obtenidos no son compatibles con el modelo. Surge, por tanto, la sospecha de que existen una serie de sucesos de falso centelleo que sobreviven a estos cortes: pulsos asimétricos con más de 4 picos y pulsos con decaimientos lentos. No obstante, por las propias características del DAQ de ANAIS (tamaño de la ventana de adquisición y existencia de un tiempo muerto), no resulta sencillo estudiar el origen o caracterizar de forma correcta este tipo de sucesos para tratar de descartarlos del análisis de forma eficiente.

Cabe comentar que, en los últimos años se ha introducido un método de selección de sucesos basado en técnicas de Machine Learning [7]. Este presenta una serie de ventajas con respecto al anterior como son, principalmente, el aumento de la eficiencia de selección de sucesos entre 1 y 2 keV en un 30 % con respecto a la eficiencia del corte de PSV+número de picos y la reducción del nivel de fondo entre 1 y 2 keV en un 20 %. No obstante, no es objetivo de este trabajo desarrollar una técnica de Machine Learning con los datos de ANOD. Se realizará, por tanto, la comparación con el análisis estándar de ANAIS explicado en esta subsección.

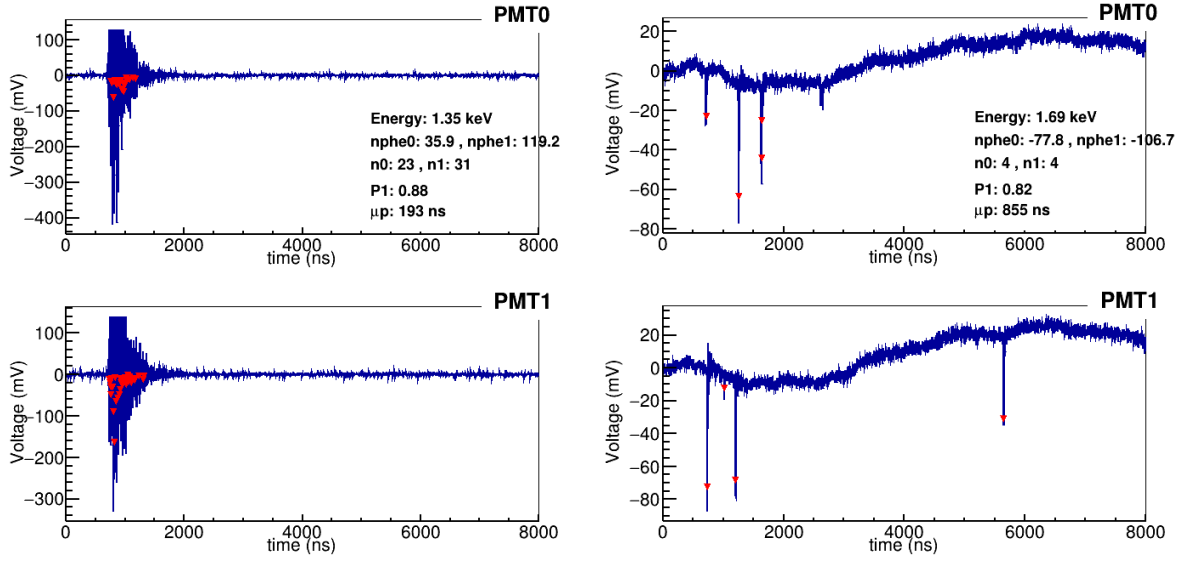
#### 4.3. Selección de sucesos de centelleo en ANOD.

Dada la nueva adquisición, es necesario adaptar las técnicas de selección de sucesos en la ROI descritas en el apartado anterior a las nuevas condiciones. No obstante, previamente a esto, es necesario analizar cómo se ven modificados los pulsos y las variables calculadas a partir de estos.

##### 4.3.1. Análisis de pulsos de ruido electrónico y otros sucesos problemáticos.

En una primera instancia, se observan una serie de pulsos caracterizados por tener una forma similar a oscilaciones rápidas amortiguadas o por presentar oscilaciones de baja frecuencia de la línea de base. Algunos ejemplos representativos de estos dos tipos de sucesos pueden verse en la [Figura 4](#).

Respecto a los primeros (paneles de la izquierda), estos aparecen normalmente condensados al



**Figura 4:** Sucesos de ruido representativos observados en ANOD.

inicio de los runs y presentan una alta multiplicidad. Es factible pensar, por tanto, que se deben a fenómenos vinculados a interferencias eléctricas que se observan, principalmente, durante el arranque de la adquisición. Así mismo, puesto que también están presentes el antiguo DAQ de ANAIS, es posible desvincularlos de ANOD.

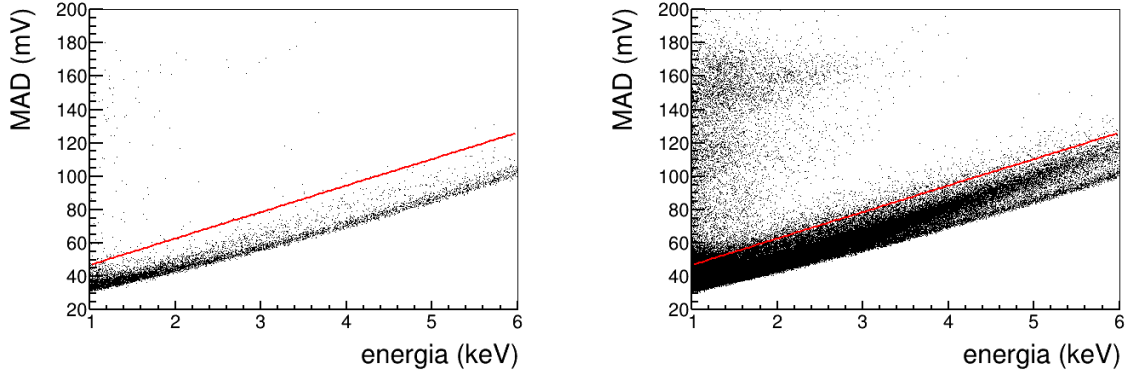
Respecto a los segundos (paneles de la derecha), estos no se observan en el antiguo DAQ. No obstante, en la mayoría de los casos, estos sucesos parecen estar vinculados a pulsos muy energéticos que saturan la adquisición y posteriormente producen un ruido de baja frecuencia. Estos pulsos aparecen, por tanto, durante el tiempo muerto del antiguo DAQ, lo cual explicaría que no estén presentes en ANAIS. Inicialmente, se pensó que estos sucesos podían estar vinculados a muones. No obstante, al estudiar los pulsos detectados inmediatamente después de un muon, no se pudo establecer una correlación entre estos y los sucesos de ruido. Así mismo, estos nos parecen concentrarse en regiones temporales concretas, sino que se distribuyen a lo largo de todo el tiempo de medida. Su origen, sin embargo, no se ha podido identificar todavía.

Debido a que, como puede observarse, a estos sucesos se les asignan energías en la ROI, resulta necesario identificarlos para, de esta manera, eliminarlos del análisis. Se define, por tanto, una nueva variable denominada MAD (Mean Absolute Deviation):

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_i^N |A_i - \langle A \rangle|; \quad (7)$$

donde  $i$  recorre todos los puntos adquiridos desde el inicio hasta el final de la ventana de adquisición ( $N$  puntos),  $A_i$  es la amplitud del pulso en el bin  $i$ -ésimo y  $\langle A \rangle$  es la amplitud media del pulso.

Al representar los valores de MAD frente a la energía (en la ROI) para los sucesos de calibra-

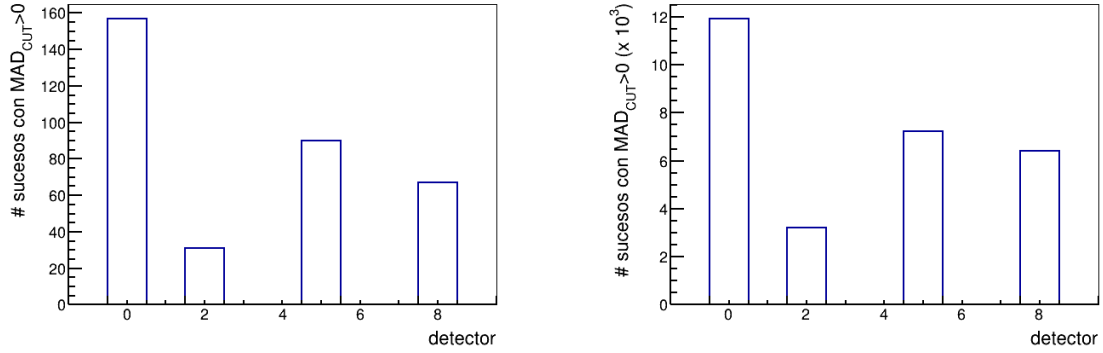


**Figura 5:** Representación de MAD frente a la energía para los sucesos de calibración (izda) y fondo (dcha) en la ROI de uno de los detectores (D5). Los sucesos por encima de la línea roja se asocian a sucesos de ruido.

ción con  $^{109}\text{Cd}$  se observa (Figura 5, panel izquierdo) cómo, mayoritariamente, el valor de MAD crece linealmente con la energía. No obstante, se puede apreciar como existen algunos puntos que quedan claramente fuera de esta tendencia, siendo los más alejados los vinculados a los ruidos de baja frecuencia. De esta manera, es posible trazar una recta paralela a esta tendencia, de tal forma que todos los sucesos situados por encima de ella se asocian con sucesos de ruido. Se define, por tanto, la variable  $MAD_{CUT}$ : distancia en la variable MAD entre el valor asociado a un suceso y el valor que toma la recta trazada para la energía de este; tal que los sucesos de ruido verifican  $MAD_{CUT} \geq 0$ . El resto de sucesos verificarán  $MAD_{CUT} < 0$ . La eficiencia asociada a este corte es prácticamente 1. En el panel derecho de la Figura 5, se ha representado lo mismo para los sucesos de fondo, donde es posible observar que los sucesos de ruido no son despreciables en esta población.

Representando el número de sucesos de calibración y fondo con  $MAD_{CUT} \geq 0$  para cada detector, se obtiene la Figura 6. En esta se puede observar como los sucesos vinculados a ruido no se distribuyen homogéneamente entre los detectores, sino que parecen mantener una relación de proporción entre ellos tanto en calibración como en fondo. Esto parece confirmar la hipótesis de que se tratan de ruidos que siguen a depósitos de mucha energía. Concretamente, podría tratarse de sucesos asociados a una desintegración alfa de un contaminante interno del cristal ( $^{210}\text{Po}$  proveniente de  $^{210}\text{Pb}$ ), los cuales se caracterizan por ser sucesos muy energéticos que saturan el PMT, pues el detector 0 es el que más contaminación alfa presenta.

No obstante, no todos los sucesos eliminados por este corte son exclusivamente sucesos de ruido tipo electrónico. Concretamente, se puede apreciar como algunos de ellos se corresponden con otro tipo de pulsos: sucesos muy asimétricos que presentan picos muy elevados, tanto al principio como a lo largo de toda la ventana; pulsos que disparan la adquisición con picos de su cola y que, por tanto, no presentan en su traza una región de pretrigger donde se pueda calcular correctamente el nivel de la línea de base, sino que el pretrigger está ocupado por el propio pulso o parte de él (estos sucesos están asociados a pulsos que han comenzado durante el tiempo muerto de ANAIS y que, por tanto, no han disparado la adquisición al inicio del pulso, si no en su cola) o sucesos que presentan pulsos en valores de tiempo fuera de la ventana de



**Figura 6:** Número de sucesos de ruido ( $MAD_{CUT} \geq 0$ ) por debajo de 6 keV para medidas de calibración (izda) y de fondo (dcha) adquiridos en cada uno de los detectores de ANOD (0, 2, 5 y 8).

ANAIS correspondientes a sucesos muy energéticos. Estos últimos resultan de especial interés porque reflejan perfectamente uno de los problemas que, como se verá posteriormente, surgen de las nuevas condiciones de adquisición del nuevo DAQ. Igualmente, todos ellos constituyen sucesos anómalos que pueden ser identificados por tener en común valores de MAD fuera de la tendencia observada; esta desviación puede ser mejor apreciada debido a la anchura de la nueva ventana. Algunos ejemplos de estos pulsos pueden verse en la [Figura 7](#).

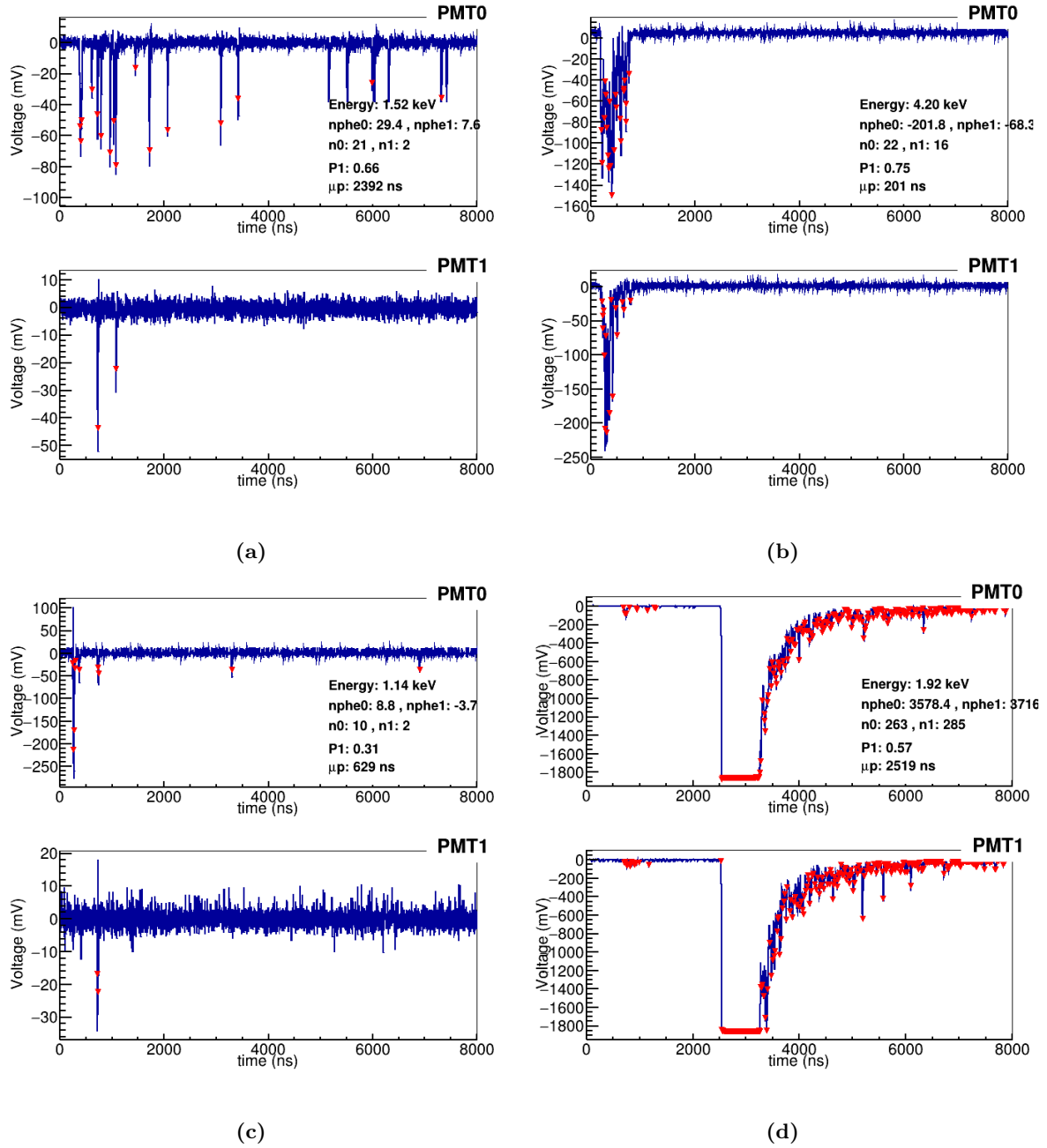
Cabe comentar, a este respecto, que, tanto para los del tipo de **(b)** y **(c)** como para los de **(d)**, estos valores tan grandes de MAD para sus energías se deben, en el primer caso, a que, puesto que estos sucesos disparan en la región de pretrigger, su línea de base está mal calculada <sup>2</sup> y, por tanto, todas las variables que integran una región del pulso están también mal estimadas: en particular, la energía; y, en el segundo, al hecho de que la asignación energética se lleva a cabo con variables definidas en la ventana de ANAIS y, por tanto, al suceso se le asigna únicamente la energía correspondiente a lo observado en esa ventana (la cual no se corresponde con la energía del suceso completo pues, en realidad, se podría hablar de dos sucesos distintos) mientras que MAD se calcula con toda la ventana. En el pulso **(b)** a el fenómeno comentado se une la aparición de voltajes positivos debidos a ruido electrónico.

#### 4.3.2. Representación $P_1^{ANOD}$ vs $\log(\mu_p^{ANOD})$ .

Una vez eliminados los sucesos de ruido eléctrico y anómalos, se sigue la misma estrategia que con el antiguo DAQ, es decir, se representa la distribución de  $P_1$  frente a  $\log(\mu_p [\mu s])$  con las variables definidas para la nueva adquisición:  $P_1^{ANOD}$  y  $\mu_p^{ANOD}$ .

Concretamente, haciendo esto para los sucesos de calibración con  $^{109}\text{Cd}$ , se obtiene el panel izquierdo de la [Figura 8](#), donde puede observarse cómo los eventos de centelleo vuelven a concentrarse en torno a una región con forma de elipse centrada en  $P_1^{ANOD} \sim 0.65$  y  $\log(\mu_p^{ANOD}) \sim -1.5$  (etiquetada como región 1). No obstante, a diferencia de lo que puede verse en la [Figura 3](#), ya no existen dos regiones bien diferenciadas de concentración de sucesos; a las observadas en la adquisición de ANAIS (1 y 2) se ha añadido una tercera (3), situada a la derecha de la región

<sup>2</sup>El cálculo del nivel de DC se hace promediando los primeros 250 ns de pulso, por lo que si el pulso verdadero se halla en esta región, el nivel de DC baja considerablemente.

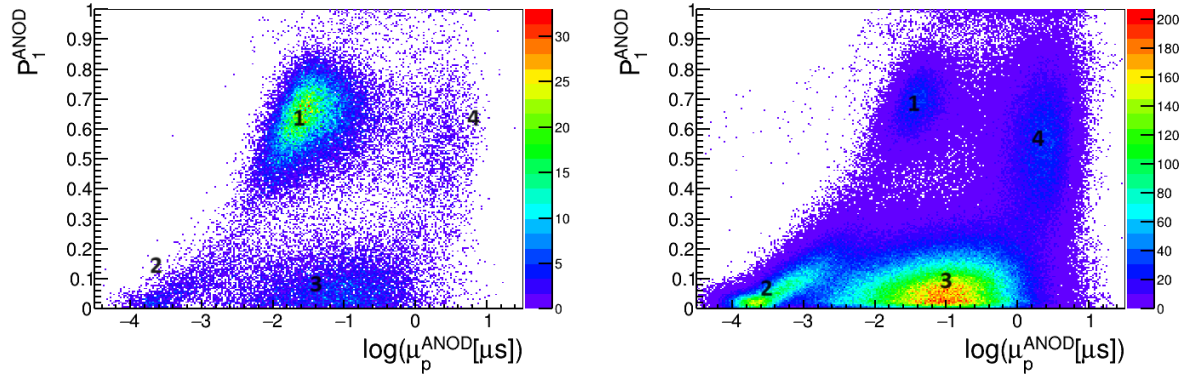


**Figura 7:** Sucesos representativos de los pulsos eliminados por el corte en MAD: (a) pulso asimétrico con picos elevados para la energía del suceso, (b) suceso con picos ocupando la región del pretrigger (c) pulso de muy baja energía con voltajes positivos y (d) suceso de baja energía acompañado de un pulso muy energético.

de concentración de los pulsos rápidos de PMT ( $P_1^{ANOD} < 0.4$ ). Cabe destacar que, si se lleva a cabo la misma representación para sucesos de fondo (Figura 8, panel derecho), se hace más notable otra concentración de sucesos (4) situada a la derecha de la zona de concentración de los pulsos de centelleo.

La aparición de esta nuevas regiones (3 y 4) se debe a que, al aumentar el tamaño de la ventana de adquisición y redefinir el primer momento  $\mu_p^{ANOD}$  hasta el final de esta, los sucesos

que presentan picos más allá de la ventana de ANAIS–112 experimentan un desplazamiento del primer momento a valores mayores. Se observa, por ejemplo, como en ANOD aparecen sucesos en regiones que en ANAIS estaban completamente vacías: valores de  $\log(\mu_p^{ANOD}) > 0$ . Estos pulsos o picos en la cola pueden atribuirse a numerosos fenómenos: coincidencias fortuitas con otros centelleos o luz de Cherenkov, coincidencias fortuitas con fotoelectrones individuales de corriente oscura o afterpulses<sup>3</sup>, pulsos lentos que no eran completamente adquiridos en la ventana de ANAIS o sucesos de muones o relacionados con ellos.

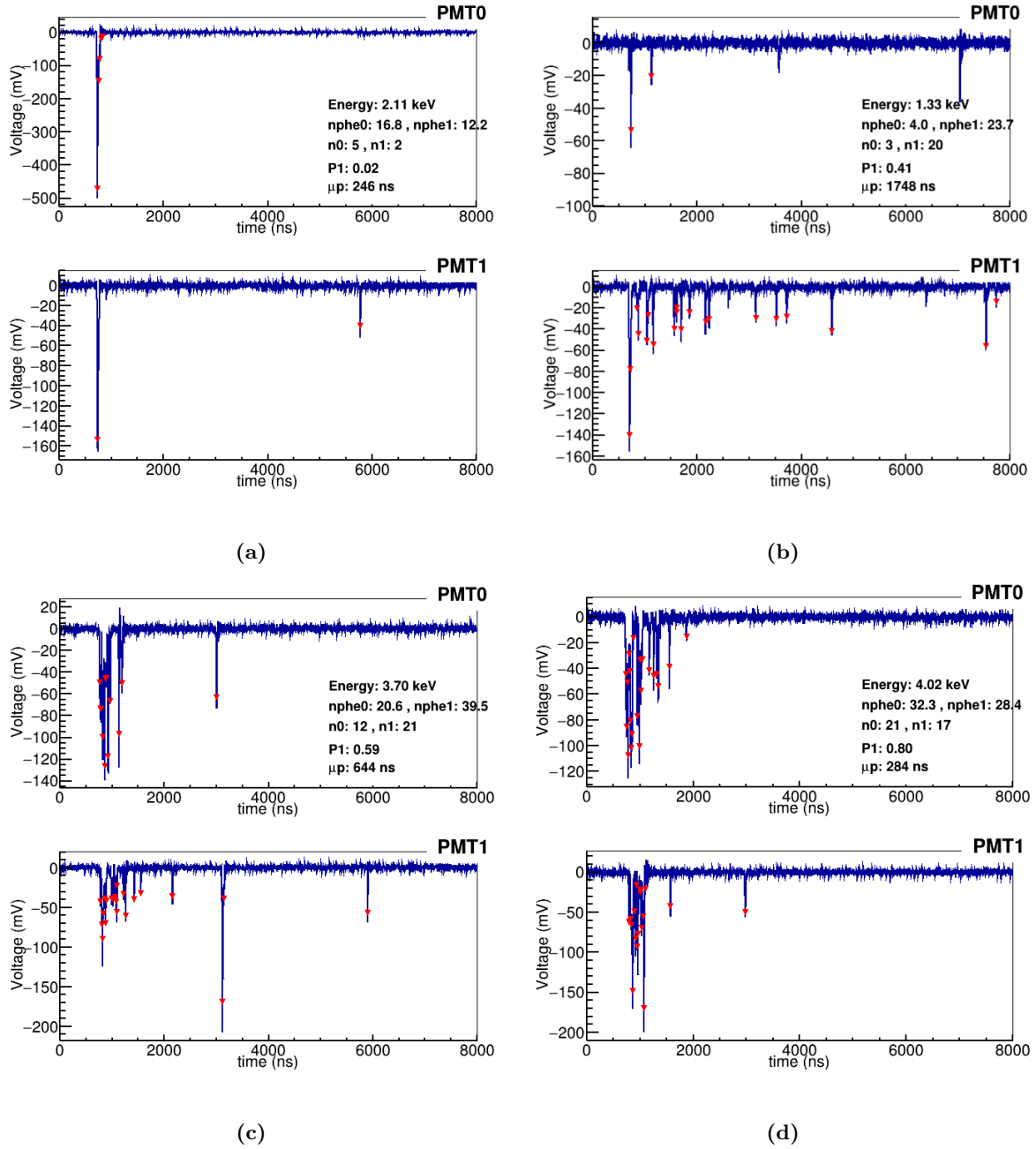


**Figura 8:** Representación de  $P_1^{ANOD}$  frente a  $\log(\mu_p^{ANOD})$  para sucesos de calibración de  $^{109}\text{Cd}$  (izda) y de fondo (dcha) entre 1 y 6 keV. En la calibración se observa como los sucesos se concentran, principalmente, en tres regiones: las dos que se observan en [5] (1 y 2) y una tercera (3) situada a la derecha de la región donde  $P_1 < 0.4$ . En fondo se aprecian cuatro regiones: dos asociadas a pulsos rápidos ( $P_1^{ANOD} < 0.4$ , 2 y 3), una al centelleo (1) y otra a la derecha de esta (4).

La Figura 9 (a) muestra un ejemplo de pulso de la región (3), es decir, con  $P_1^{ANOD} < 0.4$  y primer momento mayor a los registrados en ANAIS. Como se puede observar, se trata de un pulso rápido en el que aparece un fotoelectrón aislado en torno a 5700 ns en el PMT1 que produce el incremento del valor de  $\mu_p^{ANOD}$ . Esta región está integrada por pulsos rápidos que presentan picos en la cola. No obstante, debido a que la variable  $P_1^{ANOD}$  sólo se integra hasta 600 ns después del inicio del pulso, su valor no se ve afectado por el cambio de la ventana de adquisición. Esto implica que este suceso sigue siendo compatible con las características de un pulso rápido, no suponiendo, por tanto, un problema para su posterior discriminación.

Resulta mucho más interesante preguntarse por la separación de sucesos entre las regiones (1) y (4) observada en la Figura 8. En ANAIS, estos pulsos se concentran en la misma elipse, la cual está integrada por sucesos de centelleo, pero también por sucesos asimétricos en el reparto de luz entre ambos PMTs. En ANOD, sin embargo, los sucesos de centelleo se concentran en torno a (1), mientras que los sucesos que se concentran en torno a (4) están vinculados con distintos sucesos anómalos. En la Figura 9(b) y 9(c) se pueden observar dos sucesos pertenecientes a esta última región. Vemos como el primero de ellos se caracteriza por su asimetría, es decir, por

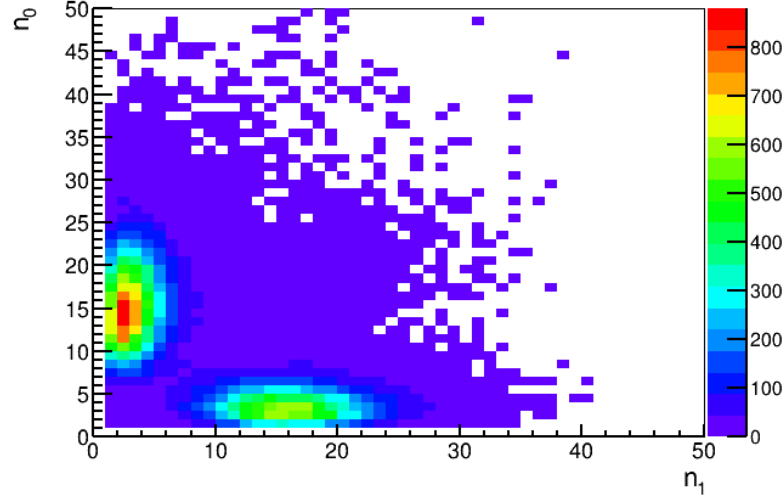
<sup>3</sup>Los afterpulses son sucesos de ruido que tienen su origen en el fotomultiplicador. Estos se producen debido a luz producida en el propio dispositivo y que llega al fotomultiplicador o debido a la existencia de trazas de impurezas en la región de vacío que pueden ser ionizadas por los electrones que la atraviesan: al quedar con carga positiva, se ven aceleradas por el campo eléctrico en dirección al fotocátodo, donde vuelven a generar una avalancha. Su probabilidad de ocurrir aumenta linealmente con la energía del suceso incidente y depende del dispositivo particular. No obstante, esta suele ser muy pequeña (no mayor que un pequeño porcentaje) [8].



**Figura 9:** Sucesos representativos de las nuevas regiones de acumulación: (a) pulso rápido con pico en la cola (región 3), (b) pulso asimétrico a lo largo de toda la ventana de adquisición (región 4), (c) suceso de centelleo con picos en la cola que abandona la elipse (región 4) y (d) suceso de centelleo con picos en la cola que no abandona la elipse (región 1). La ventana de ANAIS abarca, aproximadamente, hasta los 1900 ns.

presentar picos a lo largo de toda la ventana en una de sus trazas mientras que apenas presentan picos en la otra. Concretamente, si para los sucesos de fondo entre 1 y 6 keV de la región (4) se representa el número de picos detectados por el PMT0 frente a los detectados por el PMT1, se observa que, principalmente, se trata de sucesos de este tipo (Figura 10). A este respecto cabe comentar que, si se representa  $\log(\mu_p^{ANOD})$  frente a la energía (Figura 11) se observa que la mayor parte de los sucesos de la región 4 se concentran entre 1 y 2 keV.





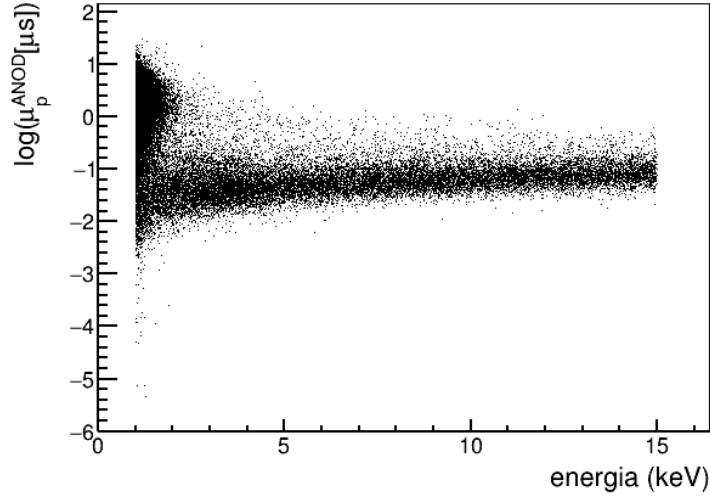
**Figura 10:** Representación de  $n_0^{ANOD}$  frente a  $n_1^{ANOD}$  para sucesos de fondo (1-6 keV) que verifican  $P_1^{ANOD} > 0.4$  y  $MAD_{CUT} < 0$  con  $\log(\mu_p^{ANOD}) > -0.8$ . Es posible observar como se trata de sucesos mayoritariamente asimétricos, pues se concentran en regiones con una diferencia media de unos 10 picos entre ambas trazas.

Sin embargo, tal y como se muestra en la [Figura 9 \(d\)](#) entre estos es posible encontrar sucesos de centelleo. No obstante, estos constituyen una pequeña parte, ya que, como se verá posteriormente, el ritmo de coincidencias fortuitas de centelleos con los fenómenos ligados a la aparición de picos en la cola es muy pequeño y, además, debido a que su distribución se asemeja a una exponencial, tienden a presentar una notable concentración de picos en la ventana de ANAIS. Esto último supone que la aparición de pulsos en la cola, los cuales tienen, predominantemente, formas similares a los asociados al PMT (picos aislados), no genera variaciones demasiado grandes en el valor del primer momento, pues la contribución de estos en la media pesada es mucho menor que la contribución de la cabecera del suceso. Sería de esperar, por tanto, que la mayoría de los centelleos desplazados se encontrasen en la región intermedia entre la elipse y la región 4, siendo este desplazamiento muy pequeño para sucesos muy energéticos y mayor para sucesos menos energéticos: por sus propias características, los sucesos de centelleo de baja energía (1-2 keV) presentan pocos picos en la ventana de ANAIS y, por tanto, en caso de mostrar picos en su cola, sus valores del primer momento experimentan un desplazamiento mayor que el que se da en sucesos de energía mayores, pues estos presentan un mayor número de picos en ANAIS. Un ejemplo representativo de este fenómeno puede verse en la [Figura 9\(d\)](#). En esta se muestra un suceso que, a pesar de presentar un pico en la cola de la traza de uno de los dos PMTs, permanece en la elipse (región 1).

#### 4.3.3. Corte en $\log(\mu_p^{ANOD})$ .

Resulta patente cómo las nuevas condiciones de adquisición y, en concreto, el tamaño de la ventana, modifican sustancialmente la estrategia de cortes seguida en ANAIS. Con la separación observada en la [Figura 8](#) se abre, por tanto, la posibilidad de introducir nuevos cortes para tratar de eliminar del análisis algunos de estos pulsos anómalos de forma más eficiente que con





**Figura 11:** Distribución de la variable  $\log(\mu_p^{ANOD})$  frente a la energía para sucesos de fondo del detector 0 que verifican  $P_1^{ANOD} > 0.4$  y  $MAD_{CUT} < 0$ .

los cortes planteados en 4.2.

En primer lugar, puesto que los denominados pulsos rápidos siguen concentrándose en una región tal que  $P_1^{ANOD} < 0.4$ , se introduce, inicialmente, la condición de que  $P_1^{ANOD} > 0.4$ . Siguiendo [5], la eficiencia de este corte es prácticamente 1. Seguidamente, debido a la separación observada a simple vista en la variable  $\log(\mu_p^{ANOD})$ , se plantea utilizar esta variable para definir un nuevo corte. No obstante, para establecer este corte es necesario estudiar la distribución de los sucesos de centelleo en la variable  $\log(\mu_p^{ANOD})$ . Es en este punto donde adquiere relevancia la obtención de una buena población de sucesos de centelleo.

En [5] esta población se obtiene a partir de la ya mencionada población de coincidencias procedente de las contaminaciones internas de  $^{22}\text{Na}$  y  $^{40}\text{K}$ . No obstante, esto no es reproducible en ANOD ya que se requieren largos periodos de tiempo de medida para obtener estadística suficiente de estos sucesos y en ANOD no se ha alcanzado todavía ese punto. Así mismo, a esto debe añadirse el hecho de que la cantidad actual de  $^{22}\text{Na}$  en los cristales es muy reducida, ya que este isótopo tiene un periodo de semidesintegración de 2.6 años y el experimento ANAIS lleva alrededor de 7 años en funcionamiento.

Es por ello que, para tratar de efectuar una primera aproximación al corte planteado, se recurre a la población de calibración con  $^{109}\text{Cd}$ . Esta población, sin embargo, presenta una serie de inconvenientes: al tratarse de fuente externas, los sucesos detectados no son de tipo *bulk*, es decir, no se distribuyen homogéneamente en todo el cristal y pueden verse afectados por efectos superficiales de mala recolección de luz, por ejemplo; y, durante la medida de calibración, también se registran sucesos no vinculables al centelleo (pulsos rápidos, asimétricos y lentos), por lo que esta población contendrá también sucesos de este tipo.

A pesar de las desventajas anteriores, se ha probado que los sucesos de centelleo producidos por el  $^{109}\text{Cd}$  no son tan diferentes de los sucesos de coincidencia a baja energía [7] y, por tanto,

se utilizarán para tratar de determinar un posible valor de corte en el primer momento y para estimar su eficiencia. Concretamente, si para esta población se representa la distribución de  $\log(\mu_p^{ANOD})$  frente a la energía, se obtiene la [Figura 12](#). Esta distribución hace evidente la necesidad de que el corte en  $\log(\mu_p^{ANOD})$  sea dependiente de la energía, especialmente en la región entre 1 y 2.5 keV, pues, para energía mayores, parece asumible considerar un valor de corte constante.

Para calcular adecuadamente la eficiencia de aceptación de sucesos es necesario estimar la proporción de falsos centelleos que podrían estar presentes en la población de calibración. Podemos comprobar como la diferencia entre calibración y fondo en el ritmo de sucesos con primer momento anómalo ( $\log(\mu_p^{ANOD}) > -0.5$ ) en la región entre 1 y 2 keV es muy pequeña en todos los detectores (ver [Tabla 2](#)). Esto significa que la mayor parte de los sucesos de calibración que se encuentran en esta región aparecen también en el fondo y que, por tanto, excepto para el D2, solamente un ritmo  $\sim 1$  mHz parece estar asociado a centelleos desplazados. El ritmo anormalmente bajo del D2 comparado con los otros dos detectores puede ser debido a una mala calibración energética, ya que el pico de 11.9 keV del  $^{109}\text{Cd}$  utilizado para la calibración en energía era poco visible en este detector y, por tanto, fue difícil ajustarlo para las medidas tomadas durante la realización del trabajo.

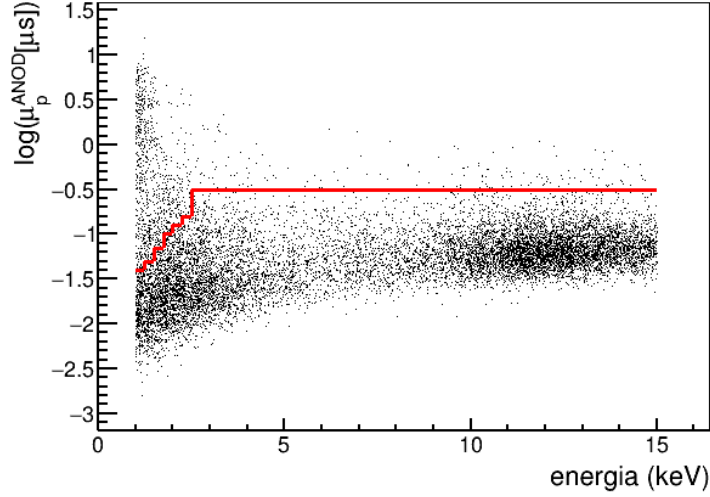
	Ritmo fondo (mHz)	Ritmo calibración (mHz)
<b>D0</b>	8.1	9.5
<b>D2</b>	2.3	1.9
<b>D5</b>	5.4	6.6
<b>D8</b>	5.5	6.1

**Tabla 2:** Ritmos de fondo y de calibración para los detectores de ANOD en la región entre 1 y 2 keV con  $\log(\mu_p^{ANOD}) > -0.5$ .

Este hecho permite afirmar que esta región ( $\log(\mu_p^{ANOD}) > -0.5$ ) de la población de calibración entre 1 y 2 keV está contaminada por falsos centelleos y justifica, por tanto, la inclusión de un pre-corte en el primer momento que los elimine. En esta habrá, no obstante, sucesos de centelleo cuyo desplazamiento podría deberse a afterpulses o a coincidencias fortuitas con otros sucesos (corriente oscura, Cherenkov, otro centelleo). De esta manera, para estimar la eficiencia de este pre-corte entre 1 y 2 keV, tomaremos como referencia la obtenida en la región de 12 a 13 keV. Esta aproximación es conservativa, ya que, por un lado, el ritmo de sucesos de centelleo con picos en la cola debido a afterpulses no debería ser mayor entre 1 y 2 keV que entre 12 y 13 keV, al ser estos proporcionales a la energía [8]; y, por otro, lo mismo puede decirse de las coincidencias fortuitas con corriente oscura u otros centelleos, pues la incidencia de estas es proporcional al ritmo de sucesos, y en la región entre 12 y 13 keV este ritmo ( $\sim 111$  mHz) es muy similar al de 1 y 2 keV ( $\sim 113$  mHz). Sería de esperar, por tanto, que la región de referencia se viera más afectada por estos fenómenos que la región entre 1 y 2 keV. Igualmente, dado que es posible comprobar que la eficiencia de un pre-corte es prácticamente constante entre 3 y 15 keV, con el objetivo de disponer de más estadística, se emplea esta región para la estimación de la eficiencia de este. Este pre-corte hace posible obtener una mejor población de centelleos que

permite evaluar de forma más correcta el efecto del corte que se pretende introducir.

Para definir el valor de este, se divide el rango de 1 a 2.5 keV en intervalos energéticos de 0.25 keV (para tener estadística suficiente) y el rango de 2.5 a 10 keV se considera como un único intervalo. Una vez establecido esto, para cada uno de los 7 intervalos resultantes y para cada detector, se estudia cuál es el valor de corte que supone una mayor reducción del nivel de fondo respecto del obtenido en [5] con la mayor eficiencia posible.



**Figura 12:** Distribución de la variable  $\log(\mu_p^{ANOD})$  frente a la energía para los sucesos de calibración con  $^{109}\text{Cd}$  del detector 0 que verifican  $P_1^{ANOD} > 0.4$  y  $MAD_{CUT} < 0$  y valores de corte fijados (línea roja).

El corte fijado puede verse en rojo en la Figura 12 para el detector 0. Los sucesos de centelleo se encuentran por debajo de la línea. La eficiencia del corte se ha calculado como el número de sucesos de calibración que superan el corte dividido entre el número de sucesos de calibración que superan el pre-corte. Así mismo, se ha multiplicado esta eficiencia por la eficiencia de trigger<sup>4</sup> detector a detector. El resultado se presenta en los paneles de la izquierda de la Figura 13 (puntos rojos). En los paneles derechos de la Figura 13 se muestra el espectro energético de fondo tras aplicar el corte y corregir por la eficiencia (en rojo). En esta figura se presentan también las eficiencias y los fondos derivados del corte en PSV de ANAIS y del corte conjunto PSV+número de picos (4.2) así como la estimación del modelo de fondo correspondiente al séptimo año del experimento [6].

En estas representaciones se observa como, manteniendo una eficiencia similar a la de PSV, con el corte definido en ANOD se eliminan más sucesos que con PSV en ANAIS, especialmente en el rango entre 1 y 2 keV. Así mismo, si se compara con el corte conjunto PSV+picos, se aprecia como la eficiencia del corte en el primer momento es siempre mayor o igual (D8) que la eficiencia de este corte. Respecto a los espectros de fondo obtenidos, estos reproducen bastante

<sup>4</sup>Debido al tamaño de la ventana de coincidencia entre ambos PMTs (200 ns), en las regiones de baja energía, donde hay muy pocos fotoelectrones, es posible que algunos de ellos no disparen la adquisición. Este fenómeno se cuantifica a través de la eficiencia de trigger. Un estudio más detallado de este aspecto puede verse en [5]

bien lo previsto por el modelo de fondo y los resultados de ANAIS hasta 2 keV en todos los detectores. Por debajo de 2 keV, el comportamiento difiere para cada detector (ver [Tabla 3](#)). En todos ellos se obtienen ritmos muy por debajo de los resultantes del corte en PSV de ANAIS. Sin embargo, para D0, los resultados del corte en el primer momento están ligeramente por encima de los del corte conjunto de ANAIS, aunque en ciertos puntos se obtienen ritmos menores y más cercanos al modelo de fondo; mientras que, para D2, D5 y D8 el espectro obtenido está ligeramente por debajo del corte conjunto de ANAIS, siendo más compatible con el modelo de fondo. Cabe resaltar que, para el detector D2, se observa que el pico asociado al  $^{40}\text{K}$  está desplazado  $\sim 0.3$  keV con respecto del modelo de fondo. Esto se debe a que, tal y como se ha comentado, este detector está ligeramente descalibrado.

	Ritmo Anod (c/keV/kg/día)	Ritmo PSV (c/keV/kg/día)	Ritmo PSV + picos (c/keV/kg/día)	Modelo de fondo (c/keV/kg/día)
D0	$5.48 \pm 0.63$	$24.40 \pm 1.13$	$4.52 \pm 0.49$	3.83
D2	$2.20 \pm 0.36$	$6.81 \pm 0.58$	$4.90 \pm 0.67$	2.57
D5	$4.90 \pm 0.55$	$12.37 \pm 0.75$	$5.66 \pm 0.63$	2.96
D8	$2.44 \pm 0.56$	$33.83 \pm 1.28$	$2.97 \pm 0.47$	2.16

**Tabla 3:** Ritmos de sucesos de fondo corregido por la eficiencia entre 1 y 2 keV obtenidos mediante los distintos cortes aplicados para cada uno de los detectores.

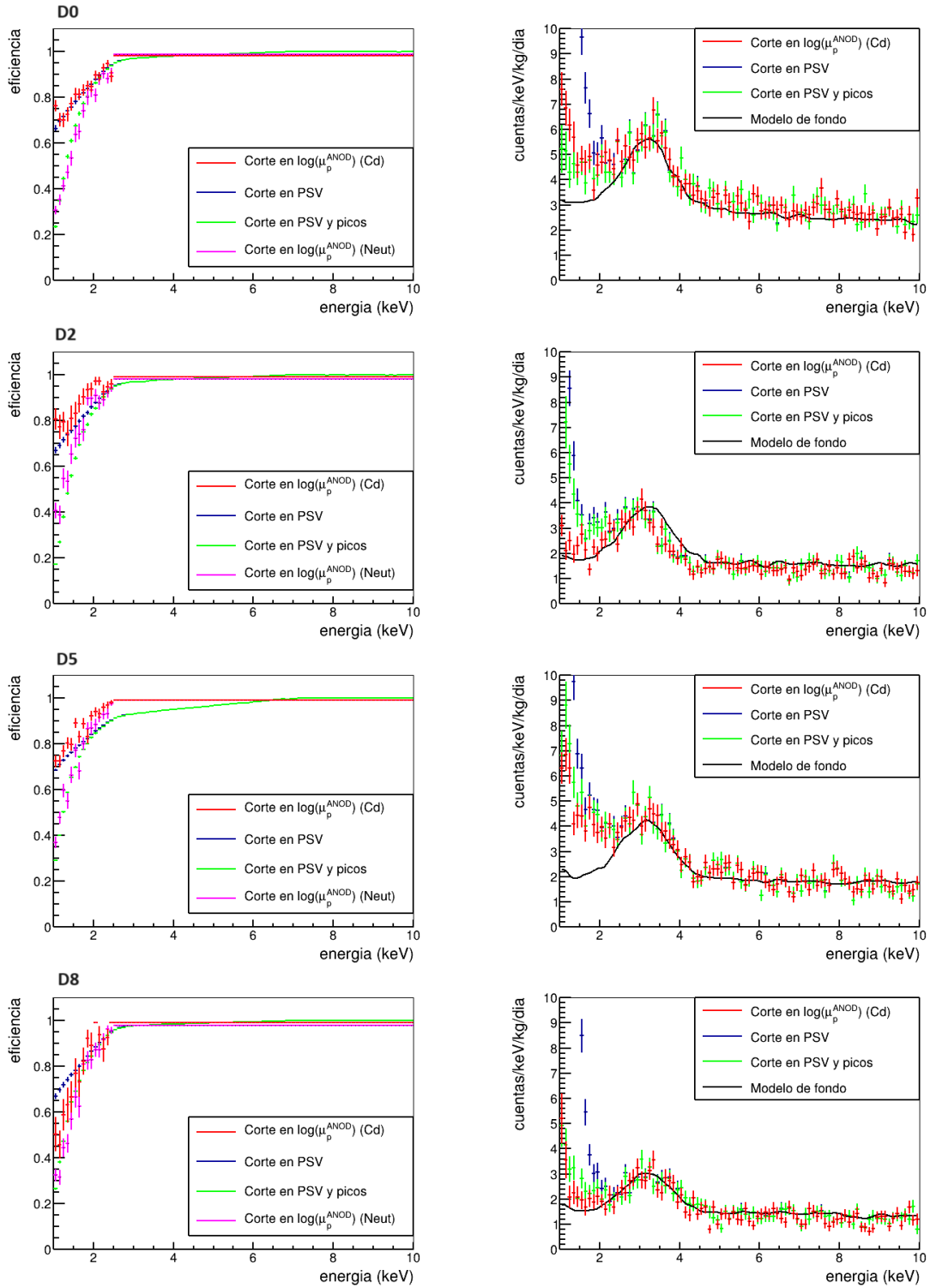
Tras la aplicación del corte en el primer momento es posible observar cómo la mayor parte de los sucesos eliminados eran efectivamente asimétricos ([Figura 14](#)). Esto respalda el corte aplicado así como los razonamientos esgrimidos en su justificación.

A raíz de los resultados obtenidos, es posible afirmar que el análisis introducido muestra un gran potencial de cara al futuro, especialmente si se considera su posible acción conjunta con cortes en otras variables o con algoritmos de machine learning, o la posibilidad de mejorar la estimación de su eficiencia mediante más estadística o mejores poblaciones de centelleo (población de coincidencias).

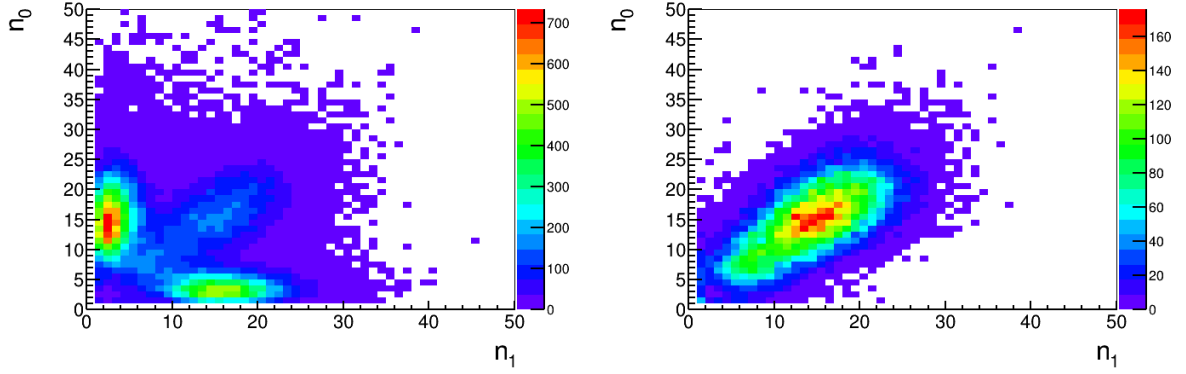
## 5. Calibración de neutrones.

Desde el año 2021, con el objetivo de tratar de estudiar la respuesta de los detectores del experimento ANAIS–112 a los retrocesos nucleares se introdujo la calibración del experimento mediante fuentes de neutrones ( $^{252}\text{Cf}$ ) [[9](#), [10](#)].

El estudio de la interacción de estas partículas resulta de especial interés, pues estas, al igual que se espera de los WIMPs, interactúan preferentemente mediante dispersión elástica con los núcleos atómicos de los detectores (al calibrar el experimento con neutrones, se logra que la escala energética este perfectamente adaptada a la energía transferida por un WIMP). No obstante, en un centelleador como el NaI(Tl), la luz de centelleo producida por un retroceso nuclear es menor que la generada por un retroceso electrónico de la misma energía. Esta diferencia se cuantifica a través de los que se conoce como factor de *quenching* o factor de eficiencia relativa ( $Q$ ):



**Figura 13:** Eficiencias y espectros de fondo obtenidos para los detectores de ANOD (D0, D2, D5 y D8) mediante el corte en  $\log(\mu_p^{ANOD})$  planteado para la calibración con  $^{109}\text{Cd}$ , el redefinido para la calibración con neutrones y mediante los cortes de ANAIS (PSV y corte conjunto PSV + picos). Se incluye también la estimación del modelo de fondo del séptimo año del experimento para cada detector.



**Figura 14:** Representación de  $n_0^{ANOD}$  frente a  $n_1^{ANOD}$  antes (izda) y después (dcha) del corte en el primer momento para sucesos de fondo en la ROI (1-6 keV) que verifican  $P_1^{ANOD} > 0.4$  y  $MAD_{CUT} < 0$ . Es posible observar como desaparecen las concentraciones de sucesos asimétricos.

$$Q = L_{NR}/L_{ER}; \quad (8)$$

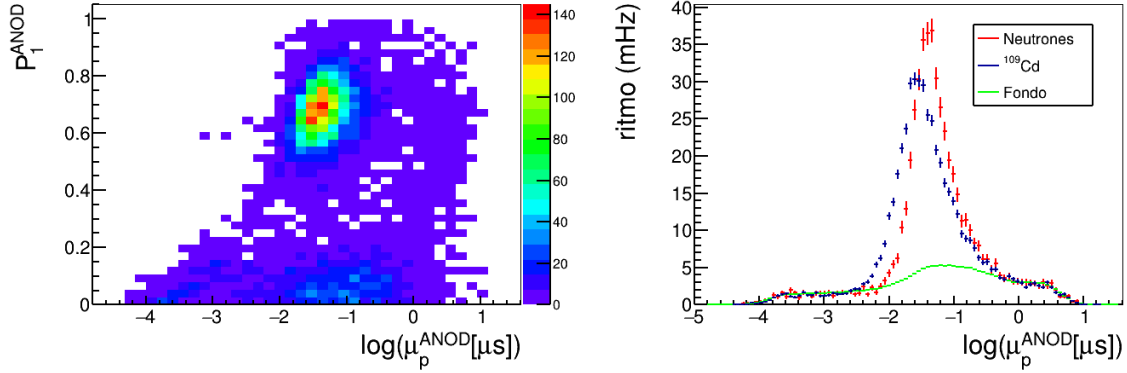
donde  $L_{NR}$  ( $L_{ER}$ ) es la señal de centelleo producida por un retroceso nuclear (electrónico). La determinación de esta magnitud resulta de vital importancia para poder llevar a cabo una correcta comparación entre experimentos que emplean el mismo material blanco [9, 10].

El 2 de abril de 2024 se llevó a cabo la primera calibración de neutrones con la nueva adquisición. En este apartado se estudiará cómo cambia el análisis desarrollado en los apartados anteriores para esta población.

En primer lugar, debido a que la sección eficaz de dispersión elástica es elevada, se espera que un porcentaje no despreciable de las trazas puedan contener varios centelleos. Esto se debe a que los neutrones, en su trayectoria, pueden interactuar varias veces con uno o varios detectores. Así mismo, puesto que su tiempo de vuelo no es despreciable en el montaje del experimento, en la traza de un suceso múltiple puede producirse un desplazamiento del tiempo de inicio del pulso en la ventana de adquisición respecto del on-set habitual ( $\sim 715$  ns). Esto, debido al carácter finito de la ventana, puede suponer que se corte el pulso. Así mismo, debido al ya comentado hecho de que la asignación de valores a ciertas variables en el experimento ANAIS-112 se hace con magnitudes definidas en la ventana de ANAIS (1260 ns), también puede conducir a una mala definición de las variables asociadas. En ANAIS-112, se estableció una restricción sobre el tiempo de inicio de los pulsos para evitar este problema, imponiendo que el tiempo de inicio no fuera superior a 150 ns tras el on-set habitual [7]. En ANOD, esto se traduce en que el tiempo de inicio del pulso debe ser inferior a 865 ns.

En la Figura 15 (panel izquierdo) se observa como, al igual que ocurría con los centelleos vinculados al  $^{109}\text{Cd}$ , los asociados a neutrones tienden a concentrarse en una región centrada en  $\log(\mu_p^{ANOD}) \sim -1.4$  y  $P_1^{ANOD} \sim 0.7$ . En esta representación se aprecian también las mismas regiones de concentración de sucesos descritas en 4.3.2. Esto, por tanto, permite descartar los sucesos asociados a pulsos rápidos mediante el corte  $P_1^{ANOD} > 0.4$ . Así mismo, para esta

población también se aplica el corte en MAD para la eliminación de sucesos de ruido.



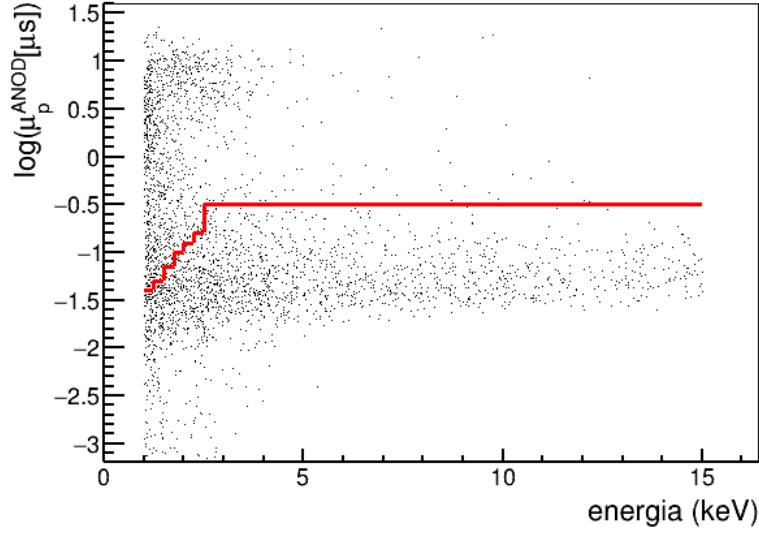
**Figura 15:** Distribución de los sucesos de calibración de neutrones de 1 a 6 keV en las variables  $P_1^{ANOD}$  y  $\log(\mu_p^{ANOD})$  (izda) y comparación de ritmos en la ROI (1-6 keV) en calibración con neutrones, con  $^{109}\text{Cd}$  y en fondo para distintos valores del logaritmo del primer momento.

En el panel derecho se muestra la comparación entre los ritmos de sucesos en la ROI en calibración con neutrones y en calibración con  $^{109}\text{Cd}$  con el fondo. En esta es posible observar como los neutrones aportan un mayor número de centelleos que el  $^{109}\text{Cd}$  en la región correspondiente a la elipse. Así mismo, resulta patente que el pico de los neutrones está ligeramente desplazado en el primer momento con respecto al del  $^{109}\text{Cd}$ , pero parece estar más alineado que este con el pico del fondo. Esto, por tanto, permite considerar que los neutrones aportan una población más numerosa y representativa de los sucesos de centelleo observados en fondo (los neutrones interaccionan homogéneamente por todo el volumen del detector dando lugar a centelleos de tipo *bulk*), por lo que se trata de de calcular la eficiencia del corte definido en el apartado anterior para esta población (ver Figura 16).

Los resultados obtenidos pueden verse en la Figura 13 (línea magenta). En esta resulta patente como, entre 1 y 2 keV, la eficiencia del corte calculada a partir de la población de neutrones es, para todos los detectores, considerablemente menor que la del corte en PSV y la calculada a partir de la población de  $^{109}\text{Cd}$ , y similar a la del corte conjunto. Esto no es de extrañar pues, tal y como se ha visto, la población de neutrones está desplazada a valores mayores del primer momento con respecto a la del  $^{109}\text{Cd}$ .

Esto, sin embargo, va en contra de algunas medidas experimentales [5] que observan constantes de centelleo hasta un 10% más rápidas para retrocesos nucleares con respecto a retrocesos electrónicos como los vinculados al  $^{109}\text{Cd}$ , pues, en ese caso, se esperaría que la población de neutrones estuviese desplazada hacia valores menores del primer momento. No obstante, debe tenerse en cuenta que, tal y como se ha comentado, el porcentaje de trazas con varios centelleos (y en particular sucesos de muy bajas energías asociados a retrocesos del yodo) no es en absoluto despreciable para los neutrones. Así mismo, los efectos de su presencia sobre los valores del primer momento que se asignan a los sucesos parecen ser más compatibles con los resultados obtenidos.

Esto, por tanto, permite considerar que el desplazamiento positivo del primer momento observado en los resultados obtenidos no es consecuencia de la forma de los pulsos sino de la presencia de centelleos en sus colas. Por todo ello, resulta necesario desarrollar métodos de análisis de los



**Figura 16:** Distribución de la variable  $\log(\mu_p^{ANOD})$  frente a la energía para los sucesos de calibración con neutrones del detector 0 que verifican  $P_1^{ANOD} > 0.4$  y  $MAD_{CUT} < 0$  y valores de corte fijados (línea roja).

centelleos en la cola de los pulsos, así como de la influencia de estos sobre los valores del primer momento que se asigna a los sucesos, con el objetivo de tratar de homogeneizar la selección de sucesos de centelleo independientemente de su origen.

## 6. Conclusiones y líneas de mejora.

En este trabajo se ha podido observar como la introducción de un nuevo sistema DAQ en el experimento ANAIS-112 con una ventana de digitalización de  $8 \mu s$  tiene un gran potencial para mejorar las estrategias de selección de sucesos de centelleo. Concretamente, se ha podido observar como, al aumentar la ventana de adquisición, algunas variables de caracterización de los pulsos cambian notablemente, lo que permite plantear nuevos cortes y estrategias de selección. No obstante, este cambio supone también la aparición de nuevos fenómenos vinculados a la aparición de picos en la cola de los pulsos que, hasta ahora, no se habían considerado (afterpulses, coincidencias fortuitas con centelleos, corriente oscura, etc).

Igualmente, dado que, a diferencia del DAQ antiguo, ANOD no presenta tiempo muerto, ha sido posible también identificar una población de sucesos de ruido electrónico de baja frecuencia tras pulsos muy energéticos que saturan el detector. Respecto a estos, pese a que su origen no ha podido ser completamente identificado, se ha acotado considerablemente: todo parece indicar que se trata de ruidos vinculados a depósitos de mucha energía. Estos, sin embargo, son eliminados del análisis mediante la implementación de una nueva variable (MAD), que, además, supone la eliminación de algunos sucesos que no son de ruido electrónico pero que están vinculados a otras anomalías, como líneas de base mal calculadas o coincidencias fortuitas con pulsos muy energéticos. Un estudio más detallado de su origen vía hardware resultaría, por tanto, de vital



importancia.

Respecto a la selección de sucesos, se ha utilizado el primer momento del pulso calculado en la ventana de  $8\mu s$  para definir la estrategia de filtrado de la nueva adquisición. Esta ha resultado ser igual de eficiente que los cortes de ANAIS, permitiendo obtener espectros de fondo muy similares a los del antiguo DAQ o incluso más próximos a lo esperable por el modelo de fondo. Concretamente, el corte introducido en este trabajo ha mejorado notablemente (alrededor de un 30 % para D0 y D5, un 50 % para D2 y un 13 % para D8 en [1-2] keV) la eficiencia de selección de sucesos frente a los cortes estándar de ANAIS-112 y, en los detectores D2, D5 y D8, también ha disminuido el nivel de fondo. Por todo ello, el análisis realizado, aunque preliminar, parece implicar un incremento de la sensibilidad experimental de ANAIS-112 (proporcional a la raíz del cociente entre eficiencia y fondo) [11].

Este corte, no obstante, presenta algunas limitaciones, como es la necesidad de un pre-corte debido a la ausencia de una población de centelleos pura. Esto, sin embargo, podría resolverse mediante el incremento de la estadística de fondo, con el objetivo de poder recurrir a las poblaciones en coincidencia, o mediante el empleo de otro tipo de fuentes más intensas.

En este punto, una clara línea de mejora consistiría en la introducción de nuevos cortes o métodos de análisis que, partiendo de este, permitan reducir el fondo de forma más rigurosa mediante la consideración de otras características de los sucesos de centelleo. Entre ellos, la línea clara a seguir sería adaptar los algoritmos de machine learning ya utilizados en ANAIS-112 a la nueva adquisición, pues estos han demostrado ser más eficientes en el filtrado de ruido que el uso de cortes estándar. Otra línea de interés residiría en la implementación de algoritmos para la detección de sucesos dobles en las trazas e identificación de afterpulses. Estos permitirían llevar a cabo un mejor estudio de la calibración de neutrones y de la forma de sus pulsos de centelleo.

Los resultados de este trabajo permiten afirmar que la introducción de un nuevo DAQ en ANAIS abre la posibilidad de introducir nuevas estrategias de selección de sucesos, más eficientes y eficaces, de comprender mejor los sucesos de falso centelleo y de analizar y estudiar fenómenos que no se observaban con el antiguo DAQ. Está previsto que este mes de junio se reciba una nueva tarjeta de adquisición con 32 canales, que permitirá digitalizar simultáneamente los nueve detectores de ANAIS-112 y el módulo blank. Con la nueva digitalización funcionando para todos los detectores y mejorando las técnicas de discriminación de sucesos iniciadas en este trabajo, se prevé incrementar la sensibilidad del experimento ANAIS-112 a la señal observada por DAMA/LIBRA. El objetivo final sería desarrollar unos protocolos de filtrado basados en la nueva adquisición que permitieran reanalizar los 7 años de datos registrados en ANAIS-112 con la antigua adquisición.

## Referencias

- [1] N. Aghanim et al. “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters”. En: *Astron. Astrophys.* 641 (2020). [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)], A6. DOI: [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910). arXiv: [1807.06209](https://arxiv.org/abs/1807.06209) [[astro-ph.CO](#)].
- [2] Teresa Marrodán Undagoitia y Ludwig Rauch. “Dark matter direct-detection experiments”. En: *J. Phys. G* 43.1 (2016), pág. 013001. DOI: [10.1088/0954-3899/43/1/013001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/1/013001). arXiv: [1509.08767](https://arxiv.org/abs/1509.08767) [[physics.ins-det](#)].
- [3] Marc Schumann. “Direct Detection of WIMP Dark Matter: Concepts and Status”. En: *J. Phys. G* 46.10 (2019), pág. 103003. DOI: [10.1088/1361-6471/ab2ea5](https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab2ea5). arXiv: [1903.03026](https://arxiv.org/abs/1903.03026) [[astro-ph.CO](#)].
- [4] R. Bernabei et al. “The DAMA project: Achievements, implications and perspectives”. En: *Prog. Part. Nucl. Phys.* 114 (2020), pág. 103810. DOI: [10.1016/j.pnpnp.2020.103810](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103810).
- [5] J. Amaré et al. “Performance of ANAIS-112 experiment after the first year of data taking”. En: *Eur. Phys. J. C* 79.3 (2019), pág. 228. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-6697-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6697-4). arXiv: [1812.01472](https://arxiv.org/abs/1812.01472) [[astro-ph.IM](#)].
- [6] J. Amare et al. “Analysis of backgrounds for the ANAIS-112 dark matter experiment”. En: *Eur. Phys. J. C* 79.5 (2019), pág. 412. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-6911-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6911-4). arXiv: [1812.01377](https://arxiv.org/abs/1812.01377) [[astro-ph.GA](#)].
- [7] I. Coarasa et al. “Improving ANAIS-112 sensitivity to DAMA/LIBRA signal with machine learning techniques”. En: *JCAP* 11 (2022). [Erratum: *JCAP* 06, E01 (2023)], pág. 048. DOI: [10.1088/1475-7516/2022/11/048](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/11/048). arXiv: [2209.14113](https://arxiv.org/abs/2209.14113) [[astro-ph.IM](#)].
- [8] Glen Knoll. *Radiation Detection and Measurement (4th ed.)* Hoboken, NJ: John Wiley, 2010. ISBN: 978-0-470-13148-0.
- [9] Tamara Pardo et al. “Neutron calibrations in dark matter searches: the ANAIS-112 case”. En: *PoS TAUP2023* (2024), pág. 078. DOI: [10.22323/1.441.0078](https://doi.org/10.22323/1.441.0078). arXiv: [2311.07290](https://arxiv.org/abs/2311.07290) [[astro-ph.IM](#)].
- [10] David Cintas González. “New strategies to improve the sensitivity of the ANAIS-112 experiment at the Canfranc Underground Laboratory”. Tesis doct. U. Zaragoza (main), 2023. arXiv: [2310.07339](https://arxiv.org/abs/2310.07339) [[physics.ins-det](#)].
- [11] I. Coarasa et al. “ANAIS-112 sensitivity in the search for dark matter annual modulation”. En: *Eur. Phys. J. C* 79.3 (2019), pág. 233. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-6733-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6733-4). arXiv: [1812.02000](https://arxiv.org/abs/1812.02000) [[astro-ph.IM](#)].