

Sistema de adquisición de datos para un experimento de detección directa de materia oscura (AN AIS)

por

Miguel Ángel Oliván Monge

Trabajo fin de Máster Dirigido por: Enrique F. Torres Moreno

Máster en Ingeniería de Sistemas e Informática 2011/2012

Posgrado en Ingeniería Informática

Universidad de Zaragoza

Junio, 2012

© Miguel Ángel Oliván Monge 2012

Resumen

En el presente trabajo se describe el diseño, la implementación, los tests y la puesta en marcha del sistema de adquisición de datos del experimento ANAIS.

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

El objeto del trabajo aquí presentado es el diseño, implementación y validación de un sistema capaz de tratar, digitalizar, transmitir y almacenar los datos del experimento e implementar un análisis preliminar de dichos datos. En este documento se repasan todos los aspectos a tener en cuenta en el diseño del sistema de adquisición de datos: tratamiento analógico y digital de la señal, los elementos de hardware y software necesarios, el almacenamiento y análisis de datos, la monitorización del sistema y el envío de estadísticas. Se describen también los requisitos que se deben cumplir en cada uno de estos elementos, haciendo hincapié en la caracterización y reducción del tiempo muerto introducido. Posteriormente se describe la implementación de los sistemas hardware y software.

Se detallan también las pruebas realizadas para verificar que se cumplen los requisitos, los esfuerzos para caracterizar y mejorar el sistema, los problemas encontrados y el modo en el que se resolvieron. En particular se detallan las estrategias usadas en el software de adquisición para reducir el tiempo muerto y las medidas realizadas para caracterizar el sistema en función de configuraciones distintas. También se describen las tareas de búsqueda de latencias inesperadas en la atención de las interrupciones por parte del kernel de Linux y se detallan las configuraciones elegidas tanto de hardware como de software, las razones de su elección, en particular la opción de adquirir los datos mediante interrupciones y no hacerlo con encuesta activa.

Finalmente se describe 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, a la espera de la llegada de nuevos detectores.

Índice general

Resumen	I
Índice general	III
Índice de figuras	VII

I Memoria	1
1. El experimento ANAIS	3
1.1. Introducción	3
1.2. Proyecto	3
1.2.1. Motivación	3
1.2.2. Equipo humano	4
1.2.3. Papel del autor en el experimento	5
1.2.4. Cronología	5
1.3. Infraestructura	6
1.3.1. Laboratorio subterráneo de Canfranc	6
1.3.2. Cristales detectores	7
1.3.3. Fotomultiplicadores	7
1.3.4. Blindaje de plomo	8
1.3.5. Caja anti-radón	9
1.3.6. Vetos	9
1.3.7. Cadena electrónica y sistema de adquisición	10
1.3.8. Caseta	10
2. Requisitos y validación del sistema	11
2.1. Requisitos principales de la cadena electrónica	11
2.2. Requisitos principales del software	12
2.3. Validación	13
2.4. Condiciones y entornos de prueba	14
2.5. Montaje de pruebas en la Universidad de Zaragoza	14
2.5.1. Pruebas funcionales	15
2.5.2. Medidas de tiempo muerto	16
2.5.3. Origen del retardo en la espera a la IRQ	16
2.6. Pruebas con el prototipo en el LSC	17
2.6.1. Verificaciones funcionales y de estabilidad	17

3. Conclusiones y trabajos futuros	19
3.1. Conclusiones	19
3.2. Trabajos futuros	19
3.2.1. <i>Slow Control</i>	19
3.2.2. Análisis de datos	20
3.2.3. Parche tiempo real	20
3.2.4. Ruido electrónico	20
Bibliografía	21
 II Apéndices	 25
A. Cadena electrónica	27
A.1. Tratamiento de señal de centelleo	27
A.1.1. Descripción de la señal	27
A.1.2. Detección de eventos	30
A.1.3. Tratamiento analógico de la señal	30
A.1.4. Digitalización de la señal	31
A.1.5. Otros parámetros digitalizables de la señal	32
A.2. Otros datos a adquirir	32
A.2.1. Ritmo de interacciones, tiempo real y tiempo muerto	32
A.2.2. Parámetros ambientales y monitorización de sistemas	33
A.3. Requisitos de la cadena electrónica	33
A.4. Elecciones de diseño	35
A.4.1. Bus VME y electrónica NIM	36
A.4.2. Discriminadores y módulos AND	36
A.4.3. Tarjeta digitalizadora de señal (<i>Matacq</i>)	37
A.4.4. Tarjeta digitalizadora de carga (<i>QDC</i>)	38
A.4.5. Tarjeta de almacenamiento de patrón de coincidencia (<i>Pattern Unit</i>)	38
A.4.6. Contador y contador latched	38
A.5. Descripción de módulos	38
A.6. Descripción Funcional	40
A.6.1. Esquema de contadores	43
A.7. Pruebas de validación y comparativas	45
A.7.1. Tests discriminadores: Umbral y fracción constante	45
A.7.2. Digitalizadora (<i>Matacq</i>)	45
A.7.3. Integradores de carga (<i>QDC</i>)	45
A.7.4. Retardos analógicos, retardos digitales y digitalizadores de tiempo (<i>TDC</i>)	46
A.8. Problemas encontrados	46
A.8.1. Generación de ruido eléctrico	46
A.8.2. Módulo OR	47
A.8.3. Integradores de carga (<i>QDC</i>)	47
A.8.4. Entradas y salidas del controlador del Bus VME	47
A.8.5. Enmascarar interrupciones con el <i>I/O Register V977</i>	48

B. Software de ANAIS	49
B.1. Software de adquisición de datos	49
B.1.1. Requisitos del Software de adquisición de datos	50
B.1.2. Componentes del software de adquisición	51
B.1.3. Diseño del programa de adquisición	54
B.2. Otro software	56
B.2.1. Software de Análisis de datos	56
B.2.2. Software de monitorización(<i>slow control</i>)	58
B.2.3. Software de análisis de ruido eléctrico	58
C. Pruebas de conjunto	61
C.1. Objetivos	61
C.2. Condiciones y entornos de prueba	61
C.3. Montaje de pruebas en la Universidad e Zaragoza	62
C.3.1. Pruebas funcionales	62
C.3.2. Medidas de tiempo muerto	64
C.3.3. Origen del retardo en la espera a la IRQ	69
C.4. Pruebas con el prototipo en el LSC	72
C.4.1. Verificaciones funcionales y de estabilidad	73
D. Glosario	75

Índice de figuras

1.1. Modulación anual en la detección de materia oscura	4
1.2. Infraestructura de ANAIS	6
1.3. Cristal y fotomultiplicador	8
1.4. Detector y blindaje de plomo	9
1.5. Caseta, caja anti-radón y blindaje	10
2.1. Calibraciones del prototipoIII en Zaragoza	15
2.2. Información enviada automáticamente por el sistema de adquisición	18
A.1. Ejemplo de centelleo	28
A.2. Centelleo (baja energía)	28
A.3. Centelleo en coincidencia	29
A.4. Composición de los tiempos muertos de un evento	33
A.5. Chasis NIM y Chasis VME en un rack	36
A.6. Esquema de la cadena electrónica de cada detector	41
A.7. Esquema de la cadena electrónica global	43
A.8. Esquema de contadores	44
B.1. Componentes software de adquisición	52
B.2. Diseño del software de adquisición	54
B.3. Visualización de parámetros de análisis de pulsos	57
B.4. Espectro de ruido obtenido con el software de análisis de ruido eléctrico	59
C.1. Calibraciones del prototipoIII en Zaragoza	63
C.2. Medidas de tiempo muerto en distintas configuraciones	65
C.3. Frecuencias de adquisición con distintas configuraciones en función de la frecuencia a la que llegan las señales	66
C.4. Ruido provocado por la encuesta al bus VME	68
C.5. Distribución de RMS de la línea base: interrupción y encuesta . . .	69
C.6. Esquemas temporales de la adquisición: IRQ Digitalizadora y IRQ <i>I/O Register</i>	71
C.7. Información enviada automáticamente por el sistema de adquisición	73

Parte I

Memoria

Capítulo 1

El experimento ANAIS

En este capítulo se presentará el experimento ANAIS, su motivación, su equipo de trabajo y su infraestructura situada en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC).

1.1. Introducción

ANAIS (*Annual modulation with NaI Scintillators*)[1] es un experimento de detección directa de materia oscura. Su objetivo es medir la diferencia estacional en el ritmo de detección de partículas en función de la energía de acuerdo con los modelos propuestos, tanto de materia oscura (WIMPs, *Weakly Interacting Massive Particles*, partículas masivas de interacción débil) como de su distribución en las galaxias.

Para tratar de detectar directamente esas interacciones de materia oscura ANAIS usa cristales centelleadores de yoduro de sodio (NaI). Estos centelleadores producen luz en la interacción con diversos tipos de partículas como rayos alfa, beta, gamma, muones y en general cualquier fuente radioactiva. La luz generada se detecta con unos dispositivos llamados fotomultiplicadores que la convierten en señal eléctrica que posteriormente será procesada, digitalizada y almacenada por el sistema de adquisición de datos. Esos datos serán analizados para obtener, entre otras cosas, el ritmo de interacciones en las zonas de energía esperadas y su dependencia con el tiempo.

1.2. Proyecto

El experimento se integra en el marco del proyecto “Detección directa de materia oscura en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc: experimentos ANAIS y ROSEBUD”, financiado por los ministerios españoles MICINN y MEC (Proyectos FPA2008-03228 y FPA2011-23749, Consolider-Ingenio 2010 (MULTIDARK CSD2009-00064 y CPAN CSD2007-00042)) y por el Gobierno de Aragón (Grupo de Investigación en Física Nuclear y Astropartículas).

1.2.1. Motivación

En el marco del modelo cosmológico estándar existen numerosas evidencias de que aproximadamente el 23 % de la materia del Universo es materia oscura[2]. Esta materia no debe emitir luz y debe interaccionar solamente mediante gravitación e interacción débil. Una de las pruebas más sólidas de la existencia de la materia oscura aparece, por ejemplo, en las curvas de rotación de las galaxias [3]. Para

explicar su velocidad de rotación es necesario suponer la existencia de halos de materia oscura alrededor de dichas galaxias.

Por otro lado existen modelos teóricos que predicen cómo pueden ser los WIMPs, qué energía deben depositar y qué ritmo de interacciones es el esperado en función de la velocidad relativa entre los WIMPs y el detector y otros parámetros como la masa del WIMP o la forma y densidad del halo[4].

Como consecuencia de dichos modelos se predice que la Tierra en las distintas fases de su movimiento anual, y debido a la diferencia de velocidades relativas con los WIMPs, debe encontrarse con un ritmo distinto de detección de materia oscura a lo largo del año y tener periodicidad anual. En la Figura 1.1 se ilustra el fundamento de la modulación anual esperada según los modelos más sencillos de distribución de WIMPs.

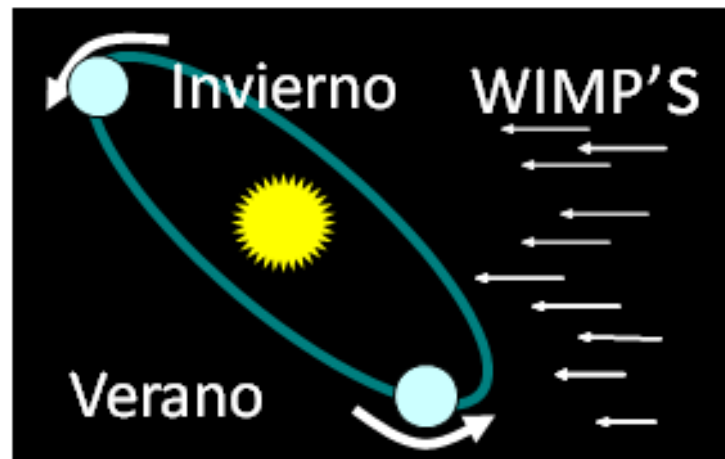


Figura 1.1: Modulación anual prevista en el ritmo de detección de materia oscura (WIMPs)

El experimento ANAIS se enmarca dentro de una serie de experimentos que se están realizando en todo el mundo para tratar de detectar la materia oscura de un modo directo[5], como CDMS [6], CoGeNT[7], CRESST[8] o DAMA/LIBRA. En particular se trata de confirmar o desmentir el resultado positivo de modulación anual del experimento DAMA/LIBRA[9] que usando detectores del mismo tipo que ANAIS apunta la aparición de la modulación tras medir trece ciclos anuales, algo que ningún otro experimento, incluso con mayor sensibilidad, ha hecho.

1.2.2. Equipo humano

El experimento ANAIS fue concebido, diseñado y está siendo desarrollado y operado únicamente por personal de la Universidad de Zaragoza. En el momento de

la escritura de este trabajo fin de máster, la lista de los miembros de la colaboración ANAIS es: J. Amaré, S. Cebrián, C. Cuesta (Doctoranda), E. García, C. Ginestra (Doctorando), M. Martínez, **M.Á. Oliván (Técnico)**, Y. Ortigoza, A. Ortiz de Solórzano (Técnico), C. Pobes (en este momento “winterover” en ICECUBE), J. Puimedón, M.L. Sarsa, J.A. Villar (Portavoz).

1.2.3. Papel del autor en el experimento

El autor de este trabajo fin de máster está contratado como técnico responsable del diseño, montaje, puesta en marcha y operación del sistema de adquisición de ANAIS. Este puesto está co-financiado por el CPAN (Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear). La contribución del autor a lo aquí expuesto ha sido desarrollada a lo largo de dos años, simultaneándola con labores de diseño, implementación y optimización del software de análisis de datos para ANAIS, de diseño e implantación de un clúster de computación científica, instalación y mantenimiento de servidores de control de fuentes (**subversion**) y apoyo al desarrollo y ejecución de software de todo el grupo de investigación (GIFNA, Grupo de Investigación en Física Nuclear y Astropartículas)

El trabajo que aquí se presenta es fruto de un esfuerzo en equipo de muchos años. Las aportaciones más importantes del autor son: colaboración en el diseño de la cadena electrónica, pruebas del diseño conceptual, corrección, ajustes y mejoras en dicha cadena, especialmente en lo que respecta al diseño de contadores de tiempo, medidas de tiempo real y tiempo vivo, rediseño y reescritura completa del software de adquisición y del esquema de datos de salida, rediseño, ayuda a la reescritura del software de análisis, pruebas unitarias y de conjunto de todo el sistema y optimización de las diversas fases de la adquisición con exploración en el driver y en el kernel de Linux para reducir tiempo muerto. El trabajo hubiese sido imposible sin la inmersión en este mundo gracias a Carlos Pobes, sin sus conocimientos, experiencia y apoyo. Por otro lado también sería imposible sin los trabajos anteriores suyos y de María Martínez y sin el apoyo constante de Clara Cuesta, Alfonso Ortiz, David Fortuño, María Luisa Sarsa y José Ángel Villar.

1.2.4. Cronología

ANAIS lleva desde 1998 haciendo medidas con distintos prototipos con objeto de encontrar las condiciones experimentales idóneas para el experimento final. Se han testeado hasta cuatro prototipos distintos con distintas variantes hasta encontrar las características que deben cumplir los cristales que formarán parte de ANAIS. Se espera para este año la llegada de dos cristales de alta pureza desarrollados en Estados Unidos *ex-profeso* para el experimento. En cuanto se disponga de ellos se caracterizará su contaminación interna y, si es igual o inferior a lo esperado, se convertirán en los dos primeros cristales del experimento ANAIS y se procederá a solicitar dieciocho más.

El objetivo global es tomar datos de, al menos, cinco años para poder observar la modulación anual de, al menos, cinco ciclos. El sistema de adquisición se debe

ir adaptando a este crecimiento gradual de detectores sin presentar problemas de funcionamiento ni rendimiento.

1.3. Infraestructura

En esta sección se describen los elementos que componen el experimento para poder dar una idea general de su funcionamiento. Debido al bajo ritmo de interacción esperado de los WIMPs y a que se espera que depositen poca energía es necesario trabajar en un entorno de máxima radiopureza: en subterráneo, fabricando todos los componentes con materiales de muy baja radioactividad y apantallando las posibles contaminaciones externas con blindajes adecuados.

En la Figura 1.2 se puede ver esta infraestructura, desde los cristales 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 junto al sistema de adquisición de datos.

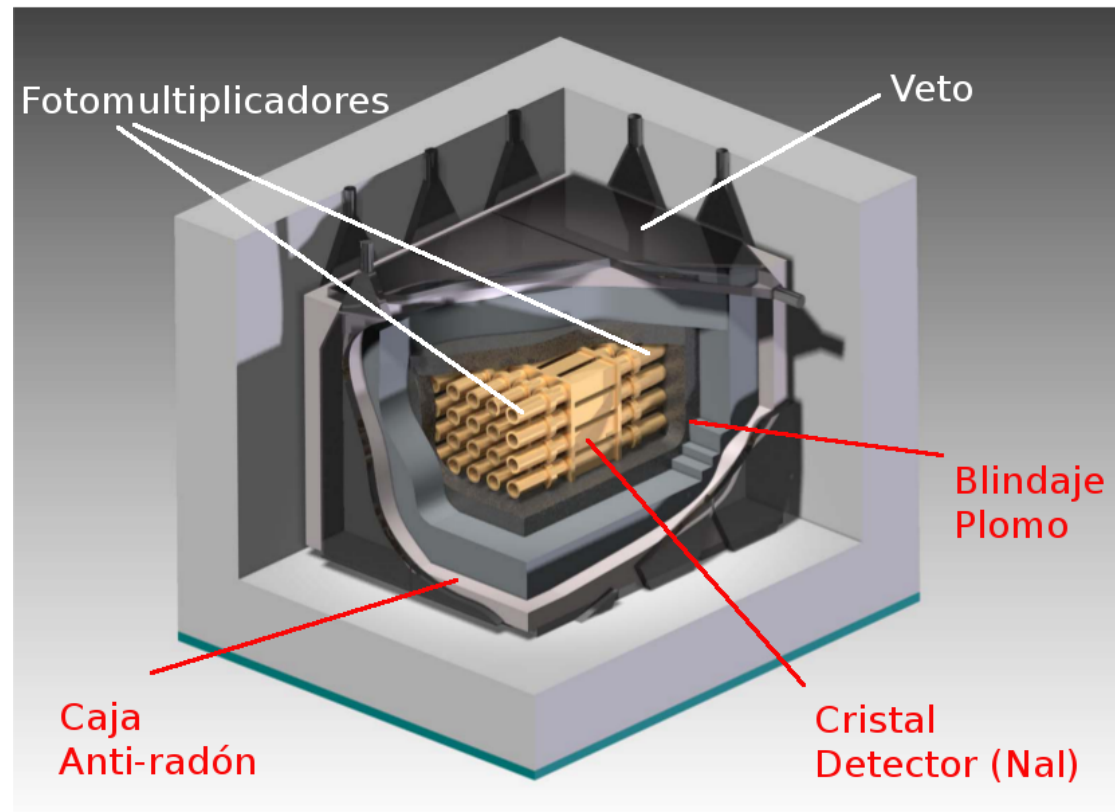


Figura 1.2: Infraestructura física del experimento ANAIS.

1.3.1. Laboratorio subterráneo de Canfranc

El experimento está ubicado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc para poder aislarse de los rayos cósmicos. Así, bajo 850 metros de roca, el flujo de

muones es muy inferior en el interior del laboratorio, situado debajo del pico Tobazo que hace de blindaje. En el interior del laboratorio se tiene un flujo de muones que es hasta cinco ordenes de magnitud menor que en la superficie.

La especial ubicación del experimento condiciona el desarrollo y las pruebas del sistema completo. En particular, exige que la mayor parte de las pruebas unitarias puedan hacerse por separado dado que sólo en Canfranc se tiene todo el montaje con todos los elementos y en las condiciones finales. Por ese mismo motivo ANAIS requiere unas pruebas de conjunto concienzudas y que el sistema sea fácilmente monitorizable y en lo posible manipulable vía Internet.

1.3.2. Cristales detectores

El elemento fundamental del experimento son los cristales detectores. Son cristales centelleadores que convierten la energía depositada por la radiación ionizante en luz, generando una cantidad de luz proporcional a la energía que 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. En prototipos previos se ha podido determinar las contaminaciones de los cristales usados y los isótopos radioactivos más molestos. El requisito que deben cumplir los detectores es poseer menos de 20 ppb (partes por billón anglosajón) de potasio, cuyo isótopo, ^{40}K , es especialmente perjudicial para el experimento porque tiene una línea de desintegración en la zona de interés. En la actualidad se está midiendo con un prototipo del que se ha caracterizado las contaminaciones y se ha determinado que no es apropiado para los propósitos de la detección de materia oscura. 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, poner a punto la electrónica y sistema de adquisición de datos, etc. En 2012 se espera recibir dos cristales ultrapuros de los que se determinará del mismo modo sus niveles de contaminación. Si estos niveles son adecuados se procederá a montar el experimento completo con veinte cristales del mismo fabricante.

1.3.3. 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 V 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 1.3 se puede observar como una interacción en un cristal genera luz y esta luz es detectada por el fotomultiplicador.

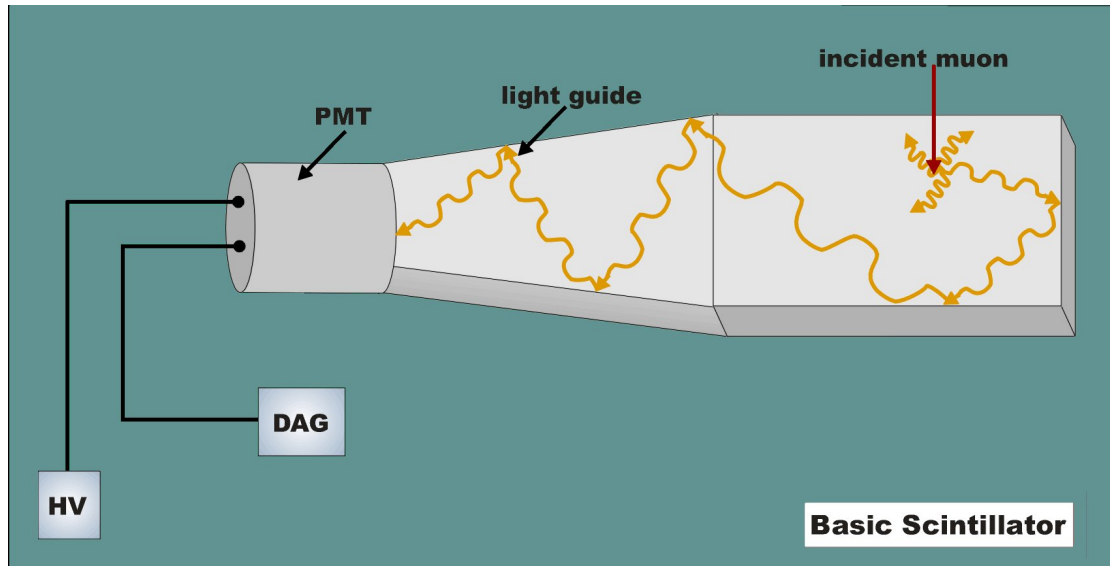


Figura 1.3: Interacción de una partícula en un cristal que provoca un centelleo, detectado por un fotomultiplicador y convertido en señal eléctrica. *PMT* es el fotomultiplicador, *HV* el alto voltaje necesario para el fotomultiplicador, *DAG* es la señal e *incident muon* es una partícula que provoca un centelleo, una emisión de luz.

1.3.4. 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 más internos son plomo arqueológico de baja actividad.

En la figura 1.4 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.

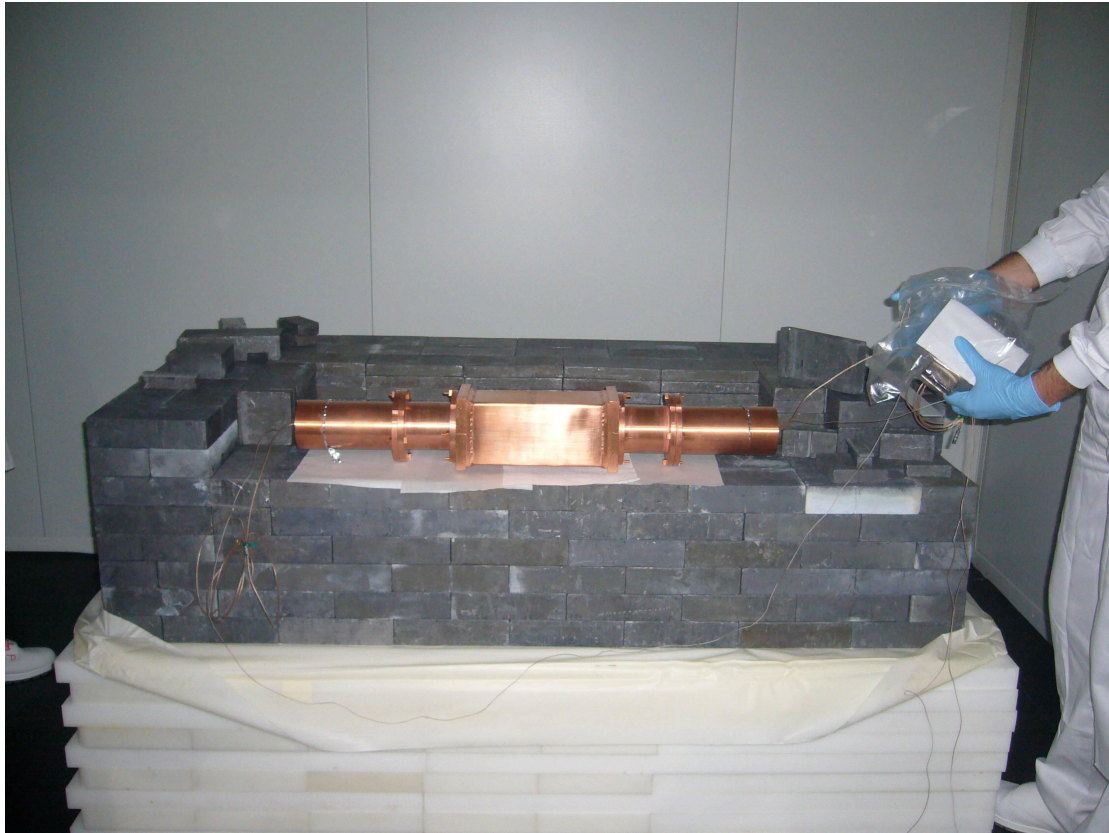


Figura 1.4: Progreso de montaje del blindaje del Prototipo IV. Sobre el plomo se ve el detector con su carcasa de cobre. En el centro el cristal con forma paralelepípedica y en los extremos los fotomultiplicadores en sus carcasas de forma cilíndrica.

1.3.5. 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.

1.3.6. Vetos

Son detectores de plástico centelleador 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.

1.3.7. Cadena electrónica y sistema de adquisición

A partir de la señal de salida de los fotomultiplicadores comienza la cadena electrónica encargada de la detección de eventos y del tratamiento y digitalización de dicha señal. Posteriormente el sistema de adquisición se encarga de leer y almacenar los datos y de monitorizar el buen funcionamiento del sistema. Es en este sistema en el que se centrará el presente trabajo. En el Anexo A Cadena electrónica, página 27, se repasarán los requisitos que debe cumplir la cadena electrónica y describirá la implementación del sistema hardware. En el Anexo B Software de ANAIS, página 49, se verá el sistema software y en el Anexo C Pruebas de conjunto, página 61, los tests realizados a todo el conjunto.

1.3.8. Caseta

Todos los elementos descritos con anterioridad salvo el sistema de adquisición se encuentran en una caseta sin ventanas con una puerta de acceso que normalmente está cerrada. Así se aísla el experimento del resto del laboratorio y sólo se rompe este aislamiento para el proceso rutinario de calibración y tareas de mantenimiento. En la figura 1.5 se puede ver el interior de la caseta, con la caja anti-radón, los vetos encima de ella y el blindaje de plomo en su interior.

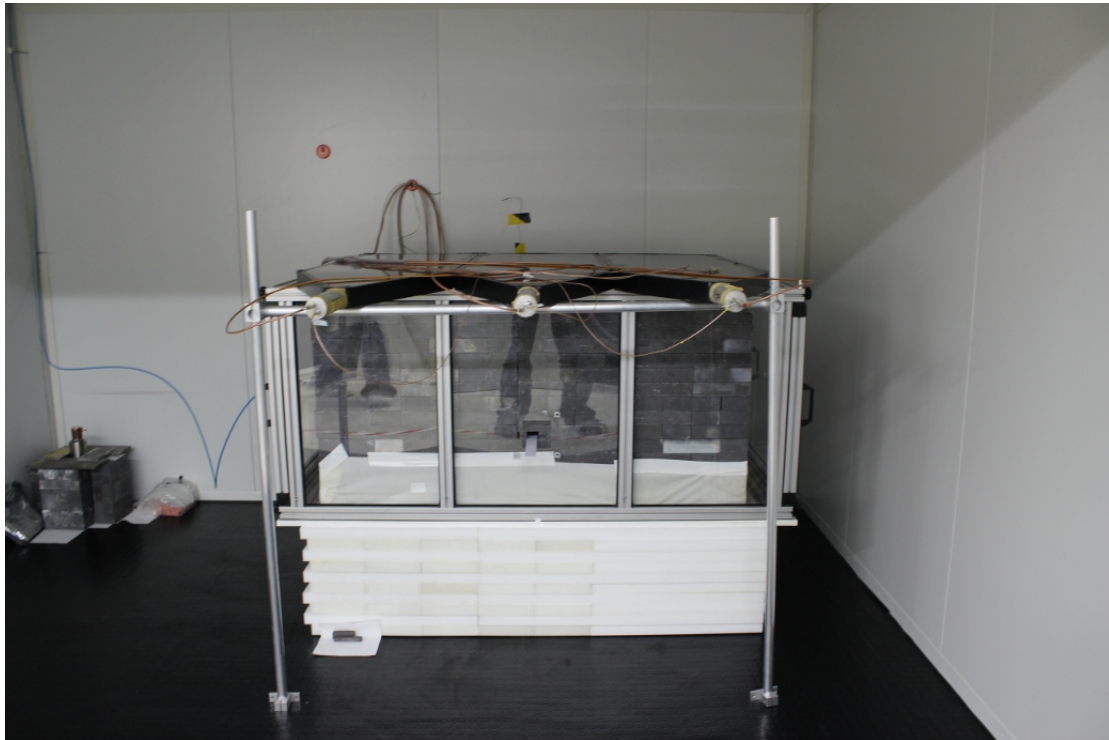


Figura 1.5: Caseta en la que está el detector. Se puede ver en su interior el blindaje de plomo dentro de la caja anti-radón, encima de la cual están los vetos.

Capítulo 2

Requisitos y validación del sistema

En el presente capítulo se hace un breve repaso a los requisitos de la cadena electrónica y del software. También se da un vistazo a la validación del conjunto. En el Anexo A Cadena electrónica, página 27, se ve con más detalle la cadena electrónica, sus requisitos, su implementación y algunas comparativas entre módulos. En el Anexo B Software de ANAIS, página 49, se detallan los requisitos del software y su implementación. En el Anexo C Pruebas de conjunto, página 61, se ven todos los test realizados, los datos resultantes de ellos, la caracterización del sistema y la elección de las mejores configuraciones.

2.1. Requisitos principales de la cadena electrónica

La cadena electrónica del sistema de adquisición del experimento ANAIS la componen todos los elementos analógicos y digitales para el proceso y digitalización de la señal de los fotomultiplicadores. Dicha cadena electrónica 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. En el Anexo A Cadena electrónica, página 27, se ven tanto los requisitos como la implementación con más detalle.

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. También es un requisito del experimento guardar información de qué cristal o cristales han sido los causantes del disparo del evento.

Resolución temporal del orden de nanosegundos: Dado que la señal elemental es la de los fotones individuales detectados por el fotomultiplicador, también llamados fotoelectrones. Dicha señal es del orden de la decena de nanosegundos es necesaria una frecuencia de muestreo muy alta, del orden de las gigamuestras 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.

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 (ver definiciones en A.2.1 Ritmo de interacciones, tiempo real y tiempo muerto, página 32). 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.

Otros requisitos: Ventana de digitalización de $1\mu s$, precisión suficiente en los valores de digitalización, máximo rango dinámico-energético, validez y correlación de datos, estabilidad temporal y contención del coste económico respetando todos los requisitos anteriores.

2.2. Requisitos principales del software

En este apartado se repasan los distintos requisitos que debe cumplir el software, entre los que destacan la funcionalidad básica de transmitir y almacenar los datos y el tener caracterizado y en lo posible minimizado el tiempo muerto. En el Anexo B Software de ANAIS, página 49 se repasan estos requisitos con más detalle, se describe todo el software y el diseño y la implementación del software desarrollado.

Adquisición y almacenamiento datos: Como función principal el software debe encargarse de recibir la información de la llegada de un nuevo evento, transmitir los datos de los módulos que han digitalizado y almacenar esos datos para su posterior análisis. Debe por tanto preguntar o esperar a recibir la información de evento nuevo, comprobar que cada tarjeta está preparada para ser leída, leer los datos y rearmar cada una de las tarjetas que lo requiera. También, según el esquema que se puede ver en A.6 Descripción Funcional, página 40, debe volver a poner activa a la cadena electrónica.

Minimizar el tiempo muerto introducido por el software: El tiempo muerto introducido por el software debe ser pequeño frente al tiempo muerto introducido por el hardware y la transmisión de datos.

Modo Calibración: El programa debe calibrar el detector, es decir, debe adquirir datos provenientes de fuentes radioactivas que se colocan en las proximidades del detector. Esas fuentes emiten radiación en energías conocidas y el sistema debe poder guardar la información de calibración. De este modo, cuando el sistema adquiera los datos sin presencia de fuente (datos de radiación de fondo) se puede

establecer la correspondencia entre digitalización y energía depositada. Existen pues dos modos de funcionamiento:

- **Calibración:** En este modo se supone que hay una fuente radioactiva, por lo tanto no se digitaliza la señal y solo se toman datos de las integradoras de carga (QDC). Además se genera un histograma con los valores de QDC que es directamente el espectro de energía de la fuente de calibración. En ella se observan picos que corresponden a las diversas emisiones de la fuente. Las fuente por lo general tienen una alta actividad y por ello se obtienen muchos datos en muy poco tiempo. Por lo tanto en este modo la frecuencia de adquisición es alta, dependiendo de la fuente, pero puede llevar a saturar el ritmo de adquisición con el tiempo muerto, que sin digitalización es de unos 2,5 KHz.
- **Fondo:** En este modo sí interesa digitalizar porque interesa caracterizar al máximo y con todos los detalles las interacciones producidas en el cristal. En este caso y en condiciones de laboratorio subterráneo, la frecuencia de adquisición no debería ser superior al Hercio.

Monitorizabilidad: ANAIS es un experimento diseñado para estar años tomando datos en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Por lo tanto el acceso físico al montaje no es fácil ni inmediato. Por este motivo es muy importante que el sistema pueda dar la información necesaria para evaluar su funcionamiento correcto e informar automáticamente a través de Internet de posibles problemas que requieran de intervención humana.

Estabilidad: En un experimento sin supervisión humana constante es importante que el sistema sea lo suficientemente robusto como para funcionar de un modo desatendido, máxime teniendo en cuenta los datos que podrían perderse por un fallo software.

Escalabilidad: El comportamiento de todo el sistema debe escalar adecuadamente conforme el sistema vaya creciendo en número de detectores y de módulos. Es importante detectar bugs de rendimiento y hacer en lo posible tests de escalabilidad.

Otros requisitos: Formato de salida fácilmente visualizable, configurabilidad, modo calibración y robustez en el almacenamiento de los datos.

2.3. Validación

En este apartado se da un vistazo a las pruebas y caracterización del sistema que se realizaron para su validación. En el Anexo C Pruebas de conjunto, página 61, se describen con mucho más detalle.

Los objetivos de las pruebas de validación son corroborar que se cumplen los requisitos de diseño, encontrar de configuración y caracterizar el sistema. A continuación se describen las distintas condiciones en las que se se pueden hacer test a un sistema como éste y posteriormente se describirán brevemente las pruebas realizadas y las conclusiones de dichas pruebas.

2.4. Condiciones y entornos de prueba

El sistema de adquisición debe estar diseñado para las condiciones que se va a encontrar un laboratorio subterráneo y con blindajes adecuados. Pero las pruebas en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc son siempre más complicadas por dificultad de acceso, posible falta de materiales (cables, conectores, etc.) y por no estar todo el equipo humano y equipamiento electrónico de que se dispone en la Universidad de Zaragoza. Por eso se planteó hacer la mayor parte de las pruebas posibles en superficie, en laboratorios de la Facultad de Ciencias. A continuación se repasan las diferencias entre uno y otro entorno y el tipo de pruebas que se pueden hacer en cada uno de ellos.

Condiciones en superficie y sin blindaje En superficie y sin blindaje se está expuesto a toda la radioactividad natural, desde los rayos cósmicos y sus productos hasta los isótopos radioactivos naturales que nos rodean (radiación de fondo). En superficie y sin blindaje la radiación de fondo es demasiado intensa para los propósitos de ANAIS, dando unas frecuencias de adquisición muy altas incluso subiendo las energías de corte. No obstante este fondo es un buen test para verificar que el sistema funciona. Adicionalmente, en superficie también se puede calibrar el sistema con fuentes radioactivas de energías conocidas.

Condiciones en subterráneo y con blindaje En estas condiciones el ritmo de la radiación de fondo debe ser mucho menor y por lo tanto el ritmo de la adquisición de fondo debe serlo también, permitiendo teóricamente bajar el umbral ya que hasta el detector sólo llega la radiación que atraviesa la montaña y la poca radioactividad natural de un entorno radiopuro. En estas condiciones merece la pena simular como debe ser el fondo en función de las contribuciones de isótopos conocidos y posteriormente compararlo con los datos de radiación de fondo obtenidos. Este trabajo se ha hecho con mucho detalle y con buenos resultados para el prototipoIV[10]. En estas condiciones quedan las pruebas más delicadas que son las de estabilidad y de bajo umbral, que son difíciles de hacer en superficie, aunque conviene repetir la pruebas anteriores y por supuesto calibrar el sistema para conocer la equivalencia energética de los valores de digitalización.

2.5. Montaje de pruebas en la Universidad de Zaragoza

Para poder hacer la mayor cantidad de pruebas posibles antes de tener el sistema midiendo en el LSC se instaló un montaje de pruebas en Z la Universidad de Zaragoza, en condiciones de superficie con la primera versión de la electrónica descrita en la sección A.6 Descripción Funcional, página 40.

2.5.1. Pruebas funcionales

Para verificar que la cadena electrónica funcionaba correctamente se calibró el detector digitalizando y guardando las señales con fuentes radioactivas de energías conocidas.

En estas pruebas ya se realiza un repaso completo a la funcionalidad: adquisición de datos, modo calibración, prueba de la configuración y verificación de los datos de salida tanto directamente como por el programa de análisis. En la figura 2.1 se pueden ver algunos resultados de esas calibraciones. En la parte superior se puede ver de izquierda a derecha el espectro de ^{60}Co y de ^{57}Co . En la parte inferior izquierda el mismo espectro de ^{60}Co calculado con el área de la señal por el programa de análisis (ver B.2.1 Software de Análisis de datos, página 56) y que obtiene los mismos picos de 1,17 y 1,33 MeV que con los integradores de carga (QDC) y además se observa el pico suma que en que en los QDC saturaba. En la parte inferior derecha se observa la correspondencia lineal entre el área calculada con el programa de análisis y las medidas directas del QDC, con zonas de saturación y de pedestal (valor mínimo de la digitalización).

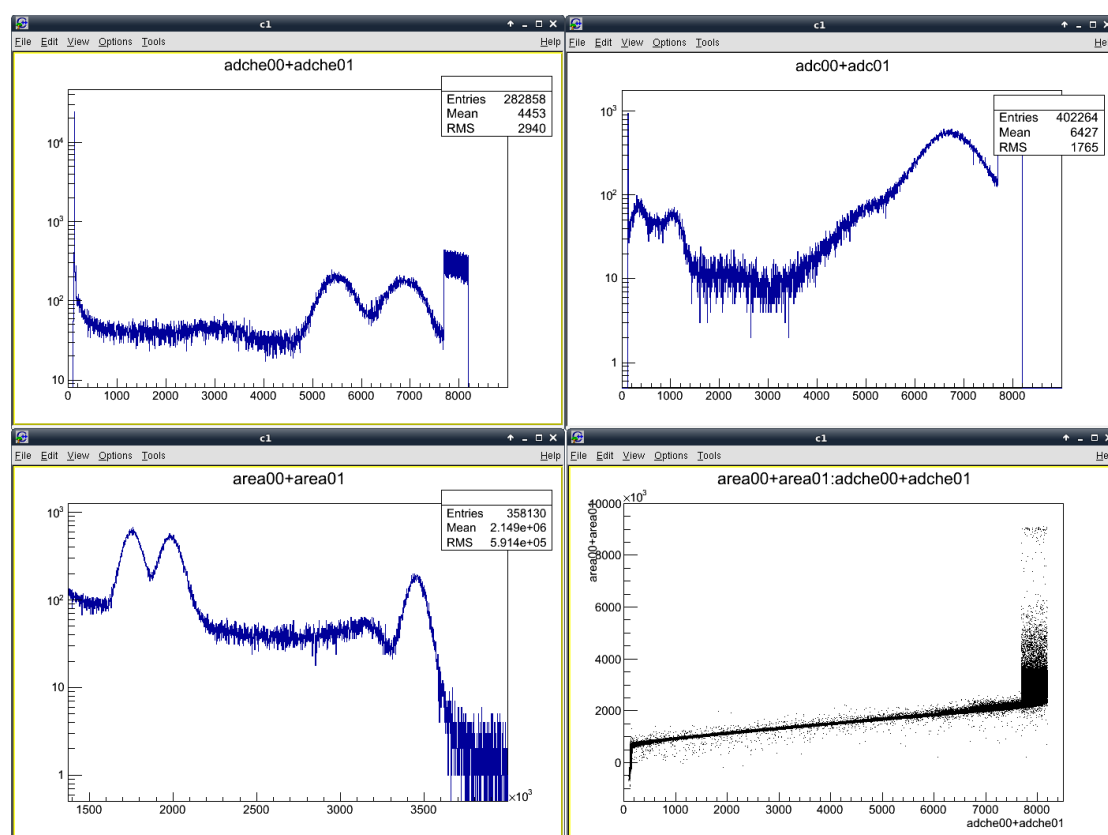


Figura 2.1: Calibraciones del PrototipoIII en Zaragoza. De izquierda a derecha, arriba: espectros de ^{60}Co y de ^{57}Co . Izquierda abajo: espectro de ^{60}Co calculado con el área de la digitalización. Derecha abajo: correspondencia entre valores de área y de QDC de alta energía.

2.5.2. Medidas de tiempo muerto

Medir el tiempo muerto con precisión es fundamental para comparar las medidas del experimento con las simulaciones (ver A.2.1 Ritmo de interacciones, tiempo real y tiempo muerto, página 32). En este apartado se muestra las medidas de tiempo muerto realizadas y la verificación de esos resultados con métodos indirectos. Con estas pruebas garantizamos que el tiempo muerto está medido con precisión y se pueden comparar los resultados de las medidas de fondo con las simulaciones

En primer lugar se midió el tiempo muerto medio en función de la frecuencia de adquisición, usando los contadores de tiempo vivo (ver A.4.6) usando como entrada una señal generada a frecuencias variables proveniente del generador de pulsos, con forma y amplitud similar a la de un centelleo. Estas medidas se realizaron con el programa de adquisición en distintas configuraciones, combinaciones de las dos opciones más importantes: encuesta activa al bus VME frente a interrupción generada por la digitalizadora y escritura de datos síncrona frente a asíncrona (ver B.1.3 Almacenamiento asíncrono de datos, página 56).

De estas medidas se extrajeron dos conclusiones:

- La opción que menor tiempo muerto introducía era la de encuesta activa y almacenamiento asíncrono.
- La diferencia entre adquisición por interrupción y por encuesta superaban los $100\mu s$.

A la luz de estos resultados la opción sería clara a favor de la encuesta activa. Pero paralelamente analizando los datos se pudo comprobar que dicha encuesta introducía ruido en la digitalización (ver figura C.4 Ruido provocado por la encuesta al bus VME, página 68) lo que descartó su uso. Esto dio razones para investigar la abultada diferencia de tiempos entre encuesta activa e interrupciones.

2.5.3. Origen del retardo en la espera a la IRQ

En esta sección se cuentan los distintos pasos seguidos para encontrar el origen de un retardo tan abultado en la espera a la interrupción generada en el bus VME. Para todas estas pruebas se contó con la colaboración del profesor José Luis Briz, que amablemente resolvió dudas y propuso pruebas para encontrar el origen del retardo.

Primero se sospechó que esa latencia podría estar introducida por los retardos en la gestión de las interrupciones por parte de Linux. La primera opción que se tomó fue instalar un kernel con el parche de tiempo real, pero el módulo del kernel que hace de driver de la tarjeta PCI de comunicación con el bus VME no está preparado para esta configuración y no funcionaba.

Posteriormente se instrumentó dicho módulo, modificando su código fuente para medir el tiempo desde que recibía notificación de IRQ hasta que por fin devolvía el control al espacio de usuario, después de haber procesado la interrupción. Para ello se introdujo información temporal en la estructura de estado del driver, tiempo inicial y tiempo final. Se usó la primitiva del kernel `getnstimeofday` que proporciona resolución de nanosegundos. Aquí se pudo comprobar que en la gestión del módulo hasta que el control llega a espacio de usuario transcurren del orden de 10 μs .

Visto que el retardo no era en el módulo de control de la PCI sólo quedaban dos opciones, o bien el retardo se introducía en la gestión de las IRQ por parte del kernel de Linux o bien venía del origen de la interrupción. Se trató de mejorar la gestión de las interrupciones usando el planificador POSIX de prioridades fijas `SCHED_FIFO`, escasamente documentado en su implementación en Linux, pero tampoco se notó mejora.

Fue entonces cuando se valoró que el retardo podría estar en el origen. Se planteó que podría ser el *I/O Register*, la primera tarjeta que conoce la llegada del evento, quien avisase de esa llegada. Se implementó esa posibilidad y se configuró de este modo el sistema y se pudo comprobar que los 100 μs provenían de lo que le costaba a la digitalizadora generar la IRQ y que ese tiempo se podía aprovechar para ir descargando otros datos. Asimismo se comprobó que esta estrategia no introducía el ruido que sí introducía el *poll*. En la figura C.6 Esquemas temporales de la adquisición: IRQ Digitalizadora y IRQ *I/O Register*, página 71 se observa el cambio en la tarjeta generadora de la IRQ para anticipar su generación y el cambio en el orden de lectura de algunos módulos. Esto puso de manifiesto también que el orden de lectura de los módulos puede optimizarse para reducir algo el tiempo muerto y aprovechar que algunos módulos están ocupados para comunicarse con otros.

2.6. Pruebas con el prototipo en el LSC

Una vez dadas por finalizadas las pruebas en la Universidad de Zaragoza se decidió mover el sistema de adquisición al Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Estas ya son medidas en condiciones de laboratorio subterráneo y con blindaje. Por lo tanto el ritmo de adquisición es mucho menor y se puede estudiar mejor los efectos de ruido eléctrico en la cadena de adquisición.

Posteriormente a la instalación que fue bastante rápida y satisfactoria, se fueron detectando problemas asociados a la estabilidad que afectan a la precisión requerida en las medidas. Una vez se dejó midiendo en el LSC se detectaron algunos problemas sobre todo en la estabilidad en los QDC y problemas de ruidos eléctricos.

2.6.1. Verificaciones funcionales y de estabilidad

Una vez solucionados o paliados los efectos anteriores se ha podido verificar tanto la estabilidad como la funcionalidad. El sistema está tomando datos de fondo

con normalidad y se calibra semanalmente. Se configuró una monitorización de la adquisición con envío de correo electrónico en caso de cualquier incidencia. Hoy en día con los *smartphones* y el 3G es en modo muy efectivo de comunicación y resolución de incidencias. También se configuró una notificación diaria con estadísticas de ritmo y datos de fondo que también se envía por correo electrónico. En la figura 2.2 se puede observar uno de esos informes rutinarios diarios.

En dicha figura se puede ver en la parte superior el espectro de fondo de baja, alta y muy alta energía. En la parte inferior, de izquierda a derecha, el ritmo de adquisición y las asimetrías entre vías en los distintos rangos energéticos. En particular el gráfico del ritmo es muy informativo porque se pueden ver en él paradas provocadas por malfuncionamiento de hardware o software o se pueden ver incrementos en el ritmo provocados por ruidos.

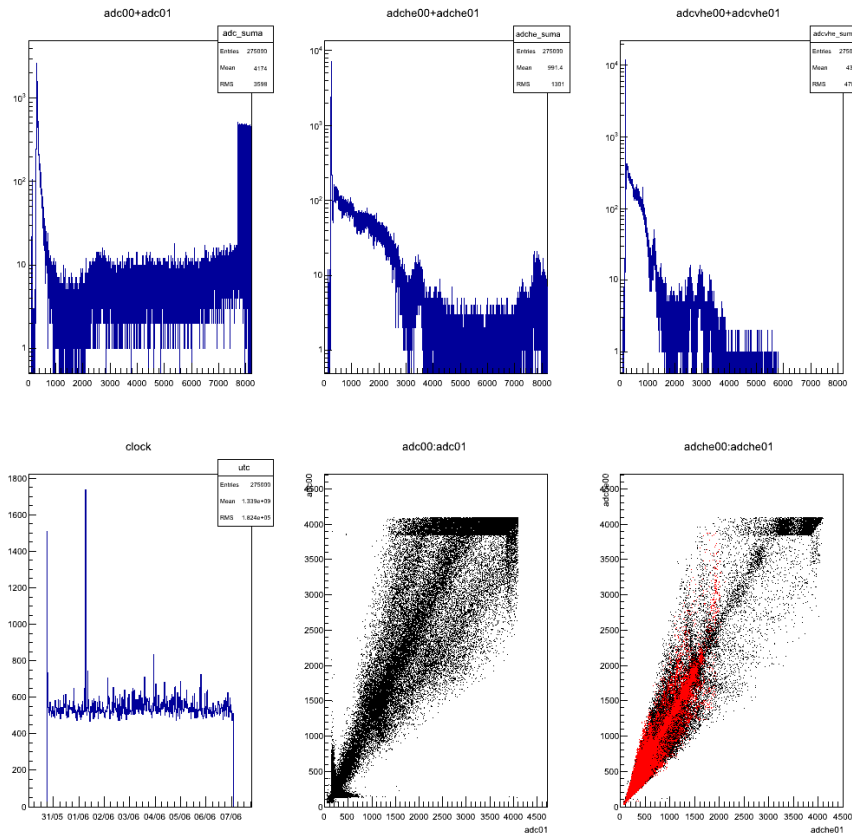


Figura 2.2: Información enviada automáticamente por el sistema de adquisición. En la parte superior está el espectro de fondo de baja, alta y muy alta energía. En la parte inferior, de izquierda a derecha, el ritmo de adquisición y las asimetrías entre vías en los distintos rangos energéticos.

El ritmo de adquisición ha permanecido muy estable salvo en los episodios de ruido descritos en el apartado anterior y desde luego sin paradas debidas al malfuncionamiento de hardware o software.

Capítulo 3

Conclusiones y trabajos futuros

3.1. Conclusiones

Una vez implementado, caracterizado y optimizado el sistema de adquisición se puede concluir que se han cumplido los objetivos marcados en un inicio y que se obtenido un sistema muy optimizado, configurable y escalable según los requisitos. Además es un sistema preparado para funcionar prácticamente desatendido y con una gestión remota cómoda. Adicionalmente en el proceso de caracterización y optimización del sistema ha habido una labor de investigación a bajo nivel del conjunto hardware-software que ha servido para ampliar el conocimiento sobre éste y mejorar su rendimiento.

Sistema implementado y en funcionamiento El sistema implementa los requisitos requeridos. En particular el sistema almacena los datos previstos con la precisión y los rangos dinámicos requeridos. Además el sistema permite calibrar el detector, es monitorizable, estable y escalable. El sistema es autónomo salvo calibraciones semanales y notifica inmediatamente cualquier incidencia, además de proveer estadísticas diarias vía correo electrónico.

Sistema analizado y optimizado El sistema ha sido analizado para escoger las mejores configuraciones y para entender su respuesta, sus tiempos muertos y cómo reducirlos. Además ha servido para detectar efectos adversos en la señal como la encuesta continua y para optimizar el orden del acceso a los módulos para disminuir el tiempo muerto. También ha servido como acicate para la inmersión en las partes internas de Linux como la planificación y los parches de tiempo real.

3.2. Trabajos futuros

3.2.1. *Slow Control*

Un trabajo futuro importante es el 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 valores como los voltajes de alto voltaje, las temperaturas de los chasis, haga análisis de ruido como el implementado en B.2.3 Software de análisis de ruido eléctrico, página 58. Además, con todos esos parámetros se puedan establecer reglas de notificación o alarma caso de detectar valores anómalos.

3.2.2. Análisis de datos

Otro trabajo futuro es el análisis de datos. Actualmente el programa extrae mucha información de las señales, pero es posible optimizar los análisis a baja energía, aprovechando y optimizando la identificación de picos ya existente. Por ejemplo se puede estimar de un modo más robusto la energía integrando sólo en aquellos lugares donde hay pico. Así se puede disminuir la relación señal/ruido. También hay mucho margen para la propuesta e implementación de algoritmos que permitan clasificar mejor los eventos según su naturaleza y facilitar el análisis estadístico de los datos.

3.2.3. Parche tiempo real

Como trabajo pendiente queda tratar de hacer funcionar el módulo del kernel controlador de la PCI con el parche de tiempo real y hacer test de latencias y su influencia en el tiempo muerto.

3.2.4. Ruido electrónico

Este es uno de los temas más delicados a los que se va a enfrentar el experimento. Por ello, como trabajos futuros están tres líneas distintas para paliar y eliminar los ruidos eléctricos:

Fuentes lineales

Las fuentes conmutadas de alimentación son una fuente de 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.

Filtrados

El propio fabricante de la fuente de alto voltaje, el elemento más ruidoso, ha sugerido test de instalación de filtros pasa baja. Es una posibilidad que hay que testear y aunque solo resolvería el problema puntual con ese origen.

Conversión óptica

Otra opción es la conversión de la señal, tan cerca del fotomultiplicador como sea posible a señal óptica. De este modo se podría aislar al detector de la cadena electrónica y evitar un posible camino para el ruido eléctrico.

Bibliografía

- [1] J. Amaré, S. Borjabad, S. Cebrián, C. Cuesta, D. Fortuño, E. García, C. Ginestra, H. Gómez, M. Martínez, **M. Á. Oliván**, Y. Ortigoza, A. Ortiz de Solórzano, C. Pobes, J. Puimedón, M. Sarsa, and J. Villar, “Low energy events in NaI scintillators. ANAIS status and prospects,” in *”Proceedings of Identification of Dark Matter 2010 (IDM 2010). July 26 - 30 2010. University of Montpellier 2, Montpellier, France.”*, 2010.
- [2] N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, B. Gold, M. R. Greason, M. Halpern, R. S. Hill, G. Hinshaw, A. Kogut, E. Komatsu, D. Larson, M. Limon, S. S. Meyer, M. R. Nolte, N. Odegard, L. Page, K. M. Smith, D. N. Spergel, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright, “Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results,” *ApJS*, vol. 192, feb 2011.
- [3] V. C. Rubin, “The rotation of spiral galaxies,” *Science*, vol. 220, no. 4604, pp. 1339–1344, 1983.
- [4] M. Martínez, *Diseño de un prototipo para un experimento de detección directa de materia oscura mediante modulación anual con centelleadores de yoduro de sodio*. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2006.
- [5] R. J. Gaitskell, “Direct Detection of Dark Matter,” *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 54, pp. 315–359, Dec. 2004.
- [6] CDMS II Collaboration, Z. Ahmed, D. S. Akerib, S. Arrenberg, C. N. Bailey, D. Balakishiyeva, L. Baudis, D. A. Bauer, P. L. Brink, T. Bruch, R. Bunker, B. Cabrera, D. O. Caldwell, J. Cooley, P. Cushman, M. Daal, F. DeJongh, M. R. Dragowsky, L. Duong, S. Fallows, E. Figueroa-Feliciano, J. Filippini, M. Fritts, S. R. Golwala, D. R. Grant, J. Hall, R. Hennings-Yeomans, S. A. Hertel, D. Holmgren, L. Hsu, M. E. Huber, O. Kamaev, M. Kiveni, M. Kos, S. W. Leman, R. Mahapatra, V. Mandic, K. A. McCarthy, N. Mirabolfathi, D. Moore, H. Nelson, R. W. Ogburn, A. Phipps, M. Pyle, X. Qiu, E. Ramberg, W. Rau, A. Reisetter, T. Saab, B. Sadoulet, J. Sander, R. W. Schnee, D. N. Seitz, B. Serfass, K. M. Sundqvist, M. Tarka, P. Wikus, S. Yellin, J. Yoo, B. A. Young, and J. Zhang, “Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment,” *Science*, vol. 327, pp. 1619–, Mar. 2010.
- [7] C. E. Aalseth, P. S. Barbeau, N. S. Bowden, B. Cabrera-Palmer, J. Colaresi, J. I. Collar, S. Dazeley, P. de Lurgio, J. E. Fast, N. Fields, C. H. Greenberg, T. W. Hossbach, M. E. Keillor, J. D. Kephart, M. G. Marino, H. S. Miley, M. L. Miller, J. L. Orrell, D. C. Radford, D. Reyna, O. Tench, T. D. Van Wechel, J. F. Wilkerson, and K. M. Yocum, “Results from a search for

- light-mass dark matter with a p -type point contact germanium detector,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, p. 131301, Mar 2011.
- [8] G. Angloher, M. Bauer, I. Bavykina, A. Bento, A. Brown, C. Bucci, C. Ciemiak, C. Coppi, G. Deuter, F. von Feilitzsch, D. Hauff, S. Henry, P. Huff, J. Imber, S. Ingleby, C. Isaila, J. Jochum, M. Kiefer, M. Kimmerle, H. Kraus, J.-C. Lanfranchi, R. Lang, B. Majorovits, M. Malek, R. McGowan, V. Mikhailik, E. Pantic, F. Petricca, S. Pfister, W. Potzel, F. Pröbst, W. Rau, S. Roth, K. Rottler, C. Sailer, K. Schäffner, J. Schmalzer, S. Scholl, W. Seidel, L. Stodolsky, A. Tolhurst, I. Usherov, and W. Westphal, “Commissioning run of the cressst-ii dark matter search,” *Astroparticle Physics*, vol. 31, no. 4, pp. 270 – 276, 2009.
 - [9] R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, R. Cerulli, C. Dai, A. d’Angelo, H. He, A. Incicchitti, H. Kuang, J. Ma, F. Montecchia, F. Nozzoli, D. Prosperi, X. Sheng, and Z. Ye, “First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI,” *The European Physical Journal C - Particles and Fields*, vol. 56, pp. 333–355, 2008. 10.1140/epjc/s10052-008-0662-y.
 - [10] S. Cebrián, C. Cuesta, J. Amaré, S. Borjabad, D. Fortuño, E. García, C. Ginestra, H. Gómez, M. Martínez, **M. Á. Oliván**, Y. Ortigoza, A. Ortiz de Solórzano, C. Pobes, J. Puimedón, M. Sarsa, and J. Villar, “Background model for a NaI(Tl) detector devoted to dark matter searches.” submitted, 2012.
 - [11] 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.
 - [12] “IEEE Standard for a Versatile, Backplane Bus: VMEbus,” tech. rep., ANSI/IEEE Std 1014-1987, 1987-09-11.
 - [13] “Standard NIM instrumentation system,” tech. rep., DOE/ER-0457T, 1990 May 01.
 - [14] A. Mathur, M. Cao, S. Bhattacharya, A. Dilger, A. Tomas, and L. Vivier, “The new ext4 filesystem: Current status and future plans,” in *Proceedings of the 2007 Linux Symposium*, pp. 21–33, June 2007.
 - [15] A. Tridgell and P. Mackerras, “The rsync algorithm,” Technical Report TR-CS-96-05, Australian National University, Department of Computer Science, June 1996. (see also: <http://rsync.samba.org>).
 - [16] T. Ylönen, “SSH: secure login connections over the internet,” in *Proceedings of the 6th conference on USENIX Security Symposium, Focusing on Applications of Cryptography - Volume 6*, SSYM’96, (Berkeley, CA, USA), pp. 4–4, USENIX Association, 1996.
 - [17] Oren Ben-Kiki, Clark Evans, and Brian Ingerson, “YAML ain’t markup language (YAML®) version 1.2,” tech. rep., The YAML Project, 2009. (see also: <http://yaml.org/>).