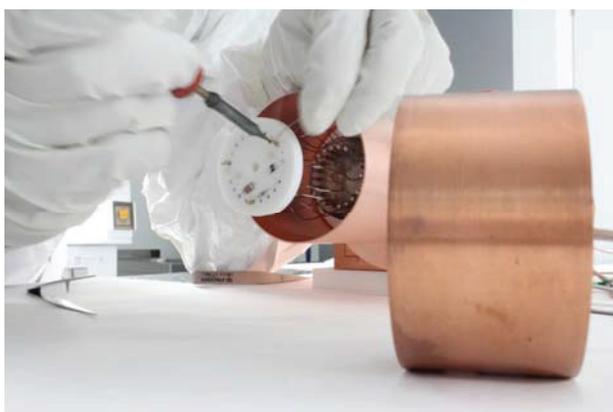


Trabajo Fin de Máster

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA ASOCIADA A UN EXPERIMENTO DE DETECCIÓN DE MATERIA OSCURA

Máster en Ingeniería Electrónica



Autor:

David Fortuño Ferra

Director:

Jesús Acero Acero

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza
Marzo 2013

RESUMEN

El experimento ANAIS está diseñado para detectar y caracterizar la materia oscura con cristales centelladores de yoduro de sodio (NaI), mediante la observación de la modulación anual en el ritmo de detección, lo cual se está llevando a cabo en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), bajo el monte Tobazo.

En este trabajo se van a presentar diferentes diseños, actividades y desarrollos propios que se han realizado para poder poner en marcha el experimento. Estos desarrollos incluyen un amplio abanico de posibilidades, ya que el experimento abarca desde el diseño del encapsulado del detector al desarrollo del software de la adquisición de datos.

Nos centraremos principalmente en el detector y el tratamiento inicial de la señal, así como en el desarrollo de algún módulo electrónico de la cadena de adquisición o la electroformación del cobre que se utiliza en el encapsulado del detector.

Finalmente se describirá el estado actual del sistema, que se encuentra tomando datos en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc desde Diciembre de 2011 con todos los componentes del sistema en funcionamiento.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
ÍNDICE DE FIGURAS	10
1. INTRODUCCIÓN:.....	15
1.1 Experimento ANAIS	15
1.1.1 <i>Cristales detectores</i>	16
1.1.2 <i>Fotomultiplicadores</i>	17
1.1.3 <i>Blindaje de plomo</i>	17
1.1.4 <i>Caja anti-radón</i>	18
1.1.5 <i>Vetos</i>	18
1.1.6 <i>Sistema de adquisición</i>	18
1.2 Objetivos del trabajo fin de máster.....	20
1.3 Cronograma del trabajo fin de máster.....	20
2. PROTOTIPO DE PRUEBAS Y SELECCIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR	21
2.1 Funcionamiento y características.....	21
2.2 Requisitos de los fotomultiplicadores.....	21
2.3 Tipos de fotomultiplicadores usados.....	22
2.4 Desarrollo del montaje experimental (banco de pruebas)	24
2.4.1 <i>Descripción del montaje</i>	24
2.4.2 <i>Simulaciones del circuito con el LED</i>	26
2.4.3 <i>Resultados obtenidos</i>	27
2.5 Conclusiones.....	29

3. CIRCUITOS DE POLARIZACIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR.	31
3.1 Descripción de los pulsos de salida	31
3.2 El circuito de polarización.....	33
3.3 Análisis del circuito de polarización	34
3.4 Problemas del fondo radiactivo de los componentes	37
3.5 Conclusiones	39
4. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN MÓDULO GENERADOR DE RETRASOS NIM	41
4.1 Introducción	41
4.2 El estándar NIM.....	42
4.3 Descripción del módulo	44
4.3.1 Conversión de lógica NIM a TTL.....	44
4.3.2 Generación de retrasos y pulsos variables.....	44
4.3.3 Conversión de lógica TTL a NIM.....	45
4.4 Simulaciones y medidas experimentales	46
4.4.1 Simulaciones	46
4.4.2 Medidas experimentales	47
4.4.3 Pruebas de los retardos digitales y analógicos.....	48
4.5 Conclusiones	49
5. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN PROCESO DE ELECTROFORMACIÓN DE PIEZAS DE COBRE.....	51
5.1 Introducción	51
5.2 La técnica de electroformación	51

5.3 Sistema electrónico de control	52
5.4 Conclusiones	55
6. CONCLUSIONES GLOBALES Y TRABAJOS FUTUROS.....	57
6.1 Conclusiones	57
6.2 Trabajos futuros	57
ANEXOS.....	59
ANEXO A: LABORATORIOS SUBTERRÁNEOS: Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)	61
ANEXO B: CADENA ELECTRÓNICA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL EXPERIMENTO ANAIS	65
ANEXO C: PLANOS.....	85
ANEXO D: ARTÍCULOS:.....	93
I-. Background model for a NaI (TI) detector devoted to dark matter searches	93
II-. Update on the ANAIS experiment. ANAIS-0 prototype results at the new Canfranc Underground Laboratory	93
REFERENCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modulación anual prevista en el ritmo de detección de materia oscura (wimps).....	15
Figura 2: Infraestructura física del experimento ANAIS.....	16
Figura 3: Cristal centelleador.....	16
Figura 4: Interacción de una partícula en un cristal que provoca un centelleo, detectado por un fotomultiplicador y convertido en señal eléctrica. PMT es el fotomultiplicador, HV el alto voltaje necesario para el fotomultiplicador, DAG es la señal que produce el centelleo.....	17
Figura 5: Progreso de montaje del blindaje del prototipo IV. sobre el plomo se ve el detector con su carcasa de cobre. en el centro el cristal con forma paralelepípedica y en los extremos los fotomultiplicadores en sus carcasas de forma cilíndrica.	18
Figura 6: Sistema de adquisición del experimento ANAIS.	19
Figura 7: Esquema de un fotomultiplicador indicando sus principales componentes. ...	21
Figura 8: Fotos de los diferentes fotomultiplicadores: (a) low background PMTs from electron tubes limited (ETL), (b) hamamatsu high quantum efficiency (HQE), (c) low background (LB), (d) ultra low background (ULB) and (e) very low background (VLB) photomultipliers.	23
Figura 9: Datos técnicos de los diferentes PMTs a los que se han realizado pruebas.	24
Figura 10: Banco de pruebas de los fotomultiplicadores donde se puede ver que la fibra óptica se introduce en el teflón del cilindro opaco. también existe la opción de colocar una fuente radioactiva en el cilindro (pegada al fotomultiplicador) tal y como se puede observar en la Figura c.	25
Figura 11: Esquema del circuito utilizado para generar pulsos con un led. con el potenciómetro se regula el ritmo de emisión, con el R7 la constante de caída y con el R9 la intensidad de emisión.....	25
Figura 12: En azul está la señal de entrada al C1, o señal de emisión, y en verde la señal después de pasar por el filtrado del C1.	26
Figura 13: En rojo se representa la señal a la salida del C1 y en la gráfica superior en verde la señal que llega a la base del transistor Q3.....	26
Figura 14: Simulación paramétrica de la señal que se obtiene en la R8 de 51Ω y que es la pulsación final del led, la señal cuadrada es la señal de entrada, la cual podemos variar en frecuencia.	27
Figura 15: Ganancias relativas de los diferentes fotomultiplicadores usados.	28
Figura 16: Variación de la ganancia con la frecuencia en los PMT ULB.....	28
Figura 17: Fotomultiplicador VLB que será usado en el experimento anais.	29
Figura 18: Definición de la FWHM.....	32
Figura 19: Ejemplo de señal de centelleo de alta energía digitalizada.....	32
Figura 20: Ejemplo de señal de centelleo de alta energía vista en el osciloscopio.....	33
Figura 21: Ejemplo de señal de centelleo de baja energía digitalizada.....	33
Figura 22: Esquema tipo de conexión	34
Figura 23: Uno de los esquemas de polarización usado en el experimento ANAIS. ...	35
Figura 24: Análisis en ac del circuito, donde el ánodo se simula como un generador de corriente.....	35
Figura 25: Reflexiones en la línea de transmisión.....	36

Figura 26: Análisis paramétrico del efecto de las capacidades en la línea de transmisión. se ha simulado para C = 0, 15, 45, 60 y 100 pF. con un retraso de 5 ns respecto a la señal del ánodo.....	36
Figura 27: Ancho de banda para la señal de salida.	37
Figura 28: Esquema de salida usado en trabajos previos a la izquierda y a la derecha con la resistencia de salida en serie.....	37
Figura 29: Simulación de los rebotes provocados al alejar las resistencias de polarización unos 2 metros. en verde la señal del ánodo.	38
Figura 30: Evolución de las circuitos de polarización de los fotomultiplicadores	39
Figura 31: Sistema de adquisición a la salida del detector.....	42
Figura 32: Ejemplo de una señal nim tomada con el osciloscopio.	43
Figura 33: Etapa de entrada del módulo a la izquierda y la señal de entrada/salida a la derecha.....	44
Figura 34: En amarillo la señal de entrada NIM, en azul la salida del primer monoestable y en morado la salida ttl del segundo monoestable. las Figuras (a) y (b) muestran el retardo de 120 y 200 ns respectivamente.	45
Figura 35: Esquema usado en spice para simular el conversor TTL/NIM.....	46
Figura 36: En verde están la señal nim a la salida y la corriente por el transistor Q4, la señal azul es la corriente por el transistor Q3.	46
Figura 37: En azul la tensión en la base del transistor Q4, en rojo la tensión en el Q3 y en verde la señal ttl de entrada.	47
Figura 38: En rojo la señal NIM de salida y en verde la TTL de entrada.....	47
Figura 39: En amarillo la entrada nim, en azul la salida del conversor nim/ttl, en morado la entrada al conversor TTL/NIM y en verde la salida del módulo. . las Figuras (a) y (b) muestran el retardo de 62 y 40 ns respectivamente.	48
Figura 40: Gráficas con las pruebas realizadas con los TDC.....	48
Figura 41: Imagen del módulo integrado en un rack NIM del experimento.	49
Figura 42: Esquema del proceso de electroformación	52
Figura 43: Pieza de cobre electroformado obtenido a 4 A/dm ² con velocidad de giro de 4 rev/s tras 42 h de proceso de electrodeposición a corriente continua.	52
Figura 44: Vista frontal y posterior del sistema electrónico de control.	53
Figura 45: Esquema del sistema de control del proceso de electroformación.	54
Figura 46: Vista del sistema de electroformación completo	55

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN:

1.1 Experimento ANAIS

ANAIS (Annual modulation with NaI Scintillators) [1] es un experimento de detección directa de materia oscura. Su objetivo es medir la diferencia estacional del ritmo de detección de partículas para confirmar la existencia de materia oscura, como también su distribución en las galaxias.

Los cálculos teóricos y evidencias experimentales arrojan que el 25 % de la materia que compone el Universo es materia oscura [2]. Esta materia no emite luz y sólo interacciona a través de la fuerza gravitatoria y de interacción débil. Una de las pruebas más fehacientes de la existencia de la materia oscura son las curvas de rotación de las galaxias. Para explicar su trayectoria es imprescindible suponer que existen halos de materia oscura alrededor de las galaxias permitiendo la rotación observada. Como consecuencia de ello debería encontrarse un flujo modulado de materia oscura según el movimiento anual de la Tierra.

Los candidatos a materia oscura que este experimento intenta hallar son WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, partículas masivas de interacción débil). Como bien define su acrónimo son partículas que interaccionan muy poco con la materia haciendo su detección difícil y complicada. Una representación esquemática de la detección de la materia oscura se encuentra en la Figura 1.

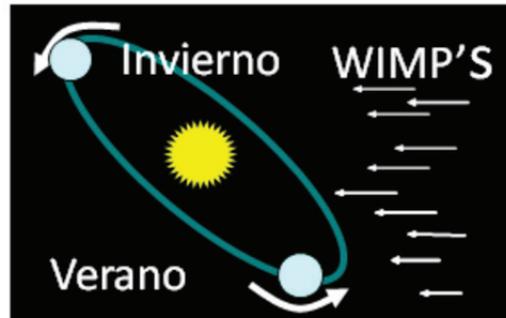


Figura 1: Modulación anual prevista en el ritmo de detección de materia oscura (WIMPs).

Debido a que la señal que los WIMPs dejarían en el detector tiene muy baja probabilidad de que suceda, el experimento ANAIS [3], se sitúa en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc [4] donde se refugia de los rayos cósmicos provenientes de la atmosfera que serían detectados en el experimento. Así la montaña hace de blindaje frente a las partículas que forman los rayos cósmicos. En el laboratorio se consigue reducir este nivel de radiación en cinco órdenes de magnitud.

En la Figura 2 se puede ver esta infraestructura, desde los detectores con su carcasa de cobre en el interior, los fotomultiplicadores en sus dos extremos, el blindaje de plomo, la caja estanca anti-radón y los vetos en el exterior, de color negro y con un fotomultiplicador en el extremo. A continuación se repasa cada uno de estos elementos.

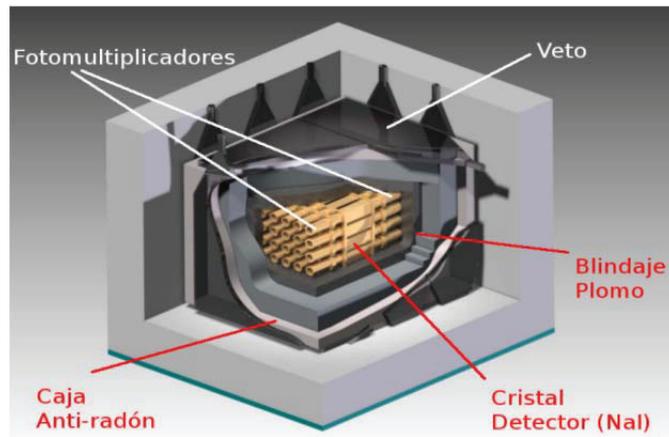


Figura 2: Infraestructura física del experimento ANAIS.

1.1.1 Cristales detectores

El elemento fundamental del experimento son los cristales detectores, como el que muestra la Figura 3, donde se muestra la interacción de una partícula en el cristal y su posterior producción de fotones. Son cristales centelleadores que convierten la energía depositada por la radiación ionizante en luz, generando una cantidad de luz proporcional a la energía que se deposita en su interacción con el cristal. Para el propósito del experimento es muy importante que los cristales sean radiopuros, deben contener la mínima impureza radioactiva que proporcione ruido a la señal que se desea detectar. Este es un requisito imprescindible porque la posible contaminación podría enmascarar la señal esperada y dificultar o imposibilitar la determinación de la oscilación anual. No obstante, aunque este prototipo no es adecuado para el experimento final (sus niveles de contaminación son superiores a los requeridos), ha permitido optimizar el diseño del encapsulamiento, estudiar distintos modelos de fotomultiplicadores (PMTs), poner a punto la electrónica y sistema de adquisición de datos.

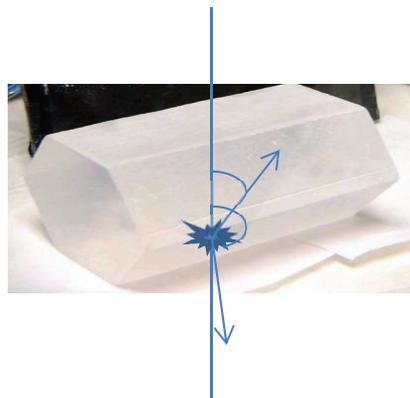


Figura 3: Cristal centelleador.

1.1.2 Fotomultiplicadores

La detección de la luz generada en los cristales se realiza mediante fotomultiplicadores. Estos dispositivos son capaces de generar electrones mediante el efecto fotoeléctrico y posteriormente multiplicar el número de electrones para que la señal eléctrica sea tratable electrónicamente. Para su operación necesitan una fuente de alto voltaje. Los fotomultiplicadores usados en ANAIS necesitan voltajes entre 1000 y 1500 V.

En ANAIS se usan dos fotomultiplicadores por cristal para detectar luz en sus dos extremos. Esto tiene como objetivo poder confirmar que la señal detectada proviene de un centelleo del cristal y no es una detección fortuita de un fotón generado en o en la proximidad del fotomultiplicador. En la Figura 4 se puede observar como una interacción en un cristal genera luz y esta luz es detectada por el fotomultiplicador.

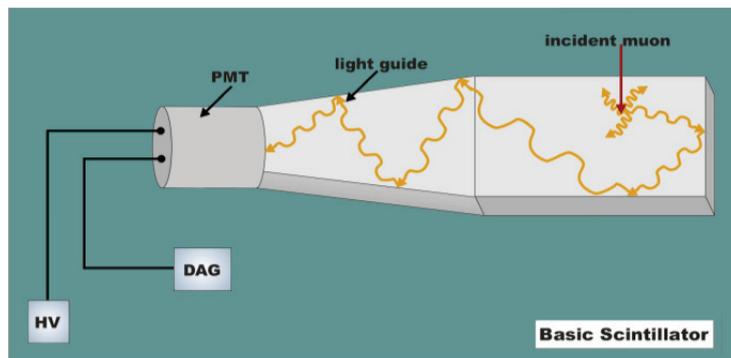


Figura 4: Interacción de una partícula en un cristal que provoca un centelleo, detectado por un fotomultiplicador y convertido en señal eléctrica. PMT es el fotomultiplicador, HV el alto voltaje necesario para el fotomultiplicador, DAG es la señal que produce el centelleo.

1.1.3 Blindaje de plomo

Los cristales y los fotomultiplicadores se rodean con ladrillos de plomo para aislar en lo posible a los detectores de la radioactividad natural. De otro modo los detectores registrarían toda la actividad circundante que no dejaría observar efectos sutiles como el que se quiere detectar. El blindaje consiste en 30 cm de plomo, de los cuales los 10 cm internos son plomo arqueológico de baja actividad. En la Figura 5 se puede observar el progreso de montaje del blindaje que rodea al prototipo. También se puede observar el detector con su carcasa de cobre y los dos fotomultiplicadores a los lados.



Figura 5: Progreso de montaje del blindaje del Prototipo IV. Sobre el plomo se ve el detector con su carcasa de cobre. En el centro el cristal con forma paralelepédica y en los extremos los fotomultiplicadores en sus carcasas de forma cilíndrica.

1.1.4 Caja anti-radón

El blindaje se encuentra en el interior de un caja estanca de policarbonato con perfiles de aluminio que permite un cierre hermético y a la que se le puede suministrar un flujo de nitrógeno gas para desalojar el radón del aire de la cavidad más próxima a los detectores. El radón es relativamente abundante en subterráneos y tiene actividad radioactiva muy molesta para la zona de interés.

1.1.5 Vetos

Son detectores de plástico centellador colocados fuera del blindaje para detectar sucesos de alta energía. Detectan muones que atraviesan la montaña y llegan hasta el experimento. El centelleo de estos vetos en coincidencia con un suceso en los cristales de NaI, permite rechazarlos ya que se debe atribuir a un muón y no a la materia oscura. Si un evento en el cristal coincide con una señal en los vetos se descarta (se veta) por ese motivo.

1.1.6 Sistema de adquisición

A partir de la señal de salida de los fotomultiplicadores comienza el sistema de adquisición encargado de la detección de eventos y del tratamiento y digitalización de dicha señal. En el esquema global que se muestra en la Figura 6 se puede ver que hay dos partes, la primera y marcada en verde es el sistema de adquisición a la salida del detector. En este Trabajo Fin de Máster se centra en esta parte del experimento que es donde se encuentran los PMTs y donde hemos realizado nuestras pruebas y desarrollos para mejorar el experimento. El funcionamiento de esta primera etapa se explicará con detalle en el capítulo 4.

La segunda parte y marcada en morado es donde se digitaliza la señal para que posteriormente el sistema de adquisición almacene los datos y monitoree el buen funcionamiento del sistema. Esta parte se explicará en el Anexo B, al igual que el funcionamiento global del sistema de adquisición. Este Trabajo Fin de Máster pretende centrarse en las pruebas que se han realizado a los fotomultiplicadores, así como ciertas mejoras y desarrollos propios que han contribuido al desarrollo y puesta en marcha del experimento.

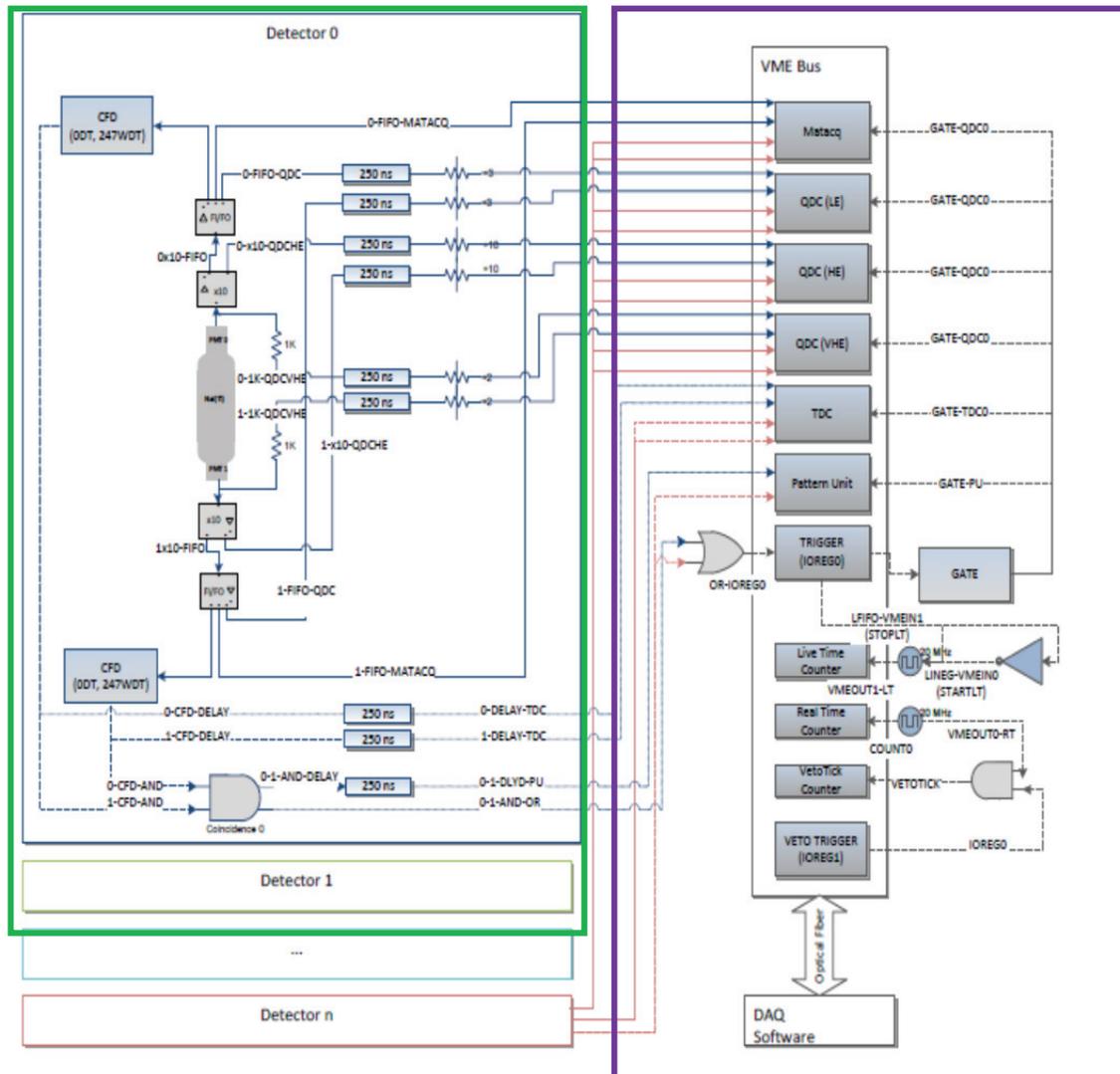


Figura 6: Sistema de adquisición del experimento ANAIS.

1.2 Objetivos del trabajo fin de máster

Los objetivos principales de este Trabajo Fin de Máster son:

- Realizar una serie de pruebas a los fotomultiplicadores disponibles, para poder elegir el más idóneo al experimento.
- Diseñar y probar los circuitos de polarización de los fotomultiplicadores.
- Desarrollo de módulos electrónicos específicos para el experimento.
- Con la finalidad de fabricar encapsulados y piezas para el detector, se presentará un sistema electrónico capaz de realizar la electroformación de cobre.

Todo el trabajo realizado está orientado a la puesta en marcha de un experimento que se basa en la detección de partículas elementales.

1.3 Cronograma del trabajo fin de máster

A continuación se muestra la distribución de las actividades realizadas con su asignación temporal:

ACTIVIDAD	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RECOPIACION INFORMACIÓN									
DISEÑO SIST.ELECTROFORMACIÓN									
PRUEBAS SIST.ELECTROFORMACIÓN									
REALIZACIÓN SIST.FINAL									
ESTUDIO FOTOMULTIPLICADORES									
REALIZACION PROTOTIPO SIST. LED									
PRUEBAS FOTOMULTIPLICADORES/LED									
ESTUDIO BASES FOTOMULTIPLICADORES									
SIMULACIONES BASES									
PCB BASES									
PRUEBAS CIRCUITOS BASES									
DISEÑO ELECTRÓNICA EXPERIMENTO									
SIMULACIÓN MOD. VENTANAS									
DISEÑO PROTOTIPO									
PRUEBAS PROTOTIPO									
REALIZACIÓN DISEÑO DEFINITIVO									
MEDIDAS EXPERIMENTALES									
REDACCIÓN MEMORIA									

2. PROTOTIPO DE PRUEBAS Y SELECCIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR

Una vez que un detector centelleador ha convertido la energía depositada por una partícula en una señal luminosa, dicha señal debe ser procesada. Para ello, en este experimento se usan fotomultiplicadores. En este capítulo se exponen las medidas llevadas a cabo a distintos fotomultiplicadores que permitirán comparar sus características y valorar sus posibilidades para mejorar las prestaciones del experimento.

2.1 Funcionamiento y características

Entre los aparatos fotosensitivos que existen actualmente, un fotomultiplicador [5] proporciona una respuesta muy rápida y alta sensibilidad. Según puede verse en la Figura 7, un fotomultiplicador típico está formado por un fotocátodo, electrodos focalizadores, un sistema multiplicador de electrones (dínodos) y un colector de electrones (ánodo); todo esto encerrado en un tubo al vacío.

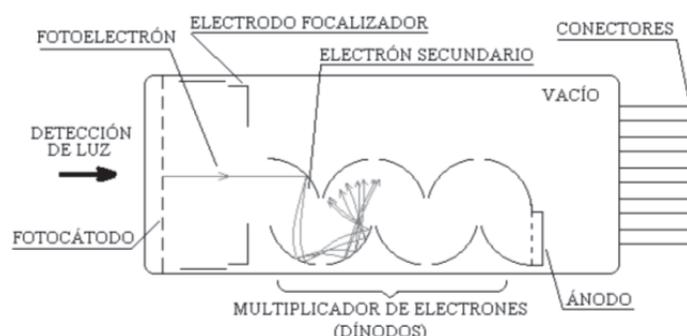


Figura 7: Esquema de un fotomultiplicador indicando sus principales componentes.

Cuando la luz incide en el fotocátodo, en un rango de longitudes de onda adecuado (dependiente del material fotosensible utilizado como fotocátodo), este emite fotoelectrones en el vacío (por efecto fotoeléctrico). Estos fotoelectrones son entonces dirigidos por un campo eléctrico adecuado (generado por los voltajes de los electrodos focalizadores) hacia el multiplicador de electrones. Allí los electrones se multiplican en cada etapa o dínodo, invirtiendo la energía que el campo eléctrico les proporciona en arrancar electrones del dínodo por un proceso de emisión secundaria. Los electrones multiplicados son finalmente recogidos por el ánodo proporcionando la señal de salida.

2.2 Requisitos de los fotomultiplicadores

Para la búsqueda de materia oscura interesan fotomultiplicadores con alta eficiencia cuántica que sean capaces de "ver" la menor cantidad de luz posible. Lógicamente también deben tener muy alta radiopureza porque son una de las mayores fuentes de contaminación del detector al encontrarse tan cerca del cristal (de hecho están en contacto si no se instalan guías de luz). No debe confundirse eficiencia cuántica con ganancia, aunque de ambas características dependerá la amplificación de la luz que

realice el fotomultiplicador. A continuación se van a introducir los conceptos de ganancia y eficiencia cuántica y sus principales diferencias.

Ganancia

La ganancia es la relación entre la corriente de salida del ánodo y la generada en el fotocátodo. Para un fotomultiplicador con n etapas (dínodos) y un factor medio de emisión de electrones secundarios \bar{z} por etapa, la ganancia es \bar{z}^n . Además el factor de emisión de electrones secundarios es $\bar{z} = AE^\alpha$ donde A es una constante, E el voltaje entre etapas y α un coeficiente que depende del material y la forma geométrica, que suele estar comprendido entre 0,7 - 0,8. Si se aplica un voltaje V entre el cátodo y el ánodo, la ganancia μ es:

$$\mu = \bar{z}^n = (AE^\alpha)^n = \left[A \left(\frac{V}{n+1} \right)^\alpha \right]^n = KV^{\alpha n} \quad (1)$$

Donde K es una constante. La ganancia depende fuertemente del voltaje aplicado. Cualquier pequeña variación en este sería magnificada a la salida. Esto implica que las fuentes de voltaje deben ser estables en largos periodos de tiempo para poder realizar un experimento de estudio de materia oscura.

Eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica es el número de fotoelectrones emitidos por el fotocátodo respecto al número de fotones incidentes. Dicho de otro modo, no todos los fotones que llegan al fotocátodo se convierten en electrones por efecto fotoeléctrico y llegan a los dínodos y este factor es el que representa la eficiencia cuántica que suele expresarse en porcentaje.

$$QE = \frac{\text{Número de fotoelectrones}}{\text{Número de fotones}} \times 100(\%) \quad (2)$$

En resumen, tanto la eficiencia cuántica como la ganancia son dos factores muy importantes a tener en cuenta que deben valorarse conjuntamente a la hora de elegir un fotomultiplicador. La eficiencia cuántica determina el umbral alcanzable, como se ha mencionado para la medida de materia oscura es necesario que sea bajo, entonces la alta eficiencia cuántica supone una ventaja. Por otro lado la ganancia facilita distinguir la señal de un único fotoelectrón del ruido electrónico.

2.3 Tipos de fotomultiplicadores usados

En este Trabajo Fin de Master se han probado varios modelos de fotomultiplicadores se han probado antes de realizar la elección del más apropiado para ser instalado en el experimento en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Los siguientes cinco modelos han sido estudiados:

ETL (Electron Tubes Limited) [6]: Fotomultiplicadores de bajo fondo de la marca Electron Tubes Limited, modelo 9302B, la primera opción para ser instalados en el experimento ANAIS.

HQE (Hamamatsu high quantum efficiency) [7]: Fotomultiplicadores de Hamamatsu de alta eficiencia cuántica, mayor al 42%. El modelo (R6233-100SEL) fue probado con el objetivo de bajar el umbral de detección. Sin embargo sus requerimientos de bajo fondo no fueron los necesarios.

LB (low background photomultiplier) [7]: PMTs Hamamatsu de bajo fondo, modelo (R6233-100MOD), muy similares en funcionamiento a los de alta eficiencia cuántica, pero combinando una buena eficiencia cuántica y bajo fondo radioactivo. Además el precio de los LB es inferior al de los ETL.

ULB (ultralow background photomultiplier) [7]: Este modelo de Hamamatsu, el R11065 SEL eran una buena opción ya que están especialmente diseñados para experimentos de bajo fondo. Bajo pedido se pueden pedir de una eficiencia cuántica del 30%, sin embargo su coste es excesivo.

En cualquier caso, Hamamatsu dejó al grupo de investigación un PMT modelo (ZK5171) para que fuera medido su fondo radiactivo. Después de realizar las correspondientes medidas se compraron y testearon dos unidades, el (BA0057 y el BA0086).

VLB (very low background photomultiplier) [7]: Este modelo fue ofrecido por Hamamatsu como una posible solución para el experimento. El VLB PMTs (R6956 MOD) tiene menos radioactividad que el LB y no es tan caro como los ULB, además se garantiza una eficiencia cuántica del 33%.

En la Figura 8 aparece una imagen de los fotomultiplicadores y en la Figura 9 se muestran sus principales características.

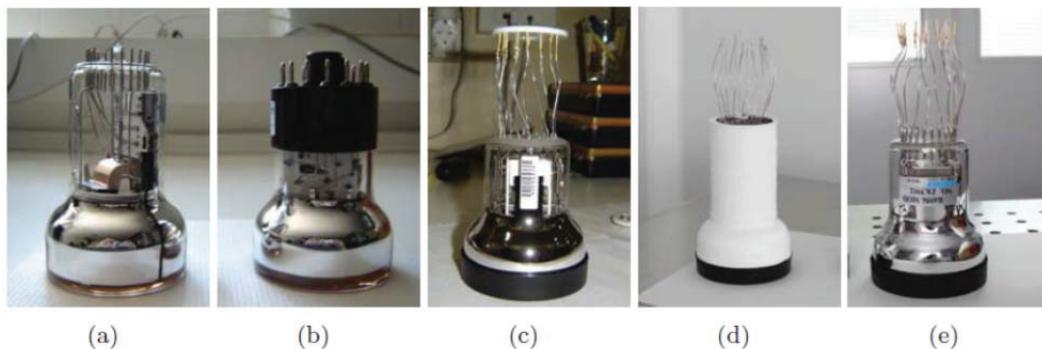


Figura 8: Fotos de los diferentes fotomultiplicadores: (a) Low background PMTs from Electron Tubes Limited (ETL), (b) Hamamatsu high quantum efficiency (HQE), (c) low background (LB), (d) ultra low background (ULB) and (e) very low background (VLB) photomultipliers.

GENERAL		9302B	R6233-100	R11065	R6956
Diameter	inch	3	3	3	3
Spectral response	nm	285-630		200-650	300-650
λ of max. Response	nm		420	420	420
PK material			SBA	BA	BA
PK Min. Effective	mm		70	64	70
Dynode structure		L	B+L	B+L	B+L
Number of Stages		9	8	12	10
Operating Ambient T	C	-30/+60		-186/+50	-30/+50
Max. Supply Voltage	V	1300	1500	1750	1500
Max. Av. Anode Curr.	mA	0,1	0,1	0,1	0,1
CHARACTERISTICS AT 25°C					
Cathode Luminous Sens.	$\mu\text{A/lm}$	75	130	90	100
QE@peak	%	30	35	25	
QE@420 nm	%		34		
Cath. Blue Sens. Index			13.5	10	11
Anode Luminous Sens.	A/lm	50	30	450	100
Gain	-10^5	7	2,3	5	10
Anode Dark Curr. (max)	nA	0,5(5)	10(30)	10(100)	6(60)
Dark Current Rate	s^{-1}	500			
Anode Pulse Rise Time	ns	7,5	6	5,5	9,5
Electron Transit Time	ns	125	52	46	60
Transit Time Spread	ns	15		6,5	13
Pulse Linearity	mA	30(+/-5%)		20(+/-2%)	30(+/-2%)

Figura 9: Datos técnicos de los diferentes PMTs a los que se han realizado pruebas.

2.4 Desarrollo del montaje experimental (banco de pruebas)

A la hora de probar distintas configuraciones del sistema de recogida de luz, es un gran inconveniente la higroscopicidad (capacidad de los materiales para absorber la humedad) del NaI y la necesidad de preservarlo en atmósfera limpia para evitar contaminaciones superficiales. Además, debido a que los detectores de NaI han de ponerse dentro de un blindaje de plomo, resulta más cómodo poder hacer estas pruebas en un banco de pruebas antes de realizar el montaje definitivo dentro del blindaje. Por todo esto se optó por simular la emisión de luz mediante un LED pulsado. Para ello se diseñó y construyó un prototipo que sirviese para simular la emisión de luz en el banco de pruebas.

2.4.1 Descripción del montaje

En primer lugar se diseñó el sistema que daba soporte mecánico al montaje. Este sistema se puede observar en la Figura 10. Se diseñó un cilindro opaco en el cual se colocaba uno o dos fotomultiplicadores (PMTs) en los extremos para realizarles diferentes pruebas. La luz de un LED, guiada a través de una fibra óptica, incide en un disco de Teflon (que actúa como difusor de luz) dentro del cilindro. Esa luz incidente es medida por los PMTs. La intensidad de la luz que llega a los PMTs se puede seleccionar con dos polarizadores y un filtro de absorción. Gracias al circuito del LED, la salida es similar a la de un pulso de centelleo de un detector de NaI(Tl), con lo cual nos permite simular sucesos sin necesidad de usar un detector. La señal producida

por el fotomultiplicador se graba en un osciloscopio digital y posteriormente se analiza con un software específico.

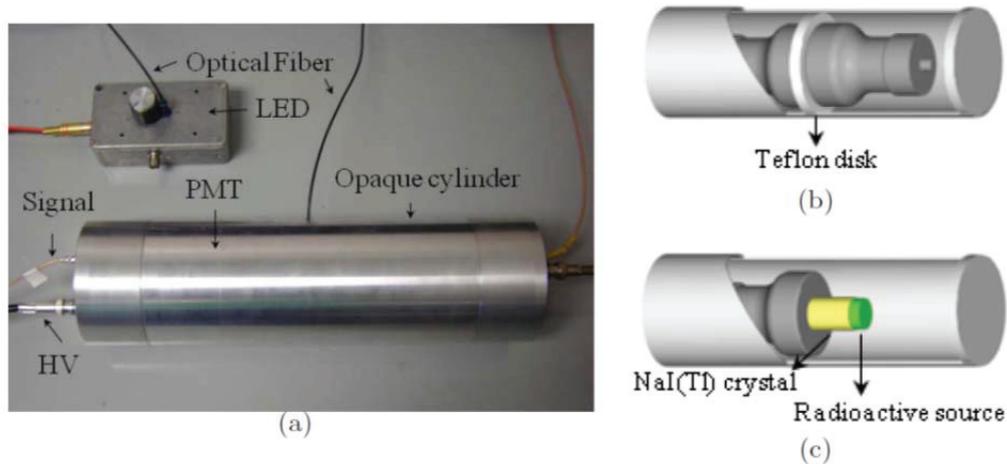


Figura 10: Banco de pruebas de los fotomultiplicadores donde se puede ver que la fibra óptica se introduce en el teflón del cilindro opaco. También existe la opción de colocar una fuente radioactiva en el cilindro (pegada al fotomultiplicador) tal y como se puede observar en la Figura c.

El LED utilizado es un diodo que emite en el ultravioleta (la frecuencia de emisión de nuestros cristales) y se ha utilizado el circuito de la Figura 11 para generar un pulso luminoso cuya intensidad decae exponencialmente con el tiempo. El sistema desarrollado dispone de tres potenciómetros con los que se regula el ritmo de emisión, la constante de caída y la intensidad de emisión.

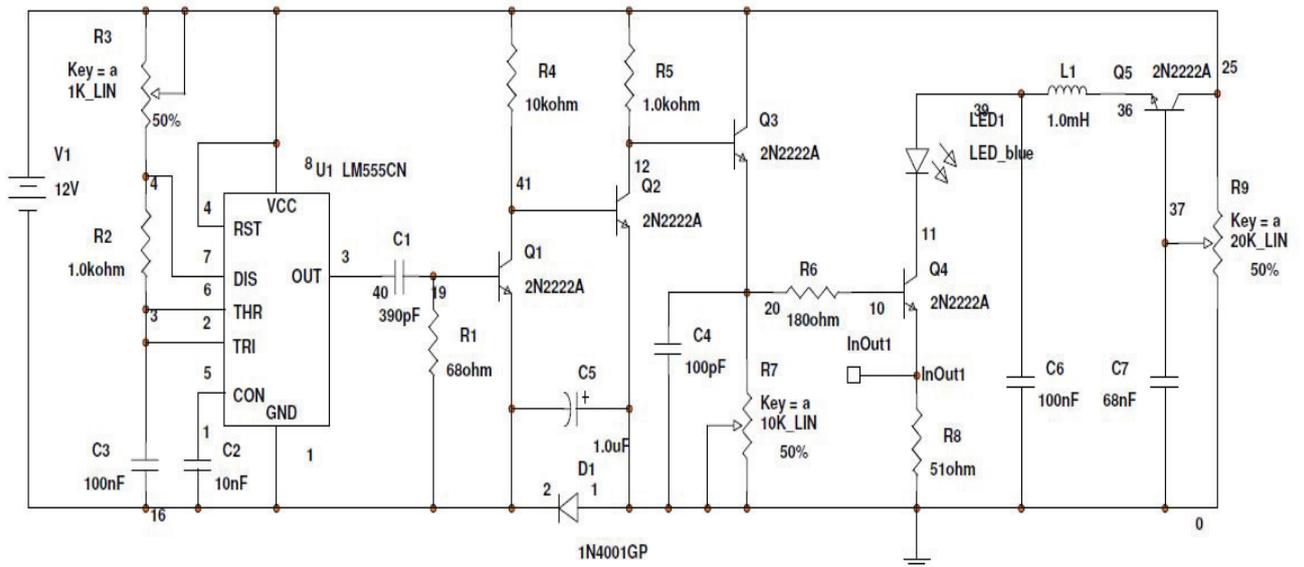


Figura 11: Esquema del circuito utilizado para generar pulsos con un LED. Con el potenciómetro se regula el ritmo de emisión, con el R7 la constante de caída y con el R9 la intensidad de emisión.

Aunque se partió de este esquema, se ha variado la configuración del sistema en alguna ocasión, utilizando inversores en lugar de los transistores Q1 y Q2 y en lugar de utilizar el LM555CN, se ha utilizado en el laboratorio un generador de ondas.

2.4.2 Simulaciones del circuito con el LED

El LED utilizado es un diodo que emite en el ultravioleta, con una longitud de onda de 410 nm y una tensión de polarización de unos 3,2 V. A continuación se muestra una simulación pSpice [8] del circuito de la Figura 11.

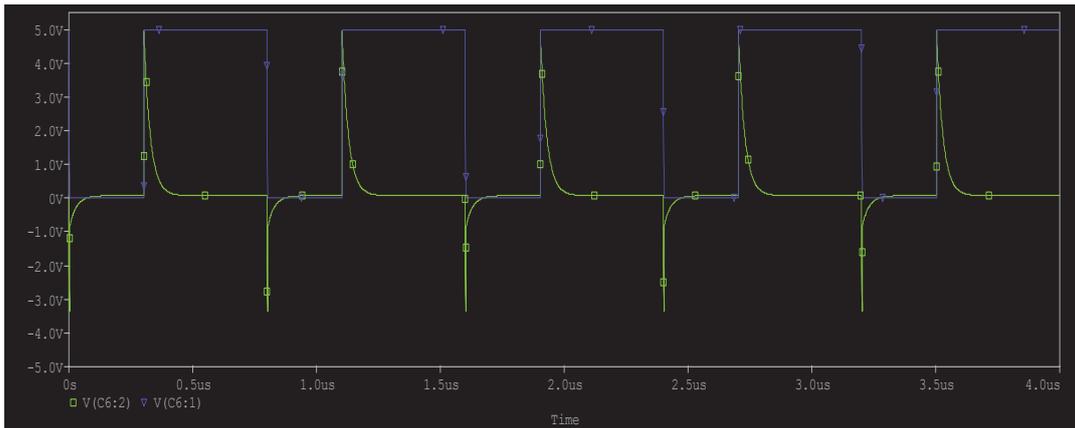


Figura 12: En azul está la señal de entrada al C1, o señal de emisión, y en verde la señal después de pasar por el filtrado del C1.

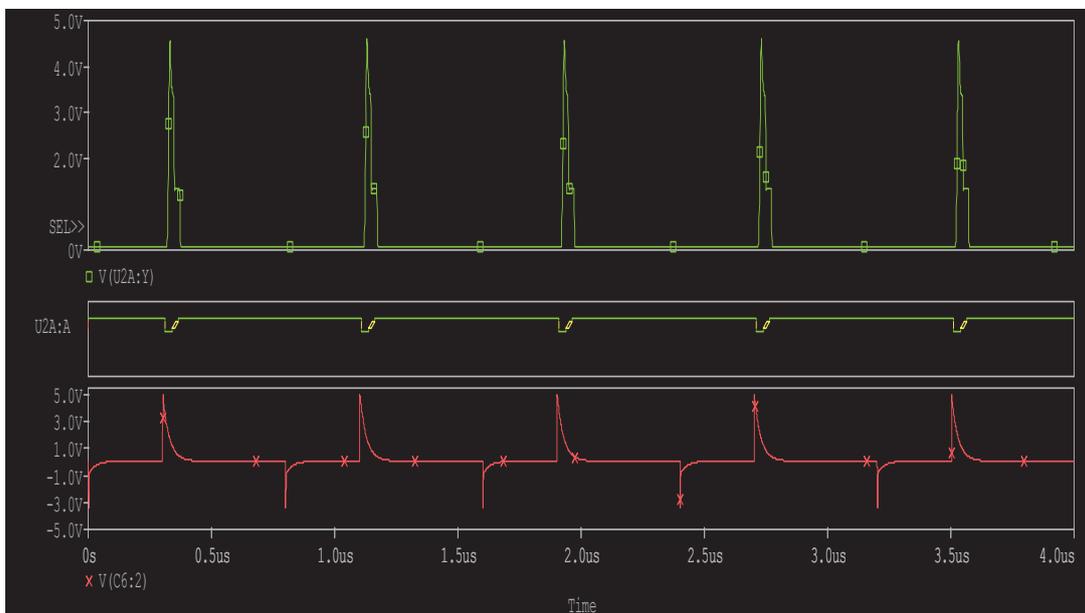


Figura 13: En rojo se representa la señal a la salida del C1 y en la gráfica superior en verde la señal que llega a la base del transistor Q3.

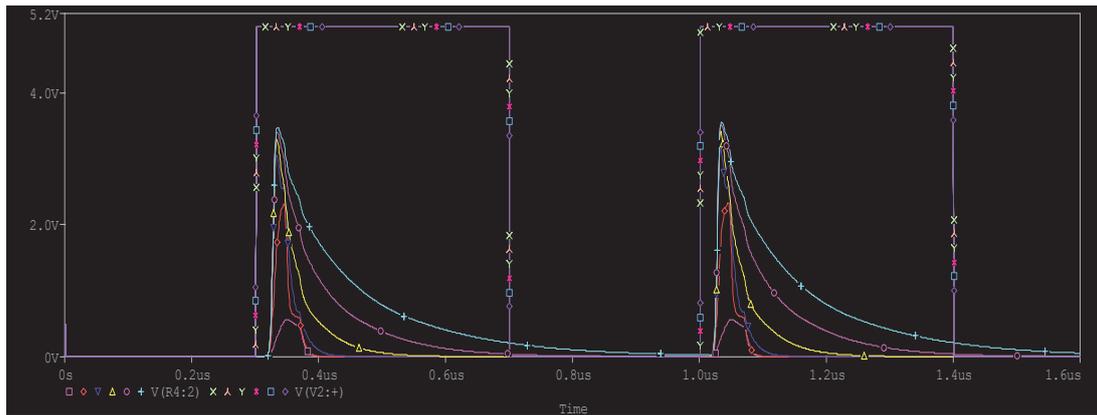


Figura 14: Simulación paramétrica de la señal que se obtiene en la R8 de 51Ω y que es la pulsación final del LED, la señal cuadrada es la señal de entrada, la cual podemos variar en frecuencia.

Con esto ya tenemos los pulsos que necesitamos para que la frecuencia de emisión de nuestro LED varíe. Posteriormente, con el C4 y el potenciómetro R7 variaremos la constante de caída de la señal que llega al transistor Q4.

Como se puede apreciar en la Figura 14, la anchura del pulso del LED está entre 30-50 ns ya que si se hace más estrecho se distorsiona. Con esta anchura ya tenemos un pulso rápido para poder probar los PMTs al nivel del fotoelectrón, también podemos obtener un pulso con un tiempo de decaimiento de hasta $10 \mu\text{s}$ si queremos un pulso más lento. La amplitud del pulso ha de mantenerse entre 2-3 V para que no se distorsione la señal y el LED emita correctamente, y la frecuencia de emisión hasta unos 15 MHz se comporta correctamente.

2.4.3 Resultados obtenidos

Se obtuvieron experimentalmente las curvas de ganancia para cada fotomultiplicador. Estas medidas consistieron en medir la respuesta (amplitud del pulso eléctrico de salida del ánodo del fotomultiplicador) ante el mismo estímulo luminoso del LED para distintos voltajes aplicados. No es necesario medir la ganancia absoluta sino la relativa puesto que es suficiente con saber qué fotomultiplicador tiene la mayor ganancia.

Las ganancias se fueron midiendo a medida que llegaban los PMTs y antes de colocarlos en el experimento para poder comprobar su correcto funcionamiento, para determinar su punto de operación óptimo y comparar ganancias entre diferentes fotomultiplicadores. Como en cada detector se ponen dos fotomultiplicadores y han de tener la misma ganancia, este montaje nos sirve al mismo tiempo para determinar a qué voltaje se obtiene la misma ganancia. Los modelos LB y HQE tienen una ganancia similar, los ETL tienen una ganancia un poco superior, y los ULB, VLB tienen una ganancia menos homogénea.

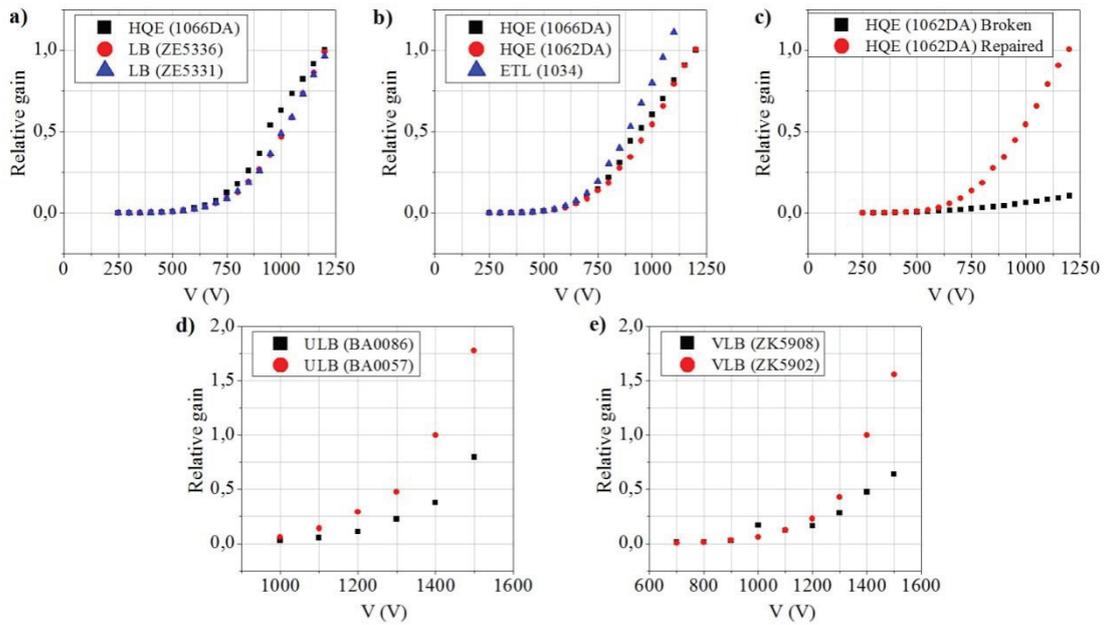


Figura 15: Ganancias relativas de los diferentes fotomultiplicadores usados.

Dependencia de la ganancia con el ritmo.

Se realizaron pruebas a distintas frecuencias con el banco de pruebas del LED, para estudiar el comportamiento no lineal de la ganancia del ULB PMT a alta frecuencia y señales grandes. La diferente estructura de los dinodos respecto a los otros modelos parece ser la causa de este comportamiento. Al aumentar la frecuencia de la señal, la ganancia aumenta, sin embargo con los LB no ocurre lo mismo. Este efecto ha de tenerse en cuenta cuando se calibra el experimento, ya que se usan fuentes radiactivas de mayor energía (mayor frecuencia), con lo cual la ganancia aumenta. Sin embargo, para la zona de interés del experimento baja energía (bajas frecuencias), este efecto no se ha observado.

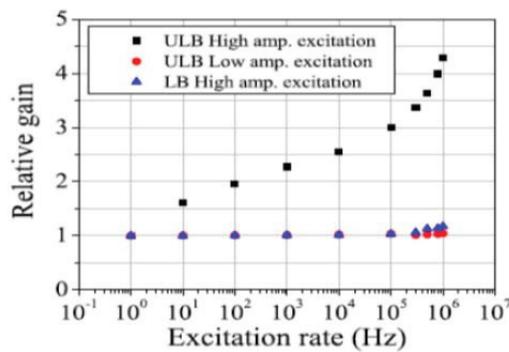


Figura 16: Variación de la ganancia con la frecuencia en los PMT ULB

2.5 Conclusiones

En los resultados anteriores se ha determinado la versatilidad de los fotomultiplicadores más adecuados para el experimento ANAIS. La primera opción fue usar los fotomultiplicadores de Electron Tubes, pero como hemos visto en los apartados anteriores los fotomultiplicadores de Hamamatsu con una mayor eficiencia cuántica son una mejor opción. Los fotomultiplicadores de bajo fondo (LB) de Hamamatsu pueden requerir guías de luz cuya contribución al fondo del experimento es considerable.

Entre los ULB o los VLB y hablando en términos de bajo fondo habría que elegir los ULB. Pero debido al alto coste de los ULB y que Hamamatsu garantiza una eficiencia cuántica del 33% para los VLB y del 30% para los ULB. Además los ULB como se ha visto, a altas frecuencias y señales grandes tiene un comportamiento no lineal, por tanto la opción más plausible es usar los PMTs VLB. Se puede observar uno de ellos en la Figura 17.

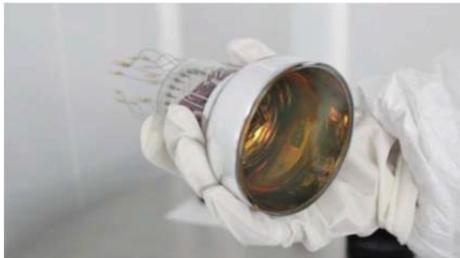


Figura 17: Fotomultiplicador VLB que será usado en el experimento ANAIS.

3. CIRCUITOS DE POLARIZACIÓN DEL FOTOMULTIPLICADOR

En el capítulo anterior se ha descrito cómo una partícula que incide en el detector es transformada en luz para que posteriormente el fotomultiplicador la transforme en carga generada en el ánodo. Esta señal de carga ha de convertirse en un pulso de tensión que es lo que realmente se mide con un osciloscopio o es digitalizado y almacenado después de pasar por la cadena de adquisición. En este capítulo se va a describir cómo se transforma esa carga en un pulso de salida gracias a unos circuitos que se acoplan al fotomultiplicador y que se llaman circuitos de salida, polarización o circuitos de polarización del PMT.

3.1 Descripción de los pulsos de salida

Para realizar el análisis del pulso de salida de estos circuitos de polarización se requiere una buena comprensión de la forma temporal de nuestros pulsos y el efecto sobre ella de los circuitos equivalentes de salida. Este estudio de los pulsos nos va a permitir por ejemplo, distinguir los tipos de partículas de alta energía para entender la contaminación intrínseca de nuestros detectores, o también estimar el número de fotoelectrones en un suceso mediante contaje.

El propio diseño de la electrónica posterior de adquisición, requiere también una buena comprensión de estos pulsos, para garantizar que no se distorsione la señal.

La producción de luz que sigue a la interacción de una partícula decae aproximadamente de forma exponencial con una constante que en el caso del NaI es a temperatura ambiente es de $T_s = 230$ ns [9]. Así que podemos representar la intensidad luminosa en función del tiempo como:

$$I(t) = A \exp\left(-\frac{t}{T_s}\right) / T_s \quad (3)$$

Esta expresión, normalizada ($A = 1$), debe interpretarse realmente como la distribución de probabilidad de intensidad luminosa en función del tiempo.

Sólo en el caso de que se produzca un número elevado de fotones, la forma real del pulso luminoso se aproximará a esta forma teórica. En la práctica el número de fotones que lleguen a los cátodos va a ser pequeño. Así pues, la forma del pulso luminoso será una suma de deltas de Dirac en instantes que siguen la función de distribución anterior.

No es posible extraer una expresión analítica de la respuesta temporal de un PMT para un fotoelectrón, que representaremos como el $SER(t)$, es decir, *single electron response*. Sin embargo, puede parametrizarse de forma sencilla. Por un lado, está el tiempo de tránsito t_t , que es el tiempo transcurrido desde el inicio de la avalancha hasta la presencia del pulso en el ánodo, definido en el máximo de amplitud. Aunque no es un parámetro relevante en nuestro experimento, las especificaciones de nuestros PMTs dan un tiempo de tránsito de 40 ns. En aplicaciones en que se requiera un control preciso de tiempos absolutos, será importante controlar este parámetro y su posible variación.

Conforme los electrones son acelerados en las sucesivas etapas del PMT y se va amplificando la avalancha, las pequeñas diferencias de tiempo iniciales, provocadas por las diferentes velocidades iniciales (tanto en módulo como en dirección) se van incrementando, y esto hace que la llegada de la carga al ánodo no sea una delta de Dirac, sino una función con una cierta anchura t_w . Este parámetro fija la resolución temporal de nuestro sistema o capacidad de distinguir fotones individuales.

Hay dos modelos distintos de PMTs, que hemos llamado "lentos" y "rápidos". Los primeros tienen una FWHM de unos 30 ns, y los segundos de unos 15 ns. La FWHM (Full Width at Half Maximum) se puede ver en la Figura 18, la cual nos indica la fluctuación del tiempo de tránsito entre dos pulsos individuales producidos por un fotón. En cualquier caso, se comprende que unos pocos fotones distribuidos exponencialmente con 230 ns de constante de tiempo, van a dar lugar a una estructura temporal discreta.

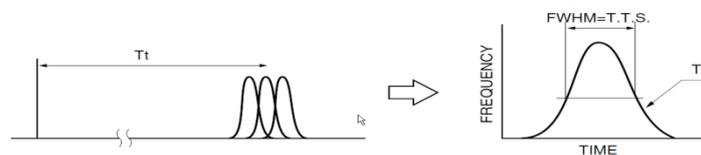


Figura 18: Definición de la FWHM

Con estos parámetros, es posible dar varias aproximaciones a la $SER(t)$. En nuestro caso hemos considerado como aproximación una gaussiana, aunque en la práctica la función no sea perfectamente simétrica:

$$SER(t) = \frac{A}{2\pi} \exp \left[-\frac{(t-t_t)^2}{2t_w} \right] \quad (4)$$

Se hace hincapié en la importancia de la $SER(t)$ ya que en los experimentos de materia oscura se buscan señales a baja energía y por lo tanto es muy importante tener el umbral de energía lo más bajo posible, es decir, se requiere que el experimento sea capaz de "disparar" a nivel del fotoelectrón. Para ello hay que ser capaz de distinguir los fotoelectrones del ruido.

En la Figura 19, se puede observar la señal de un centelleo de alta energía digitalizado, el cual es la suma de una gran cantidad de fotones. En la Figura 20 se observan los centelleos de alta energía en el osciloscopio en una escala de tiempos del orden de ms.

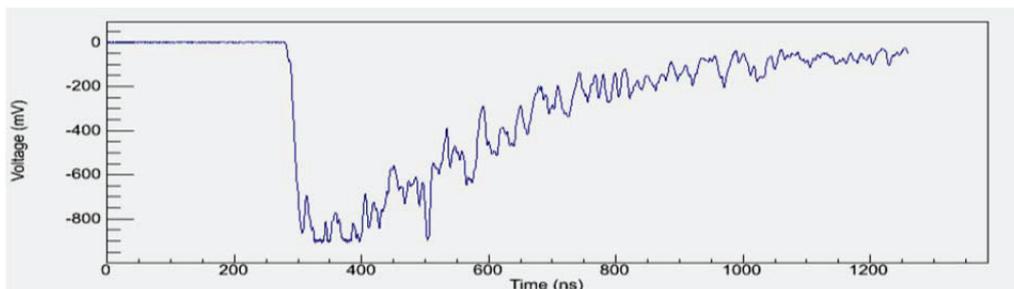


Figura 19: Ejemplo de señal de centelleo de alta energía digitalizada.

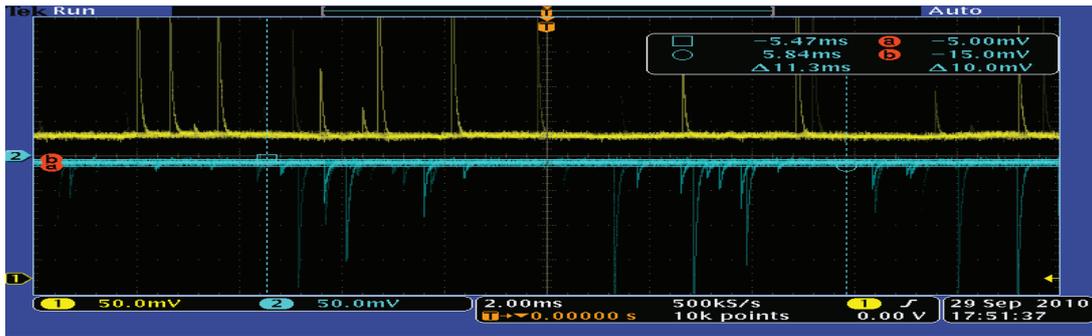


Figura 20: Ejemplo de señal de centelleo de alta energía vista en el osciloscopio.

De la misma forma en la Figura 21 se pueden observar los fotones individuales (fotoelectrones) que son cada uno de los picos ya que el umbral de detección está en un nivel más bajo.

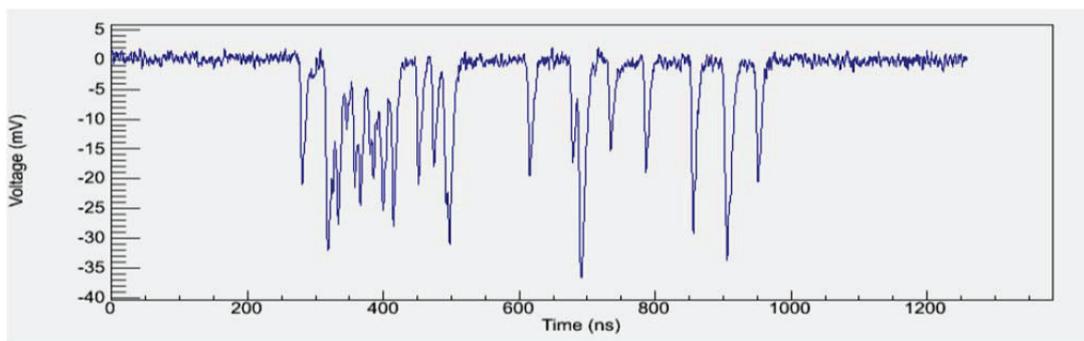


Figura 21: Ejemplo de señal de centelleo de baja energía digitalizada.

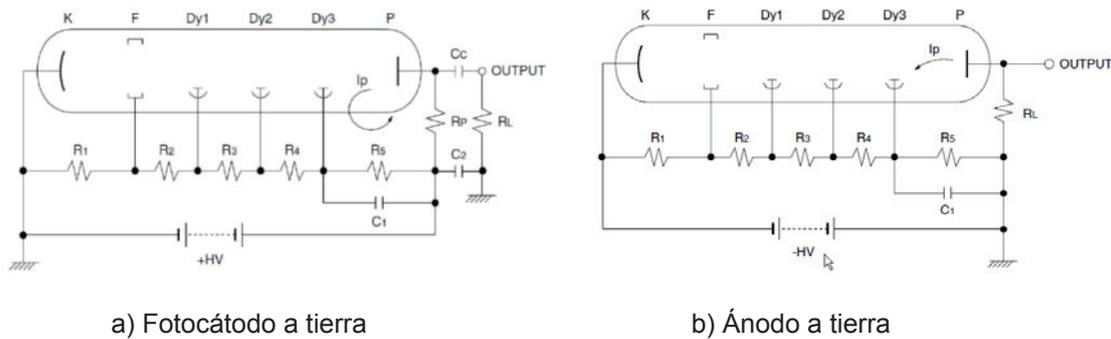
3.2. El circuito de polarización

Como se ha comentado anteriormente los circuitos de salida o circuitos de polarización llevan la tensión a cada uno de los dínodos del fotomultiplicador (PMT), y al mismo tiempo es por donde la señal del ánodo del PMT es obtenida. Normalmente un voltaje de 500 a 3000 voltios se aplica entre el ánodo (P) y el cátodo (K), este voltaje se podría suministrar con varias fuentes de alimentación, lo cual normalmente no es viable. En la práctica se suelen usar resistencias conectadas entre el ánodo y cátodo a modo de divisores de tensión, en alguna ocasión también se usan diodos zener o transistores. Los condensadores que se ponen en paralelo con las resistencias en las últimas etapas son para mejorar la linealidad en la señal de salida cuando el PMT trabaja en modo pulsante como es nuestro caso. Así cuando hay discontinuidades en el funcionamiento aseguran la carga.

Para conectar la tierra hay dos posibilidades tal y como se muestra en la Figura 22, la más inmediato es poner el ánodo a tierra y aplicar una tensión negativa al fotocátodo, así no hay diferencia de potencial con los circuitos externos facilitando la conexión. Sin embargo, en nuestro caso, que es una aplicación de contaje de fotones o centelleos, hemos puesto el fotocátodo a tierra y aplicado tensión positiva al ánodo, ya que con esto el sistema es inmune a interferencias y no tendremos problemas de deterioro del fotocátodo. Si se aplica alto voltaje negativo al fotocátodo puede haber flujo de

electrones desde la carcasa que está conectada a tierra al fotocátodo o incluso si el diseño no es el correcto, dañar permanentemente el fotocátodo. Para aplicar el voltaje de polarización usaremos una fuente de alimentación CAEN SY2527 usada para este tipo de experimentos, la cual nos garantizará la estabilidad necesaria.

También tenemos que poner un condensador de desacoplo a la salida del ánodo, para separar la alta tensión aplicada, de la señal de salida.



a) Fotocátodo a tierra

b) Ánodo a tierra

Figura 22: Esquema tipo de conexión

Como ya se ha comentado, nuestro experimento se basa en la medida de pulsos de luz, estos pulsos no tienen una intensidad constante. Por tanto, pondremos resistencias de mayor valor en el primero y los últimos dinodos, aumentando el voltaje en estas etapas y mejorando las siguientes prestaciones:

- Detección de los pulsos más débiles, ya que en la primera etapa el voltaje es mayor.
- Mejor detección de los pulsos rápidos.
- Mayor linealidad en la señal de salida.

Después de tener en cuenta estas consideraciones, ya podemos definir nuestro circuito de salida del fotomultiplicador.

3.3 Análisis del circuito de polarización

Uno de los esquemas de polarización usados en el experimento ANAIS es el que se muestra en la Figura 23, todos los esquemas que se usan tienen en común esta estructura con pequeñas diferencias. Estas diferencias son la cantidad de dinodos, el valor de las resistencias y condensadores, y la relación de voltaje entre las diferentes etapas para fijar la corriente de polarización. En este caso la corriente de polarización es de $909 \mu\text{A}$, ya que se aplica un voltaje de 1410 V .

En este apartado nos centraremos en la parte del circuito del que se extrae la señal que posteriormente pasa al sistema de adquisición. El equivalente AC del circuito de la Figura 23 aparece en la Figura 24. Como se ve, en el caso de que la carga sea pequeña, la resistencia de 110 kΩ puede desprejiciarse y tenemos una fuente de corriente ideal sobre el RC de salida. Al incluir el circuito de polarización, el PMT pasa a ser una fuente real de corriente con $R_{out} = 110 \text{ k}\Omega$.

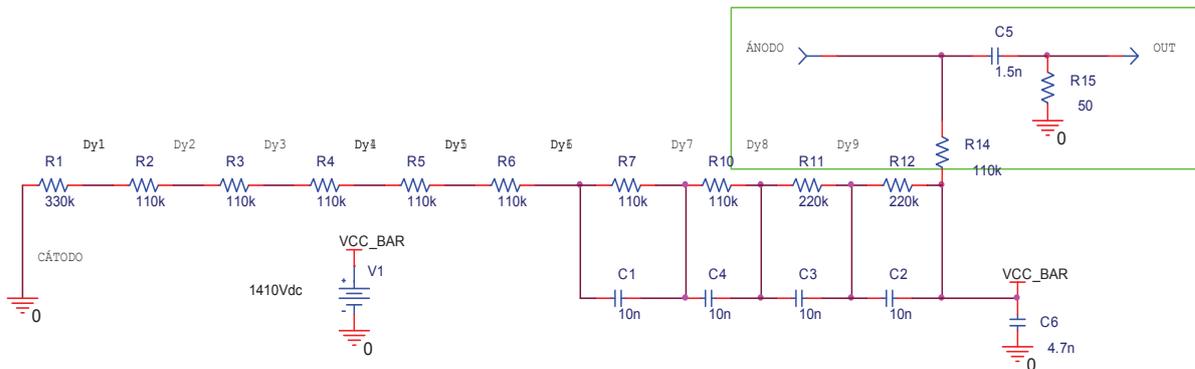


Figura 23: Uno de los esquemas de polarización usado en el experimento ANAIS.

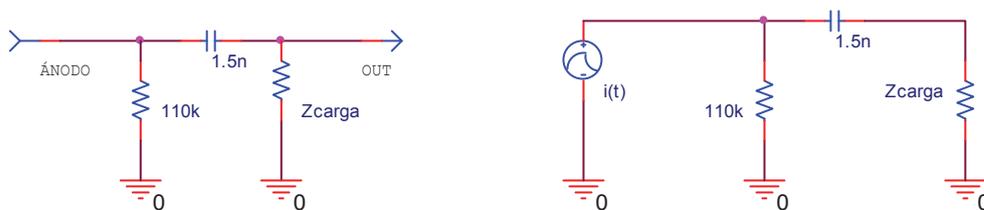


Figura 24: Análisis en AC del circuito, donde el ánodo se simula como un generador de corriente.

Otro aspecto relevante es el hecho de que la lectura de la señal se realiza generalmente a cierta distancia del ánodo, ya que el fotomultiplicador se encuentra situado dentro de un blindaje de plomo, y el cable de salida de la señal, al igual que la alimentación de tensión han de conectarse al chasis donde está la electrónica de adquisición. Las frecuencias características de nuestras señales se sitúan por debajo de los 100 MHz, y la anchura de la señal del fotoelectrón está entre 20 y 40 ns, dependiendo de la respuesta del PMT.

De esta forma, el acoplamiento de las impedancias es muy importante si se quieren evitar reflexiones tal y como se muestra en la Figura 25. Para una impedancia de línea Z_o de 91 Ω y un retardo de 10 ns con una $Z_{carga} = 50 \Omega$ se obtienen estos rebotes en la señal.

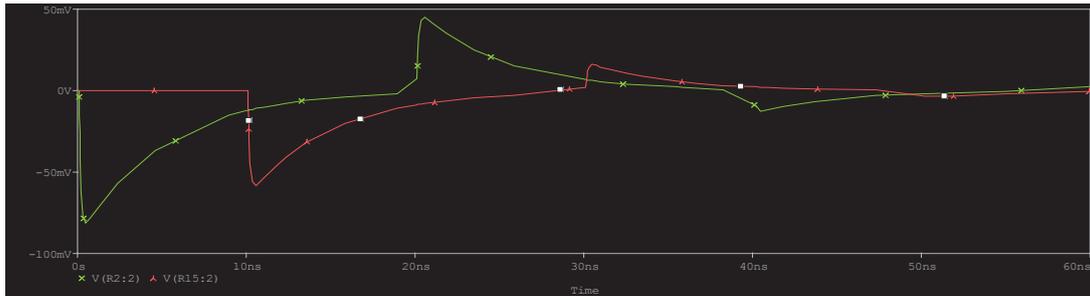


Figura 25: Reflexiones en la línea de transmisión.

Para una carga de 50Ω , deberemos usar obviamente cables de impedancia característica 50Ω . En nuestro caso usamos cables coaxiales RG-174/U. La capacidad parásita de los cables puede ser importante, con lo cual tendremos que tenerla en cuenta. Los cables coaxiales usados tienen unas capacidades típicas de 30 pF/m , de forma que con unos tres metros se tienen capacidades del orden de 100 pF , este orden de capacidades empieza a ser importante, y como se puede observar en la Figura 26, los pulsos se atenúan y pasan a tener una constante de caída más lenta, con lo cual interesa minimizar al máximo la longitud de los cables.

Los cables, además, introducen cierta atenuación. La Figura 27 muestra la atenuación que se produce a lo largo del ancho de banda con varias capacidades diferentes (longitudes de cable) de $5, 15, 50$ y 100 pF . Esto supone un límite a la anchura de banda máxima que pueden dejar pasar los cables sin distorsionar la señal. Vemos que estos cables pueden empezar a atenuar más de un 10% a partir de unos 100 MHz . Sin embargo, en nuestro experimento, estamos por debajo de ese límite, por lo que los cables no van a suponer una limitación importante, pero si a tener en cuenta. En cualquier caso, siempre que ha sido posible se ha limitado la longitud de los mismos y los bucles, que pueden funcionar como antenas y captar ruidos que deterioren la relación señal/ruido.

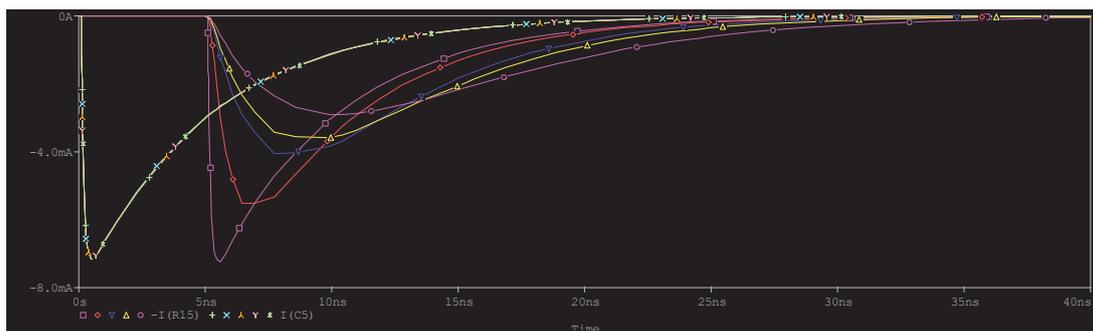


Figura 26: Análisis paramétrico del efecto de las capacidades en la línea de transmisión. Se ha simulado para $C= 0, 15, 45, 60$ y 100 pF . Con un retraso de 5 ns respecto a la señal del ánodo.

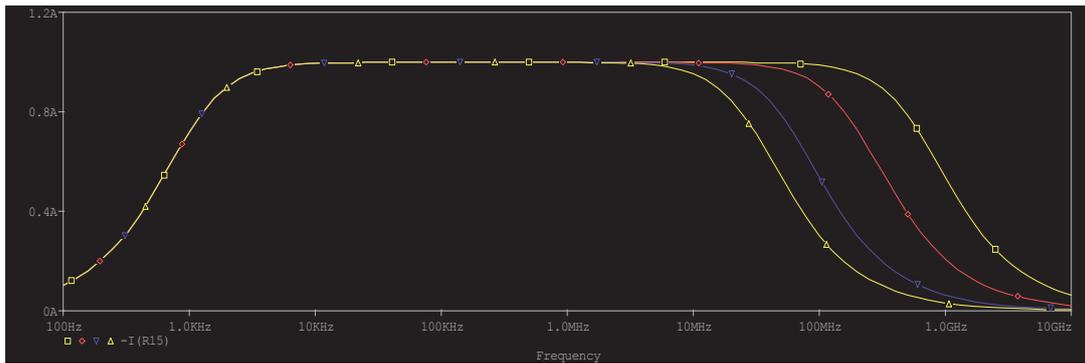


Figura 27: Ancho de banda para la señal de salida.

Otra cuestión que ha podido estudiarse en este trabajo y que ha permitido ganar un factor 2 en la ganancia se refiere a la forma de conectar la línea de transmisión. En los primeros diseños del circuito de salida del PMT se colocaba una resistencia en paralelo de 50Ω antes de la línea y posteriormente los 50Ω de la carga al otro lado.

Dado que el equivalente del fotomultiplicador es un generador de corriente, se entiende que en esa configuración se pierda señal. Tanto las simulaciones como las medidas en laboratorio lo confirman. Así pues, se han modificado las circuitos de polarización e incluido una resistencia de 50Ω , pero en serie para conseguir un correcto acoplamiento de impedancias, como se refleja en la Figura 28.

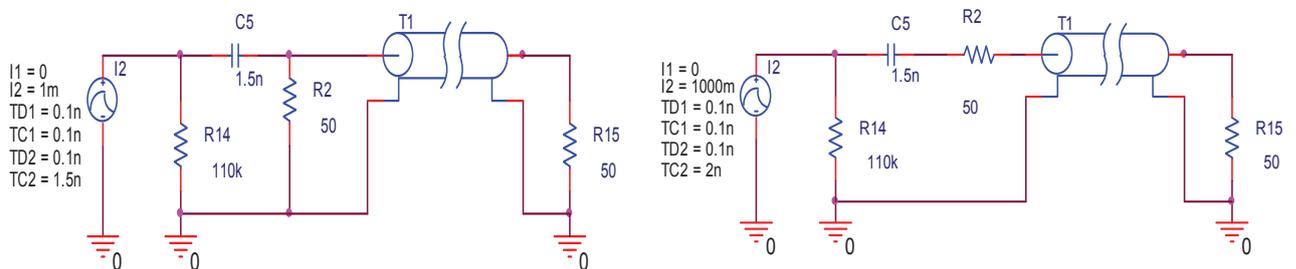


Figura 28: Esquema de salida usado en trabajos previos a la izquierda y a la derecha con la resistencia de salida en serie.

3.4 Problemas del fondo radiactivo de los componentes

Además, como se ha comentado, éste es un experimento de bajo fondo radiactivo, por lo que es deseable reducir al mínimo los componentes con posibles contaminaciones radioactivas cerca de los detectores. Para elegir los materiales menos radioactivos que componen el detector, se lleva a cabo una exhaustiva serie de medidas de radiopureza de cada componente (resistencias, condensadores....) [10]. Una de estas contribuciones son las resistencias de polarización de los PMT. Por ese motivo se diseñaron circuitos de polarización en las que las resistencias están alejadas del PMT.

Esto tiene el efecto de generar rebotes en la señal que no son deseables. Hay que tener en cuenta que la luz recorre 30 cm/ns en el vacío. La señal de los cables va a viajar algo más lento, por lo que puede tardar varios ns en recorrer 1 m de cable. La señal al salir del ánodo se divide en dos y una parte viaja hacia la resistencia de 110 k Ω . Al llegar allí, la alta impedancia hace que la señal se refleje y viaje de nuevo hacia la carga, pero con un retraso de varios nanosegundos.

Esto es importante sobre todo al considerar la *SER* y la respuesta con pocos fotoelectrones. Si se quiere hacer un espectro de la *SER* integrando áreas habrá que procurar que los rebotes sean mínimos. Además, en caso de intentar hacer un recuento individual de fotones, el rebote puede falsear el número total. En la Figura 29 se ve este efecto para 10 ns de retraso con líneas ideales.

En la práctica, las atenuaciones van a hacer que el efecto no sea tan importante, pero en cualquier caso, se comprende el efecto negativo de alejar las resistencias. Así pues, una mejor opción es usar resistencias de bajo fondo.

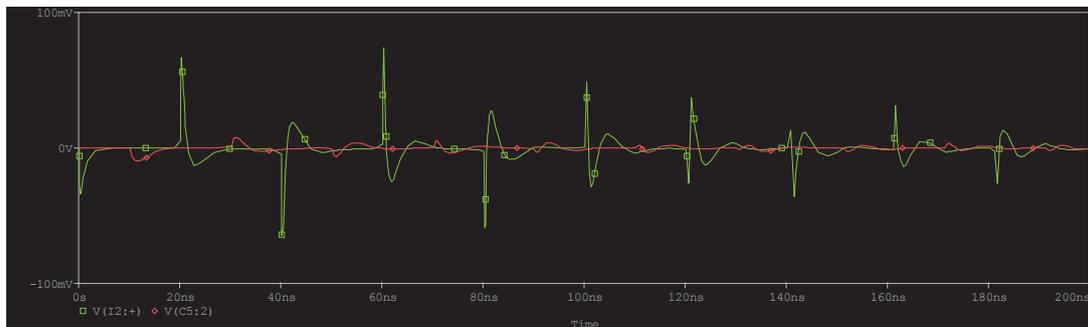


Figura 29: Simulación de los rebotes provocados al alejar las resistencias de polarización unos 2 metros. En verde la señal del ánodo.

A continuación, en la Figura 30 se muestra la evolución a lo largo del tiempo de los diferentes montajes realizados, la última de ellas es la más reciente y la que está montada actualmente en el experimento. En un principio se usaron componentes THD, para luego pasar a SMD montados en PCBs, incluso se alejó la base del PMT como se ha comentado. Finalmente los componentes SMD se han montado en un trozo de teflón, después de haber comprobado su baja radioactividad.



Figura 30: Evolución de los circuitos de polarización de los fotomultiplicadores

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el circuito con el que obtenemos las señales de nuestro experimento en su etapa inicial. Posteriormente se procesa y digitaliza, caracterizando la partícula en energía y tipo. En el experimento ANAIS las estrategias de detección para considerar las señales de interés y que no se pierda información son varias. La más sencilla es usar un discriminador de umbral que detecta cuándo el voltaje pasa por debajo del nivel de trigger. Otra estrategia es disparar por cantidad de carga en unidad de tiempo en lugar de por nivel. Finalmente, también se puede digitalizar continuamente la señal. Esta última opción no es muy problemática en nuestro caso debido al bajo ritmo (la cantidad de datos a guardar no sería excesiva).

La señal en el experimento es rápida, del orden 20-40 ns, tiempo marcado por el fotelectrón. Esta señal es muy variable dependiendo del montaje realizado, y hay que poner mucho cuidado en no distorsionarla.

Como ideas generales para obtener la señal adecuada, teniendo en cuenta los resultados de este capítulo podemos tener las siguientes:

- Realizar un buen acoplo de impedancias, ya que como se ha visto, poner la resistencia de salida de 50Ω en serie hace que la señal no se atenúe por dos.
- Elección del cable coaxial con impedancia de 50Ω . En nuestro caso es así ya que la instrumentación nuclear usa normalmente el acoplo a 50Ω . Con esto también se elimina una posible causa de aparición de rebotes en la señal.
- Reducción de la longitud de cables coaxiales debido a que las capacidades intrínsecas de los mismos atenúan nuestra señal.
- Realizar la conexión del cátodo a tierra para eliminar fuentes de ruido, ya que si aparecen en esta etapa son amplificados por todos los dínodos hasta llegar al ánodo.
- Poner condensadores en las últimas etapas del circuito para mejorar la linealidad en la señal.
- Poner resistencias de mayor valor en las primeras y últimas etapas para mejorar la detección de señales débiles, mejorando también la linealidad.
- No alejar los componentes de los dínodos, ya que se producen rebotes en la señal no deseados.
- No utilizar placas PCBs ya que su radioactividad afecta al detector.
- Usar componentes SMD ya que son más radiopuras que los THD y así afectan menos al detector.

A parte de estas consideraciones, cada PMT es diferente aunque sea del mismo modelo, así que antes de hacer el montaje definitivo es imprescindible probar el PMT con un circuito de salida, ya que de este modo podremos modificarlo hasta conseguir que la salida por el ánodo sea la correcta.

4. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN MÓDULO GENERADOR DE RETRASOS NIM

A lo largo de este capítulo vamos a describir el desarrollo de un módulo de retrasos digitales basado en el estándar NIM (Nuclear Instrumentation Modules) [11]. El cual dará más estabilidad y precisión a la electrónica de adquisición del experimento.

Este módulo se ha diseñado para permitir el retardo digital de la salida de los discriminadores y de la coincidencia de cada detector. En el Anexo B se ha realizado una descripción completa del sistema de adquisición del experimento, por lo tanto, en este capítulo explicaremos brevemente el estándar NIM, el experimento a la salida del detector y describiremos la funcionalidad del módulo dentro del experimento.

4.1 Introducción

En la Figura 31 podemos observar la parte del esquema del experimento a la salida del detector, un esquema completo ya se presentó en la Figura 6 de este TFM y se explica en el Anexo B.

En esta primera etapa se hace el proceso de detección de la señal y de extracción de vías de distintas energías y retardos analógicos y digitales. Esta electrónica es necesaria para cada detector y por ello se replica tantas veces como detectores haya. Para la detección de la señal se usan los *Constant Fraction Discriminator* (CFD). Se les proporciona como entrada la señal proveniente del fotomultiplicador amplificada x10. De este modo se puede ajustar mejor el umbral en un punto en el que disparen las señales más pequeñas, los fotoelectrones, pero no lo haga el ruido eléctrico. Como el disparo del detector debe ser coincidente en los dos fotomultiplicadores, la salida del discriminador, ya digital, se lleva a un módulo *AND*, cuya salida proporciona esa coincidencia.

En esta cadena la ventana de coincidencia viene marcada por la duración de la señal de salida de los CFD. Dicha ventana está configurada a 200 ns, tiempo en el que se está seguro de que se detectan todas las señales coincidentes con un margen para que no se pierdan señales de interés.

La señal amplificada x10 se obtiene por triplicado (gracias a un *Fan-In Fan-Out*) con tres objetivos distintos. La primera señal es para el disparo como se ha descrito en el apartado anterior. Las otras dos serán dos copias de la vía de baja energía, una de ellas se digitalizará y la otra, retardada, se integrará con el *QDC* (integrador de carga).

Para cumplir con el requisito de obtener información de los distintos rangos energéticos, la señal se atenúa, retarda y divide antes de llegar a ningún amplificador. De este modo no se pierde información de las señales muy grandes que saturarán la electrónica y que corresponden a las energías más grandes. De esas operaciones se obtienen dos señales, una más atenuada que la otra, que llamamos vías de muy alta energía y de alta energía respectivamente. Estas señales están atenuadas de modo que encajen las zonas de interés con el rango dinámico del *QDC* y así aprovechar dicho rango al máximo.

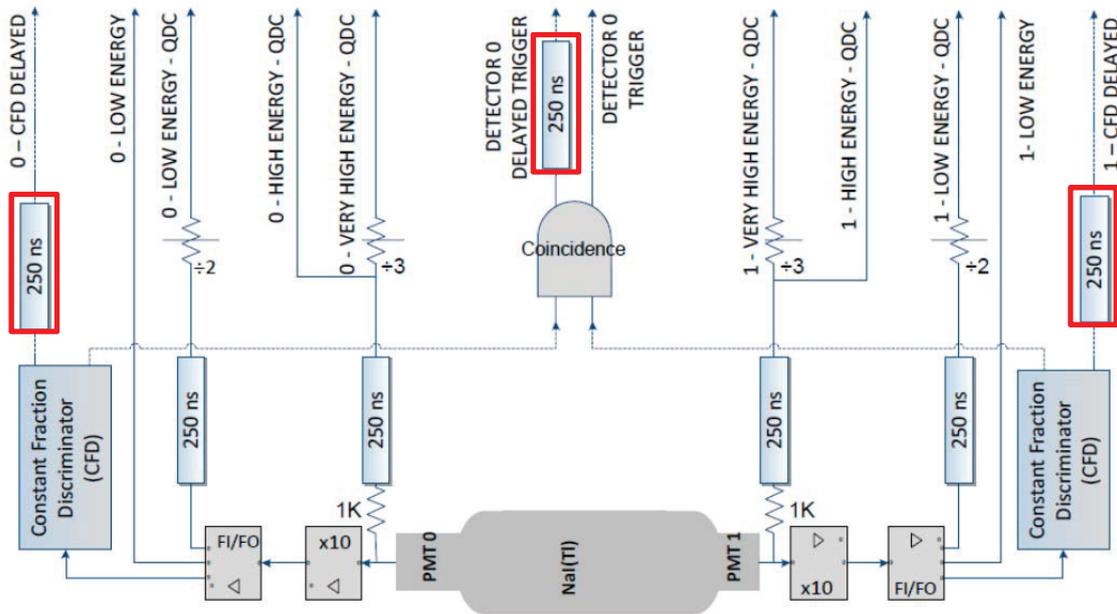


Figura 31: Sistema de adquisición a la salida del detector.

En la Figura 31 se puede observar también que se retardan con 250 ns diversas señales. Por un lado se retardan todas las señales que van al QDC. Es necesario retardarlas porque la señal de coincidencia ocurre con la última de ellas.

Marcados en rojo en la Figura 31 están los retardos digitales que nuestro módulo va a realizar, anteriormente se hacían con longitudes de cable de unos 50 m, ya que 5 ns corresponden aproximadamente a 1 m.

En esta fase del experimento se usaban 6 retardos, con el módulo nos ahorramos 3, si en un futuro tal y como está previsto, se ponen 20 detectores, entonces nos ahorraremos 60 retardos que son 3 km de cable.

4.2 El estándar NIM

La electrónica NIM (Nuclear Instrumentation Module) es un estándar dentro de la física de partículas, trabaja con una lógica distinta de la TTL o ECL, también denominada lógica NIM. Establece tamaño, conector y alimentación para que los módulos se puedan conectar a un chasis NIM. Todas las conexiones entre módulos se hacen con cables de 50 Ω y conectores de estándar BNC/LEMO/SMA. Fue definido por primera vez por la Comisión Estadounidense de la Energía Atómica en 1968-1969 [12]. Hay dos tipos de señales, las lógicas y las lineales.

- 1- Señales lineales: la amplitud de la señal lleva información de la carga o energía depositada en un detector cuando se produce un evento. Pueden ser de dos tipos:

Señales lineales lentas: tienen el rise time mayor a 50 ns y una duración de 0 a 100 ms con amplitud de 0 a 10 V.

Señales lineales rápidas: tienen el rise time menor a 2 ns y una duración menor a 1 μ s con amplitudes de 0 - 1, 0 - 5, y 0 - 10 V dependiendo del módulo que genera las señales.

- 2- Señales lógicas: la amplitud y forma es fija para todos los eventos, para medir tiempo entre detectores, tomar decisiones sobre el evento (coincidencias), y para controlar el sistema de toma de datos. En estas señales lógicas están encuadradas las señales NIM de lógica positiva y las señales NIM rápidas de lógica negativa.

Señales NIM de lógica positiva y negativa:

	Output	Input		Output	Input
Logic1	de 4 hasta 12V	de 3 hasta 12V	Logic1	de -14 hasta -18mA	de -12 hasta -36mA
Logic0	de 1 hasta -2V	de 1,5 hasta -2V	Logic0	de -1 hasta 1mA	de -4 hasta 20mA

En la Figura 32 podemos observar una señal NIM rápida de lógica negativa, que es del tipo que vamos a utilizar en nuestro módulo. Usaremos el uno lógico, por tanto sobre una $R = 50 \Omega$ con una corriente de $\approx -16 \text{ mA}$, tendremos un pulso de $\approx -0.8 \text{ V}$.

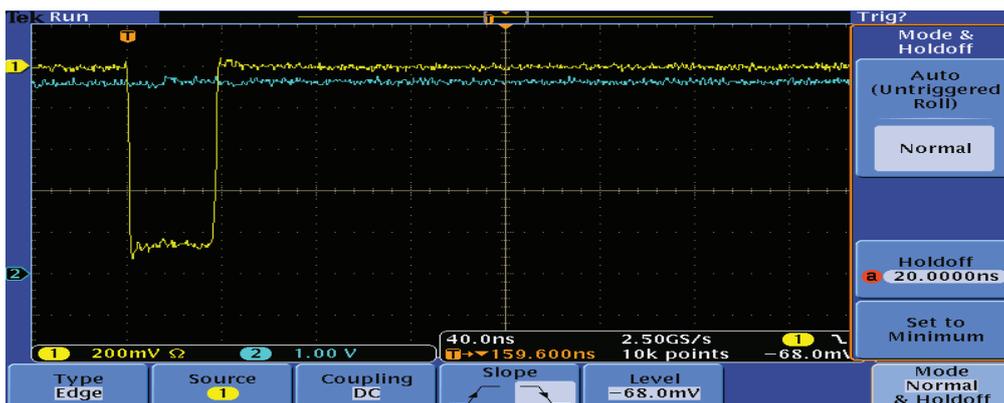


Figura 32: Ejemplo de una señal NIM tomada con el osciloscopio.

4.3 Descripción del módulo

4.3.1 Conversión de lógica NIM a TTL

Uno de los problemas con el que nos encontramos a la hora del diseño es que a nivel comercial, con lógica NIM no encontramos componentes. Algunas empresas fabrican módulos con este estándar, pero es un producto final, por tanto se optó por hacer una conversión del estándar NIM al TTL. Una vez que tenemos una señal TTL, su manipulación es más sencilla.

Para hacer esta conversión se aprovecha la similitud del nivel lógico 1 de nuestra señal NIM con el estándar ECL. Así pues, se ha usado el integrado MC10H125-D, para hacer la conversión de lógica NIM/ECL a TTL.

Como se aprecia en la Figura 33, ponemos un $R=50 \Omega$ a la entrada, ya que la señal NIM se propaga en una línea de transmisión de dicho valor. A la entrada positiva del MC10H125-D se pone un nivel DC, así los niveles lógicos ECL se aproximan a los de una señal NIM y así a la salida del comparador tenemos una señal TTL positiva. Con un pequeño ajuste hemos conseguido hacer la conversión de una señal NIM a TTL.

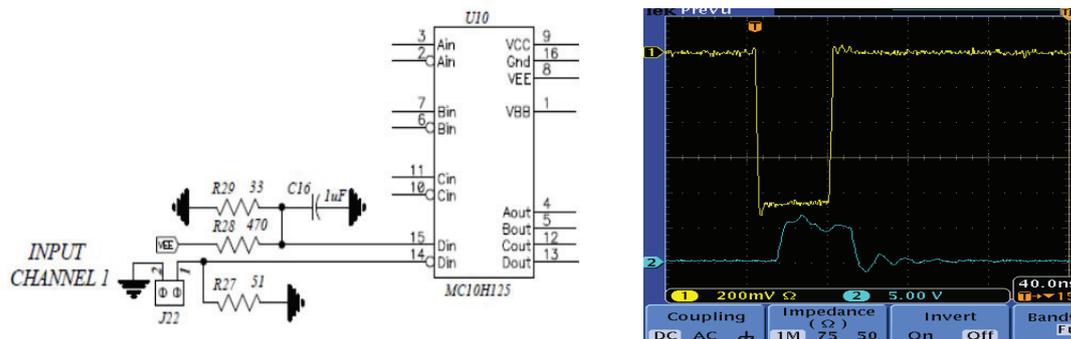


Figura 33: Etapa de entrada del módulo a la izquierda y la señal de entrada/salida a la derecha.

4.3.2 Generación de retrasos y pulsos variables

Para la siguiente etapa, se ha utilizado el integrado SN74121N, es un monoestable que nos proporciona la anchura de pulso variable que necesitamos. Al poner dos SN74121N en serie, con uno controlamos el retraso de la señal y con el otro la anchura del pulso. Como nosotros necesitamos pulsos de entre 40-200 ns y un retardo de entre 100-300 ns, hemos tomado un $C=100 \text{ pF}$ y un potenciómetro exterior de 10 K Ω , así tenemos la anchura del pulso que puede ir desde 40 ns a 1 μs . Esto nos da el margen necesario para ajustar en el experimento la anchura de los pulsos y los retrasos que necesitamos.

En la Figura 34 se han puesto dos retrasos de 120 ns (Figura 34 (a)) y 200 ns (representada en la Figura 34 (b)), como podemos observar, el flanco de bajada del primer monoestable dispara el segundo monoestable, de este modo variamos el retraso de salida del módulo.

El SN74121N introduce un retraso entre la entrada y la salida de ≈ 40 ns, así que si sumamos los dos retardos de 40 ns y el retraso que introduce el MC10H125-D de unos 15 ns, tendremos un total de ≈ 95 ns como retraso mínimo. Sin embargo, si invertimos la señal a la salida del MC10H125-D, entonces mejoraremos el retraso en 35 ns, así que el retraso mínimo se establece en ≈ 60 ns.

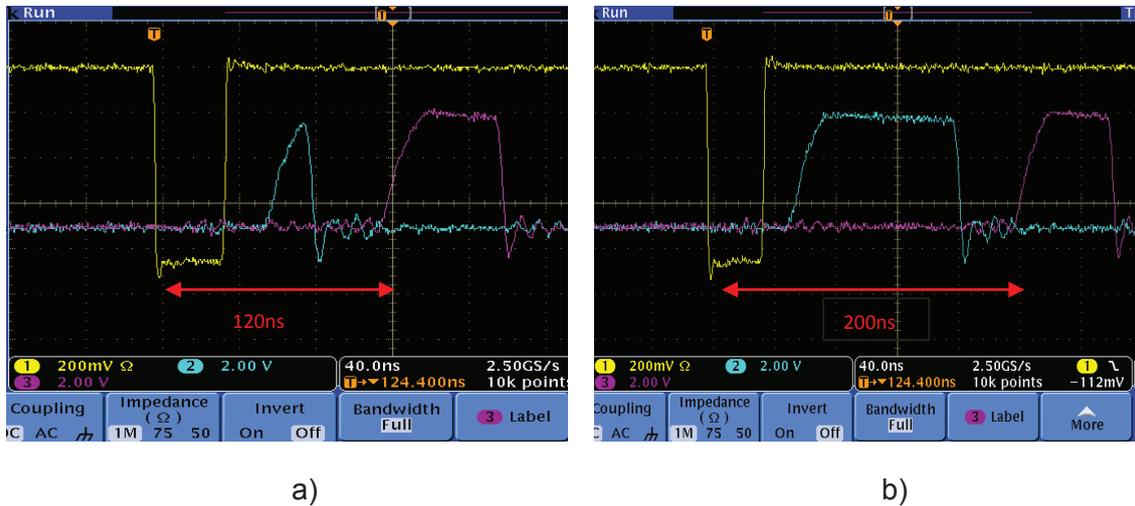


Figura 34: En amarillo la señal de entrada NIM, en azul la salida del primer monoestable y en morado la salida TTL del segundo monoestable. Las Figuras (a) y (b) muestran el retardo de 120 y 200 ns respectivamente.

El resto de componentes que se incluyen en esta etapa son el integrado 74F86 y el 74F244. El primero de ellos se ha incluido para mejorar el retraso mínimo del módulo tal y como se ha comentado y el segundo es un driver, del tipo F.

4.3.3 Conversión de lógica TTL a NIM

En nuestro módulo utilizamos la configuración que se muestra en la Figura 35. Es una configuración en emisor común. Cuando hay un pulso, conduce el Q4, y cuando está en reposo es el Q3 el que conduce. Como el chasis NIM nos da -6V, lo hemos aprovechado para alimentar el módulo, ya que está dentro de los parámetros de los componentes usados.

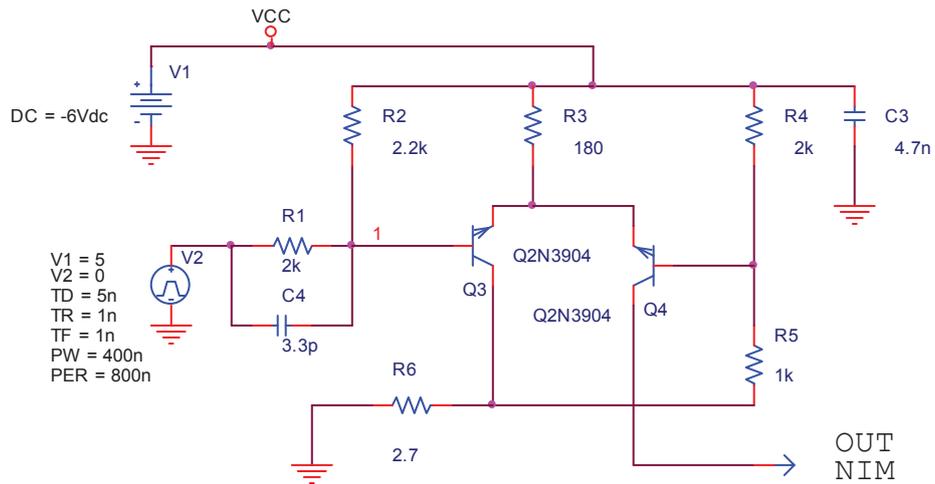


Figura 35: Esquema usado en spice para simular el conversor TTL/NIM.

4.4 Simulaciones y medidas experimentales

4.4.1 Simulaciones

Para las simulaciones se ha usado el esquema de la Figura 35 en Spice. Los resultados se muestran en las Figuras 36,37 y 38. En el Anexo C se encuentra el esquema general del circuito.

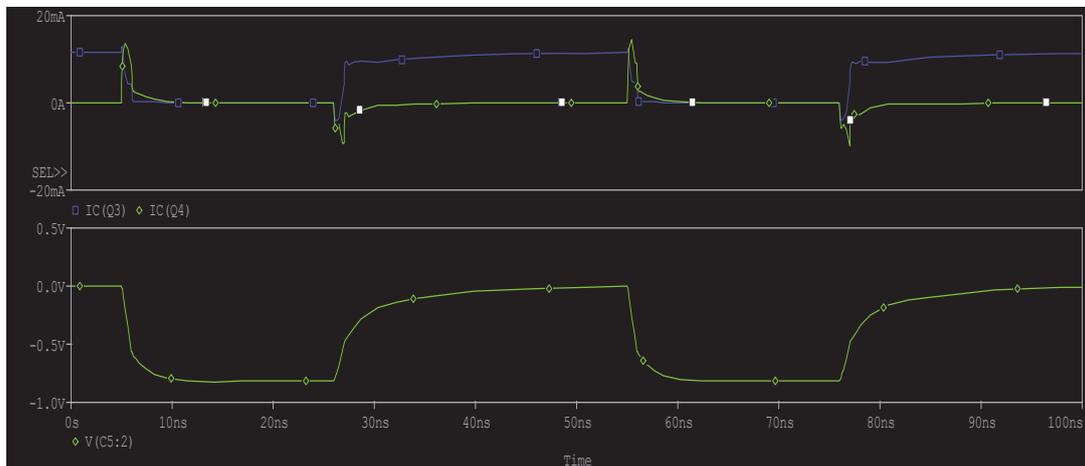


Figura 36: En verde están la señal NIM a la salida y la corriente por el transistor Q4, la señal azul es la corriente por el transistor Q3.

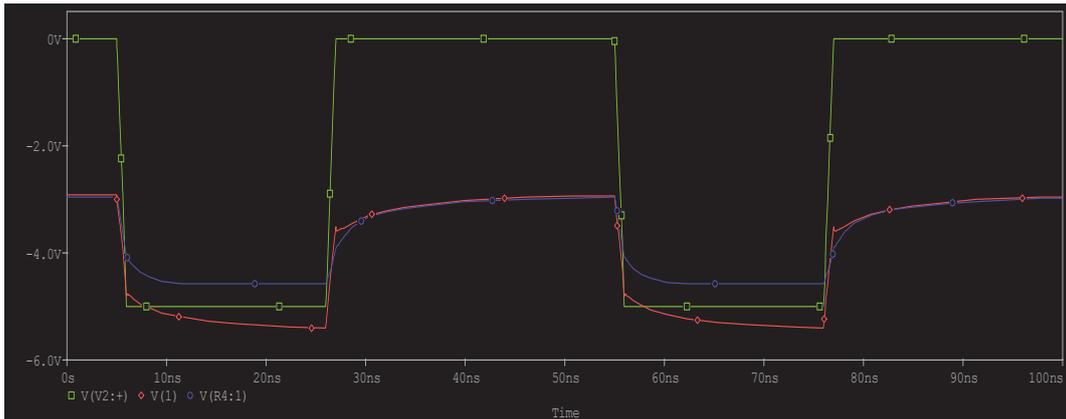


Figura 37: En azul la tensión en la base del transistor Q4, en rojo la tensión en el Q3 y en verde la señal TTL de entrada.

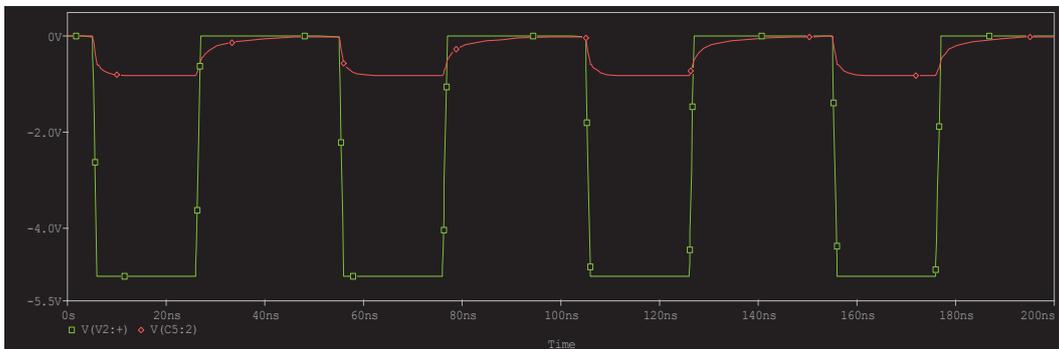
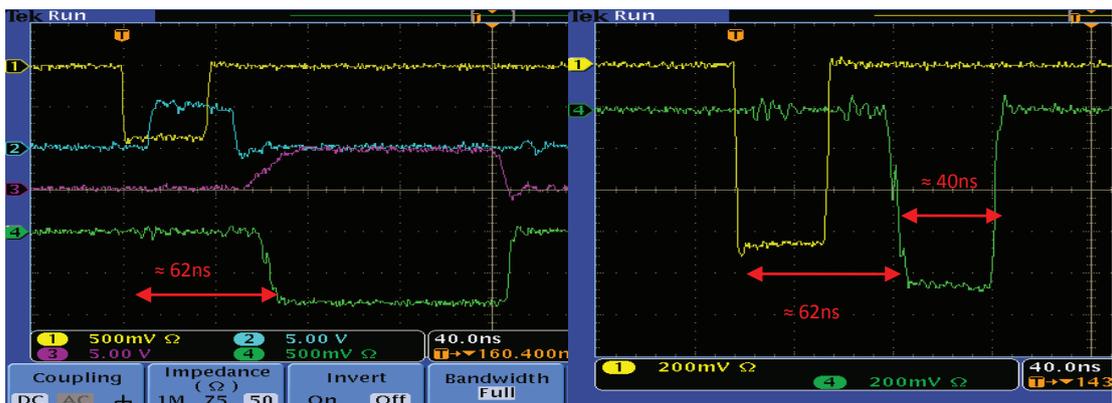


Figura 38: En rojo la señal NIM de salida y en verde la TTL de entrada.

4.4.2 Medidas experimentales

En la Figura 39a y 39b está marcado el retraso mínimo de 62 ns que genera el módulo, la anchura mínima del pulso de salida es de 40 ns tal y como se aprecia en la Figura 39b. De este modo hemos conseguido cumplir con los requerimientos mínimos definidos.



a)

b)

Figura 39: En amarillo la entrada NIM, en azul la salida del conversor NIM/TTL, en morado la entrada al conversor TTL/NIM y en verde la salida del módulo. Las Figuras (a) y (b) muestran el retardo de 62 y 40 ns respectivamente.

4.4.3 Pruebas de los retardos digitales y analógicos

El test consistió en medir retardos con los TDC (Time Digital Conversion), los cuales son módulos VME que tal y como indican sus siglas, realizan la conversión de tiempos en una señal digital, y además admite entradas NIM. En las pruebas, mediante un generador de pulsos se generaba una señal que se introducía al TDC como start. Primero se retardaba la señal NIM con un cable coaxial y en la otra prueba con nuestro módulo de retardos. De este modo se obtenía la medida de varios retardos, testeando de paso la funcionalidad básica de los TDC. En la Figura 40a están los resultados de los retardos analógicos, y en la Figura 40b los digitales. Se observó que los retardos digitales tenían una menor dispersión en el valor medido por los TDC. Esto no dejaba dudas acerca de que la opción digital debía ser la elegida.

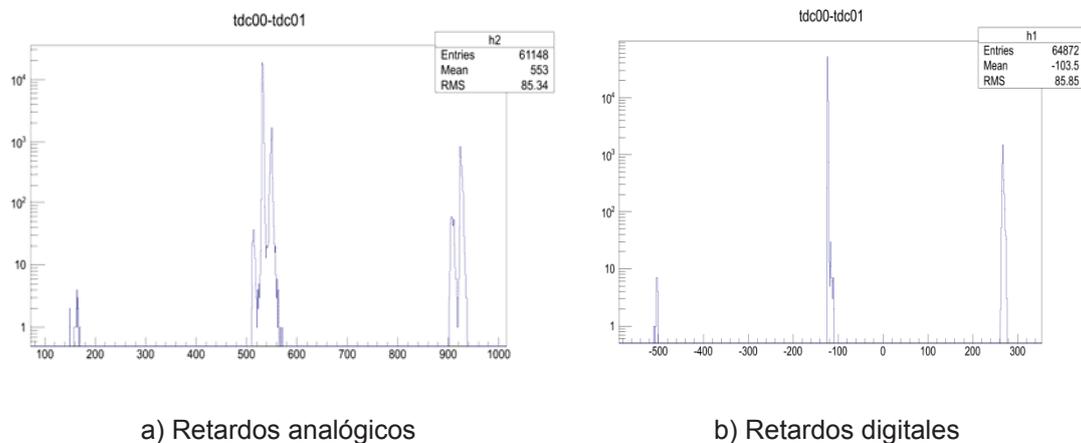


Figura 40: Gráficas con las pruebas realizadas con los TDC.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito brevemente el desarrollo de un módulo de retardos no comercial basados en el estándar NIM.

Estos módulos tienen varias ventajas sobre los analógicos.

- Son mecánicamente más fáciles de manejar e instalar ya que son un módulo frente a cincuenta metros de cable si necesitamos 250 ns de retardos.
- No atenúan la señal y son más fácilmente configurables: mediante un potenciómetro se puede variar su retardo.
- Los componentes utilizados no se han de programar y se pueden encontrar fácilmente en cualquier proveedor.

También tenemos que tener en cuenta que gracias a este desarrollo hemos realizado la conversión NIM/TTL y a la inversa TTL/NIM aprovechando la similitud de nuestras señales NIM con las ECL, ambas rápidas. Por tanto, si en el experimento hay necesidad de manipular señales NIM, con estos conversores, podremos usar

componentes comerciales y realizar nuestros propios diseños en la electrónica, facilitando el desarrollo del experimento.

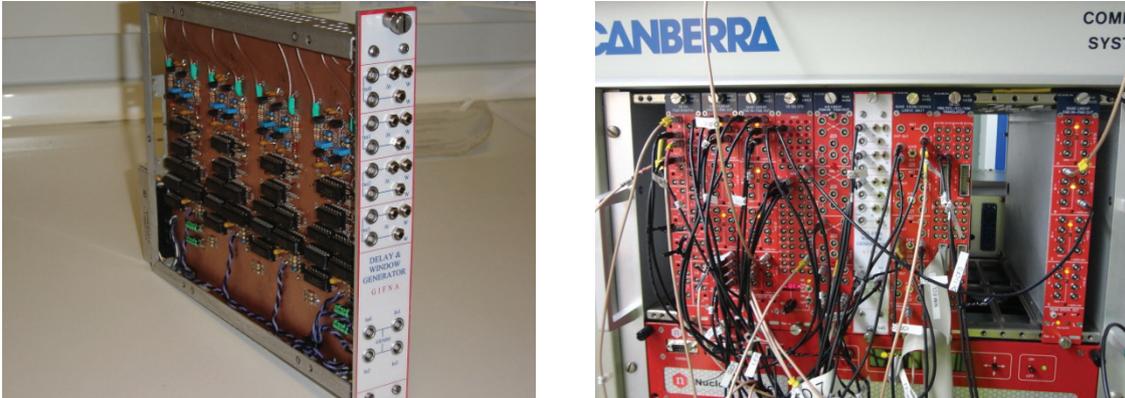


Figura 41: Imagen del módulo terminado e integrado en un rack NIM del experimento.

5. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN PROCESO DE ELECTROFORMACIÓN DE PIEZAS DE COBRE

5.1 Introducción

A lo largo de este TFM ya se ha comentado que la detección de señales de radiación muy débiles provenientes de eventos nucleares poco probables o búsqueda de partículas que interaccionan débilmente requiere de detectores de gran masa y sensibilidad, únicamente efectivos si se ubican en un ambiente de muy bajo fondo radioactivo. Ello obliga al uso de laboratorios subterráneos, al empleo de voluminosos blindajes y al encapsulado de los detectores en carcasas confeccionadas con materiales libres de radioisótopos.

El cobre es uno de los materiales más idóneos para la construcción de componentes en detectores de bajo fondo radioactivo debido a los bajos niveles de radioisótopos presentes (uranio y torio fundamentalmente) [13] y sus excelentes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. No obstante hay que señalar que incluso el cobre comercial de alta calidad (OFHC, Oxigen free high conductivity) presenta una actividad del orden de los milibecquerelios por kilogramo, en tanto que la actividad deseable para acceder a los límites de detección actuales sería del orden de los microbecquerelios por kilogramo. La exigencia marcada es reducir en 3 órdenes de magnitud el contenido de impurezas.

Por este motivo se inició una línea de trabajo en el departamento para el desarrollo de técnicas de crecimiento por depósito electrolítico con las que se pretende obtener piezas de cobre de alta pureza, con menor contenido en radioisótopos que el comercial, y con forma y dimensiones adecuadas para encapsular principalmente los detectores y fotomultiplicadores.

5.2 La técnica de electroformación

La técnica de electroformación consiste en la fabricación de piezas mediante la deposición electrolítica de metal sobre moldes en el seno de una cuba electrolítica. El metal procedente de los ánodos (barras metálicas) se deposita mediante electrólisis, a través del electrolito, sobre el cátodo (molde) y una vez que alcanza el espesor y rigidez adecuados, se desmolda para obtener la pieza metálica final.

Como cátodo se emplean moldes pulidos y limpios de acero inoxidable, con la misma forma y dimensiones que la pieza de cobre a obtener. El molde, localizado en el centro de la cuba electrolítica, está conectado a un motor por medio de un eje roscado y gira durante todo el proceso proporcionando una deposición homogénea de metal. Los ánodos son barras de cobre electrolítico comercial situadas en el interior de la cuba electrolítica, con una distribución homogénea alrededor del cátodo y colgadas de un anillo de cobre que actúa como soporte y contacto eléctrico. El electrolito, en el cual se encuentran sumergidos tanto el cátodo como los ánodos, está formado por una solución de sulfato de cobre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ a la que se adicionan una serie de agentes.

Estos agentes son principalmente ácido sulfúrico 96%, ácido clorhídrico 35% y tiourea que favorecen la conductividad eléctrica y la nucleación del cristal de cobre. En la Figura 42 se muestra un esquema del proceso de electroformación.

La corriente eléctrica necesaria para llevar a cabo el proceso electrolítico se obtiene por medio de una fuente de alimentación 6 V, 60 A dc regulada continuamente en voltaje y corriente. La conexión eléctrica de los electrodos (cátodo y ánodos) se realiza con cables aislados, protegidos de los vapores ácidos y corrosivos del proceso.

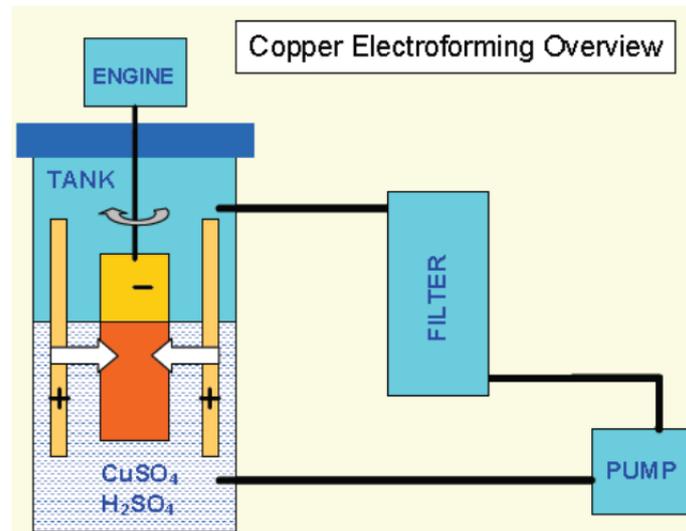


Figura 42: Esquema del proceso de electroformación

5.3 Sistema electrónico de control

Se llevaron a cabo las primeras pruebas de electroformación de cobre (Figura 43). Estas piezas presentaban un notable crecimiento dendrítico del cobre, principalmente en la zona lateral, con mayor depósito en la esquina inferior debido a un mayor campo eléctrico. Además, se observó cómo los nódulos formados en la base de la pieza tenían orientación según el sentido de giro del molde (espiral).



Figura 43: Pieza de cobre electroformado obtenido a 4 A/dm² con velocidad de giro de 4 rev/s tras 42 h de proceso de electrodeposición a corriente continua.

Tras estas primeras pruebas se concluyó la necesidad de realizar un estudio más detallado de la influencia de varios parámetros electrolíticos, tales como densidad de corriente, velocidad y sentido de giro del molde, sobre el resultado final. Para ello se diseñó, montó e instaló un sistema electrónico de control que permitiese variar estos parámetros.

El sistema electrónico de control (Figura 44) dispone de dos secciones:

- Sección de control del motor: control de la velocidad y sentido de giro del motor.
- Sección de control de la polaridad del baño electrolítico: procesos de electrodeposición a corriente continua o a pulsos invertida.

Estas secciones están diseñadas en dos líneas separadas y disponen de interruptores a la entrada, lo que permite que sean accionadas de forma independiente.

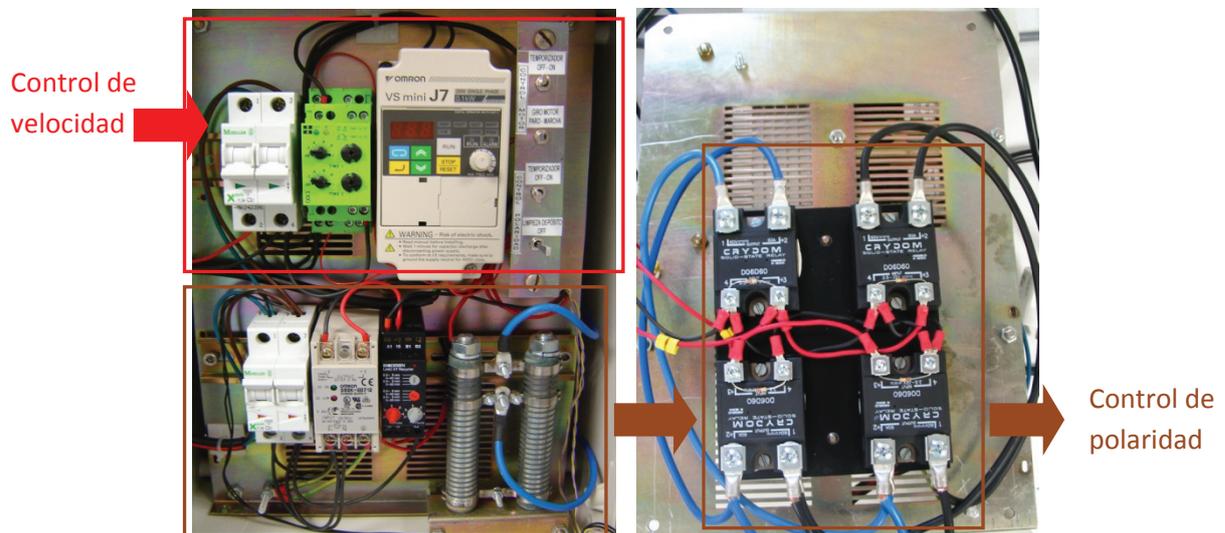


Figura 44: Vista frontal y posterior del sistema electrónico de control.

La sección de control del motor está situada en la parte superior y consta de un temporizador, un regulador compacto de frecuencia y varios interruptores. Mediante esta sección es posible realizar procesos de electroformación a diferentes velocidades de giro del motor así como programar ciclos en el que se alternen giros en un sentido (forward) y al contrario (reverse).

La sección de control de la polaridad del baño electrolítico se sitúa en la parte inferior y posterior del equipo, y está compuesta por un temporizador, relés de estado sólido, una fuente de alimentación y varios interruptores. Esta sección permite realizar procesos de electroformación mediante corriente DC (DC plating) o corriente a pulsos invertida (pulse-reverse current plating). En la Figura 45 se muestra el esquema del sistema de electroformación completo.

En los procesos de electroformación existe una serie de factores que de modo directo o indirecto influyen notablemente en las características finales del electrodepósito metálico obtenido. Algunos de estos factores son la intensidad de corriente

electrolítica, la tensión entre electrodos y las características del electrolito en el baño de electroformación (pH y T). Además, estos parámetros también informan de posibles fallos durante el proceso así como de cambios importantes en las propiedades del electrolito. Por todo ello, es sumamente importante la medición, visualización y el registro de estos parámetros a lo largo de todo el proceso electrolítico. Con este objetivo se diseñó y construyó un sistema de medición de parámetros que se incorporó a la instalación de electroformación.

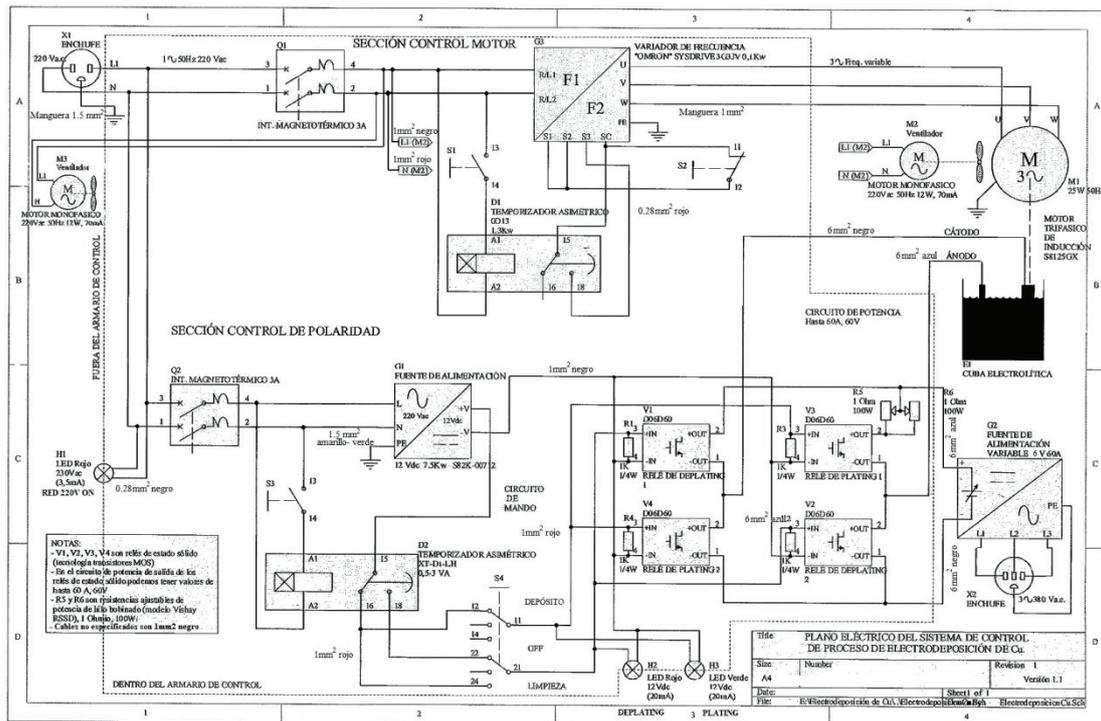


Figura 45: Esquema del sistema de control del proceso de electroformación.

La medida de los parámetros I (intensidad de corriente electrolítica) y V (tensión en electrodos) se lleva a cabo de forma directa sobre el cableado del sistema y sus valores se muestran mediante displays situados sobre el propio equipo de medida, en la tapa superior.

Por otro lado, los parámetros de pH y temperatura del electrolito se miden mediante sondas situadas a la salida de la cuba electrolítica y sus valores son recibidos en una tarjeta de adquisición de datos y mostrados en el ordenador a través del software de adquisición correspondiente.

La instalación de electroformación de cobre definitiva consta de un baño electrolítico, un filtro y una bomba, un motor, una fuente de alimentación, un sistema de control y un sistema de medición de parámetros. En la Figura 46 de la página siguiente se puede observar el sistema instalado.

5.4 Conclusiones

Con este desarrollo hemos conseguido fabricar piezas de Cu radiopuras de una forma controlada. La radiopureza de las piezas se midió en un detector de radiopureza en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, corroborando que con este sistema podemos fabricar encapsulados para nuestros detectores y PMTs.

Este sistema se montó y ubicó en un laboratorio del GIFNA (Grupo de investigación en física de partículas) de la Universidad de Zaragoza.

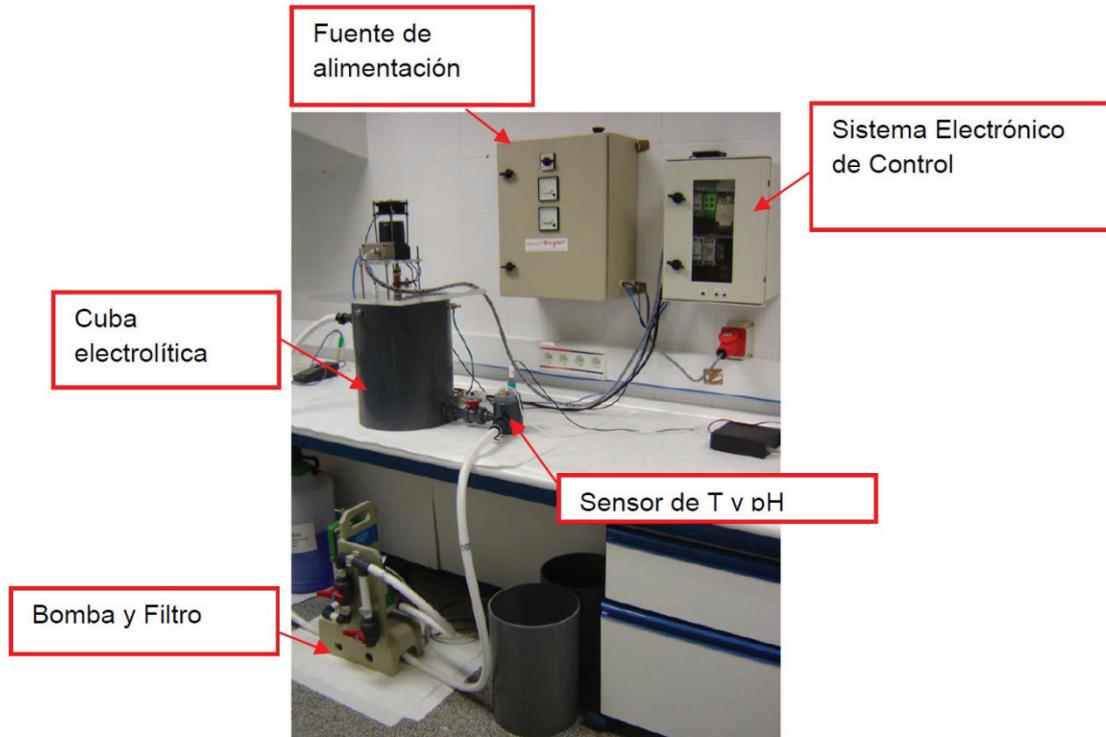


Figura 46: Vista del sistema de electroformación completo

6. CONCLUSIONES GLOBALES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

En este TFM se han presentado a lo largo de sus capítulos una serie de pruebas y desarrollos que se han llevado a cabo en el experimento ANAIS, y en concreto en la etapa inicial de detección de la señal a nivel del detector, antes de pasar a la parte del sistema de adquisición que digitaliza la señal. También se han presentado las conclusiones parciales en los distintos capítulos desarrollados.

Se ha conseguido realizar pruebas a una serie de fotomultiplicadores gracias a un banco de pruebas realizado ad hoc. Así se ha elegido el fotomultiplicador más adecuado sin necesidad de instalarlo en el experimento con las dificultades que esto entraña.

A nivel de señal de salida del fotomultiplicador se ha analizado la señal de salida y las características de los circuitos de polarización de éstos. Así mismo se ha mejorado el acople de impedancias, la linealidad y los niveles de ruido de este circuito.

Otra mejora importante ha sido el desarrollo de un módulo de retrasos, ya que en los experimentos de física de partículas se usan intensivamente. Gracias a este desarrollo se ha conseguido realizar la conversión de la lógica NIM a la TTL, abriendo el camino para realizar otros módulos que se adapten a las necesidades del experimento.

Finalmente, con el sistema de electroformación se ha conseguido controlar los parámetros del proceso, y así poder fabricar nuestras propias piezas de Cu radiopuro. Estas piezas con las que se encapsulan los detectores son una parte esencial del experimento, ya que cualquier impureza puede falsear nuestra señal.

6.2 Trabajos futuros

Como líneas futuras de trabajo y mejoras con respecto a la electrónica de nuestro experimento podemos citar las siguientes:

- Sistema de monitorización de parámetros ambientales o *slow control*. En previsión de que lleguen los cristales definitivos el sistema debe estar preparado para medir y contrastar su estabilidad. Para ello hay que evolucionar el actual slow control para que mida las fluctuaciones del alto voltaje, las temperaturas de los chasis y ambiental o el flujo de nitrógeno líquido que consume el experimento. Con todos esos parámetros se puedan establecer reglas de notificación o alarma en caso de detectar valores anómalos.
- Las fuentes conmutadas de alimentación son una fuente de ruido eléctrico. Teniendo en cuenta que es una prioridad la reducción del ruido eléctrico, existe la posibilidad de instalar fuentes lineales de continua, que por su naturaleza deben introducir menos ruido. Como tarea pendiente está estudiar la viabilidad de usar fuentes lineales para la potencia requerida.

- Respecto a la conversión a señal óptica, es deseable que se realice tan cerca del fotomultiplicador como sea posible. De este modo se podría aislar al detector de la cadena electrónica y evitaría un posible camino para el ruido eléctrico.
- Otra línea de trabajo importante es la búsqueda de otro sistema para crear retrasos analógicos que no sea con cables coaxiales. Crear estos retrasos con una señal óptica sería una opción.
- En previsión del montaje definitivo de 20 detectores, debería buscarse una manera automatizada de calibrar el experimento. Actualmente esta calibración se hace semanalmente introduciendo una fuente radiactiva en el blindaje de forma manual.
- Hacer un estudio de las EMIs (interferencias electromagnéticas) radiadas y conducidas de una forma sistemática.

Todos estos trabajos serían un avance en el experimento, aunque los más importantes actualmente son la reducción del ruido eléctrico y la búsqueda de otro sistema para realizar los retrasos analógicos de la señal de salida del detector.

ANEXOS

ANEXO A: LABORATORIOS SUBTERRÁNEOS: Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)

Los fenómenos de la física de alta energía, como el decaimiento del protón, la desintegración doble beta o la búsqueda de candidatos a la materia oscura, son considerados sucesos poco probables debido a la baja probabilidad con que ocurren. Para su estudio se utilizan instalaciones subterráneas que proporcionan una reducción del fondo cósmico respecto del que se obtiene en la superficie. Estas instalaciones complementan la investigación que se realiza en aceleradores, donde se llevan a cabo estudios de los constituyentes de la materia, sus interacciones y simetrías.

La localización de estas instalaciones las hace ideales para el desarrollo de la física de astropartículas ya que su blindaje natural las protege de la radiación producida por los rayos cósmicos y los procesos radioactivos naturales.

A la hora de elegir emplazamiento bajo tierra hay que tener en cuenta unos ciertos parámetros que condicionan la posible señal de estos procesos. El más importante de estos parámetros es la profundidad del lugar, ya que está relacionado directamente con el número de partículas provenientes de rayos cósmicos. La siguiente Figura muestra la localización de los principales laboratorios subterráneos europeos:

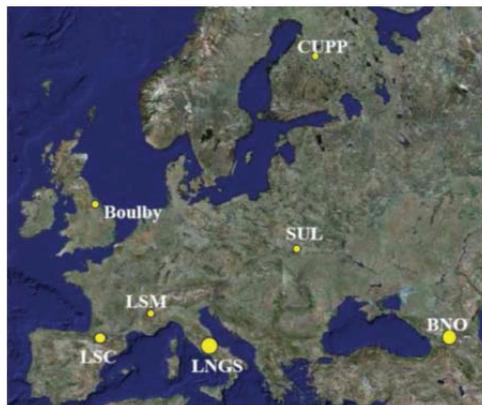


Figura 1: Instalaciones subterráneas en funcionamiento en Europa. Entre otras destacan el Laboratorio Subterráneo de Modane (LSM) en Francia y el Laboratorio Subterráneo de Gran Sasso (LNGS) en Italia.

Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC)

La historia del Laboratorio Subterráneo de Canfranc se remonta a la década de los años 80 del siglo pasado. El grupo de Física Nuclear y Altas Energías de la Universidad de Zaragoza, dirigido por el profesor Ángel Morales, eligió el antiguo túnel de ferrocarril de Canfranc en el pirineo aragonés como lugar para crear un laboratorio subterráneo donde realizar experimentos de detección de sucesos poco probables.

Se trataba de un emplazamiento compuesto de dos pequeñas salas de apenas 10m² cada una de ellas situadas a 780 metros de la entrada española del túnel a una profundidad de 675 metros equivalentes de agua (m.w.e) que posteriormente se denominó Laboratorio 1. En 1988, se amplió el laboratorio con un módulo de unos

15m² instalado sobre las vías. Posteriormente se instaló sobre las vías del tren un nuevo módulo prefabricado de 27m². Este módulo, junto con el ya existente, se emplazó en una nueva localización a 1.200 metros de la entrada española (a una profundidad de 1.380 m.w.e. fue lo que constituyó el Laboratorio 2.

En 1994 durante la realización de las obras del túnel de carretera del Somport, se ejecutó las obras de excavación y adecuación de un nuevo laboratorio de 118m² a 2.520 metros de la entrada española y una profundidad de 2.450 m.w.e. La nueva instalación, denominada Laboratorio 3, operativa desde 1995 permitió abordar nuevos experimentos y obtener una considerable mejora en los fondos radiactivos. En la Figura siguiente se representa el perfil del túnel ferroviario de Canfranc y la ubicación de los distintos laboratorios.

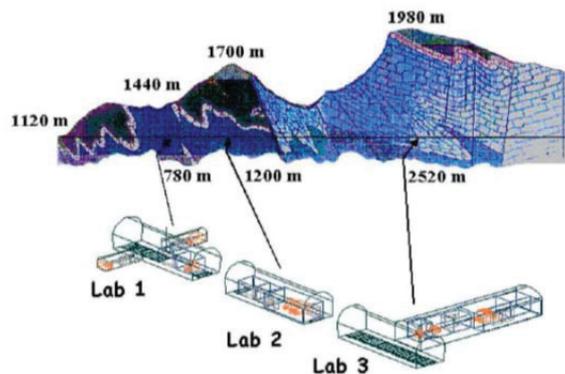


Figura 2: Perfil del antiguo túnel ferroviario del Somport. Ubicación y cubierta de roca para los distintos laboratorios.

En 2004 comenzaron las obras de lo que sería el actual Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). Esta instalación es compartida por el Gobierno de Aragón, el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Universidad de Zaragoza. Esta infraestructura debido a su complejidad y su objetivo fue catalogada como la primera Instalación Singular Científica en Aragón, además de ser la única en este campo que existe en España y en extensión el segundo laboratorio subterráneo en Europa.

Está compuesto por una sala principal (Hall A) situada a una profundidad de 2500 m.w.e., con unas dimensiones de 5000m², orientada al CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares www.cern.ch) de forma que un detector situado en él pueda recibir un haz de neutrinos procedentes de esta instalación. También existe una sala auxiliar (Hall B) de 800m².

La línea investigadora entre los experimentos que se han llevado a cabo en el Laboratorio de Canfranc ha sido el estudio de la desintegración doble beta de los núcleos con el fin de conocer propiedades del neutrino y la búsqueda de candidatos a constituir la materia oscura. Entre los más destacados están: KRIPTON, IGEX y ROSEBUD. En la actualidad, se tienen en funcionamiento varios experimentos: GEODIN, BiPo y ANAIS. También existen varios experimentos de nueva generación,

donde su detector alcanza tamaños de 1 tonelada, como son ArDM y NEXT, que a lo largo de 2013 finalizarán su construcción.



Figura 3: Hall A o principal del LSC.



Figura 4: Experimento ArDM en el Hall principal del LSC.

ANEXO B: CADENA ELECTRÓNICA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL EXPERIMENTO ANAIS

En el presente anexo introducen varios aspectos de la cadena electrónica del sistema de adquisición de datos del experimento ANAIS. Primeramente se describe la señal del experimento y la información que es importante extraer de ella. Posteriormente se repasan los requisitos que debe cumplir la cadena electrónica para que dicha información permita caracterizar la interacción física sin perder información relevante. Después se describen las elecciones de diseño que se han tomado para cumplir esos requisitos y se hace una descripción funcional del conjunto de la cadena. Finalmente se muestran las validaciones realizadas sobre los distintos módulos para verificar que se cumplen los requisitos.

Tratamiento de señal de centelleo

Descripción de la señal

Como hemos visto la radiación ionizante se detecta en el cristal mediante centelleo, esto es, emisión de luz en un corto espacio de tiempo. La señal de luz generada por dicha radiación es proporcional a la energía depositada por la partícula incidente. Para poder tratar la señal de luz se usan fotomultiplicadores, que se encargan de convertir la luz en electrones, en corriente eléctrica. El objetivo del procesado y digitalización de la señal eléctrica es poder caracterizar del mejor modo posible la partícula incidente tanto en energía como en tipo de partícula. De la carga eléctrica generada se podría deducir la energía depositada por la partícula, pero además en la forma temporal de la señal hay información acerca del tipo de partícula incidente, información que también permite eliminar ruidos electrónicos y sucesos que no provienen de centelleo en el cristal. Por ello no es suficiente con medir la carga emitida por los fotomultiplicadores sino que es necesario digitalizar la señal para un postprocesado offline.

En la Figura 2 se puede ver la señal de un centelleo del cristal de NaI usado en ANAIS convertida en señal eléctrica. Se muestra en el eje Y la digitalización del voltaje a la salida de un fotomultiplicador y su decaimiento en el tiempo. Se puede ver que la señal es negativa dado que lo que se está viendo es la corriente de electrones. Para tener una idea de los órdenes de magnitud en los que se mueve la señal se debe hacer notar que el eje X está nanosegundos y el eje Y en milivoltios, por lo tanto es una señal pequeña y rápida. La intensidad de la luz de un centelleo decae con una constante que se denomina constante de centelleo y que es de 230 ns para el NaI.

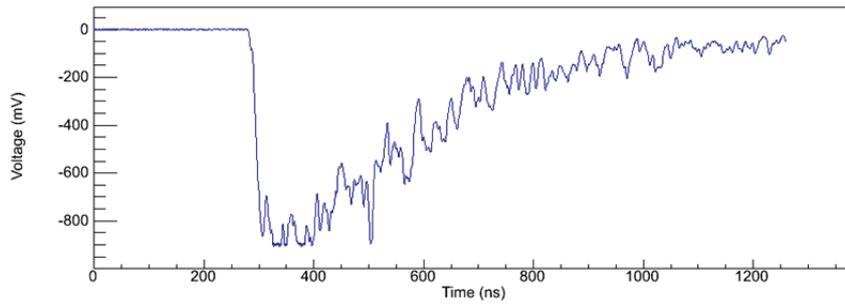


Figura 1: Ejemplo de señal de centelleo. Se muestra la señal de luz recogida en cada uno de los extremos del cristal convertida en señal eléctrica.

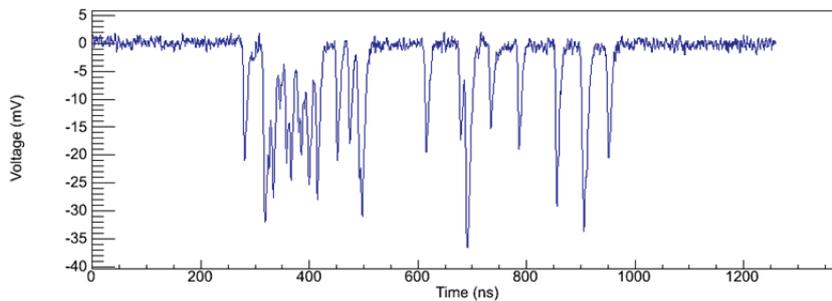


Figura 2: Ejemplo de señal de centelleo de baja energía. Se puede ver en ella los fotones individuales (fotoelectrones) que son cada uno de los picos.

Como se ha comentado anteriormente, a mayor energía depositada más luz. La zona de energía de mayor interés para el experimento es la baja energía por lo tanto las señales más interesantes son las de menos luz lo que supone señales más pequeñas. En la Figura 2 se observa una interacción de menos energía en la que se distinguen los fotones individuales o fotoelectrones: generan una corriente negativa y por lo tanto un pulso negativo por fotón. Las interacciones de baja energía tienen dificultades añadidas ya que se ven más afectadas por el ruido eléctrico porque la relación señal/ruido va disminuyendo.

Los detectores de ANAIS poseen dos fotomultiplicadores situados en cada extremo del cristal. Se usa esta configuración para poder descartar señales no provenientes del cristal: sólo se aceptan señales en coincidencia, que son señales que han llegado a los dos extremos con un pequeño desfase temporal. En la Figura 3 se puede observar las señales de las dos vías de un cristal y como son prácticamente simultáneas. También se puede ver que la magnitud no es la misma porque la luz detectada en cada vía y la ganancia de los fotomultiplicadores no tienen por qué ser la misma.

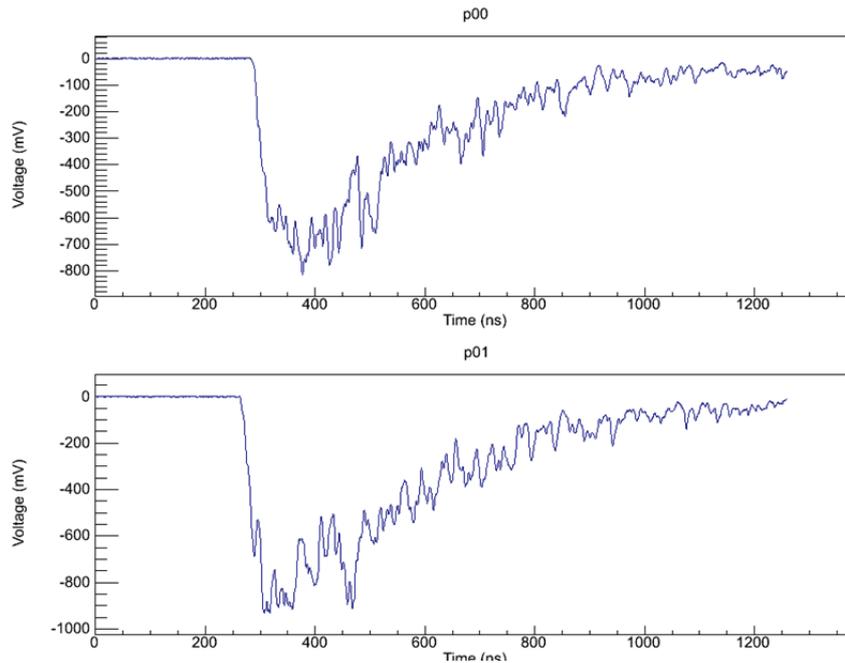


Figura 3: Centelleo en dos las vías de un cristal.

El tratamiento de la señal y su posterior digitalización debe conservar la información importante, tanto de carga recogida como otros parámetros de interés que dan datos adicionales muy valiosos acerca del evento detectado: tiempo de detección del evento en cada una de las vías o número y tamaño de fotoelectrones en señales de baja energía por poner dos ejemplos. La diferencia de tiempos entre las señales de las dos vías puede usarse para distinguir señales provenientes de la misma interacción frente a coincidencias fortuitas: a menor distancia es más probable que sean el resultado de la misma interacción. El número y tamaño de los fotoelectrones se pueden usar como estimador de la energía menos afectados por el ruido electrónico.

Una digitalización de calidad suficiente de la que se pueda reconstruir la forma de la señal permite extraer estos parámetros en un análisis *offline*. Además este análisis se puede ir refinando con la posibilidad del desarrollo de nuevos parámetros de caracterización de eventos que sean capaces de discriminar entre tipos de evento de un modo más robusto. Preservar al máximo la información de la señal fuerza requisitos tanto al tratamiento de la señal como a su conversión a formato digital.

Detección de eventos

Marcar cuando comienza un evento es crítico para las medidas del experimento porque si no se define de un modo adecuado pueden darse demasiados falsos positivos o que se pierdan señales de interés. Si no se sincroniza adecuadamente con el resto de la cadena electrónica puede ocurrir también que se pueda perder parte de la información interesante del evento.

Existen varias estrategias de detección de un evento basándose en lo que se considera *señal de interés*. La más sencilla e intuitiva es usar un discriminador de umbral que detecta cuando el voltaje de la señal pasa por debajo un umbral

determinado que se denomina nivel de disparo o nivel de *trigger*. En este momento el discriminador genera una señal digital que se puede usar para informar a la cadena electrónica que debe ponerse en marcha. Se llama línea base al estado de reposo en el cual no hay señal en el fotomultiplicador, con lo cual interesa tener una línea base estable en un nivel de continua porque de otro modo el disparo se podrá ver afectado por una deriva en dicho nivel.

Otra estrategia de detección es disparar por cantidad de carga en unidad de tiempo en lugar de por nivel. Para ello es necesario integrar parte de la señal. Esto sirve para tener un disparo sólo con señales que contengan más de un pico o fotoelectrón y para lograrlo se pueden introducir elementos como un *timing filter amplifier*. Tiene la ventaja de ignorar señales demasiado pequeñas que serán probablemente ruido. Otra estrategia distinta de detección podrá ser digitalizar continuamente la señal de entrada e implementar un análisis *online*. Para ello el método más eficaz será implementarlo por hardware en un módulo con FPGA y programarla a medida de las necesidades del experimento.

En ANAIS se deben detectar eventos de baja energía con lo que cualquiera de las tres estrategias es válida en principio siempre que corresponda a un umbral en energía muy bajo. Lo que si exige el diseño del experimento es la coincidencia de las señales para evitar detección de señales que no son de centelleo del cristal.

Tratamiento analógico de la señal

Para extraer la información de la señal en las mejores condiciones es necesario tratarla analógicamente antes de pasar a las fases de digitalización. Las operaciones más típicas son la amplificación, el duplicado, la suma, el *shaping* y el retardo. Mediante la amplificación podremos disponer de una señal de mayor amplitud, Útil para adaptarse al rango dinámico de la digitalización. La relación entre la amplitud de entrada y la de salida se denomina ganancia. La amplificación tiene algún inconveniente, por ejemplo puede producirse saturación por exceder la señal el rango dinámico del amplificador o en ocasiones introducir ruido. La duplicación puede hacerse de un modo pasivo, mediante bifurcaciones o T. Las T tienen la desventaja de atenuar la señal y los duplicadores de señal tienen limitaciones análogas a los amplificadores dado que no dejan de ser amplificadores de ganancia unidad. También existe la posibilidad de sumar e invertir señales con sumadores e inversores analógicos. El *shaping* se suele hacer para convertir Área en amplitud mediante integración o alguna otra operación espectroscópica. El retardo se realiza fundamentalmente con cables de longitud suficiente para el retardo requerido. Tiene grandes inconvenientes como la atenuación de la señal y su posible deformación. Suele ser necesario después de la detección de un evento debido a que el discriminador genera una señal de disparo que activa las digitalizaciones, pero hay que retardar la señal al menos el tiempo que tarda en dar la señal el discriminador y llegar a la digitalizadora, de otro modo la señal saldrá cortada. El problema de sincronización de tiempos y módulos es una constante en todo sistema de adquisición.

Las zonas de interés para ANAIS son sobre todo las de menor energía, las de señales más pequeñas con lo que se hacen necesarias amplificaciones para aprovechar el

rango dinámico de las digitalizaciones. De todos modos el resto de energías también tienen interés, así- que es necesario que alguna información del mayor rango energético posible se pueda recuperar.

Digitalización de la señal

Los parámetros básicos de la digitalización de una señal son la frecuencia de muestreo, el ancho de banda analógico, la ventana de digitalización y el rango dinámico de digitalización. La frecuencia de muestreo o *sampling rate* es la frecuencia a la que se obtiene un valor (muestra o *sample*) de la señal. La ventana de digitalización es el tiempo que dura el muestreo de la señal. El rango dinámico es el intervalo de valores de entrada que dan una salida proporcional. Fuera de ese rango ocurre que el valor de muestreo está saturado en su valor máximo o mínimo. Este efecto se puede ver en la Figura 2 en la que hay valores, entre 300 y 400 ns, que sobrepasan el mínimo del rango dinámico, se saturan y por lo tanto se quedan en el valor mínimo.

Las señales de los detectores de ANAIS son rápidas, con las señales de los fotoelectrones individuales como unidad fundamental que marcan la escala del orden de magnitud del muestreo de la digitalización en 10-20 ns y la ventana de digitalización del orden del microsegundo por la constante de centelleo del NaI. No obstante dado que en ANAIS se quiere reconstruir la forma de la señal para posteriormente analizarla y extraer parámetros de interés conviene que la digitalización tenga una buena frecuencia de muestreo. Tampoco hay que olvidar el ancho de banda analógico de todo el sistema incluyendo la digitalizadora, que puede limitar mucho las frecuencias que se obtienen finalmente. También se puede decir que a mayor rango dinámico mayor rango energético se podrá abarcar, lo cual es muy interesante para el experimento. Y a más bits de precisión con los que se digitalicen las muestras mejor se podrán calcular los parámetros de forma de la señal.

Otros parámetros digitalizables de la señal

Además de digitalizar la señal propiamente dicha se pueden digitalizar otra serie de parámetros con módulos específicamente diseñados para ello. Parámetros digitalizables pueden ser la carga generada por una interacción, el tiempo en que disparó un discriminador o el máximo de la señal en un intervalo determinado. En ANAIS es muy importante digitalizar la carga depositada en diversos rangos de energía y es conveniente tener digitalizados los tiempos de llegada del evento en cada una de las dos vías de un cristal.

Otros datos a adquirir

Ritmo de interacciones, tiempo real y tiempo muerto

El objetivo de ANAIS es estimar la variación estacional del ritmo de interacciones producidas en el cristal detector por las partículas incidentes en un determinado rango de energías. Por ello es muy importante determinar los tiempos con gran precisión, para no cometer errores en el ritmo detectado. Dicho ritmo se define como el número de interacciones detectadas durante el tiempo de medida o tiempo vivo. El tiempo vivo define como el tiempo real en el que el sistema está en funcionamiento menos el tiempo en el que el sistema no es capaz de detectar un nuevo evento y que llamamos tiempo muerto. En un experimento como éste en el que el ritmo de interacción esperado es bajo disminuir el tiempo muerto es importante. Aumentando la relación (tiempo vivo)/(tiempo real) se gana en aprovechamiento de los detectores, evitando posibles pérdidas de eventos de interés.

El tiempo muerto es una combinación de:

- *tiempo muerto por hardware ocupado*: tiempos durante los cuales el hardware está procesando y aún no puede ser consultado. Dura desde que llega el evento hasta que es posible leer los datos.
- *tiempo muerto de atención a eventos*: tiempo muerto desde que llega un nuevo evento hasta que el software es notificado de su llegada (sólo se acumula si no hay buffers multievento).
- *tiempo muerto de transmisión*: tiempo de transmisión de datos entre el hardware y el PC (sólo se acumula si no hay buffers multievento).
- *tiempo muerto de rearme de hardware*: tiempo desde que al hardware se le ordena un rearme hasta que el hardware está rearmado y listo para una nueva adquisición.

Durante estos tiempos los módulos no pueden estar adquiriendo un nuevo evento y por lo tanto el sistema debe *permanecer ciego* a un nuevo evento. Como se ha comentado en su definición el tiempo muerto de transmisión y de atención a eventos sólo computan en caso de no haber buffers multievento, en los que hay que descargar los datos antes de permitir la llegada de uno nuevo para no destruir la información.

En la Figura 4 se representa gráficamente cada uno de los tiempos descritos anteriormente.

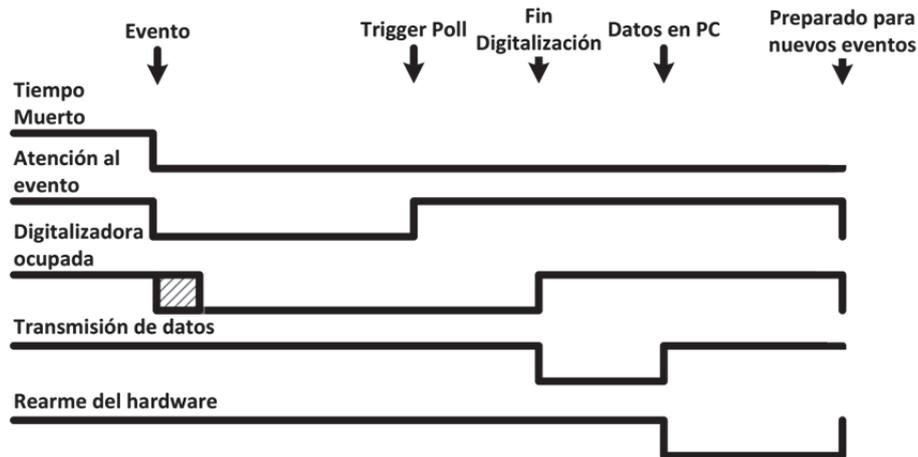


Figura 4: Composición de los tiempos muertos de un evento.

Cabe destacar que los tiempos muertos por hardware ocupado y atención a eventos no se suman directamente al tiempo muerto total sino sólo el mayor de ellos. En el gráfico anterior sucede antes la notificación al PC, pero podrá ocurrir al contrario. Transmisión y rearme deberán ocurrir en serie en un sistema sin buffer multievento, con lo que se sumarán los dos. También hay que aclarar que con distintos módulos el esquema puede ser un poco más complicado. Por un lado el tiempo muerto de hardware ocupado será el mayor de todos ellos y la transmisión y el rearme pueden ir en paralelo si son de distintos módulos.

Parámetros ambientales y monitorización de sistemas

Como ANAIS es un experimento que debe estar midiendo ininterrumpidamente durante años es muy importante que se monitoricen los parámetros que puedan afectar a la estabilidad de las medidas. Por ello se debe diseñar e implementar un software que se ejecuta en paralelo al sistema de adquisición de datos (llamado coloquialmente *slow control*) que se encarga de monitorizar y almacenar datos como temperaturas en diversos puntos o el flujo de nitrógeno y que además debe avisar si hay algún motivo para la intervención humana, como subida excesiva de temperatura, corte del nitrógeno o parada del sistema de adquisición.

Requisitos de la cadena electrónica

La cadena electrónica del sistema de adquisición del experimento ANAIS debe cumplir una serie de requisitos que vienen marcados por el tipo de señal, por los parámetros relevantes a extraer de ella y por los otros datos a almacenar descritos en la sección anterior. La cadena electrónica deberá estar correctamente dimensionada también para el número final de detectores. Además es imprescindible en el diseño la validez en la generación de datos, el uso adecuado y válido de buffers y la máxima estabilidad temporal en el disparo y digitalización de la señal.

A continuación se enumeran todos los requisitos con los que debe cumplir la cadena electrónica y que son consecuencia de lo visto anteriormente:

Disparo en coincidencia: La detección de un evento debe realizarse con la coincidencia de dos vías de un cristal. El disparo debe ser capaz de generarse con eventos de baja energía y ser robusto frente a falsos positivos: coincidencias fortuitas y ruidos eléctricos.

Resolución temporal del orden de nanosegundos: Dado que la señal elemental es la de un fotoelectrón y que dicha señal es del orden de la decena de nanosegundos es necesaria una frecuencia de muestreo muy alta, del orden de las giga-muestras por segundo para poder reconstruir la forma de la señal y no perder información relevante. También es necesario que el ancho de banda del sistema hasta su digitalización sea el adecuado para respetar todas las frecuencias de interés de la señal.

Ventana de digitalización: Puesto que la constante de centelleo del NaI es de 230 ns la ventana temporal de interés es del orden de un microsegundo, fijando así- nuestra ventana de digitalización.

Precisión en los valores de digitalización: Conviene que la precisión con la que se almacenan los datos digitalizados sea suficiente, en cualquier caso igual o mayor de ocho bits. Esto, unido a la ventana de digitalización, determina también la memoria que necesita el hardware para almacenar esos datos y es un requisito para ese hardware. Posteriormente, la memoria que ocupa la señal digitalizada incidirá en el tiempo muerto ya que deberá transmitirse hasta el PC de adquisición.

Máximo rango dinámico-energético: Las señales de mayor interés son de baja energía y en general no saturarán la electrónica analógica. Pero en ocasiones también es necesaria información en otros rangos energéticos y para ello hay que tratar de no saturar y conservar la linealidad y estudiando cada etapa de la cadena electrónica, tener caracterizados los rangos dinámicos y evitar pérdida de información en puntos críticos de dicha cadena.

Coincidencia entre cristales: También es un requisito del experimento guardar información de qué cristal o cristales han sido los causantes del disparo del evento. Esto sirve para ver coincidencias entre cristales y descartar contribuciones al ritmo de eventos por interacciones en coincidencia, que se podrán atribuir a los fondos radiactivos pero no a los WIMPs, dada la baja probabilidad de interacción de éstos.

Bajo umbral: El sistema debe tratar de detectar las interacciones de la más baja energía posible y por lo tanto el umbral de detección debe ser lo más bajo que permita el ruido eléctrico. Esto impone restricciones al tratamiento de la señal, a los discriminadores y a los niveles de ruido aceptados.

Tiempo real y tiempo muerto: Para la medida del ritmo de interacciones es fundamental medir el tiempo real y el tiempo muerto acumulado. Además, para aprovechar al máximo el tiempo de detección es importante minimizar el tiempo muerto dado que para el experimento es crucial maximizar el tiempo de medida. También es muy importante medir con precisión esos tiempos para poder comparar

cuantitativamente las medidas obtenidas con los resultados de las simulaciones de radiación de fondo natural.

Validez y correlación de datos: La generación y lectura de los eventos debe evitar desc correlaciones, es decir, datos de un evento que corresponden a otro, mezcla de datos, lecturas erróneas. Para ello es necesario sincronizar todo el sistema para que se correlacione cuando tiene un evento y luego se rearme. Esa congelación introduce tiempo muerto pero asegura la validez y correlación de los datos.

Estabilidad temporal: Además de que los datos sean correctos es necesario que los parámetros de adquisición como el nivel de *trigger*, el nivel de continua o las ganancias sean constantes con el tiempo y con la temperatura. Se debe realizar un calibración semanal para caracterizar el sistema completo pero es necesario detectar las posibles derivas temporales y/o térmicas y minimizarlas en lo posible.

Registro de veto: Los centelleadores plásticos que se colocan alrededor de detector para detectar muones. Permiten descartar sucesos relacionados con la interacción de un muón en el detector o en sus proximidades. Por esta razón se les denomina vetos, porque sirven de veto de una posible detección. El sistema debe ser capaz de guardar información temporal de la señal de los vetos y poder así etiquetar los eventos cercanos como correlacionarse con los vetos.

Coste económico: Todos los requisitos anteriores están mediatizados por el coste económico. Para que el experimento sea interesante desde el punto de vista físico se necesita disponer de suficiente masa de detectores. Ello lleva acarreado un aumento de vías y por lo tanto de material electrónico, en general lineal con el número de detectores. Para que el proyecto sea viable es conveniente minimizar el presupuesto asociado a electrónica. Esto se puede conseguir aprovechando al máximo las capacidades de hardware y tratando de reaprovechar material existente así como minimizando el uso de módulos y material asociado.

Elecciones de diseño

Se repasan las decisiones que se han ido tomando para cumplir con los requisitos mencionados con anterioridad. De estas decisiones surge la cadena electrónica que se describirá a continuación.

Bus VME y electrónica NIM

La primera elección de diseño es la decisión de en qué tecnología basar los elementos. En este caso se optó por bus VME para los módulos que se comunican con el PC de adquisición y electrónica NIM para los que no lo hacen. La electrónica NIM (Nuclear Instrumentation Module) es un estándar dentro de la física de partículas, trabaja con una lógica distinta de la TTL o ECL, también denominada lógica NIM. Establece tamaño y conector y alimentación para que los módulos se puedan conectar a un chasis NIM y resultar un sistema compacto y *enrackable*.

En cuanto al bus VME es un sistema muy usado en física nuclear y de partículas, robusto, compacto en un chasis que se puede colocar en un rack, buen ancho de

banda, con mucha oferta de módulos de propósito general y específico y buena integración con electrónica NIM. En la Figura 5 se pueden ver dos chasis, uno NIM en la parte superior y uno VME en la inferior y como se disponen en un rack.



Figura 5: Chasis NIM (arriba) y VME (abajo) en un rack.

Discriminadores y módulos AND

Para cumplir con los requisitos de disparo en coincidencia se probaron dos tipos de discriminadores que sobre el papel cumplan con los requisitos: discriminadores de fracción constante (Constant Fraction Discriminator, CFD) y discriminadores de umbral. Los CFD tienen una diferencia con los discriminadores de umbral sencillos y es que generan la señal digital de salida cuando la señal supera una fracción constante de su máximo. Se usan para que la generación de la detección se haga a una distancia igual de su máximo independientemente del tamaño de dicha señal y así situar todas las señales con el máximo alineado. Se decidió usar CFD porque simplificaba y abarataba el montaje electrónico en iguales condiciones. Cada discriminador genera una ventana de una duración determinada denominada ventana de coincidencia. Para hacer la coincidencia de dos disparos de discriminador se usa un módulo AND al que se le introduce como entrada cada una de las salidas del discriminador de cada vía de un detector. Dichas ventanas se comparan mediante un módulo AND que dará *true* si entre las dos señales existe una separación menor o igual a la ventana de coincidencia. El resultado positivo de ese AND será un *trigger* de ese detector. Esta ventana de coincidencia está configurada en 200 ns, que es suficiente para no perder eventos de centelleo pero sin embargo permite disparar coincidencias fortuitas que deberán descartarse en tiempo de análisis de datos.

Además se optó por usar CFD sin ningún tipo de integración porque el ritmo de detección no es muy alto y pruebas con prototipos previos detectaron inestabilidades causadas por un *Timing Filter Amplifier*.

El umbral de detección está fijado para disparar con seguridad con un fotoelectrón, es decir la señal elemental más pequeña que se desea detectar y está cerca del ruido eléctrico de la línea base, pero separado de AI. Esta estrategia de detección asegura que se almacena toda información potencialmente relevante y en un postprocesado *offline* se puede discriminar la información relevante de la que no lo es. Se asegura de este modo cumplir con el requisito de bajo umbral de detección. Hacer *trigger* así es posible porque el ritmo de señales de ese tipo genera un flujo de datos asumible para las capacidades del sistema. Por otro lado tiene ventajas sobre una estrategia *online* porque el algoritmo que separa las señales de interés se puede ir mejorando a *posteriori* sin que eso suponga pérdida de datos.

Tarjeta digitalizadora de señal: Matakq

Para cumplir con los requisitos de resolución temporal, ventana de digitalización, y precisión en los valores de digitalización se decidió por la tarjeta digitalizadora CAEN V1729 (basada en el chip MATAcq y referida en todo este documento como Matakq) Su máxima frecuencia de muestreo es 2 GSample/s, 1 GSample/s mínimo, ancho de banda de 300 MHz, 12 Bit de resolución, rango dinámico fijo a 1 Voltio, centrado en 0 (-0.5 V, +0.5 V), 2520 puntos de resolución horizontal fija también (1.290 \$ mínimo a 2 GSample/s), precio asumible.

Para cumplir además con el máximo rango dinámico y teniendo en cuenta que la señal es predominantemente negativa se decidió ajustar el centro del rango dinámico. La tarjeta permite hacer eso cambiando resistencias SMD sobre el módulo, desoldando las que vienen con AI y soldando otras siguiendo las indicaciones del manual. Con este proceso se consiguió centrar el rango dinámico en el intervalo (0.1 V, -0.9 V). Por otro lado introduce un tiempo muerto de transmisión y de rearme, dado que no posee buffers multievento. Este tiempo muerto es del orden de 2 ms y es asumible dado el ritmo esperado de eventos.

Cabe resaltar que existen en el mercado módulos con prestaciones superiores tanto en muestras por segundo como en reducción de tiempo muerto mediante buffers multievento o usando los denominados *flash ADC*, con un precio muy superior, unas cuatro veces más. Todas las alternativas barajadas poseen alguna desventaja que las hace menos competitivas como menor precisión en los bits de digitalización, menor número de muestras por evento o menor ritmo de muestreo. La tarjeta seleccionada tiene pues un buen compromiso entre los requisitos y el precio.

Tarjeta digitalizadora de carga: QDC

Para cumplir con los requisitos de máximo rango dinámico se decidió usar digitalizadoras de carga. Estas tarjetas calculan la integral de la señal en voltaje o, dicho de otro modo, miden la carga generada en una ventana temporal que debe proporcionársele al módulo. Su resultado es proporcional a la energía de la interacción para el mismo tipo de interacción. Los QDC elegidos, CAEN V792 se caracterizan por tener muchos canales y de ese modo se puede tener información redundante en la

zona de mayor interés, a baja energía e información sin saturar a más alta energía después de atenuar la señal. Se puede elegir además no sumar vías analógicamente para detectar asimetrías en la señal con un coste asumible. Se puede de este modo cubrir varios rangos energéticos por vía con distintas atenuaciones.

Tarjeta de almacenamiento de patrón de coincidencia: Pattern Unit

Para cumplir con el requisito del almacenamiento de la información de coincidencia entre cristales se eligió el módulo CAEN V259 que permite almacenar que entradas digitales se detectan en una ventana temporal que también debe proporcionársele.

Contador y contador: latched

Para cumplir con los requisitos de medida de tiempo y de medida de tiempo muerto se comenzó con un reloj y varios contadores. Como para determinadas medidas no resultó suficiente se adquirió un contador *latched* que se guarda los valores de un reloj de varios contadores en el momento de la llegada de una entrada digital. De este modo los valores de los contadores pueden seguir variando y el sistema de adquisición puede leer que valores tenían los contadores en el momento de interés. Para ANAIS es conveniente porque se tienen individualizados y sin *jitter* de lectura tanto el tiempo real como el tiempo muerto de cada evento.

Descripción de módulos

En esta sección se repasan los módulos usados en ANAIS que no han sido descritos anteriormente y que forman parte del conjunto de la cadena electrónica que se describirá en el apartado siguiente.

- Amplificadores: Usados para mejorar la resolución en la zona de interés
- Fan-In Fan-Out: Duplicación, suma e inversión de señales analógicas
- Módulos lógicos: AND, OR, de niveles, de pulsos, coincidencias, todos ellos de lógica NIM. Los módulos de coincidencias son muy importantes en ANAIS porque el *trigger* se hace en coincidencia de las dos señales de las dos vías de un cristal, para evitar fotoelectrones no provenientes de centelleo.
- Logical Fan-In Fan-Out: Duplicación, suma e inversión de señales digitales de lógica NIM.
- Generadores de ventanas.
- I/O Register: en ANAIS se usa para la detección del *trigger* y congelación de la adquisición hasta su reseteo.

- Retardos lógicos: Se usan para retardar una señal lógica durante un periodo de tiempo por lo general configurable. Debido al uso intensivo de retardos de señales digitales en ANAIS se ha diseñado en el grupo un módulo con gran densidad de canales para permitir el retardo digital de la salida de los discriminadores y de la coincidencia de cada detector. Es mucho más compacto, fiable y configurable que usar retardos analógicos.
- TDC (digitalizadoras de tiempo): Miden el tiempo de llegada de una señal. En el caso de ANAIS sirve sobre todo para ver la diferencia temporal entre vías de un detector.
- Elementos pasivos: Los más importantes son el uso de resistencias como atenuadoras o divisores resistivos. Los atenuadores son resistencias variables que se usan para ajustar la señal al rango dinámico de los módulos digitalizadores. Se atenúa la señal de modo que en la zona de interés de esa señal el máximo está cerca de la zona de saturación y así aprovechar el rango dinámico al máximo. Los divisores resistivos se usan para extraer señales atenuadas de la señal principal sin el uso de Fan-In Fan-Out, con la consiguiente reducción de costes.

En el caso de ANAIS la amplificación es necesaria dado que la señal de partida es pequeña, pero si no se desea renunciar a las señales de más alta energía se puede extraer una señal atenuada que no pase por la "parte activa" de la cadena electrónica, obtenida mediante un divisor resistivo. Los retardos son necesarios para poder coordinar distintos módulos como se podrá ver en su momento. Y los duplicadores son útiles cuando se quiere usar la misma señal con distintos fines, disparo y digitalización por ejemplo.

Descripción Funcional

En este apartado se describe el funcionamiento de la cadena electrónica, desde el momento en que llega un nuevo evento hasta el momento en el que los datos están preparados para la lectura y almacenamiento. El objetivo de esta cadena de adquisición es detectar los eventos de interés, digitalizar la forma de su señal y digitalizar el resto de parámetros de interés como la carga recogida, el tiempo de disparo de cada vía o el patrón de coincidencia entre cristales. Además debe encargarse de que los valores digitalizados se conserven hasta que la descarga se haya producido y la cadena está lista para la llegada de nuevos eventos.

En primer lugar se hace el proceso de detección de la señal y de extracción de vías de distintas energías y retardos analógicos y digitales. En la Figura 6 puede observar el esquema de la parte de la cadena electrónica que tiene esa labor. Esta electrónica es necesaria para cada detector y por ello se replica tantas veces como detectores haya. Para la detección de la señal se usan los *Constant Fraction Discriminator* (CFD). Se les proporciona como entrada la señal proveniente del fotomultiplicador amplificada x10. De este modo se puede ajustar mejor el umbral en un punto en el que disparen las señales más pequeñas, los fotoelectrones, pero no lo haga el ruido eléctrico. Como el disparo del detector debe ser en coincidencia de los dos fotomultiplicadores, la

salida del discriminador, ya digital, se lleva a un módulo AND, cuya salida proporciona esa coincidencia.

En esta cadena la ventana de coincidencia viene marcada por la duración de la señal de salida de los CFD. Dicha ventana está configurada a 200 ns, tiempo en el que se está seguro de que se detectan todas las señales coincidentes con un margen para no se pierdan señales de interés.

La señal amplificada x10 se obtiene por triplicado (gracias a un Fan-In Fan-Out) con tres objetivos distintos. La primera señal es para el disparo como se ha descrito en el apartado anterior. Las otras dos serán dos copias de la vía de baja energía, una de ellas se digitalizará y la otra, retardada, se integrará con el QDC.

Para cumplir con el requisito de obtener información de los distintos rangos energéticos, la señal se atenúa, retarda y divide antes de llegar a ningún amplificador. De este modo no se pierde información de las señales muy grandes que saturarán la electrónica y que corresponden a las energías más grandes. De esas operaciones se obtienen dos señales, una más atenuada que la otra, que llamamos vías de muy alta energía y de alta energía respectivamente. Estas señales están atenuadas de modo que encajen las zonas de interés con el rango dinámico del QDC y así aprovechar dicho rango al máximo.

Si no hubiese retardos y la señal de coincidencia fuese directamente el disparo de las digitalizaciones la señal que había llegado primero podría haber sucedido hace 200 ns y por lo tanto perderse. Además el proceso de la discriminación y generación de la ventana de *trigger* puede llevar algún nanosegundo. Por ello se retardan 250 ns, tiempo suficiente para que no se pierda la información de interés. Por el mismo motivo, para que vayan después del inicio de la ventana del *trigger*, se retardan también otras salidas del CFD y la coincidencia de vías, el AND lógico de los CFD. La salida retardada de los CFD se lleva a los TDC para medir con precisión el tiempo en el que llega cada una de las vías. La coincidencia de las vías se lleva a un *Pattern Unit* que guarda en cada bit cuales de los cristales han disparado en un determinado evento. Se puede ver que la vía de baja energía que va a la digitalizadora no se retarda. Esto es debido a que dicho módulo tiene *pretrigger*, es decir, que se le puede especificar cuanto tiempo antes del *trigger* debe comenzar la señal digitalizada y tiene magnitud suficiente para no necesitar más retardo.

En la Figura 7 se puede observar la segunda parte de la cadena electrónica, ésta ya común a todos los detectores. En particular se puede observar como la coincidencia de las vías de cada detector se lleva a un módulo OR que llega a un *I/O Register*. Este módulo es el que se encarga de guardar el estado de la adquisición. Cuando le llega una coincidencia de algún detector se queda en estado ocupado hasta que el software lo resetea. Es el cambio de libre a ocupado el que genera una salida que es usada para llevarla a todos los módulos digitalizadores para que realicen su trabajo. Hay que hacer notar que en caso de llegar una nueva coincidencia mientras está el *I/O Register* ocupado dicha coincidencia no genera digitalización: estamos en tiempo muerto. Como se ha comentado este mecanismo impide que se generen nuevas digitalizaciones hasta que el software no avisa de que ya tiene todos los datos. En particular es necesario por la falta de buffers multievento de la digitalizadora.

La ventana generada por el *trigger* es de duración un microsegundo y se lleva a todos los módulos digitalizadores para que se pongan en marcha. En la misma Figura (7) se pueden observar dichos módulos en el bus VME para poder transmitir sus datos al PC de adquisición. En particular están:

- los QDC, a los que llegan las vías retardadas de baja, alta y muy alta energía y que almacenarán la carga depositada
- la tarjeta digitalizadora Matabq que digitalizará la señal de baja energía de todas las vías
- los TDC que se quedarán con el tiempo de llegada de cada vía
- el *Pattern Unit* que guarda la información de qué detectores han tenido coincidencia
- contador y contador *latched*

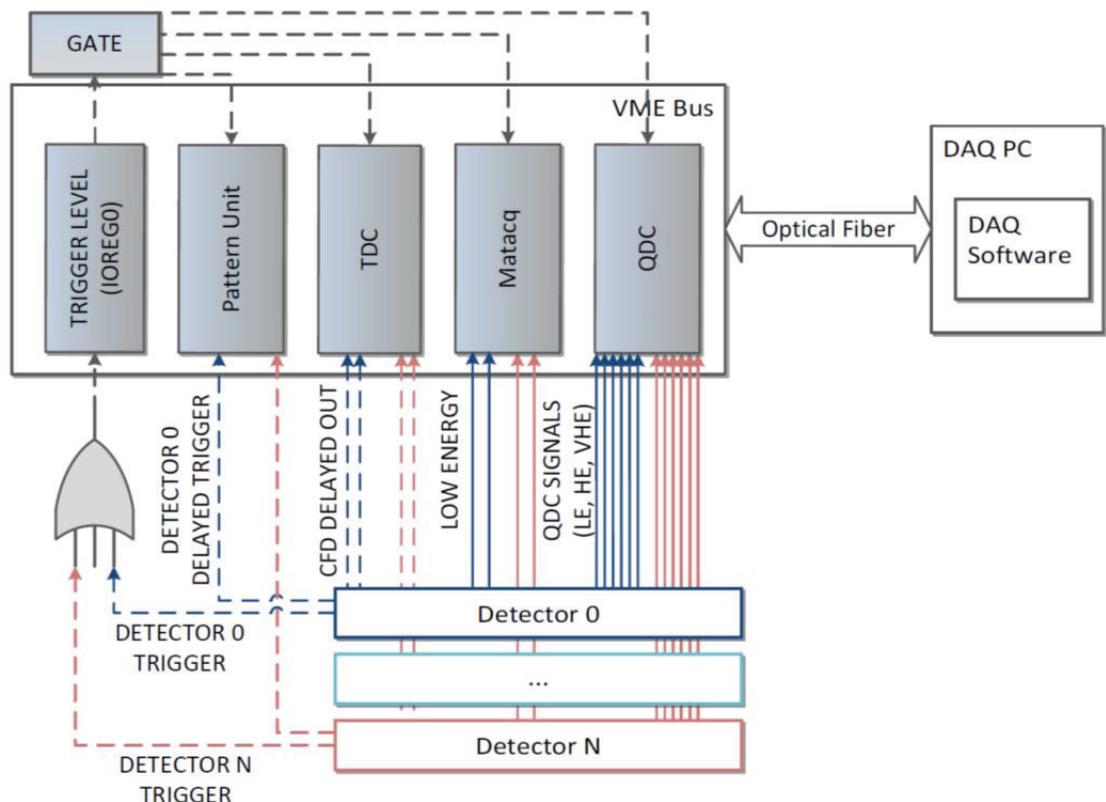


Figura 7: Esquema de la cadena electrónica de adquisición de ANAIS. En el bus VME se pueden ver los distintos módulos: el *I/OREGO* que guarda el estado del *trigger* durante el tiempo muerto, el *Pattern Unit*, que almacena el patrón de coincidencia de los distintos detectores, la digitalizadora del tiempo de disparo de cada vía (TDC), la tarjeta digitalizadora de señal (Matabq), la integradora de carga (QDC) y los contadores de tiempo real, tiempo vivo y distancia de un disparo de veto.

En el momento en el que el *I/O Register* está en ocupado es cuando el software debe entrar en acción, verificar que los datos están preparados e iniciar su descarga. Después de esa descarga el software podrá resetear el estado del *I/O Register* para volver a permitir la digitalización y almacenamiento de un nuevo evento, después de volver a poner en funcionamiento las tarjetas que así lo necesiten.

Esquema de contadores

En el presente apartado se va a describir el esquema de los contadores usados para medir tiempo real, tiempo vivo, tiempo muerto y tiempo desde el último veto. En la Figura 8 se puede observar el uso del contador base y del contador *latched*.

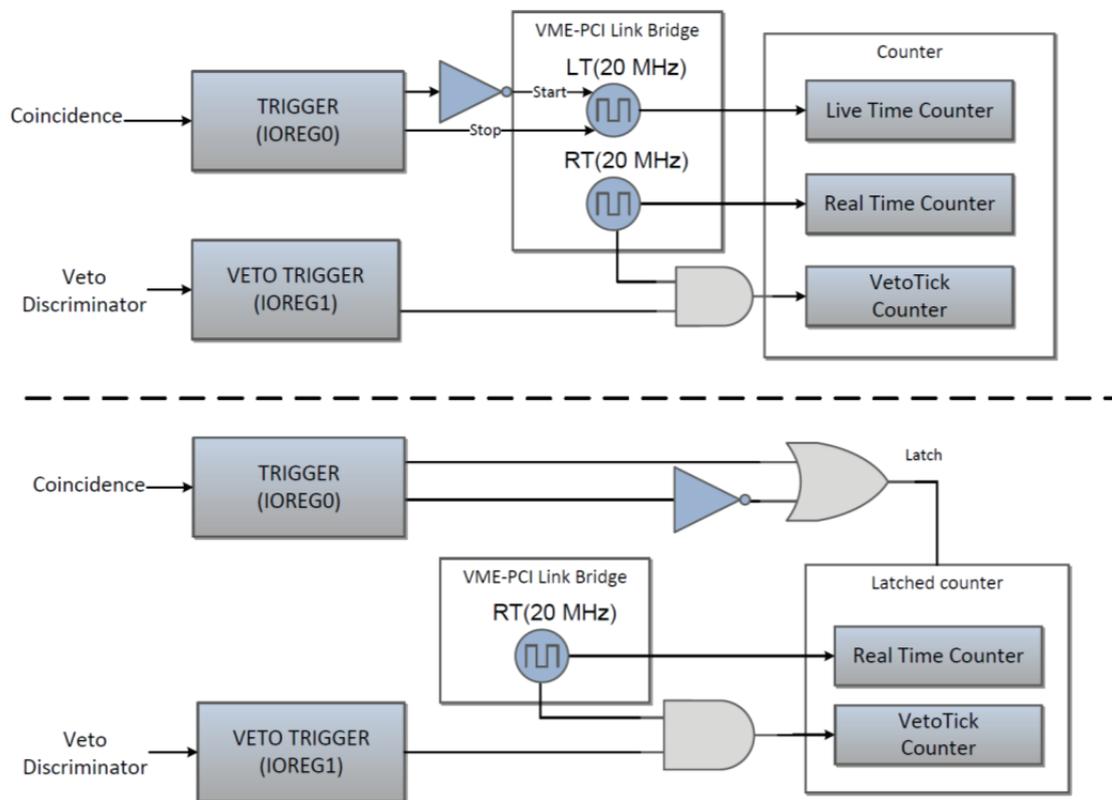


Figura 8: Esquema de contadores. En la parte superior se ve el esquema de los contadores base y en la inferior el de los contadores *latched*.

En el esquema de los contadores base se puede ver como se configuran dos relojes del *VME Bridge*. RT, el reloj de tiempo real, se inicia con el programa y no se para. El contador asociado cuenta tantos ciclos como realiza el reloj y por lo tanto mide el tiempo real. LT, el reloj de tiempo vivo se para cada vez que llega un evento, o sea, que sale 0 del *I/O Register* se pone a *true*, y se pone en marcha cada vez que la misma salida se pone a *false*. Recordemos que eso ocurre cuando el software da por

finalizada la lectura y el rearme. Por lo tanto el contador asociado a ese reloj contará el tiempo vivo. En estos contadores se cuenta también el tiempo desde que llegó el último veto. Cuando los vetos detectan una partícula se sube el nivel de la salida 1 del *I/O Register*, que mediante una puerta AND deja pasar las cuentas de reloj. Así el contador asociado contará los ciclos de RT desde que llegó un veto.

En el esquema de los contadores *latched* se ve que se usa tanto la subida como la bajada de la salida 0 del *I/O Register* como entrada *latch* al contador. Así tenemos tanto el tiempo de llegada del evento (subida) como el tiempo de descarga y rearme (bajada). El primero es el tiempo real del evento y el tiempo muerto del evento se calcula con la distancia entre los dos valores, el de subida y el de bajada. Con estos contadores el contador de veto funciona igual que con los otros.

Pruebas de validación y comparativas

En esta sección se describen las pruebas realizadas a módulos de modos individuales y comparativos entre posibles opciones. En particular se repasan los test de discriminadores, los test de la digitalizadora y la comparativa entre retardos analógicos y digitales.

Tests discriminadores: Umbral y fracción constante

El objeto de esta prueba era comparar la discriminación de los dos tipos de discriminadores. Posteriormente, valorando las ventajas y los inconvenientes de cada uno, se tomará la decisión de usar uno u otro.

Con pulsos provenientes de un generador de pulsos a frecuencia constante y barriendo en amplitud se comprobó la configuración de umbral para ambos discriminadores. Se midió la frecuencia de disparo de los discriminadores y cómo variaba para distintas amplitudes en la proximidad del umbral de disparo. De este modo se testeaba el mecanismo de discriminación y la transición entre señales que disparan y señales que no lo hacen. Se observó que su comportamiento era correcto y muy similar en los dos casos. Por esta razón se optó por usar los CFD porque generan una señal lógica de salida con la longitud suficiente para hacer la coincidencia con ella y ahorrar así- un módulo de generación de ventanas. Además el uso de los CFD tiene la ventaja añadida de centrar mejor el disparo con la forma del pulso.

Digitalizadora (Matacq)

Con este módulo se probaron tanto la digitalización como la velocidad de transferencia. Dado que es el módulo que mayor tamaño de datos genera es el más problemático en cuanto a la aportación de su transmisión en el tiempo muerto y por ello se incidió especialmente en los tests de velocidad. Se midió una tasa de transferencia por debajo de lo especificado por el fabricante. Tras investigar el origen de dicha discrepancia se pudo ver que el modo de transferencia del bus no era el

óptimo para esta cantidad de datos. El acceso al bus para descargar los datos se hacía en modo *single cycle* en el que se accede a una sola dirección de memoria y se transmite su contenido. De este modo hay que hacer tantos accesos al bus como palabras tiene el buffer. Sin embargo se vio que el acceso se debía hacer en modo bloque (BLT, *BLOCK Transfer*) o mejor, en modo multibloque (MBLT, *Multiplexed BLOCK Transfer*), en los cuales se accede una vez al bus para transferir un bloque o varios bloques respectivamente con un incremento sustancial en la velocidad de transmisión. De este modo se pudo obtener una tasa de transferencia cercana a lo especificado por el fabricante, 1 KHz para un solo canal, o sea tiempo muerto de 1 ms.

Integradores de carga (QDC)

Los test realizados a los integradores de carga tenían como propósito verificar la funcionalidad correcta de los mismos. Para ello se probó a recorrer con un generador de pulsos todo el rango dinámico del integrador de carga mediante variaciones en amplitud y duración de los pulsos. No se testeó específicamente su estabilidad, cuyos problemas fueron detectados con posterioridad en Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Retardos analógicos, retardos digitales y digitalizadores de tiempo (TDC)

En esta prueba se hizo la comparación entre dos posibilidades para los retardos de señales digitales de lógica NIM: retardos analógicos o retardos digitales. Los retardos analógicos consisten en cables de la longitud necesaria para el retardo requerido. Los retardos digitales son módulos diseñados en el grupo ex-profeso para las necesidades del experimento. Tienen varias ventajas sobre los analógicos. Por un lado son mecánicamente más fáciles de manejar e instalar ya que son un módulo frente a cincuenta metros de cable. Además no atenúan la señal y son más fácilmente configurable: mediante un potenciómetro se puede variar su retardo.

El test consistió en medir el retardo con los TDC. Mediante un *generador de pulsos* se generaba una señal que un discriminador convertía en una señal lógica que por un lado se introducía al TDC como start y por otro se retardaba. De este modo se obtenía la medida del retardo testeando de paso la funcionalidad básica de los TDC.

Se observó que los retardos digitales tenían una menor la dispersión en el valor medido por los TDC. Esto unido a las otras ventajas no dejaba dudas acerca de que la opción digital debía ser la elegida.

Problemas encontrados

Aquí se describen problemas encontrados con la cadena electrónica imprevistos y no cubiertos por las especificaciones de los fabricantes. La detección de este tipo de problemas, su localización y resolución o mitigación es una parte esencial, aunque menos llamativa que otras, del trabajo de validación del sistema de adquisición.

Generación de ruido eléctrico

En diversos puntos de todo el montaje se ha detectado generación de ruido eléctrico que afecta muy negativamente a la señal a digitalizar.

Fuentes Conmutadas

Las fuentes conmutadas que proveen de corriente continua provocan ruidos eléctricos a distintas frecuencias. En particular las fuentes de los diversos chasis y de las fuentes de alta tensión de los fotomultiplicadores generaban ruidos de alta frecuencia que pueden ser detectados en la señal y en ocasiones muy adversas hacer *trigger*. Se han tomado diversas medidas para tratar detectar fuentes de ruidos y aislarlas de la señal. Por un lado se ha implementado un software de análisis de ruidos para diagnosticar las fuentes de los mismos y por otro lado se está trabajando en filtros pasa baja para amortiguar los efectos. También se está estudiando el uso de fuentes lineales.

Polling en el bus VME

En las pruebas de estrategias de adquisición de software se observó que la interrogación continua al bus VME generaba un ruido que se podía observar claramente en la señal. Por esta razón se decidió esperar a las interrupciones en lugar de estar continuamente encuestando.

Fan-In Fan-Out

Los Fan-In Fan-Out son una pieza esencial de este experimento porque permite duplicar una señal y usarla con distintos fines. No obstante una de las premisas es que respete la forma de entrada y en particular que no introduzca ruido extra.

Se detectó en una de las primeras pruebas que la línea base de los Fan In-Fan Out tenía un ruido superior al esperado, aún en ausencia de entradas. Después de su caracterización y de la consulta con el fabricante, se comprobó que se debía a un discriminador que tienen incorporado esos módulos que "en principio" no debía influir en la señal de salida. Se procedió a su deshabilitación y se verificó que la línea base era lo estable que especifica el fabricante.

Módulo OR

Se encontró un comportamiento erróneo en los módulos lógicos que efectúan el OR. En el primer montaje de este sistema de adquisición en el LSC se observaron cambios en el ritmo de adquisición correlacionados con la temperatura. Después de investigar el origen de esos cambios de ritmo se pudo determinar que el módulo OR obtenía más valores *true* que el OR lógico de las entradas con una proporción de OR espurios correlacionado con la temperatura. Se envió el módulo al fabricante que corroboró su malfuncionamiento y lo reparó.

Integradores de carga (QDC)

También en el LSC se detectó una variación con la temperatura de los valores digitalizados de la integración de carga no observados en las pruebas hechas en la Universidad de Zaragoza.

Entradas y salidas del controlador del Bus VME

Para controlar el tiempo muerto se usó en las primeras implementaciones un generador de pulsos del controlador del BUS VME controlado por entradas. Se observó que la función de la API que configuraba un generador de pulsos desconfiguraba el otro y por lo tanto no se podía obtener la configuración deseada a pesar de ser posible según el manual. Se solucionó escribiendo la configuración directamente en un registro y no usando la API.

Enmascarar interrupciones con el I/O Register V977

Para establecer el registro del veto se usan los otros canales del *I/O Register*, pero no se desea que un veto genere interrupciones para no molestar a la adquisición. Se usó la posibilidad de enmascarar interrupciones según de que entrada proviniese, pero a pesar de ser correcto según el manual el módulo no se comportaba de este modo. Se reportó el problema al fabricante que admitió un error en el firmware y remitió otro módulo, que si enmascaraba interrupciones pero que tenía problemas a la hora de liberar la línea de IRQ. Sigue siendo un tema pendiente de resolución por el fabricante.

ANEXO C: PLANOS

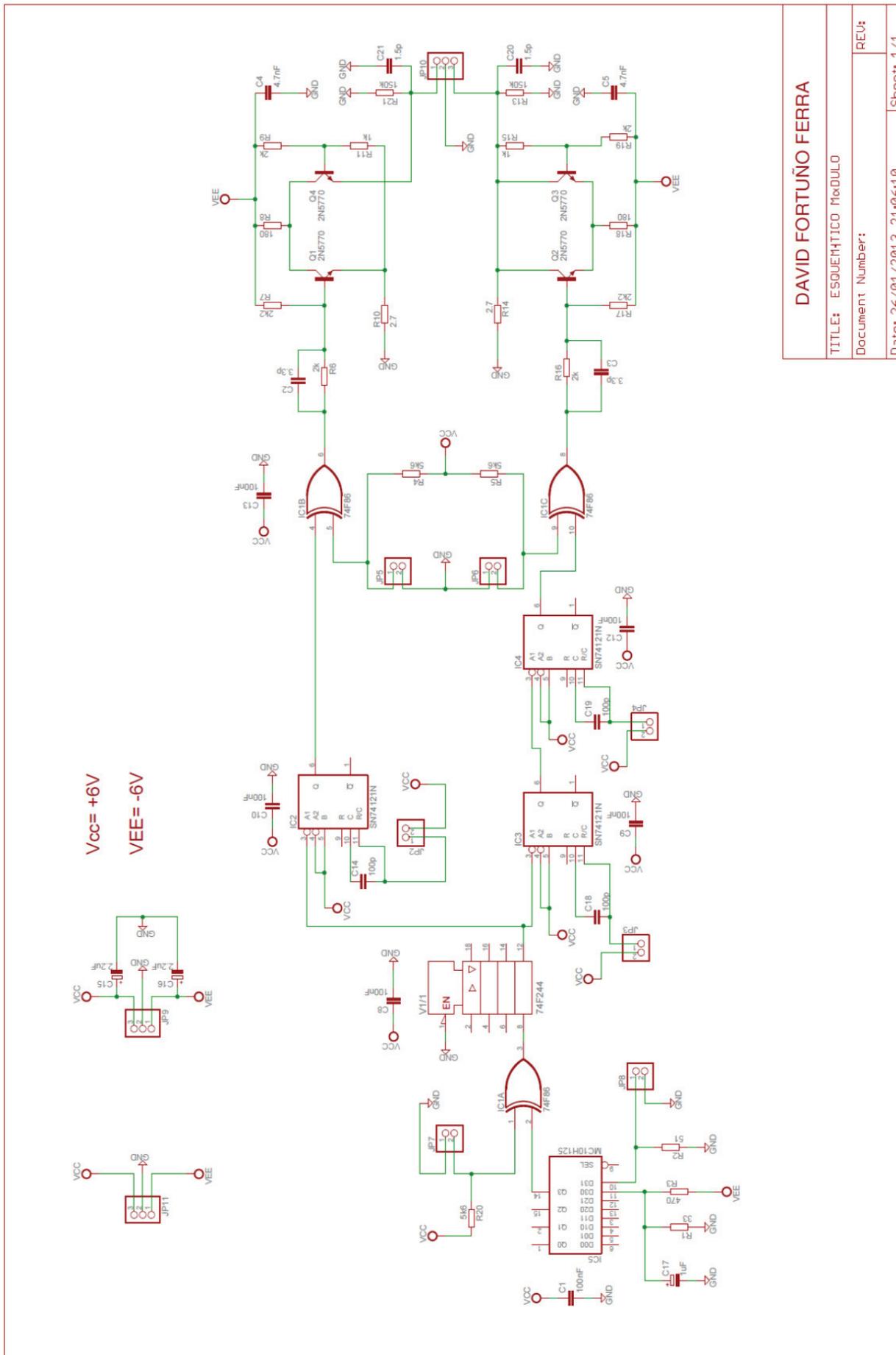
En este anexo se muestran los diferentes planos realizados.

PLACA DEL MÓDULO GENERADOR DE RETRASOS NIM (CAPÍTULO 4):

- Esquemático.
- Cara top de las pistas de circuito impreso.
- Cara bottom de las pistas de circuito impreso.
- Plano de serigrafía.
- Lista de componentes (PART LIST).

PLACA DEL CIRCUITO LED (CAPÍTULO 2):

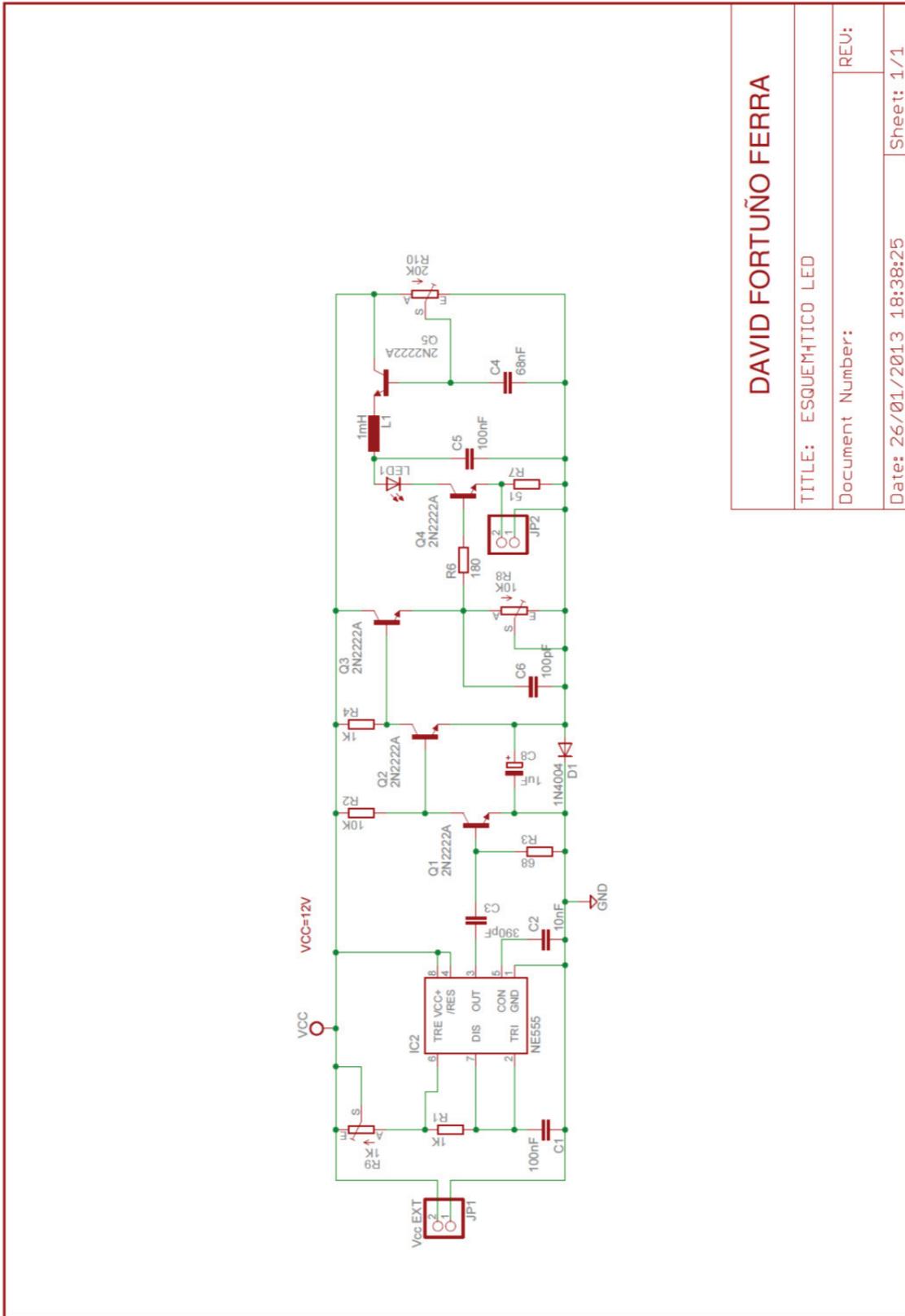
- Esquemático.
- Cara top de las pistas de circuito impreso.
- Cara bottom de las pistas de circuito impreso.
- Plano de serigrafía.
- Lista de componentes (PART LIST).



DAVID FORTUÑO FERRA	
TITLE: ESQUEMÁTICO MÓDULO	
Document Number:	REU:
Date: 26/01/2013 21:06:10	Sheet: 1/1

PART LIST

Part	Value	Package	Library	Position (inch)	Orientation
C1	100nF	C050-025X075	rcl	(0.75 2.15)	R0
C2	10nF	C050-025X075	rcl	(1.05 1.25)	R180
C3	390pF	C050-025X075	rcl	(1.05 1)	R180
C4	68nF	C050-025X075	rcl	(2.75 2.15)	R90
C5	100nF	C050-025X075	rcl	(1.9 1.6)	R270
C6	100pF	C050-025X075	rcl	(2.05 1.9)	R270
C8	1uF	E2,5-7	rcl	(1.75 1.2)	R180
D1	1N4004	DO41-10	diode	(2 1.15)	R90
IC2	NE555	DIL-08	st-microelectronics	(1.05 1.6)	R270
JP1	Vcc EXT	1X02	pinhead	(0.65 1.9)	R270
JP2		1X02	pinhead	(2.05 2.2)	R90
L1	1mH	0207/10	resistor	(2.4 2.15)	R0
LED1		LED5MM	led	(2.1 1.55)	R180
Q1	2N2222A	TO18	transistor-npn	(1.4 1.3)	R90
Q2	2N2222A	TO18	transistor-npn	(1.65 1.5)	R90
Q3	2N2222A	TO18	transistor-npn	(1.6 2.05)	R0
Q4	2N2222A	TO18	transistor-npn	(2.3 1.95)	R180
Q5	2N2222A	TO18	transistor-npn	(2.6 1.85)	R180
R1	1K	0207/10	resistor	(1.05 2)	R180
R2	10K	0207/10	resistor	(1.4 1.75)	R270
R3	68	0207/10	resistor	(1.5 1)	R0
R4	1K	0207/10	resistor	(1.25 2.2)	R0
R6	180	0207/10	resistor	(1.85 2.05)	R270
R7	51	0207/10	resistor	(2.4 2.25)	R0
R8	10K	PT-SPIN	pot	(2.4 1.3)	R90
R9	1K	PT-SPIN	pot	(0.7 1.3)	R90
R10	20K	PT-SPIN	pot	(2.7 1.3)	R90



DAVID FORTUÑO FERRA

TITLE: ESQUEMÁTICO LED

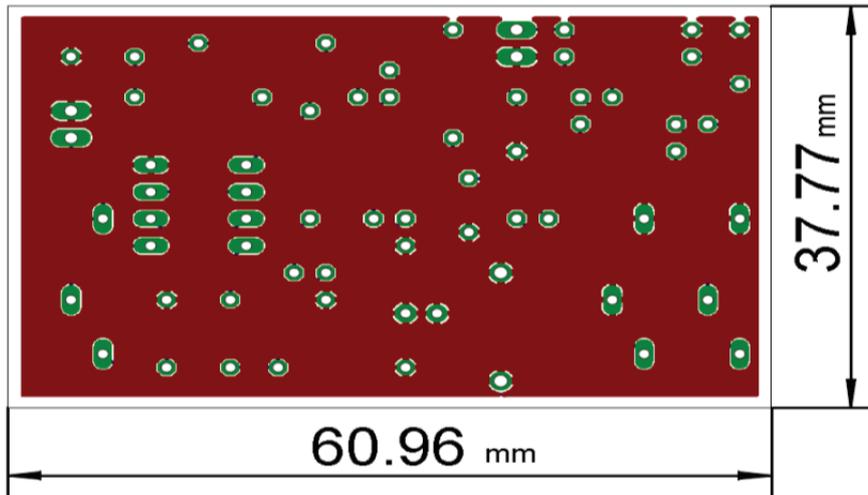
Document Number:

REV:

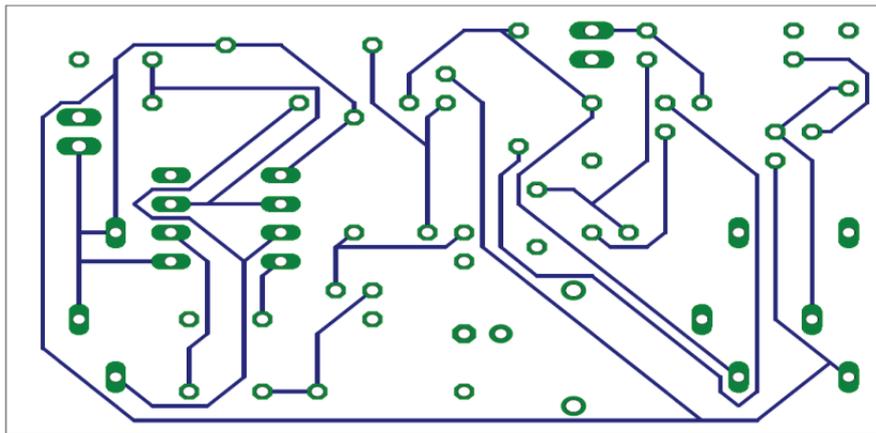
Date: 26/01/2013 18:38:25

Sheet: 1/1

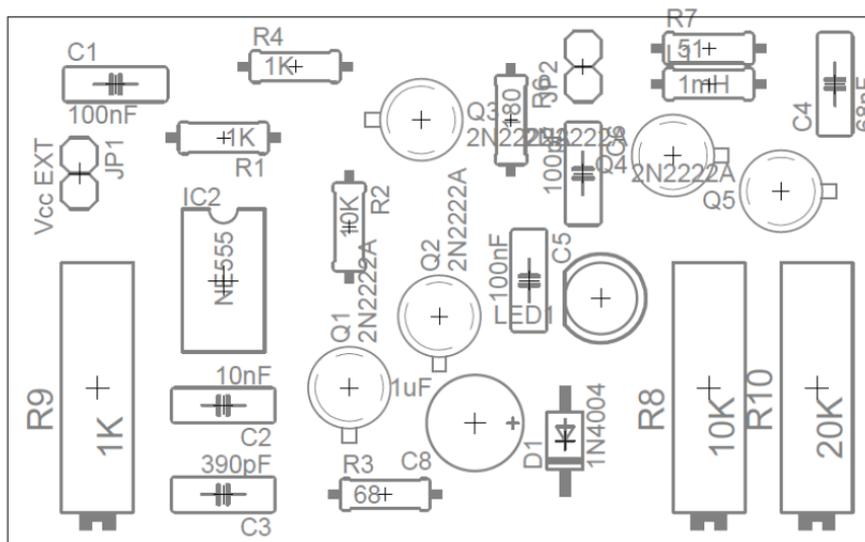
PLANO CARA TOP



PLANO CARA BOTTOM



PLANO SERIGRAFÍA



PART LIST

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	100nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C2	10nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C3	390pF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C4	68nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C5	100nF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C6	100pF	C-EU050-025X075	C050-025X075	rcl	1
C8	1uF	CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7	rcl	1
D1	1N4004	1N4004	DO41-10	diode	1
IC2	NE555	NE555	DIL-08	st-microelectronics	1
JP1	Vcc EXT	PINH-1X2	1X02	pinhead	1
JP2		PINH-1X2	1X02	pinhead	1
L1	1mH	L-EU0207/10	0207/10	resistor	1
LED1		LED5MM	LED5MM	led	1
Q1	2N2222A	2N2222A	TO18	transistor-npn	1
Q2	2N2222A	2N2222A	TO18	transistor-npn	1
Q3	2N2222A	2N2222A	TO18	transistor-npn	1
Q4	2N2222A	2N2222A	TO18	transistor-npn	1
Q5	2N2222A	2N2222A	TO18	transistor-npn	1
R1	1K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R2	10K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R3	68	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R4	1K	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R6	180	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R7	51	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R8	10K	TRIM_EU-PTSPIN	PT-SPIN	pot	1
R9	1K	TRIM_EU-PTSPIN	PT-SPIN	pot	1
R10	20K	TRIM_EU-PTSPIN	PT-SPIN	pot	1

ANEXO D: ARTÍCULOS:

I-. Background model for a NaI (TI) detector devoted to dark matter searches

II-. Update on the ANAIS experiment. ANAIS-0 prototype results at the new Canfranc Underground Laboratory

Update on the ANAIS experiment. ANAIS-0 prototype results at the new Canfranc Underground Laboratory

J Amaré, S Cebrián, C Cuesta¹, D Fortuño, E García, C Ginestra, H Gómez, M Martínez, M A Oliván, Y Ortigoza, A Ortiz de Solórzano, C Pobes, J Puimedón, M L Sarsa and J A Villar

Grupo de Física Nuclear y Astropartículas, Universidad de Zaragoza
C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, Spain
ccuesta@unizar.es

Abstract. ANAIS experiment will look for dark matter annual modulation using NaI(Tl) scintillators at the Canfranc Underground Laboratory (LSC). Highly purified NaI(Tl) crystals are being developed to reach the required sensitivity. In a parallel way, the ANAIS-0 module (made with a low background St Gobain NaI(Tl) crystal) has been taking data at the LSC, testing different configurations: various photomultiplier tubes (PMTs) models with/without light guides. Low background PMTs with light guides and ultra low background PMTs without light guides have shown a similar contribution to the background. A complete simulation of the ANAIS-0 module with shielding in the different configurations tested has been carried out and compared with the experimental data, considering contributions to the background from NaI bulk contaminants, PMTs, light guides, quartz windows and shielding materials. A good understanding of the background above 500 keV can be reported.

1. The ANAIS experiment

ANAIS is a project aiming to set up, at the new facilities of the Canfranc Underground Laboratory, a large scale NaI(Tl) experiment in order to explore the DAMA/LIBRA [1] annual modulation positive result using the same target and technique. For this goal, some of the experimental features of ANAIS should be: energy threshold below 2 keVee in order to improve sensitivity for the annually modulated WIMP signal, background at low energy kept as low as possible and very stable operation conditions. The original proposal consisted of 100 kg NaI(Tl) crystals, but an enlargement up to 250 kg was recently proposed and funds allocated.

New NaI(Tl) crystals with very low content in potassium should be used in ANAIS to reach the required sensitivity for the dark matter signal. ANAIS collaboration signed an agreement to purify commercial NaI powder below 100 ppb and 1 kg samples are being characterized at our HP Ge test bench in the LSC. The terms of the crystal growing agreement are under discussion.

Different photomultipliers have been tested. Two options are still under consideration for ANAIS: Low background (LB) photomultipliers (Hamamatsu R6233-100 or Electron Tubes Limited 9302B) with 10-cm methacrylate light guides and ultralow background (ULB) photomultipliers (Hamamatsu R11065SEL) without light guides. Regarding the acquisition code and electronics, the new VME acquisition system is completed and first tests at the University of Zaragoza have been carried out. It

¹ Speaker

will be installed at LSC for further testing with ANAIS-0 in the next weeks. Stability conditions and environmental parameters are being monitored with the ANAIS-0 module at the new facilities of LSC.

2. The ANAIS-0 module

The ANAIS-0 module consists of an old NaI(Tl) ultrapure crystal (9.6 kg), made by Saint-Gobain and encapsulated by us in OFHC copper in the University of Zaragoza (figure 1). It was designed to characterize and fully understand ANAIS background at low energy, optimize NaI scintillation events selection, determine the calibration method and test the electronics. The detector encapsulation allowed for testing different configurations of light guides and photomultipliers.



Figure 1. ANAIS-0 module with light guides.

Main results concerning background for ANAIS on site show that ultra low background photomultipliers (ULB PMTs) are radiopure enough to be a small contribution to the background of the ANAIS-0 module, and using light guides has not an important effect in the measured background (figure 2). ULB PMTs background without light guides is comparable to the background obtained with the low background photomultipliers (LB PMTs) with light guides. Work is in progress to establish the cuts to select of real bulk NaI scintillation events, mandatory before estimating the background at the very low energy region.

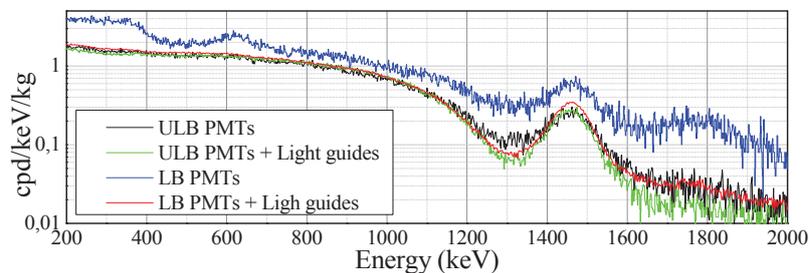


Figure 2. High energy raw background data for the different ANAIS-0 set-ups.

3. Background simulation

A complete simulation (using the GEANT4 package [2]) of the ANAIS-0 module with shielding in the different configurations tested has been carried out. Version Geant4.9.4.p01 has been used for all the simulations presented here. Physical processes and models commonly used in the context of underground experiments have been implemented for interactions of alpha, beta and gamma particles. The GEANT4 Radioactive Decay Model has been used for simulating radioactive contaminations, after checking carefully the energy conservation in the decay of all the isotopes taken into account; problems encountered in previous versions of GEANT4 code seem to be surpassed.

The simulated geometry (figure 3) includes the NaI crystal, Teflon and reflector lining, quartz windows, light guides (optional), photomultipliers, copper encapsulation as well as the shield made of both archaeological and standard low activity lead.

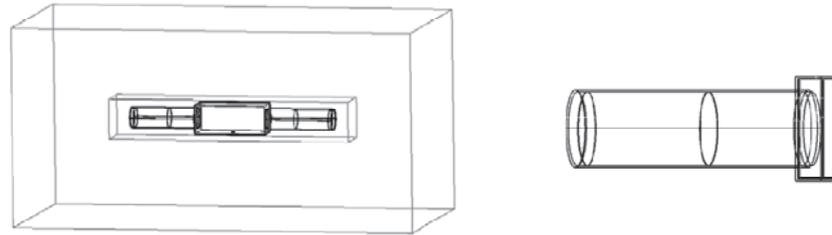


Figure 3. Geometry used in the ANAIS-0 module simulations (left). Detail of the PMT and light guide coupling (right).

Decays of radioactive impurities in the most relevant materials of the set-up, including mainly ^{238}U and ^{232}Th chains and ^{40}K , have been simulated assuming a uniformly distributed bulk contamination. Activities used to normalize simulation results come mostly from specific measurements made for ANAIS-0 building materials:

- For the ANAIS-0 module NaI crystal, the ^{40}K bulk content is determined through the coincidence method [2] to be 12.7 ± 0.6 mBq/kg. Activities of the different isotopes in the ^{238}U and ^{232}Th chains, assuming broken equilibrium, have been quantified after identifying their alpha emissions by means of Pulse Shape Analysis (PSA) and fitting the obtained alpha spectrum. The values obtained are: 0.075 ± 0.005 mBq/kg for $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$, 0.023 ± 0.007 mBq/kg for ^{230}Th , 0.098 ± 0.004 mBq/kg for ^{226}Ra , 0.188 ± 0.005 mBq/kg for ^{210}Pb , 0.013 ± 0.005 mBq/kg for ^{232}Th and 0.035 ± 0.003 mBq/kg for ^{228}Th . Concerning the activity of ^{129}I , the value deduced for DAMA/LIBRA crystals [3], produced (as the ANAIS-0 module crystal) by Saint Gobain company, has been used (9.01 mBq/crystal).

- The activities for the several ETL and Hamamatsu photomultiplier models employed in the different ANAIS-0 set-ups were measured using our HP Ge detector operated at LSC [4].

- For quartz windows, light guides and copper encapsulation the upper limits on the activities derived in specific measurements using a HP Ge detector operated at LSC have been considered.

- For archaeological lead, an upper limit on ^{210}Pb activity quoted at [5] has been used.

The energy spectrum of alpha emissions identified in the data taken for a long background measurement of ANAIS-0 has been compared with the corresponding simulation (figure 4), assuming a volumetric distribution of ^{238}U and ^{232}Th , and daughters, isotopes in NaI crystal and the activity values deduced by PSA analysis. Effect of acquisition dead time on ^{214}Po emission and the summing of alpha and beta emissions for the $^{212}\text{Bi-Po}$ sequence have been properly taken into account.

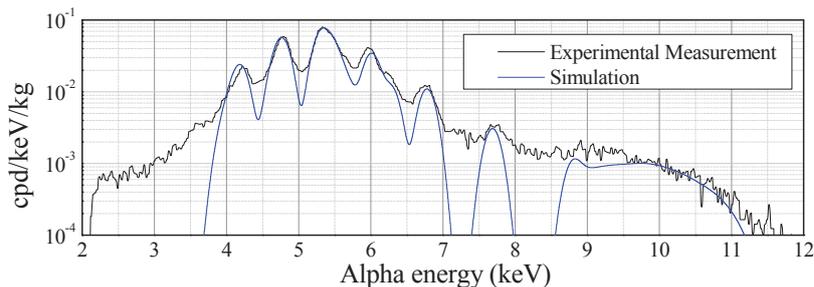


Figure 4. Simulation of the alpha spectrum compared with real data. Alpha+beta coincident events (Bi-Po sequence) are also shown.

The energy spectrum in ANAIS-0 due to beta-gamma events in a background measurement with the ULB PMTs without light guides has been compared with the simulated contribution of the different components (NaI crystal, copper encapsulation, photomultipliers, etc.) (figure 5). Looking at the high energy region, from 0.2 to 3 MeV, the main conclusion is that above 500 keV the measured background seems to be nicely reproduced by the simulated considered contributions; ^{40}K from the bulk NaI crystal is clearly the dominant background source from 500 keV to the 1460.8 keV peak.

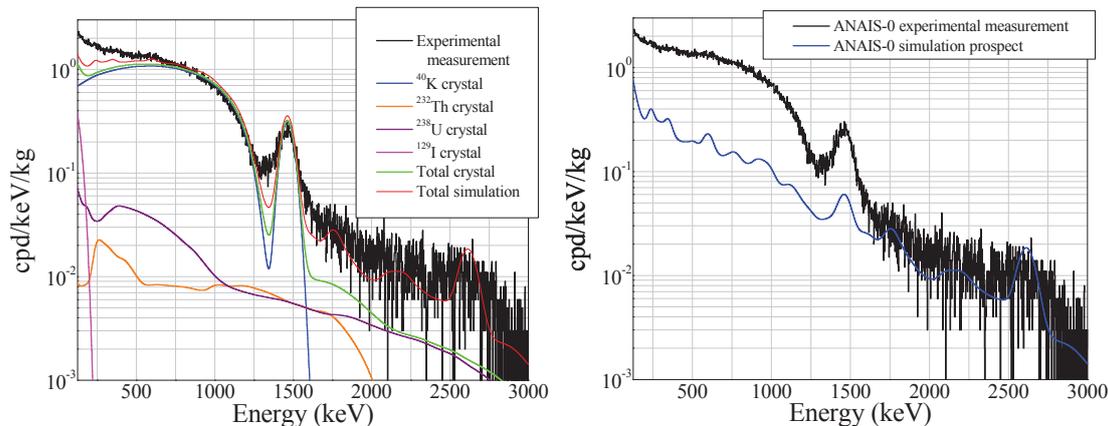


Figure 5. Simulation of the beta/gamma spectrum compared with real data. Contributions of bulk contaminations in NaI crystal are detailed in the plot and the total simulated spectrum is shown as red solid line (left). Prospect for the K contamination had as a goal for the new NaI crystals (20 ppb) keeping the same of all other contributions (right).

However, in the low energy region, below 0.2 MeV, agreement between the measured data and the total simulated contributions is worse, pointing to some non-explained component(s) in the background. Different possibilities are under study.

Drawn conclusions are equivalent for all the available configurations, either from the high or the low energy regions of the spectra.

Using the performed simulations, an estimate of the ANAIS new detectors achievable background levels has been attempted by reducing the K concentration in the NaI crystal down to 20 ppb, keeping activities for all the other emissions as presented before for the ANAIS-0 prototype (figure 5). It seems that the expected background will fulfill the ANAIS requirements provided if this K purity is effectively reached in the bulk crystal and the unexplained components (not included in the simulation for the moment) are kept under control.

4. Conclusions

New ultrapure NaI crystals are being developed, the NaI purification is on-going and crystal growing terms are under discussion. Besides, ANAIS-0 (old NaI crystal) is taking data at the LSC. Two configurations with ANAIS-0 have been tested: ultra low background photomultipliers and low background ones with light guides, both contribute equivalently to the background.

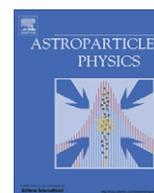
The ANAIS-0 background above 500 keV seems to be explained by the considered contributions. However, at low energy we find some non-explained components that are under study. Encapsulation materials and procedure allow us to reach the required background level if the new NaI crystals have a potassium content less than 20 ppb.

Acknowledgments

This work has been supported by the Spanish Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) under project reference FPA2008-03228 and Consolider-Ingenio 2010 Programme under grant Multidark CSD2009-00064. C. Cuesta is supported by a Gobierno de Aragón predoctoral grant.

References

- [1] Bernabei R et al 2008 *Eur. Phys. J. C* **56** 333-355 (arXiv:0804.2741)
- [2] Agostinelli S et al 2003 *NIM A* **506** 250-303
- [3] Amaré J et al 2010. *PoS (IDM2010)* 020
- [4] Bernabei R et al 2008 *NIM A* **592** 297
- [5] Cebrián S et al 1999 *Astropart. Phys.* **10** 361



Background model for a NaI (TI) detector devoted to dark matter searches

S. Cebrián^{a,b}, C. Cuesta^{a,b}, J. Amaré^{a,b}, S. Borjabad^b, D. Fortuño^a, E. García^{a,b}, C. Ginestra^{a,b}, H. Gómez^{a,b}, M. Martínez^{a,b}, M.A. Oliván^{a,b}, Y. Ortigoza^{a,b}, A. Ortiz de Solórzano^{a,b}, C. Pobes^{a,b}, J. Puimedón^{a,b}, M.L. Sarsa^{a,b,*}, J.A. Villar^{a,b}

^a Laboratorio de Física Nuclear y Astropartículas, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain

^b Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Paseo de los Ayerbe s.n., 22880 Canfranc Estación, Huesca, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 May 2012

Received in revised form 9 July 2012

Accepted 21 July 2012

Available online 7 August 2012

Keywords:

Sodium iodide scintillators

Dark matter

ANAIS

Low background

Background simulation

ABSTRACT

NaI (TI) is a well known high light yield scintillator. Very large crystals can be grown to be used in a wide range of applications. In particular, such large crystals are very good-performing detectors in the search for dark matter, where they have been used for a long time and reported first evidence of the presence of an annual modulation in the detection rate, compatible with that expected for a dark matter signal. In the frame of the ANAIS (Annual modulation with NaI Scintillators) dark matter search project, a large and long effort has been carried out in order to characterize the background of sodium iodide crystals. In this paper we present in detail our background model for a 9.6 kg NaI (TI) detector taking data at the Canfranc Underground Laboratory (LSC); most of the contaminations contributing to the background have been precisely identified and quantified by different complementary techniques such as HPGe spectrometry, discrimination of alpha particles vs. beta/gamma background by Pulse Shape Analysis (PSA) and coincidence techniques; then, Monte Carlo (MC) simulations using Geant4 package have been carried out for the different contributions. Only a few assumptions are required in order to explain most of the measured background at high energy, supporting the goodness of the proposed model for the present ANAIS prototype whose background is dominated by ⁴⁰K bulk contamination. At low energy, some non-explained background components are still present and additional work is required to improve background understanding, but some plausible background sources contributing in this range have been studied in this work. Prospects of achievable backgrounds, at low and high energy, for the ANAIS-upgraded detectors, relying on the proposed background model conveniently scaled, are also presented.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Sodium iodide scintillators have been widely used for radiation detection [1,2]. In particular, they have been applied since the nineties in the direct search for dark matter, profiting from the feasibility of growing large mass crystals, the high light output, the sensitivity to spin-dependent interacting WIMP candidates, the low and high mass isotope combination, and the particle discrimination capability (although limited at low energy). On the other hand, they suffer from poor energy resolution and low Relative Scintillation Efficiency factor for nuclear vs. electron recoil events. Several experimental efforts with NaI (TI) detectors in the search for dark matter can be found in the literature [3–12]. Among these experiments, DAMA/LIBRA results have produced a large impact in the field by analyzing the annual modulation in the rates: a modulation compatible with that expected for galactic halo WIMPs was

reported after seven cycles of measurement at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy [5] and has been confirmed with much more statistical significance by LIBRA data, accumulating six more cycles at this moment [11]. Complete understanding of the DAMA/LIBRA background at low energy has not yet been achieved and some open questions remain [13,14]. Results obtained with other target materials and detection techniques have been ruling out for years the most plausible compatibility scenarios (some of the most recent and significant negative results can be found in [15,16]), but recently CoGeNT and CRESST experiments have reported excess of events attributable to WIMPs [17,18], and even, in the former experiment, the presence of an annual modulation in the rate has been observed [19].

Confirming the DAMA/LIBRA modulation observation in a model independent way is the main goal of the ANAIS experiment (Annual modulation with NaI Scintillators), projected to be carried out at the Canfranc Underground Laboratory (LSC), Spain, with up to 250 kg of NaI (TI) [20]. In the context of ANAIS, a long effort to understand and reduce the radioactive background in sodium iodide detectors has been done. In this paper we report on the esti-

* Corresponding author at. Laboratorio de Física Nuclear y Astropartículas, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain.

E-mail address: mlsarsa@unizar.es (M.L. Sarsa).

mate of the activities of the different radioactive isotopes identified in the detector and shielding components (upper limits for some of them), on the simulation using Geant4 package of the corresponding contributions to the background and on the comparison with the experimental data obtained in different set-up configurations for calibration and background runs. Data readout allows the acquisition of spectra in three different energetic regimes simultaneously (see Section 2), but in this work we will only use the low and high energy ones (from 2 up to 200 keV and from 200 keV up to 6 MeV, respectively), and corresponding spectra will be shown separately through the paper. We emphasize our interest for understanding the background at the lowest energies, the most relevant for the dark matter analysis.

In section 2 we describe the modeled ANAIS prototype module, as well as the different experimental set-up configurations for the measurements carried out at the LSC with such a prototype. In section 3 we report on the estimate of the different radioactive isotopes contents in all materials in and around the detectors, describing briefly the techniques used for the measurements. In section 4, the simulations carried out are described and simulated spectra are compared to experimental results for calibration data. Finally, in the last sections results for the background of the analyzed prototype, using the previously reported contaminations, and prospects for the upgraded ANAIS detectors, based in the same background model conveniently scaled, are presented and conclusions drawn.

2. Experimental set-up

The detector studied throughout this work consists of a 9.6 kg ultrapure NaI (TI) crystal ($4'' \times 4'' \times 10''$), made by Saint-Gobain. The crystal was encapsulated at the University of Zaragoza using 1 mm-thick Electrolytic Tough Pitch (ETP) copper. We will refer to this detector as ANAIS-0 module. Special features of ANAIS-0 module (shown in Fig. 1) are:

- Teflon tape (2 mm thick) plus a reflecting multilayer foil (3 M VikuitiTM), both wrapping the NaI crystal, are used for light diffusion.
- Tight sealing was done at the level of the two 3'' diameter 1 cm long synthetic quartz (Suprasil-BTM) optical windows to allow the testing of different configurations of light guides and photo-

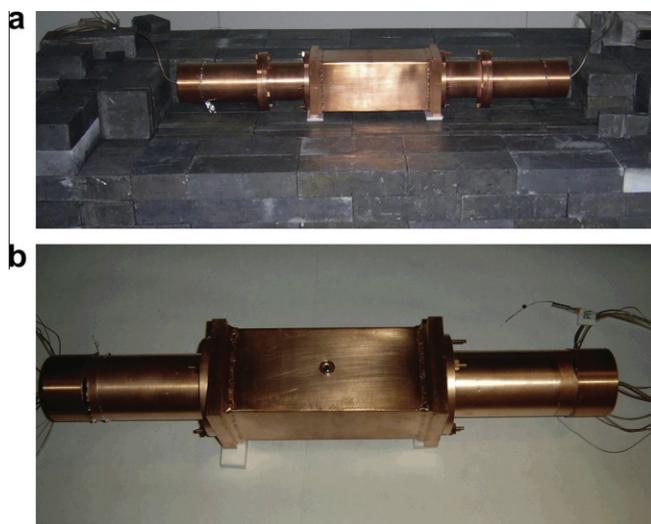


Fig. 1. Pictures of ANAIS-0 module in two configurations used. (a) Using 10 cm light guides. (b) Coupling directly the PMTs to the optical quartz windows. In (b) the Mylar window (for low-energy calibration) can be observed.

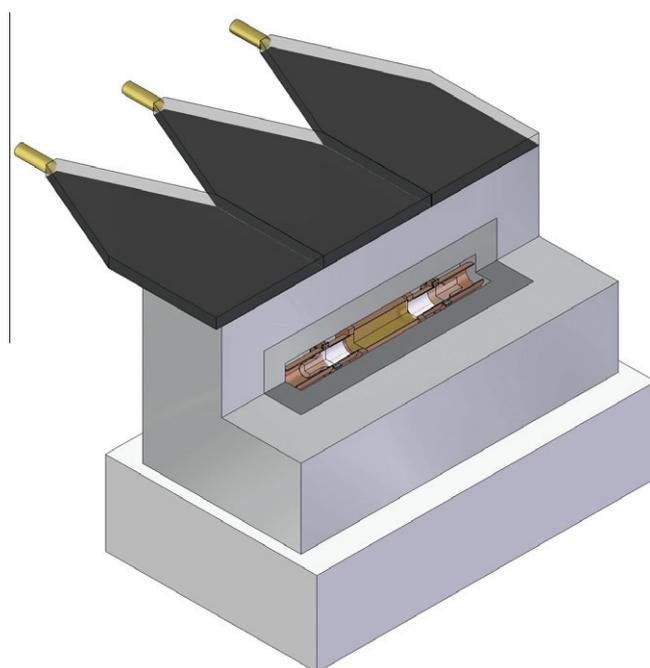


Fig. 2. Schematic drawing of the experimental layout used at LSC for the measurements with the ANAIS-0 module. It consists of 10 cm archaeological lead plus 20 cm low activity lead, all enclosed in a PVC box tightly closed and continuously flushed with boil-off nitrogen. Active vetoes are mounted on top of the shielding to reject coincident events in ANAIS-0 module.

multiplier tubes (PMTs): PMTs can be directly coupled to the optical windows or light guides can be used (being in that case 10 cm long and made of PMMA); low background Electron Tubes (ET) and Hamamatsu (Ham) PMTs of different models¹ have been used for the tests. Light guides and PMTs were encapsulated with ultra-pure copper electroformed at the University of Zaragoza in a dedicated facility.

- An aluminized Mylar window (20 μm thick and 10 mm in diameter) in the middle of one of the lateral crystal faces allows for external calibration at very low energies (see Fig. 1b).
- The sealing was done minimizing the addition of material to the copper in the welding process and glue was only used to fix, both, the quartz windows and the Mylar window to the copper.

ANAIS-0 module was designed to characterize and understand ANAIS background at low energy, optimize NaI scintillation events selection, fix the calibration method and test the electronics while new more radiopure detectors are in preparation for a 250 kg detection mass experiment. It has been operating at the old and new facilities of the Canfranc Underground Laboratory (LSC) for several months inside a shielding consisting of 10 cm archaeological lead plus 20 cm low activity lead, all enclosed in a PVC box tightly closed and continuously flushed with boil-off nitrogen. Active vetoes were mounted on top of the shielding to reject coincident events in ANAIS-0 module. The experimental layout used for the measurements at LSC can be seen in Fig. 2. All the background spectra shown in the following sections correspond to different set-ups, having all of them the same shielding layout but using different PMT models with or without light guides (see Table 1) and accumulate enough events to derive statistically significant conclusions (live time for each set-up is also shown in Table 1).

Concerning data acquisition and readout system of ANAIS-0

¹ In the following ET LB PMT, Ham LB PMT and Ham ULB PMT will stand for ET 9302B, Hamamatsu R6233-100SEL and Hamamatsu R11065SEL models, respectively.

Table 1

Different set-ups of the ANAIS-0 module (with or without light guides and coupled to different PMT models) have been used for the comparison between simulations and experimental data along this work. Available live time of measurement for each of them is also shown.

Set-up	PMT used	Light guides used	Live time (days)
1	ET LB	No	31.32
2	Ham LB	Yes	178.9
3	Ham ULB	Yes	43.71
4	Ham ULB	No	123.3

module, the most relevant features for this work are: Each PMT charge output signal is separately processed; each one is divided into a trigger signal, a signal going to the digitizer, and three signals differently attenuated and fed into QDC (charge-to-digital converter) module channels to be integrated in a 1 μ s window. Triggering is done by the coincidence (logical AND) of the two PMT signals at photoelectron level in a 200 ns window, enabling digitization and conversion of the two signals. The building of the spectra is done by software (off-line) by adding the signals from both PMTs, and Pulse Shape Analysis is applied in order to select bulk scintillation events in the NaI crystal and to distinguish alpha interactions from beta/gamma ones. Energy spectra are obtained from the QDCs in three different gain windows, chosen to match a low, a high, and an ultra-high energy ranges: the first one covers from threshold (at 2 keV) up to 200 keV, the second up to about 6 MeV, and the latter up to about 40 MeV.

3. Identification and quantification of main background contributions

The most relevant contributions to the ANAIS-0 module background are coming from radioactive isotopes located at or near the NaI crystal. Contribution from fast neutrons and environmental gamma background have been also simulated, being negligible at the present level of sensitivity. Contribution from muons interacting in the crystal (and other muon related events) can be vetoed by the coincidence with a signal in the plastic scintillators covering the ANAIS-0 shielding. Although coverage is only partial in the present experimental layout, the corresponding residual background contribution at the present level of sensitivity of ANAIS-0 module has been estimated to be negligible and has not been simulated. Because of that, we will consider hereafter contributions of alpha, beta, and gamma emissions coming from:

- internal sources of radiation, bulk distributed in the NaI crystal;
- external sources of radiation located in:
 - PMTs
 - Quartz optical windows
 - Optical coupling grease
 - Light guides
 - OFHC copper encapsulation
 - Lead shielding
 - Inner volume air

For the estimate of the activities of the different radioactive isotopes present in every detector component specific analytical techniques have been used, as is reported below.

3.1. Internal radioactive contaminants

For the ANAIS-0 module NaI (TI) crystal, we have considered contaminations in the bulk coming from uranium and thorium natural radioactive chains, ^{40}K and ^{129}I isotopes. No evidences for the presence of other radioactive contaminants have been found. We

Table 2

Activities estimated by different techniques (see text) for the identified radioactive isotopes bulk-distributed in the NaI crystal and considered in the simulation of the ANAIS-0 module.

Isotope	NaI crystal bulk activity (mBq/kg)
^{40}K	12.7 ± 0.5
^{129}I	0.96 ± 0.06
$^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$	0.075 ± 0.005
^{230}Th	0.023 ± 0.007
^{226}Ra	0.098 ± 0.004
^{210}Pb	0.188 ± 0.005
^{232}Th	0.013 ± 0.005
^{228}Th	0.035 ± 0.003

describe briefly below the technique used for the estimate of the activity of every isotope. The values for every NaI crystal bulk contamination used in the background model of ANAIS-0 module are shown in Table 2.

- The ^{40}K bulk content is the most relevant contribution to the background in the ANAIS-0 module, as it will be shown later. Because of that, a very good knowledge of such a contamination is required in order to properly estimate the prospects achievable with the new ANAIS crystals, grown using potassium-purified NaI-powder. For the ANAIS-0 module NaI crystal, bulk ^{40}K content was estimated in a dedicated set-up using it together with another large NaI detector (10.7 kg) and searching for coincidences among both of them: detecting 3.2 keV energy deposition in the ANAIS-0 crystal (following EC) and the 1460.8 keV gamma line escaping from it and being fully absorbed in the other detector. Efficiency of the coincidence was estimated by MC.
- Activities of the different isotopes in the ^{238}U and ^{232}Th chains, without imposing secular equilibrium, have been quantified after identifying their alpha emissions by means of Pulse Shape Analysis (PSA) technique and fitting the obtained alpha spectrum to a multi-gaussian function, deriving the activities of every chain branch. Results, see Table 2, show that equilibrium seems to be broken in both chains.
- Concerning the activity of ^{129}I , cosmogenic isotope usually found in iodine compounds in a very broad range of activity values (depending on the ore origin), the value deduced for DAMA/LIBRA crystals, produced (as the ANAIS-0 module crystal) by Saint Gobain company has been used: $^{129}\text{I}^{nat} = (1.7 \pm 0.1) \times 10^{-13}$ [21] and $T_{1/2} = 1.57 \times 10^7$ y [22].

3.2. External radioactive contaminants

Besides the NaI crystal, PMTs are usually the main background contribution in scintillation detectors. For the rest of the components only upper limits for the different radioactive isotopes searched for have been obtained. For most of these external components HPGe spectrometry at LSC has been used to screen the radioactive contaminations. Results are presented in Table 3 for the PMTs and in Table 4 for the rest of the components.

- Several low background Electron Tubes and Hamamatsu PMT models have been tested in ANAIS prototypes. All of them were previously measured at the HPGe test bench at the LSC. Activities of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , $^{60}\text{Co}^2$ and ^{40}K have been taken into account. Equilibrium in the natural chains has been observed except if otherwise is explicitly stated.
- For quartz windows, light guides, optical coupling grease, and

² Only observed for the Ham ULB PMT.

Table 3

Activities considered for the simulation of the different PMT models used in the ANAIS-0 module. In the case of the Ham LB and Ham ULB PMTs, the values measured for each available unit are given separately.

Detector component	Isotope	Activity (mBq/PMT)	
ET LB PMT	^{40}K	420 ± 50	
	^{232}Th	24 ± 4	
	^{238}U	220 ± 12	
Ham LB PMT	^{40}K	678 ± 42	647 ± 56
	^{232}Th	68 ± 3	75 ± 4
	^{238}U	100 ± 3	109 ± 5
Ham ULB PMT	^{40}K	12 ± 7	24 ± 9
	^{232}Th	3.6 ± 1.2	1.8 ± 1.0
	^{238}U	47 ± 28	59 ± 28
	^{226}Ra	8.0 ± 1.2	6.1 ± 1.2
	^{60}Co	4.1 ± 0.7	5.1 ± 0.8

Table 4

Activities considered in the simulation for the different components of the ANAIS-0 module layout. Upper limits are given at 95% C.L.

Simulated component	Isotope	Activity
Copper encapsulation	^{40}K	< 11 mBq
	^{232}Th	< 4.1 mBq
	^{238}U	< 140 mBq
	^{226}Ra	< 2 mBq
	^{60}Co	< 0.94 mBq
	Quartz optical window	^{40}K
^{232}Th		< 2.2 mBq/kg
^{238}U		< 100 mBq/kg
^{226}Ra		< 1.9 mBq/kg
Light guides		^{40}K
	^{232}Th	< 4.1 mBq/guide
	^{238}U	< 120 mBq/guide
	^{226}Ra	< 4.7 mBq/guide
	Optical coupling grease	^{40}K
^{232}Th		< 200 mBq/kg
^{238}U		< 2000 mBq/kg
^{226}Ra		< 30 mBq/kg
Archaeological lead		^{210}Pb
	^{232}Th	< 0.3 mBq/kg
	^{238}U	< 0.2 mBq/kg
Inner volume air	^{222}Rn	< 0.6 Bq/m ³

copper encapsulation the upper limits on the activities shown in Table 4 have been obtained at the HPGe test bench at the LSC and are given at 95% C.L. Upper limits for ^{238}U are worse than those obtained for other isotopes because of the low intensity of its gamma emissions; in this case, equilibrium in the natural chains has not been imposed.

- For archaeological lead, upper limits on ^{210}Pb , ^{232}Th and ^{238}U activities quoted in [23] have been used.
- For radon content in the air filling the inner volume of the shielding, there is no real estimate. Radon content in the laboratory air is being continuously monitored, and the inner volume of the shielding is flushed with boil-off nitrogen, to guarantee its radon-free quality. An arbitrary value for the radon content in the inner volume air of about one hundredth of the external air radon content has been assumed in our background model (0.6 Bq/m³), compatible with the absence of lines coming from radon daughter isotopes in the measured background. Nevertheless, this contribution should be considered as an upper limit.

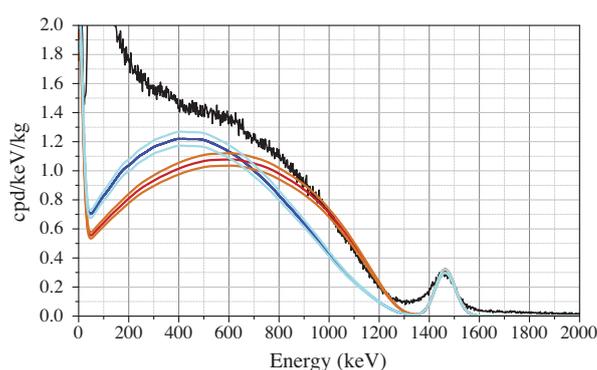


Fig. 3. Simulated spectra for bulk ^{40}K contamination in the ANAIS-0 NaI crystal are shown both for an allowed beta spectrum shape (Geant4.9.3 version) in blue and taking into account the proper shape factor for the third unique forbidden beta decay (Geant4.9.4 version) in red. It can be seen a much better accordance with the measured background spectrum (in black) shape at 1 MeV for the latter: in both cases 12.7 ± 0.5 mBq/kg of ^{40}K have been considered, as deduced from the analysis of coincidences (see text) (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

4. Geant4 simulation

A complete simulation (using the Geant4 package [24]) of the ANAIS-0 module with shielding in different experimental configurations has been carried out. Geant4 is widely used for this purpose and its reliability has been established in a large number of validating studies, changing experimental conditions and detection techniques. Some recent works using Geant4 with similar context and goals can be found in the literature [25–28]. Accurate modeling of the detector and shielding components and physical processes participating in the interaction mechanisms for every background source is required in order to reproduce qualitatively and quantitatively the background event rate of the experiment. Version Geant4.9.4.p01 and its corresponding data libraries have been used for all the simulations presented here. Physical processes and models commonly used in the context of underground experiments have been implemented for interactions of alpha, beta and gamma particles; for example, the low energy models based on the Livermore data libraries for the electromagnetic interactions. Range cut values of 10 (100) μm (that are converted into the corresponding energy cuts for every material) have been typically used for electrons (photons) in the simulation of bulk emissions; these cut values are (recommended) production thresholds for secondary particles. The Geant4 Radioactive Decay Module has been used for simulating radioactive contaminations, after checking carefully the energy conservation in the decay of all the considered isotopes; problems encountered in previous versions of Geant4 code seem to be surpassed. In particular, a very relevant (for this work) modification, included in the used Geant4 version, is related with the shape of the ^{40}K beta spectrum³, because the proper shape factor for the third unique forbidden beta decay has been used [29] (see Fig. 3).

The simulated geometry (see Fig. 4) includes the NaI crystal, Teflon and reflector lining, quartz windows, light guides (optional), photomultipliers, copper encapsulation, Mylar window, HV divider circuit and its mechanical support, and the shield made of both archaeological and standard low activity lead.

Decays of radioactive impurities in the most relevant materials of the experimental layout, including mainly ^{238}U and ^{232}Th chains and ^{40}K , have been simulated assuming (unless otherwise stated) a

³ Problem number 1068 at Geant4 Problem Tracking System: <http://bugzilla-geant4.kek.jp/>

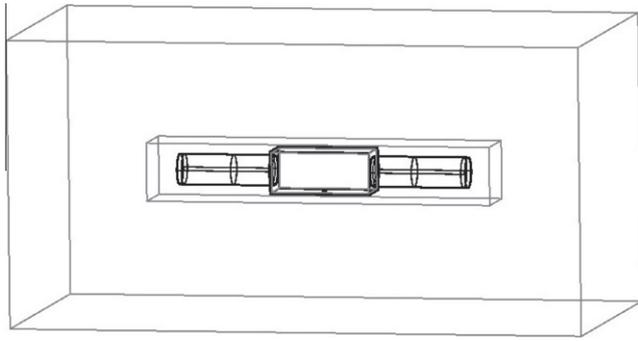


Fig. 4. Scaled geometry used in the ANAIS-0 module simulations.

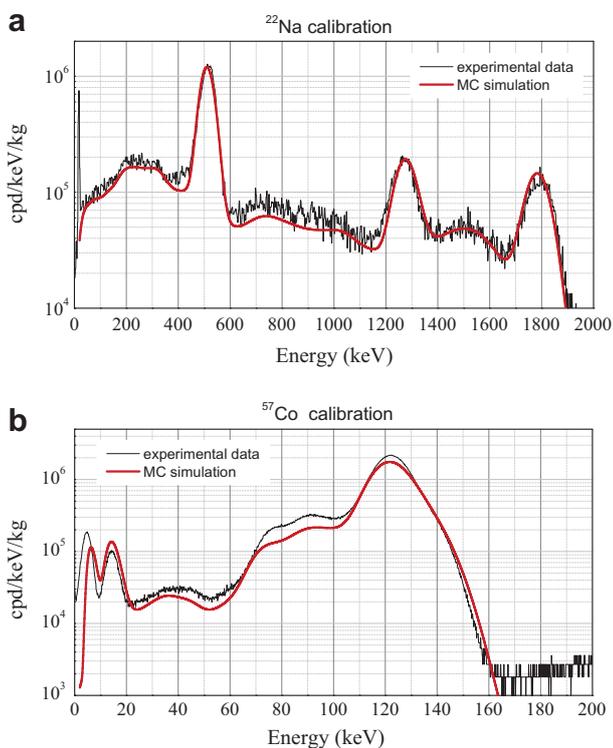


Fig. 5. Comparison of simulation (red) vs. experimental data (black) for the ANAIS-0 module for external gamma calibration sources: (a) ^{22}Na , (b) ^{57}Co (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

uniformly distributed bulk contamination in the different components. Activities used to normalize simulation results come mostly from specific measurements made for ANAIS-0 building materials, as stated in Section 3.

For each simulated event, defined considering an energy integration time of $1 \mu\text{s}$, the energy deposited in the NaI crystal by different types of particles has been recorded separately in order to build afterwards the total energy spectrum, correcting each component with the corresponding Relative Scintillation Efficiency Factor⁴. Dead time effects have been also considered in the simulations. Simulated spectra shown hereafter have been convoluted with

the response function of the detector to take into account energy resolution effects.

Energy spectra for different calibration sources have been simulated to validate the code, although systematic effects, specially at very low energy, are expected to be higher for external than for internal sources. In Fig. 5 high and low energy, measured and simulated spectra for ^{22}Na and ^{57}Co sources, as example, are shown, being simulations normalized to the known activity of the sources (known only at a level of $\pm 10\%$ accuracy). With the same goal, radon was allowed to enter into the shielding in order to have data for a homogeneously distributed contamination in the air around the ANAIS-0 module. In Fig. 6 experimental and simulated spectra are shown for radon contamination in the inner cavity air, normalizing both spectra to the same total number of counts, after subtracting the background. The radon content required to match both spectra is 58.2 Bq/m^3 . The radon level in the laboratory has been continuously monitored along the corresponding period with an Alphaguard detector (mean value of 65 Bq/m^3).

From the comparison between simulations and measured data, it can be concluded that simulation reproduces qualitatively very well all the measurements. Concerning the quantitative estimate of the activity, some systematics have been identified for external gamma calibration data, specially at the lowest energies; they could be related with our imprecise knowledge of the sources geometry and possible misplacement of the source with respect to the Mylar window, but we cannot discard a reduced scintillation yield or bad light collection efficiency for events corresponding to interactions of very low energy X-rays in the first microns of the crystal surface, that could explain, for instance, the non-linear response observed for the iron X-rays in Fig. 5b. Comparing simulation and measurement (see Table 5) we can state that simulations agree with experimental data at the accuracy level of our knowledge of activity and other source details when using for the normalization the total number of detected counts. However, some differences in Compton vs. photopeak relative event rates have been identified in the simulations (see Table 5): this suppression of Compton vs. peak event rates in the simulation can be possibly ascribed to some “energy loss” mechanisms in the detector performance, f.i. because of inhomogeneity in the light collection efficiency, resulting in less events contributing to the peaks but the same total rate. This Compton/peak defect between experimental and simulated data has been quantified as 75% with the ^{22}Na calibration (using the 1274.5 keV gamma line intensity and the number of events in the region from 600 to 1100 keV).

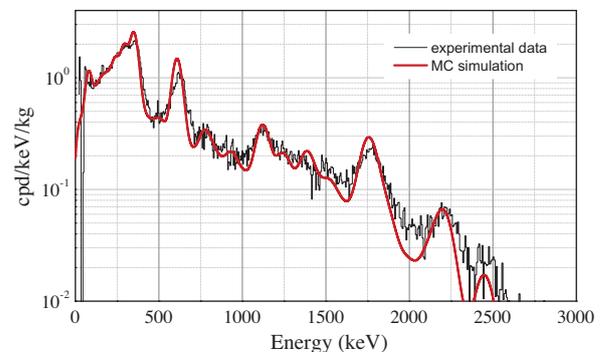


Fig. 6. Comparison of simulation (red) vs. experimental data (black) for a homogeneously distributed radon contamination in the air around the detector, inside the shielding. Simulated data have been normalized to the total number of counts observed in the experimental measurement, after subtracting the background, corresponding to a ^{222}Rn specific activity of 58.2 Bq/m^3 (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

⁴ A constant value of 0.6 has been taken as relative efficiency factor for alpha particles in the building of the electron equivalent energy spectra shown throughout this article.

Table 5

Comparison between simulated and measured data for external calibrations with gamma lines of different energies (using ^{22}Na and ^{57}Co sources) and for a radon contamination distributed in the inner volume air. Activities derived from that comparison have been obtained using the total number of counts in the spectrum (A) and using a single line (B): 1274.5 keV (^{22}Na), 122.2 keV (^{57}Co) and 609.3 keV (^{222}Rn).

	Source activity	Simulated activity	
		A	B
^{22}Na	$(1 \pm 0.1) \mu\text{Ci}$	1.08 μCi	0.95 μCi
^{57}Co	$(1 \pm 0.1) \mu\text{Ci}$	1.18 μCi	1.09 μCi
^{222}Rn	$(65 \pm 3.4) \text{Bq/m}^3$	58.2 Bq/m^3	37.2 Bq/m^3

5. Background model and comparison with the experimental results

The energy spectrum of alpha emissions identified in the data taken for a long background measurement of ANAIS-0 (set-up 2) has been compared with the corresponding simulation, assuming a bulk distribution of ^{238}U and ^{232}Th , and daughter isotopes in NaI crystal and the activity values deduced by PSA analysis and shown in Table 2. Effect of acquisition dead time on ^{214}Po emission detection efficiency and the summing of alpha and beta emissions for the ^{212}Bi -Po sequence in the charge integration window have been properly taken into account in the simulated data (see Fig. 7). Relative Scintillation Efficiency Factor for alpha particles vs. electrons has been fitted to properly match experimental data and simulation. A good agreement between simulation and measurement supports the validity of the model. From the difference between the number of events in the simulated spectrum and that in the experimental one for an energy window from 3.5 MeV to 12 MeV (17% less events in the simulation) and the consideration that efficiency for the detection of alpha events should be 100% in an ideal detector, we can conclude that our contamination levels derived from the study of the alpha emissions are probably slightly underestimated and that a surface component, implying some degradation of the energy below the nominal alpha energy value, is present. Alpha energy degraded events observed below 3.5 MeV in Fig. 7, are also possibly related with such a surface alpha contamination component, whose contribution to the beta/gamma background is considered in Section 6.

The total energy spectrum in ANAIS-0 has been simulated for the different contaminations reported in Section 3 and the different available experimental set-ups shown in Table 1. In Fig. 8a

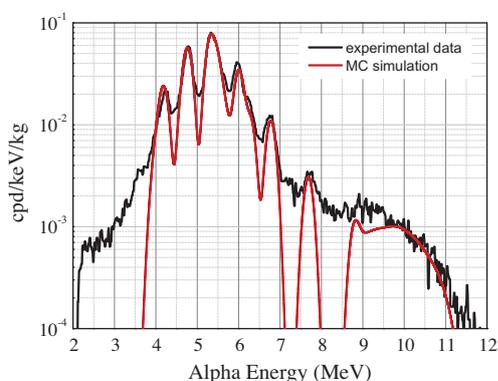


Fig. 7. Simulation of the alpha spectrum (solid red line) vs. experimental data, identified by PSA, (solid black line) for the bulk contaminations in U and Th chains shown in Table 2. The ^{212}Bi -Po coincident events, summing of the beta and alpha emissions, are also shown (in terms of alpha equivalent energy) (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

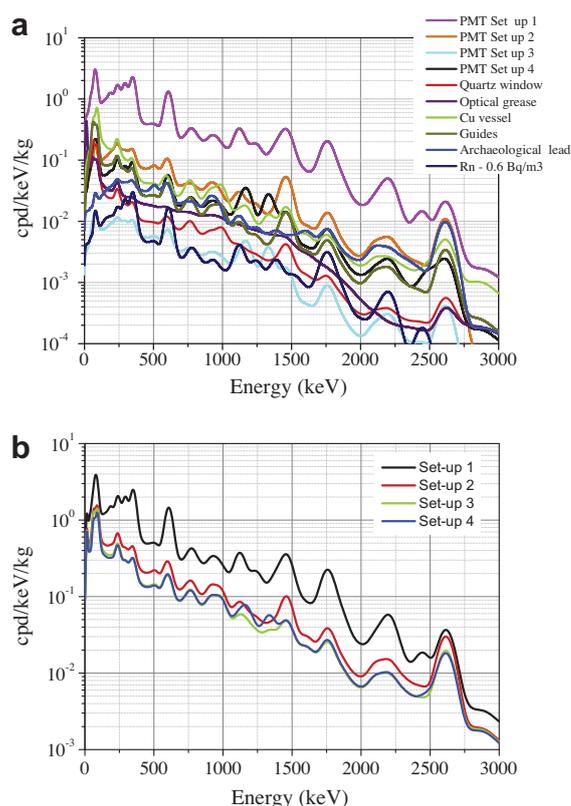


Fig. 8. Background contribution due to external radioactive contaminants in the different components used in the simulated ANAIS-0 set-ups (a). Total contribution to the background for every simulated ANAIS-0 set-up coming from contaminations in external components (b). In both cases spectra from every component and contaminant are scaled using the values shown in Tables 3 and 4, being in the latter upper limits at 95% C.L. for the corresponding contaminations (For interpretation of the references to colour in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

the contributions of the external radioactive contaminants (placed in PMTs, optical windows, light guides, optical coupling grease, copper encapsulation, inner volume air, and archaeological lead shielding) to the background are shown for the different set-ups. In Fig. 8b the total contributions to the background coming from external components are shown for every simulated set-up. It has to be noticed that for most of these contaminations only upper limits have been derived, so the contributions to the background shown in Fig. 8 should be also taken as upper limits at 95% C.L. In Fig. 9, the contributions of internal radioactive contaminants clearly dominant in the ANAIS-0 module background, are shown, together with the corresponding uncertainties at 1σ level. In this case, the same contribution is expected for all the configurations tested at LSC.

A background measurement for the ANAIS-0 set-up 4 has been compared with the addition of the simulated contribution of the different components and it is shown in Fig. 10. Below 20 keV, raw background data show an important contribution (dominant below 10 keV) of events not attributable to bulk NaI scintillation, making necessary to apply convenient filtering procedures. Different events populations appear in that low energy regime, being the most relevant: electronic noise, events originated in the PMTs (reduced but not completely suppressed by the coincidence), and anomalous fast events not compatible with NaI scintillation time constant. Efficiency of that filtering for accepting real bulk scintillation events in NaI crystal originated by beta/gamma interactions is estimated with low energy calibration data (using ^{57}Co and ^{109}Cd sources). In Fig. 10b (and all the low energy experimental spectra

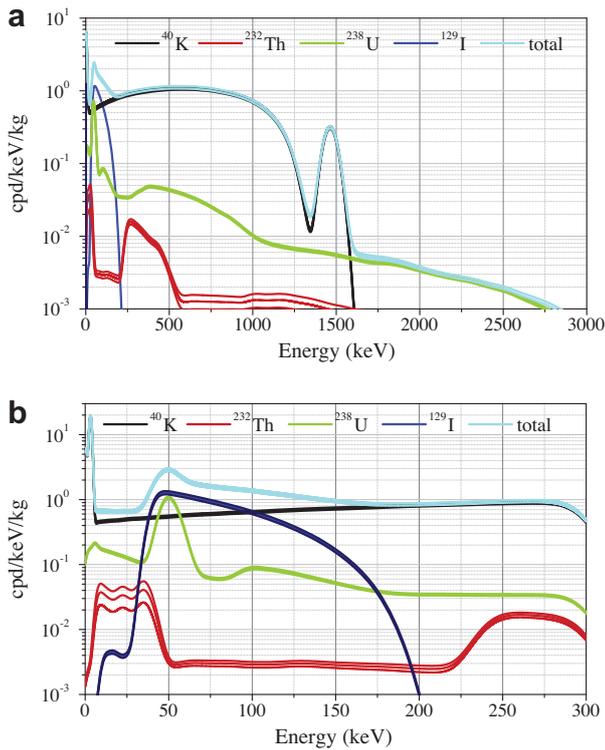


Fig. 9. Contribution to the background from internal radioactive contaminants for the ANAIS-0 crystal at high (a) and low energy (b). Uncertainties in the estimates of the contamination values used at 1 sigma level are shown in the figure (For interpretation of the references to colour in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

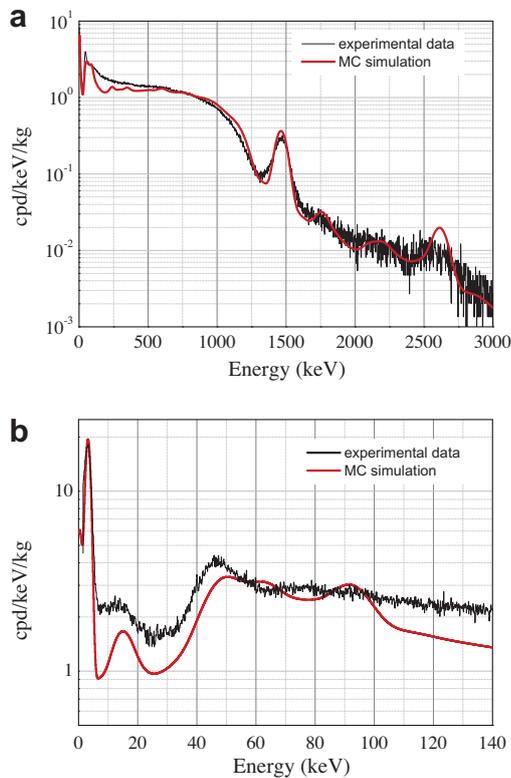


Fig. 10. Comparison between simulations and measured data at high (a) and low (b) energy for the ANAIS-0 module in set-up 4 (For interpretation of the references to colour in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

shown hereafter) only beta/gamma efficiency-corrected events are shown, except if otherwise stated.

Looking at the high energy region (see Fig. 10a), the main conclusion is that above 500 keV the measured background seems to be nicely reproduced by the simulated considered contributions, having in mind that the simulated contribution is really an upper limit; ^{40}K from the bulk NaI crystal is clearly the dominant background source from 500 to 1500 keV. However, in the low energy region, agreement between the measured data and the total simulated contributions is worse (see Fig. 10b), pointing to some non-explained background component(s). Different possibilities have been analyzed trying to better model backgrounds at low energy without compromising the good agreement at higher energies: ^{210}Pb surface contamination in the NaI crystal, ^{210}Pb surface contamination in the copper encapsulation, ^3H bulk contamination in the NaI crystal, and fast neutrons. Slight (and motivated) modifications in the assumed activities for some isotopes with respect to the upper limits given in Section 3 have been also considered as hypothesis and will be described in next section.

The total simulated contribution to the ANAIS-0 background has been evaluated and compared with the experimental data for the rest of experimental configurations available (see Fig. 11 and Table 1). Drawn conclusions are equivalent for all the available configurations, either from the high or the low energy regions of the spectra; the only relevant distinction was the presence of some cosmogenic lines below 100 keV, not included in the simulations, for the set-up 1 which was first operated, short after the handling of the detector at sea level. The signature of cosmogenic ^{125}I decaying to ^{125}Te by EC can be clearly seen in set-up 1 data; it has a half-life of 59.40 days and produces a 35.5 keV gamma (or IC electrons) plus tellurium X-rays and Auger electrons (amounting 31.8 keV for K-shell EC). Anyway, other cosmogenically produced isotopes decaying by EC to tellurium could also contribute to the 31.8 keV line. Raw data are shown in Fig. 11.

6. Other hypothetical background contributions

Some of the most realistic hypotheses analyzed, able to explain a part of the missed background events at low energy are shown in

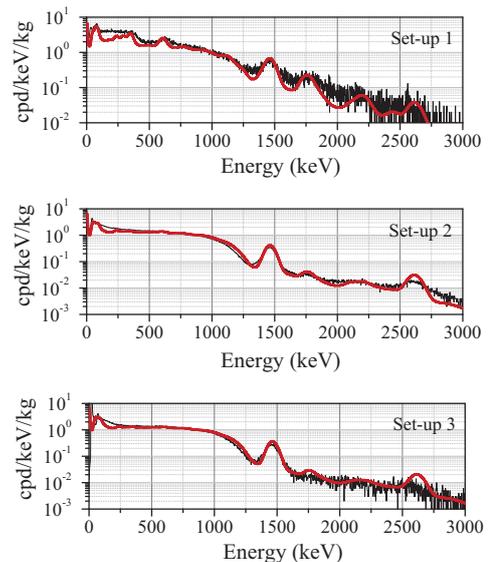


Fig. 11. Comparison of simulations (in red) and experimental data (in black) for the different ANAIS-0 set-ups. Raw data are shown for all of them (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

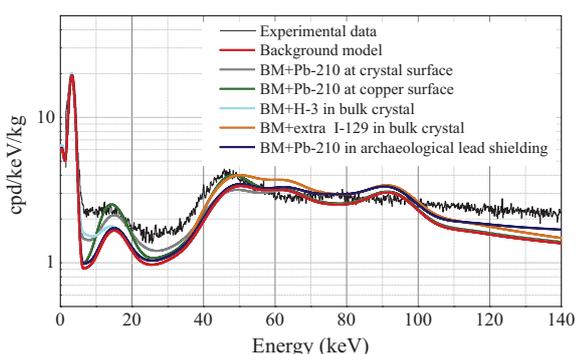


Fig. 12. Comparison between simulations and measured data at low energy for the ANAIS-0 module in set-up 4 taking into account separately different hypotheses added to the background model presented in Section 3 (see text) (For interpretation of the references to colour in this figure, the reader is referred to the web version of this article.).

Fig. 12, after adding each of them separately to the background model presented in previous section:

- 1.7 mBq of ^{210}Pb surface contamination on NaI crystal (reducing correspondingly the ^{210}Pb bulk contamination); it has been assumed a bulk contamination of ^{210}Pb in equilibrium with ^{226}Ra , and the excess of ^{210}Po alpha events as originated in the surface;
- 75 mBq of ^{210}Pb surface contamination on copper encapsulation distributed in a 1 μm layer (^{210}Pb contamination out of equilibrium is difficult to trace because of the low efficiency for detecting its gamma emissions with the HPGe spectrometer used at LSC);
- 90 $\mu\text{Bq/kg}$ of ^3H (cosmogenic origin) in the bulk NaI (upper limit derived in [21] for similar crystals from the same supplier);
- 50% extra of ^{129}I contamination in the bulk NaI;
- 1 Bq/kg extra ^{210}Pb contamination in the lead shielding (bremsstrahlung produced by electrons coming from ^{210}Bi decay could contribute to fill the missing background component above 100 keV, but this contribution is limited by the associated production of lead X-rays that easily exceeds the measured spectrum).

In Fig. 13a and b the measured background is shown at high and low energy (as black solid line) as well as the previously explained hypotheses added together to the background model presented before (shown as red solid line) together with the following modifications to that background model:

- reduction of the ^{232}Th contamination in the lead shielding from the upper limit of the measurement (see Table 4) down to 0.1 mBq/kg.
- reduction of the ^{238}U contamination from the upper limit of the measurement down to the equilibrium with ^{226}Ra contamination values in copper, quartz windows, and optical coupling grease (see Table 4).

A very remarkable agreement (except in the region above 100 keV and between 20 and 40 keV) can be observed. No fitting of the experimental data to a combination of these contributions has been attempted and we only want to stress that plausible background components at reasonable activity levels can be responsible of the observed background in the low energy region. However, these possible background sources should be taken into account in the estimates of achievable background levels for ANAIS experiment (see next section). Just as an example, we show also in

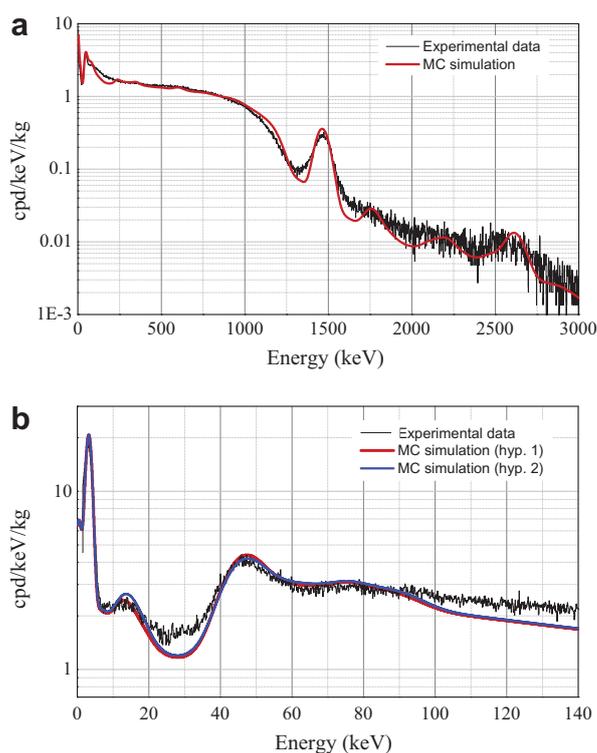


Fig. 13. Comparison between simulations and experimental data at high (a) and low energy (b) for the ANAIS-0 module in set-up 4 adding some hypotheses to the background model (see text). In black solid line, measured data are shown. In red and blue solid lines two different combinations of hypotheses about possible background contributions at low energy are shown (see text for details), both explaining quite well the measured spectrum. At high energy no difference between both hypotheses can be noticed (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

Table 6

Contribution to the background of ANAIS-0 module in set-up 4 from the different simulated set-up components: total rate derived from simulation from 150 keV to 3000 keV and corresponding percentage of the measured background. Rates and percentages shown in parentheses correspond to the simulation including extra hypotheses (see text).

Simulated component	Background contribution 150–3000 keV	
	Counts/kg/day	%
Crystal	1000.2 (1002.7)	77.5 (77.7)
Copper encapsulation	67.8 (47.5)	5.3 (3.7)
Quartz window	13.5 (6.6)	1.0 (0.5)
Optical coupling grease	21.4 (7.2)	1.7 (0.6)
Ham ULB PMT	47.2	3.7
Lead shielding	36.0 (145.0)	2.8 (11.2)
Inner volume air	9.1	0.7
Total	1195.2 (1265.3)	92.6 (98.1)

Fig. 13a as blue solid line, the spectrum resulting from all previously mentioned hypotheses, but letting the uranium out of equilibrium with radium in the optical coupling grease and reducing the ^{210}Pb contamination in the copper surface down to 50 mBq. A very similar background at low energy is obtained, pointing at the requirement of improving the sensitivity of our radiopurity assessment for that contaminants in order to identify the origin of the missing low energy background contribution.

Other possible background sources as for instance ^{227}Ac , ^{87}Rb and ^{85}Kr have been considered. No direct evidence of their presence in our data has been found and they have not been included neither in our background model nor in our shown hypotheses.

Table 7
Contribution to the background of ANAIS-0 module in set-up 4 from the different simulated set-up components: total rate derived from simulation from 5 keV to 150 keV and corresponding percentage of the measured background, total rate derived from simulation from 2 keV to 20 keV and corresponding percentage of the measured background. Rates and percentages shown in parentheses correspond to the simulation including extra hypotheses (see text).

Simulated component	Background contribution 5–150 keV		2–20 keV	
	Counts/kg/day	%	Counts/kg/day	%
Crystal	196.0 (255.0)	53.0 (68.8)	49.6 (65.0)	64.8 (84.8)
Copper encapsulation	46.1 (31.4)	12.5 (8.5)	1.4 (8.0)	1.8 (10.5)
Quartz window	15.5 (2.5)	4.2 (0.7)	1.8 (0.2)	2.4 (0.3)
Optical coupling grease	15.7 (3.3)	4.2 (0.9)	5.8 (0.9)	7.6 (1.2)
Ham ULB PMT	15.4	4.2	0.5	0.7
Lead shielding	3.2 (33.7)	0.9 (9.1)	0.3 (1.3)	0.3 (1.8)
Inner volume air	1.2	0.3	0.1	0.1
Total	293.2 (342.1)	79.3 (92.5)	59.5 (76.0)	77.7 (99.3)

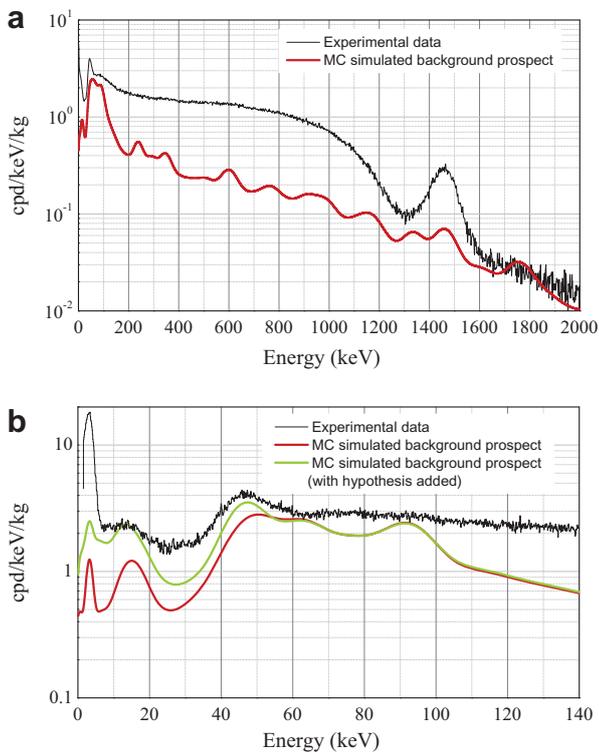


Fig. 14. Contribution to the background for a 20 ppb potassium purified NaI crystal and the same background model for the rest of the contributions to ANAIS (red solid line). In (b) the contribution to the background including the extra hypotheses, assuming no improvement in any of the contaminations is achieved, is also shown as green solid line (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

Also, the possible contribution from fast neutrons, coming in deep underground environment mainly from muon induced reactions, ^{238}U spontaneous fission and (α, n) reactions, and very relevant usually in the search for dark matter, is worth of some comment: it has been simulated for a typical flux of the order of 10^{-6} neutrons/cm 2 /s, and being negligible with respect to the rest of the contributions shown, it has not been included in the background model at the present level of sensitivity.

Possible contaminations in the Teflon reflecting foil wrapping the crystal have been studied also as complementary hypothesis, although there is no direct evidence of contamination in any of the different Teflon foils or tapes screened. Possible background contribution of surface ^{210}Pb contamination in the Teflon could produce similar effects to that included in the copper in our previ-

ously shown hypotheses; however, we find in our simulations a higher relative contribution of events below 20 keV that is more difficult to match with our low energy data.

7. Conclusions and prospects for ANAIS experiment

We summarize the simulation results in Tables 6 and 7 for the ANAIS-0 set-up 4, in the high (from 150 to 3000 keV) and low energy regions (from 5 keV to 150 keV and from 2 keV to 20 keV), respectively. Contributions of the different components to the background in counts/kg/day, as well as the explained background percentage are shown (for the background model proposed in Section 3 and in parentheses for that model adding extra hypotheses as proposed in Section 6). It is to remark that more than 92% of the background in the region from 150 to 3000 keV is explained with our proposed background model, increasing up to 98% when some hypotheses are added. More than 77% of the low energy background is also explained, increasing up to a 99% when adding the referred hypotheses.

The proposed background model for ANAIS-0 prototype is able to reproduce notably the high energy background of the experiment, for alpha as well as for beta-gamma components. At low and medium energies some non-explained background components are present. For the analysis of the dark matter annual modulation, a complete understanding of the background (aiming at its reduction) is required and much effort in this direction is ongoing.

Using the same background model presented in previous sections, an estimate of the background levels achievable for the ANAIS new detectors has been attempted (and shown as red solid line in Fig. 14) by reducing the potassium concentration in the NaI crystal down to 20 ppb level and keeping activities for all the other emissions as presented before for the ANAIS-0 prototype background model. The background estimate corresponding to the background model incorporating the hypotheses presented in Section 6 is shown as green solid line in Fig. 14b, assuming no improvement in removing any of the corresponding contaminations is achieved. However, work is also being done to improve the radiopurity of the rest of materials and components of the detectors. It can be concluded that the unexplained background components at low energy should be better understood in order to reach the objectives of ANAIS.

Acknowledgments

This work has been financially supported by the Spanish MICINN and MEC (Grants No. FPA2008-03228 and FPA2011-23749 and Consolider-Ingenio 2010 Programme under Grants MULTIDARK CSD2009-00064 and CPAN CSD2007-00042) and the Gobierno de Aragón (Group in Nuclear and Astroparticle Physics,

ARAID Foundation and C. Cuesta predoctoral grant). We acknowledge the technical support from LSC (specially I. Bandac) and GIF-NA staff.

References

- [1] J.B. Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, Pergamon Press Ltd., 1964.
- [2] P. Lecoq, A. Annenkov, A. Gektin, M. Korzhik, C. Pedrini, *Inorganic Scintillators for Detector Systems*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] K. Fushimi et al., Application of a large volume NaI scintillator to search for dark matter, *Phys. Rev. C* 47 (1993) 425; K. Fushimi et al., Limits on the annual modulation of WIMPs-nucleus scattering with large volume NaI (TI) scintillators, *Astropart. Phys.* 12 (1999) 185.
- [4] M.L. Sarsa et al., Searching for annual modulations of WIMPs with NaI scintillators, *Phys. Lett. B* 386 (1996) 458; M.L. Sarsa et al., Results of a search for annual modulation of WIMP signals, *Phys. Rev. D* 56 (1997) 1856.
- [5] R. Bernabei et al., On a further search for a yearly modulation of the rate in particle dark matter direct search, *Phys. Lett. B* 450 (1999) 448.
- [6] R. Bernabei et al., Performances of the 100 kg NaI (TI) set-up of the DAMA experiment at Gran Sasso, *Riv. Nuovo Cim. A* 112 (1999) 545.
- [7] G. Gerbier et al., Pulse shape discrimination and dark matter search with NaI (TI) scintillator, *Astropart. Phys.* 11 (1999) 287.
- [8] R. Bernabei et al., Dark matter search, *Riv. Nuovo Cim.* 26 (2003) 1.
- [9] G.J. Alner et al., Limits on WIMP cross-sections from the NAIAD experiment at the Boulby Underground Laboratory, *Phys. Lett. B* 616 (2005) 17.
- [10] K. Fushimi et al., Dark matter search by means of segmented scintillators (PICO-LON), *J. Phys.: Conf. Ser.* 203 (2010) 012046.
- [11] R. Bernabei et al., *Eur. Phys. J. C* 56 (2008) 333; R. Bernabei et al., New results from DAMA/LIBRA, *Eur. Phys. J. C* 67 (2010) 39; R. Bernabei et al., Particle dark matter signal in DAMA/LIBRA, *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, in press. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.12.078>>.
- [12] J. Cherwinka et al., A search for the dark matter annual modulation in south pole ice, *Astropart. Phys.* 35 (2012) 749–754. <arXiv:1106.1156v1[astro-ph.HE]>.
- [13] V. Kudryavtsev, M. Robinson, N.J.C. Spooner, The expected background spectrum in NaI dark matter detectors and the DAMA result, *Astropart. Phys.* 33 (2) (2010) 91–96.
- [14] R. Bernabei et al., Technical aspects and dark matter searches, *J. Phys. Conf. Ser.* 203 (2010) 012040.
- [15] E. Aprile et al., Dark matter results from 100 live days of XENON100 data, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 131302.
- [16] Z. Ahmed et al., Results from a low-energy analysis of the CDMS II germanium data, *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011) 131302; Z. Ahmed et al., Search for annual modulation in low-energy CDMS-II data. <arXiv:1203.1309v1[astro-ph.CO]>.
- [17] C.E. Aalseth et al., Results from a search for light-mass dark matter with a P-type point contact germanium detector, *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011) 131301.
- [18] G. Angloher et al., Results from 730 kg days of the CRESST-II dark matter search, *Eur. Phys. J. C* 72 (1971).
- [19] C.E. Aalseth et al., Search for an annual modulation in a P-type point contact germanium dark matter detector, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 141301.
- [20] C. Pobes et al., ANAIS status report, *J. Phys. Conf. Ser.* 203 (2010) 012044.1–012044.3.
- [21] R. Bernabei et al., The DAMA/LIBRA apparatus, *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A* 592 (2008) 297.
- [22] S.Y.F. Chu, L.P. Ekström, R.B. Firestone, WWW Table of Radioactive Isotopes, database version 2/28/1999 from URL: <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/>>
- [23] S. Cebrián et al., Performances and prospects of the ROSEBUD dark matter search experiment, *Astropart. Phys.* 10 (1999) 361.
- [24] S. Agostinelli et al., Geant4 – a simulation toolkit, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 506 (2003) 250–303; J. Allison et al., Geant4 developments and applications, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53 (2006) 270–278.
- [25] F. Bellini et al., Monte Carlo evaluation of the external gamma, neutron and muon induced background sources in the CUORE experiment, *Astropart. Phys.* 33 (2010) 169–174.
- [26] H.M. Araujo et al., Radioactivity backgrounds in ZEPLIN-III, *Astropart. Phys.* 35 (2012) 495–502.
- [27] E. Aprile et al., Study of the electromagnetic background in the XENON100 experiment, *Phys. Rev. D* 83 (2011) 082001.
- [28] V. Tomasello, M. Robinson, V.A. Kudryavtsev, Radioactive background in a cryogenic dark matter experiment, *Astropart. Phys.* 34 (2010) 70–79.
- [29] K. Siegbahn, Alpha, Beta, and Gamma-ray Spectroscopy, North-Holland, 1968.

REFERENCIAS

- [1] S.Cebrián, C. Cuesta, J.Amaré, S.Borjabad,D. Fortuño, E.García, C.Ginestra, H.Gómez, M.Martínez, M.A.Oliván,Y.Ortigoza, A.Ortiz de Solórzano, C.Pobes, J.Puimedón, M.L.Sarsa, J.A.Villar..“*Background model for a NaI (TI) detector devoted to dark matter searches*”*Astroparticle Physics* 37 (2012) 60-69
- [2] N.Jarosik, C.L. Bennett, J.Dunkey, B.Gold, M.R.Gtreason, M.Halpern, R.S. Hill, G. Hinshaw, A.Kogut, E.Komatsu, D.Larson, M.Limon, S.S. Meyer, M.R. Nolta, N.Odegard, L. Page, K.M. Smith, D.N.Spergel, G.S.Tucker, J.L.Weiland, E. Wollack, E.L. Wright.. “*Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results*” *Applied Journal Physics* (2011) Feb. Vol 192
- [3] <http://gifna.unizar.es/anais/>
- [4] www.lsc-canfranc.es/
- [5] Candy, B. “*Photomultiplier Characteristics and Practice Relevant to Photon Counting*” *Review Science Instrument* 56, 183 (1985)
- [6] www.et-enterprises.com/
- [7] www.hamamatsu.com/
- [8] http://www.cadence.com/products/orcad/pspice_simulation/Pages/default.aspx
- [9] C. Pobes. “*Optimización de la respuesta de un sistema multidetector de cristales de centelleo para un experimento de materia oscura (ANAIS)*.” PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2006.
- [10] G.Knoll. “*Radiation detection and measurement*”.4th Edition 2011. Ed.John Wiley and Sons Inc.
- [11] “*Standard NIM instrumentation system,*” Technical report, DOE/ER-0457T, 1990 .May 01.
- [12] W.R.Leo,“*Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*”.Ed.Springer-Verlag
- [13] Lloyd A. Currie. “*Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination: Application to Radiochemistry*”, *Analytical Chemistry* 40, 586-593 (1968).