

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN FÍSICA NUCLEAR

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CEPA4: AJUSTE DEL RANGO ENERGÉTICO CON MUONES **CEPA4: ENERGY RANGE ADJUSTMENT WITH MUONS**

ALEJANDRO ORTIZ CORTÉS
(alejor03@ucm.es)

Tutores: OLOF E. TENGBLAD (CSIC) (OLOF.TENGBLAD@CSIC.ES)
JOSÉ ANTONIO BRIZ (CSIC) (JOSE.BRIZ@CSIC.ES)
LUIS MARIO FRAILE (UCM) (LMFRAILE@UCM.ES)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la creación de un dispositivo para testear los componentes electrónicos para la puesta a punto del detector CEPA4, formado por una matriz de 4 detectores phoswich $\text{LaBr}_3(\text{Ce})/\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Se busca cubrir un rango energético para γ de hasta 30 MeV y protones de hasta 300 MeV con buena resolución en energía ($\approx 6\% \Delta E/E$). Para este trabajo, en el caso de radiación γ se utilizan fuentes estándar, sin embargo, puesto que no hay fuentes de protones de altas energías, se han utilizado muones atmosféricos.

Para garantizar el paso de los muones a través del detector CEPA4 se han utilizado 2 detectores centelleadores plásticos conectados en coincidencia con el CEPA4 y se han comparado los resultados con simulaciones de Monte Carlo realizadas usando Geant4.

Palabras Clave: CEPA4, phoswich, LaBr_3 , LaCl_3 , muón, experimental, rango energético, coincidencias, centelleadores, centelleador plástico

ABSTRACT

The aim of this work is building a device to test the electronic components to adjust the performance of the CEPA4 detector, which is composed by a matrix of four phoswich detectors $\text{LaBr}_3(\text{Ce})/\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. It is searched to cover a energy range up to 30 MeV for γ rays and up to 300 MeV for protons with good energy resolution ($\approx 6\% \Delta E/E$). For this work, standard calibration sources were used as gamma radiation and atmospheric muons due to the inexistence of high energy proton sources.

To be sure that the muons pass through the CEPA4 dectector we use two plastic detectors working in a coincidence mode with the CEPA4 and the results will be compared with the ones obtained using Geant4 Monte Carlo simulations.

Key words: CEPA4, phoswich, LaBr_3 , LaCl_3 , muon, experimental, energy range, coincidence, scintillators, plastic scintillator

ÍNDICE

Resumen	i
Abstract	ii
Índice	iii
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	viii
1 Introducción	1
1.1 Motivación del Trabajo	1
1.2 Detector CEPA4	5
1.3 Bases físicas de la detección de muones	7
1.4 Objetivo del trabajo	8
1.4.1 CEPA4 tumbado	8
1.4.2 CEPA4 de pie	9
2 Dispositivo de detección Experimental	11
2.1 Diseño del dispositivo experimental	11
2.1.1 Caracterización de las señales de los centelleadores	11
2.1.2 Diseño del dispositivo de coincidencias	14
2.1.3 Piezas de apoyo	21
2.2 Dispositivo para la detección de muones	23
2.2.1 Papel de la electrónica en el dispositivo	23
2.2.2 Esquema electrónico	25
2.2.3 Análisis de datos	29
3 Simulaciones	31
3.1 Diseño de la geometría	32
3.2 Simulación de la detección de muones	34

4 Resultados y Conclusiones	41
4.1 Dispositivo en posición tumbada	41
4.2 Dispositivo en posición de pie	49
4.3 Conclusiones	56
Bibliografía	59

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Sistema de detección del experimento R^3B en GSI/FAIR, Darmstadt (Alemania)	2
1.2	Estructura del Calorímetro CALIFA	3
1.3	Geometría del detector CEPA4	5
1.4	Separación de la señal en un detector phoswich	6
1.5	Poder de frenado de los muones	7
1.6	Esquema de la detección de muones con el detector tumbado	9
1.7	Esquema de la detección de muones con el detector de pie	9
2.1	Señales del PMT de un detector $LYSO$	12
2.2	Señales del PMT, preamplificador y amplificador del detector phoswich	13
2.3	Señal del PMT del detector plástico	14
2.4	Circuito interno del amplificador	15
2.5	Señales de tiempos normal y retrasada de un detector phoswich	16
2.6	Espectro de tiempos calibrado	16
2.7	Primera coincidencia observada en el osciloscopio	17
2.8	Espectro de tiempos de los centelleadores plásticos	18
2.9	Fotografía del dispositivo inicial de coincidencias	18
2.10	Primer espectro de coincidencias usando ^{22}Na	19
2.11	Espectro de coincidencias usando ^{22}Na enfocado para bajas energías	19
2.12	Ajuste gaussiano al fotopico de 1274 keV	20
2.13	Primer espectro de coincidencias usando ^{60}Co	20
2.14	Medidas de la pieza soporte de los detectores plásticos	21
2.15	Fotografía de la pieza soporte de los detectores plásticos	22
2.16	Fotografía de las cajas añadidas para cubrir las placas de los PMTs	23
2.17	Esquema señales de tiempos y energía	24
2.18	Esquema señales de ventana y disparo	24
2.19	Esquema electrónico	25

2.20	Subesquema electrónico - Señal de energía	26
2.21	Subesquema electrónico - Señal de tiempos	26
2.22	Circuito interno del módulo STM-16	27
2.23	Subesquema electrónico - Señales de disparo y ventana de coincidencias	28
3.1	Simulación de los detectores	32
3.2	Espectro simulado de una fuente de ^{60}Co	33
3.3	Comparación de las fuentes de la simulación con las medidas experimentales	34
3.4	Generador de muones atmosféricos en Geant4	34
3.5	Espectros simulados de los muones para los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 en posición tumbada	35
3.6	Espectro simulado de los muones para el detector CEPA4 en posición tumbada	36
3.7	Simulación de la geometría del dispositivo en posición de pie	37
3.8	Espectros simulados de la energía depositada por los muones atmosféricos para los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 en posición de pie	37
3.9	Espectro simulado de los muones para el detector CEPA4 en posición de pie sin coincidencias	38
3.10	Espectro simulado de los muones para el detector CEPA4 en posición de pie	39
3.11	Espectro simulado de $\Delta E/E$	40
4.1	Fotografía del dispositivo experimental en posición tumbada	41
4.2	Espectros lineales sin calibrar del CEPA4 tumbado	42
4.3	Rectas de calibración preliminar para los detectores 2 y 3 en posición tumbada	42
4.4	Espectros calibrados usando las fuentes para el dispositivo tumbado	43
4.5	Espectros hasta 3 MeV calibrados	43
4.6	Contaminación interna del LaBr_3	44
4.7	Picos del espectro del detector 2 a bajas energías	45
4.8	Rectas de calibración para el detector tumbado	45
4.9	Espectro del pulser con el dispositivo tumbado	46

4.10	Comparación de los espectros experimentales y simulados de coincidencia con 1 plástico	47
4.11	Comparación de los espectros experimentales y simulados de coincidencia con 2 plásticos	48
4.12	Fotografía del dispositivo experimental en posición de pie	49
4.13	Espectros lineales sin calibrar del CEPA4 de pie	50
4.14	Picos del espectro del detector 2 a bajas energías	50
4.15	Picos del espectro del detector 3 a bajas energías	51
4.16	Rectas de calibración para el dispositivo de pie	51
4.17	Espectro del pulser para el dispositivo de pie	52
4.18	Comparación de los espectros experimental y simulado con un sólo plástico, dispositivo de pie	53
4.19	Espectro en lineal y logarítmico del ^{60}Co en el detector 2 de pie .	54
4.20	Espectro en lineal y logarítmico del ^{60}Co en el detector 3 de pie .	54
4.21	Rectas de calibración para el dispositivo de pie con mayor rango energético	54
4.22	Comparación de los espectros experimental y simulado con un sólo plástico, dispositivo de pie, segunda prueba	55

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Características de los cristales de LaBr_3 y LaCl_3	6
2.1	Amplitud de las señales observadas en el osciloscopio procedentes del ánodo del detector, del preamplificador y del amplificador. . .	12
2.2	Fuentes de calibración	13
2.3	Característcas de los cristales centelleadores	14
3.1	Energías depositadas por los muones en los cristales centelleadores	38
4.1	Puntos utilizados para hacer la calibración	45
4.2	Resolución de los picos gamma en posición tumbado	49
4.3	Puntos utilizados para hacer la calibración del dispositivo de pie .	51
4.4	Resolución de los picos gamma en posición de pie	55

A mi familia, a la gente del CSIC, especialmente a Olof por enseñarme como es de verdad trabajar en un laboratorio y a Briz por ayudarme siempre, daba igual cuando fuera. A mis amigos del máster, a los patos, y muy especialmente a Inma y a Vicente por adoptarme en su despacho y apoyarme cada día.

1

INTRODUCCIÓN

El objetivo final de este trabajo es la utilización del detector CEPA4, prototipo del detector CEPA, para el tratamiento de las señales, simultáneas de protones y gammas durante los experimentos a realizar en R^3B en las instalaciones de FAIR en Darmstadt (Alemania) [1], y las medidas para imagen con protones del proyecto PRONTO financiado por la Comunidad de Madrid [2]. Se pretende obtener para el detector CEPA4 un gran rango dinámico con buena resolución en energía usando una electrónica específica. Para ello se realizarán pruebas experimentales y se compararán los resultados a través de simulaciones de Monte Carlo usando el código Geant4 [3].

Para ajustar el rango energético se emplearán fuentes radiactivas de calibración de radiación γ y muones atmosféricos. La medida se realizará por medio del detector CEPA4 y dos plásticos centelleadores para conocer la trayectoria de los muones. Es necesario el uso de los detectores plásticos para seleccionar los muones cuya trayectoria atravesase completamente el volumen del detector en las direcciones definidas.

1.1 Motivación del Trabajo

Este trabajo surge de la necesidad de optimizar el rango de las señales del detector CEPA para obtener una resolución en energía de aproximadamente el 6% $\Delta E/E$ para un rango dinámico de radiación γ hasta 30 MeV y protones hasta 300 MeV.

El detector CEPA forma parte del calorímetro CALIFA (CALorimeter for the InFlight detection of γ rays and light charged pAr-ticles) [4] dentro del experimento R^3B (Reactions with Relativistic Radioactive Beams) en la instalación FAIR, en Darmstadt (Alemania). En este experimento se pretende medir en cinemática completa las reacciones con haces de iones pesados a energías relativistas de alrededor de 1 A·GeV.

Para detectar todos los los fragmentos de las reacciones implicadas, el dispositivo cuenta, rodeando al blanco, con los detectores Si-tracker para partículas cargadas y CALIFA para radiación γ y protones, y dejan pasar los fragmentos de reacción emitidos hacia delante en un ángulo de laboratorio inferior a 7° .

Los fragmentos de reacción que son emitidos en ese rango angular son desviados por el imán $R^3B - GLAD$, dependiendo de su masa y carga, a distintos ángulos cubiertos por varios detectores, cada uno dedicado a un tipo de partícula (iones pesados, neutrones, protones, gammas, etc) como se muestra en la Fig. 1.1.

Dentro de estos detectores el calorímetro CALIFA tiene un papel clave puesto que es el que se encarga de cubrir al blanco de la reacción cubriendo un rango angular de 7 a 140°.

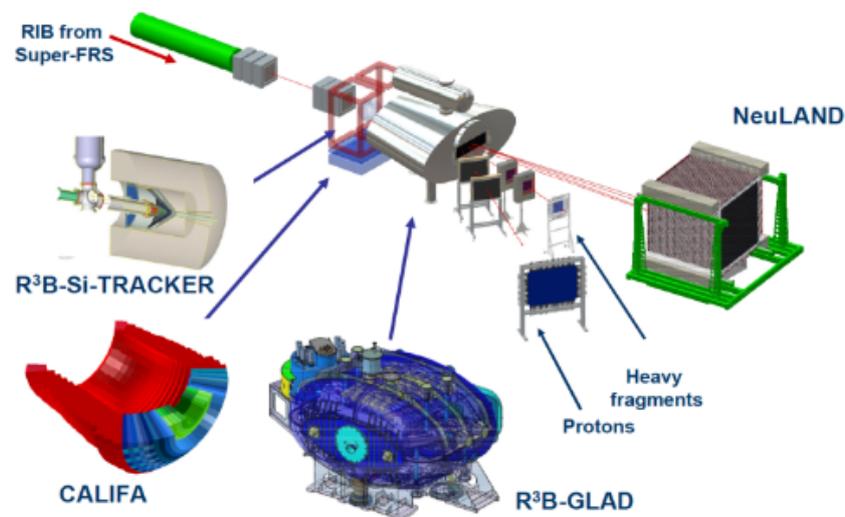


Figura 1.1: Sistema de detección del experimento R^3B en GSI/FAIR, Darmstadt (Alemania). El haz de iones procedente del Super-FRS colisiona con el blanco de la reacción el cual está cubierto por los detectores $R^3B - Si - TRACKER$ y $CALIFA$. La gran parte de los productos de la reacción avanzan en la dirección del haz debido a la cinemática de la reacción y son separados por el imán superconductor $R^3B - GLAD$. A continuación interaccionan con detectores para protones, fragmentos pesados y neutrones ($NeuLAND$). Imagen tomada de referencia [5].

Al cubrir el blanco, el calorímetro se encarga de medir la energía de los protones y de la radiación γ emitida durante la reacción, dejando pasar los fragmentos pesados que, debido a las energías relativistas, son empujados hacia delante al ser desviados ligeramente respecto a la dirección del haz incidente. $CALIFA$ está segmentado en varios tipos de detectores, cubriendo cada uno de ellos un rango de ángulos determinado, debido al impulso de Lorentz ("Lorentz boost"). La radiación emitida, tiene una energía aparente mayor a la correspondiente a la emisión, este incremento de energía será mayor conforme los ángulos sean más frontales por lo que el detector tiene que estar segmentado para poder corregir en el análisis este hecho y estar más granulado al disminuir el ángulo de salida.

Se pueden diferenciar principalmente dos partes en la estructura del calorímetro CALIFA como se puede observar en la Fig. 1.2. El *Barrel* cubre un rango angular de 140° a 43° , y el *Forward EndCap*, teniendo un rango angular de 43° a 7° .

El *Barrel* está compuesto únicamente por cristales CsI(Tl) teniendo una longitud variable de 12 a 22 cm para detener los protones, cuya energía aumenta según el ángulo de salida. Estos cristales pueden detener protones con un máximo de energía de 320 MeV teniendo una resolución en energía por debajo del 2%. Respecto a la radiación γ , estos cristales tienen una resolución de alrededor del 5-6% para energías cercanas a 1 MeV.

Por su parte, el *Forward EndCap* contiene dos tipos distintos de detectores: Los Iphos y el CEPA. Los Iphos cubren el rango angular de 43° a 19° , estando compuesto por cristales de CsI(Tl) de 22 cm de longitud. A diferencia de los cristales del *Barrel* estos mantienen el mayor tamaño pudiendo detener protones de hasta 500 MeV con una resolución en energía cercana al 7%. También se utiliza un tratamiento de señal diferente que para los cristales del *Barrel*.

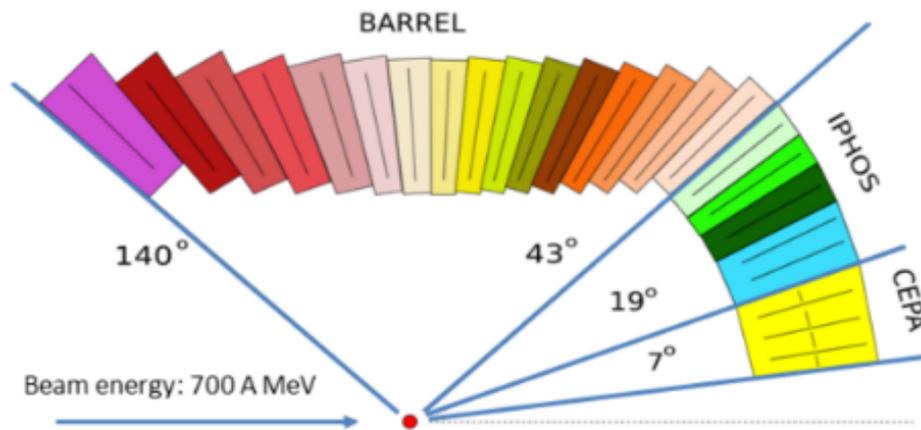


Figura 1.2: Estructura del calorímetro CALIFA especificando las partes y el rango angular que ocupa cada una de ellas. Imagen tomada de [5].

El detector CEPA cubre los ángulos más frontales de CALIFA, recibiendo las partículas de mayor energía en el rango angular de 19° a 7° . Además, recibe una mayor tasa de partículas, por lo que el procesamiento de sus señales debe de ser más rápido que el de los otros detectores. El CEPA es un detector tipo phoswich formado por dos cristales centelleadores, LaBr_3 en la parte delantera y LaCl_3 en la parte trasera, y va a ser el detector en el cual nos vamos a centrar en este trabajo y que analizaremos en los capítulos posteriores.

El término phoswich hace referencia a los detectores formados por la combinación de dos cristales centelleadores ópticamente compatibles (tienen que emitir a una longitud de onda distinta y ser transparentes a la emisión del primer cristal) conectados a un único tubo fotomultiplicador. Al ser un detector tipo phoswich y tener dos capas de cristales distintos, el CEPA permite, diferenciar la energía depositada en ambos cristales tratando las señales mediante su digitalización y su posterior análisis ejecutando algoritmos inteligentes [1] [6].

Aparte de los experimentos, el detector CEPA4 se puede utilizar con detectores de Si DSSD (Double-sided Silicon Strip Detectors) con el propósito de obtener imagen con protones. Ya se ha hecho una prueba de concepto de usar los protones para imagen médica durante un experimento en el CMAM (Centro de Micro-Análisis de Materiales) usando solamente detectores DSSD [7] [8] y se realizará un experimento próximamente usando el CEPA4 en el Centrum Cyklotronowe Bronowice (CCB) en Cracovia. Estas actividades de investigación se encuentran dentro del marco del proyecto "Protontherapy and Nuclear Techniques for Oncology", de la Comunidad de Madrid [2]. En este proyecto, la realización de imagen con protones (proton-CT) se utilizan protones de máximo 300 MeV, por lo que el rango energético a cubrir es similar al que se busca para CALIFA.

Tanto para el proyecto R^3B como para el proyecto PRONTO es necesario poner a punto el detector CEPA4 para cubrir el rango de energías requerido. Para conseguir este objetivo se utilizarán fuentes radiactivas de calibración y muones atmosféricos. Estos muones son MIPs ("Minimum Ionizing Particles") [9], es decir que la energía que depositan por unidad de distancia es constante, con una energía promedio a nivel de la superficie terrestre de aproximadamente 4 GeV [10]. Se tratará este tema en la sección 1.3.

Un trabajo similar fue llevado a cabo en la universidad de Chalmers en 2017, siendo el Trabajo Final de Master de Giovanni Bruni [5]. En este trabajo se llegó a la conclusión de que no era posible el análisis simultáneo de γ y muones debido a que no se consiguió obtener el rango dinámico (energético) deseado con la electrónica utilizada. El motivo principal era los fotomultiplicadores que usaba el CEPA4 en ese momento no eran los mejores para ese objetivo. Por este motivo se han cambiado por fototubos "*metal package*" [11], en los que se ha reducido la distancia entre los dínodos así como el número de estos. Por otro lado, puesto que una de las conclusiones del trabajo de Bruni fue que la electrónica digital no se adapta bien a las características del CEPA4 en este trabajo se ha vuelto a usar electrónica analógica.

1.2 Detector CEPA4

Un phoswich es un detector formado acoplando ópticamente dos cristales centelleadores conectados a un único sensor de luz o tubo fotomultiplicador (PMT). Esta forma de utilizar los cristales centelleadores permite el uso de detectores de menor longitud que si se usaran centelleadores normales.

CEPA4 es un prototipo diseñado por nuestro grupo del IEM (CSIC) y producido por Saint-Gobain compuesto por 4 detectores tipo phoswich aislados entre ellos. Está formado por cristales de $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ y $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ (a partir de aquí se denominarán LaBr_3 y LaCl_3) [1] y cuya geometría se puede observar en la Fig. 1.3. El cristal de LaBr_3 se sitúa en la parte frontal, detrás el cristal de LaCl_3 y, por último, el tubo fotomultiplicador en la parte posterior.

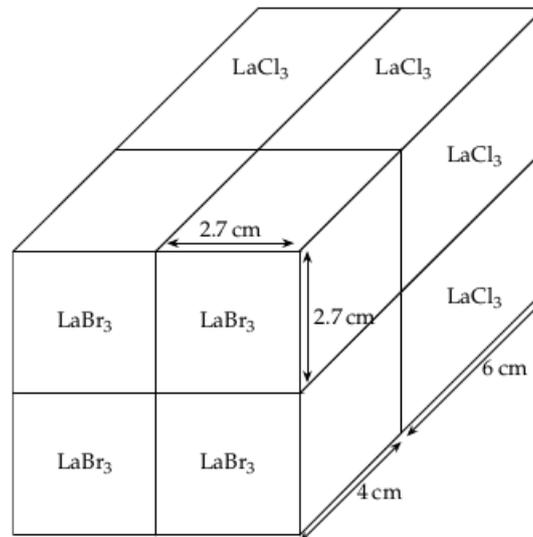


Figura 1.3: *Figura esquemática del detector CEPA4 especificando sus dimensiones. El fotomultiplicador se situaría en la parte posterior, acoplado a cada uno de los cristales de LaCl_3 . Imagen tomada de [5].*

El funcionamiento de un detector tipo phoswich consiste en usar dos cristales centelleadores con tiempo de decaimiento lo suficientemente diferentes como para ser capaces de diferenciar la energía depositada en ambos cristales mediante el tratamiento de la señal. Este hecho unido a la diferencia en la cantidad de fotones emitidos en cada cristal a una misma energía depositada (light yield) son característicos del funcionamiento de un detector tipo phoswich.

Tabla 1.1: Características de los cristales de LaBr_3 y LaCl_3

Material	$\Delta E/E$ (% a 662 keV)	Emisión de luz (fotones/keV)	Tiempo de decaimiento (ns)	Longitud de onda máxima (nm)
LaBr_3	2.9	63	16	380
LaCl_3	3.8	49	28	350

En la Fig. 1.4 se muestra el espectro de energía obtenido con un detector phoswich del CEPA4 usando una fuente de ^{137}Cs [6].

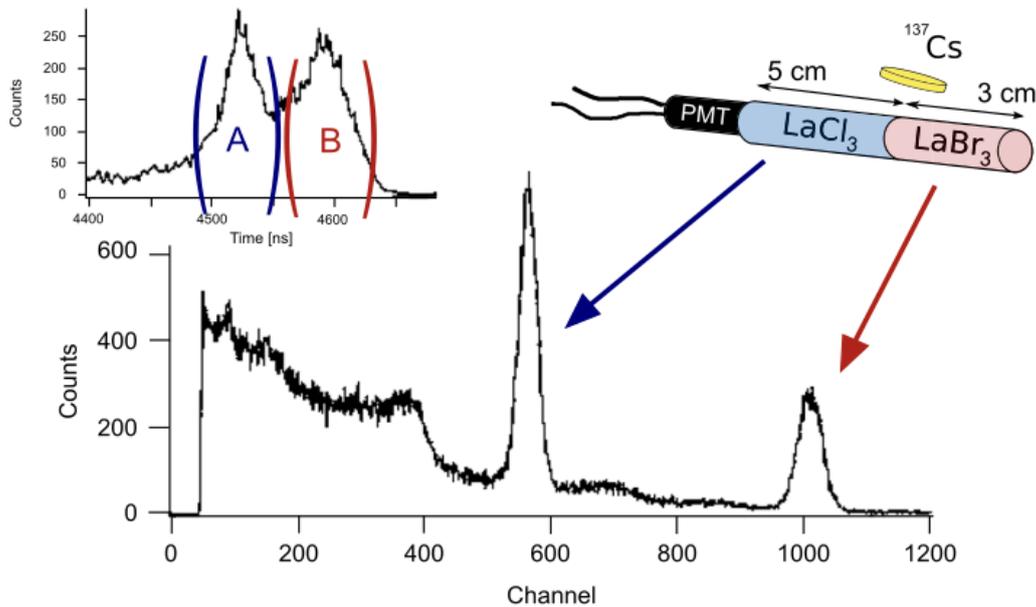
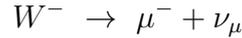


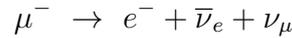
Figura 1.4: Espectro de energía resultante al colocar una fuente de ^{137}Cs para que irradie los dos materiales del cristal simultáneamente. Debido a la diferencia en la cantidad de luz emitida de casi un factor dos, la línea γ 662 keV aparece dos veces; en el canal 1000 resultado de la absorción total en el cristal de $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ y en el canal 590 para la absorción en $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. El espectro situado en la parte superior izquierda muestra el espectro de tiempo obtenido pasando la señal temporal a través de dos canales CFD separados con diferentes retrasos, optimizados para el tiempo de decaimiento del $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (16 ns), y del $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ (28 ns). Imagen tomada de la referencia [6].

1.3 Bases físicas de la detección de muones

El muón (μ) es una partícula elemental de la familia de los leptones con una masa de $106 \text{ MeV}/c^2$, carga eléctrica negativa (-e) y espín 1/2. Son producidos de forma natural como parte de la radiación cósmica secundaria debida a la desintegración de los mesones (π , K, W, ...) por medio de la interacción débil, decaiendo en muones o antimuones.



A su vez, el muón también decae mediante el mismo proceso en un neutrino muónico (ν_μ), un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$) y un electrón (e-), teniendo una vida media de $2.197 \mu\text{s}$.



Los muones interactúan levemente con la materia, pudiendo atravesar la atmósfera perdiendo energía mediante radiación de frenado, pero principalmente mediante colisiones. Esto ocurre debido a que la energía promedio de los muones atmosféricos en la superficie de la tierra es de unos 4 GeV [10].

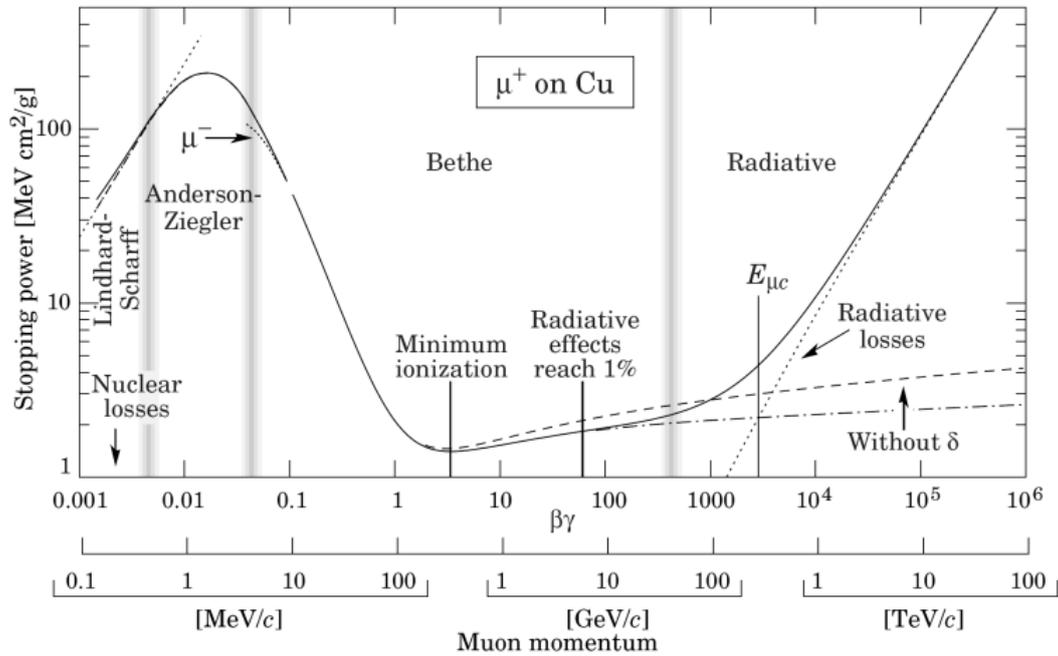


Figura 1.5: Poder de frenado de muones positivos en cobre en función del momento. Imagen tomada de referencia [12].

En la Fig. 1.5 se observa como el poder de frenado (Stopping power) de los muones con una energía de 4 GeV se encuentra en una región plana de valor mínimo. Esto quiere decir que depositarán la mínima cantidad de energía por unidad de longitud, por lo que a los muones en esa región de energía los llamamos MIPs (Minimum Ionizing Particles). Aunque el gráfico de la figura hace referencia al poder de frenado en cobre, la forma y regiones son equivalentes en otros materiales variando solo el valor de la energía depositada por unidad de longitud (stopping power), la cual dependerá de la densidad y de la longitud del material que tengan que atravesar.

El flujo de muones que llega a la altura del nivel del mar es de, aproximadamente, $1 \mu/cm^2min$. Si se considera solamente uno de los detectores phoswich, se puede estimar un conteo aproximado considerando que los muones que se van a detectar equivalen a los que atraviesan una de las paredes. Por tanto, por las paredes laterales cuya superficie es $10 \times 2.7 \text{ cm}^2$ atravesarán $0.45 \mu/s$ y a través de la pared frontal atravesarán $0.1215 \mu/s$ la superficie de $2.7 \times 2.7 \text{ cm}^2$.

1.4 Objetivo del trabajo

El objetivo del trabajo es obtener un rango dinámico con el detector CEPA4 en el que se observe el espectro energético de los muones. Para ello se van a probar nuevos fototubos "metal package" de 6 y 8 dínodos. Las ventajas de este tipo de fototubos es que son más compactos y previsiblemente menos sensibles a campos magnéticos.

A la hora de ajustar el rango energético, los muones atraviesan un rango amplio de espesores efectivos, proveniente de todas las direcciones, depositando energías muy distintas en función de la dirección incidente. Debido a este hecho se han elegido dos direcciones principales en las que los muones depositarán una energía característica dependiente de la longitud que atraviesen en el detector.

Para definir estas direcciones se ha construido un dispositivo de coincidencias formado por los dos centelleadores plásticos y el CEPA4. De esta forma solo se aceptarán para el espectro los muones detectados por los tres centelleadores en coincidencia (uno de los detectores del CEPA4 y dos centelleadores plásticos).

1.4.1. CEPA4 tumbado

La primera de estas geometrías corresponde con el detector CEPA4 horizontal con los plásticos paralelos a sus laterales, se ha denominado a esta posición como tumbado (Fig. 1.6). En esta posición los muones, mayoritariamente, sólo atraviesan un tipo de cristal (LaBr_3 o LaCl_3).

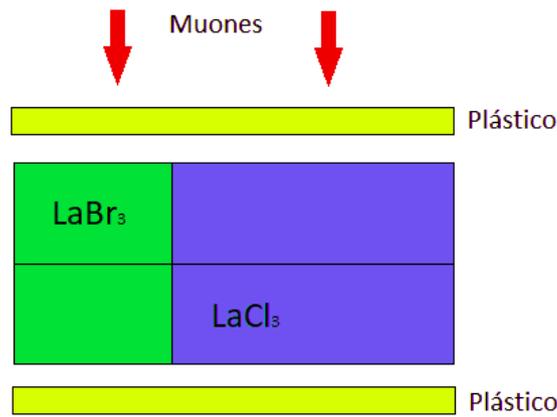


Figura 1.6: *Esquema en el que se muestra la distribución de los detectores con el dispositivo en la posición tumbado.*

1.4.2. CEPA4 de pie

La otra posición es con el CEPA4 en posición vertical (de pie) y los detectores plásticos situados uno sobre la ventana del cristal LaBr_3 y el otro bajo el fotomultiplicador situado debajo del cristal de LaCl_3 , como se muestra en la Fig. 1.7. Usando esta disposición los muones atraviesan los dos cristales del phoswich y se obtiene una única señal electrónica que está formada por dos componentes, una procedente de cada cristal (LaBr_3 y LaCl_3) que son recogidas por un mismo fototubo para cada phoswich.

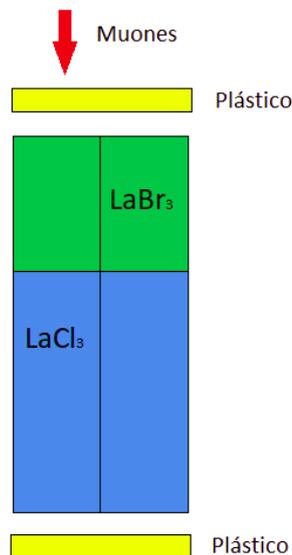


Figura 1.7: *Esquema en el que se muestra la distribución de los detectores con el dispositivo en la posición de pie.*

2

DISPOSITIVO DE DETECCIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se abarca todo lo relacionado con el dispositivo experimental para la detección de muones. El diseño del dispositivo se divide principalmente en dos partes: una inicial, en la que se ha probado cada uno de los componentes de la electrónica; y una final en la que ha realizado el montaje del dispositivo añadiendo un sistema de adquisición, de la cual se ha hecho el análisis de datos.

2.1 Diseño del dispositivo experimental

2.1.1. Caracterización de las señales de los centelleadores

En esta primera parte del trabajo no se va a utilizar el detector CEPA4, sino que primero se va a proceder a entender los detectores de centelleo y la electrónica que se va a utilizar visualizando las señales en un osciloscopio y obteniendo algunos espectros preliminares con fuentes de calibración. Para ello se van a utilizar dos detectores de centelleo, un detector de LaCl_3 equivalente a los que se encuentran en el CEPA4, y un detector LYSO ($\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.2}\text{SiO}_5:\text{Ce}$) antes de utilizar el detector phoswich.

El trabajo se ha comenzado desde cero, acoplando ópticamente los cristales LYSO y LaCl_3 a sus correspondientes tubos fotomultiplicadores (PMTs). Cada uno de los fototubos tiene dos señales de salida, una positiva y otra negativa, provenientes del ánodo y del último dínodo del fototubo respectivamente. Como era de esperar, ambas señales son simétricas, teniendo el mismo tiempo de decaimiento y una amplitud similar, siendo algo mayor la del ánodo (Fig. 2.1). El voltaje de alimentación aplicado era de alrededor de -600 V.

Una vez que el detector funcionaba correctamente se ha añadido una cadena electrónica con la intención de obtener un espectro energético. Esto se ha hecho para un detector tipo phoswich $\text{LaBr}_3/\text{LaCl}_3$ (cilíndrico de 2.54 cm de diámetro y 3 cm de longitud de LaBr_3 y 5 cm de LaCl_3).



Figura 2.1: Señales de las salidas del ánodo de polaridad positiva (amarilla) y negativa del dínodo (azul) del fotomultiplicador del detector *LYSO* observadas en el osciloscopio usando las fuentes de la Tabla 2.2.

La cadena electrónica está formada simplemente por un preamplificador *mesytec MPR-1* [13] y un amplificador también *mesytec MDS-8* [14]. El papel del preamplificador es aumentar la amplitud y el tiempo de decaimiento de la señal entrante para que el amplificador la pueda leer más fácilmente, por otro lado el amplificador también aumenta el tamaño de la señal, pero además la transforma en una señal gaussiana, cuya amplitud es proporcional a la integral de la carga eléctrica de la señal procedente del preamplificador.

Las señales que se van a observar proceden un detector phoswich (Fig. 2.2). Las amplitudes de las señales se pueden ver en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Amplitud de las señales observadas en el osciloscopio procedentes del anodo del detector, del preamplificador y del amplificador para el detector *phoswich*.

Detector	Anodo (mV)	Preamplificador (mV)	Amplificador (V)
<i>Phoswich</i>	42 ± 5	112 ± 5	10.8 ± 0.1

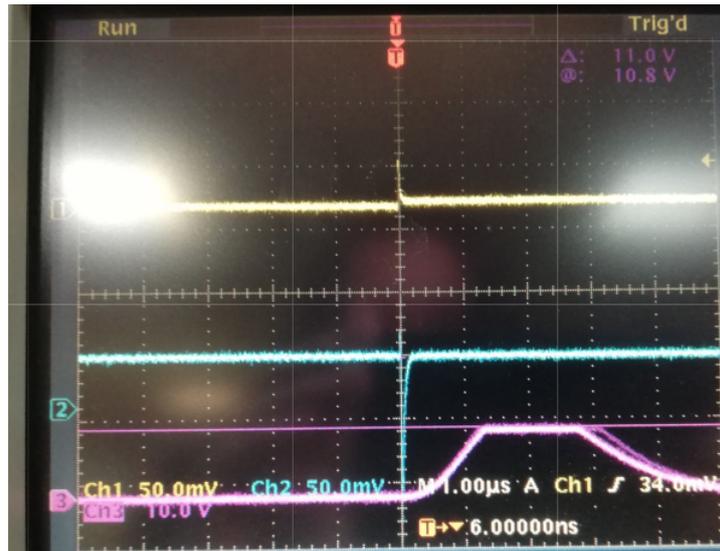


Figura 2.2: Señales del fotomultiplicador de el detector phoswich (amarilla), del preamplificador (azul) y del amplificador (rosa) observadas en el osciloscopio usando las fuentes de la Tabla 2.2.

Las señales provenientes del phoswich se corresponden perfectamente a lo que se esperaba. Las fuentes de calibración usadas para obtener estas señales son las que se indican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Energías de emisión de radiación γ emitida por cada fuente de calibración.

Fuente	Fotopico 1 (keV)	Fotopico 2 (keV)	Referencia
^{22}Na	511 (aniquilación β^+)	1274	[15]
^{60}Co	1173	1333	[16]
^{137}Cs	661.7	–	[17]

El último tipo de detector que se ha evaluado es el centellador plástico (BC-408), el cual será utilizado para obtener las coincidencias. Las medidas se han realizado con un plástico de de 8 mm grossor, siendo mayor que los que se utilizarán en el dispositivo . El motivo de este cambio es que solo se dispone de un detector plástico de 8 mm de espesor por lo que es preferible usar los otros dos que son identicos para las coincidencias, sin embargo debido a que el de 8 mm tiene mayor eficiencia, es el que se usará para el testeo.

La señal del detector plástico (Fig. 2.3) es más rápida que las señales observadas en los otros centelleadores (Tabla 2.3). La duración total de la señal del PMT pbservada en el osciloscopio (Fig. 2.3) es de unos 20 ns, con lo que es adecuada para obtener una buena señal de tiempos.

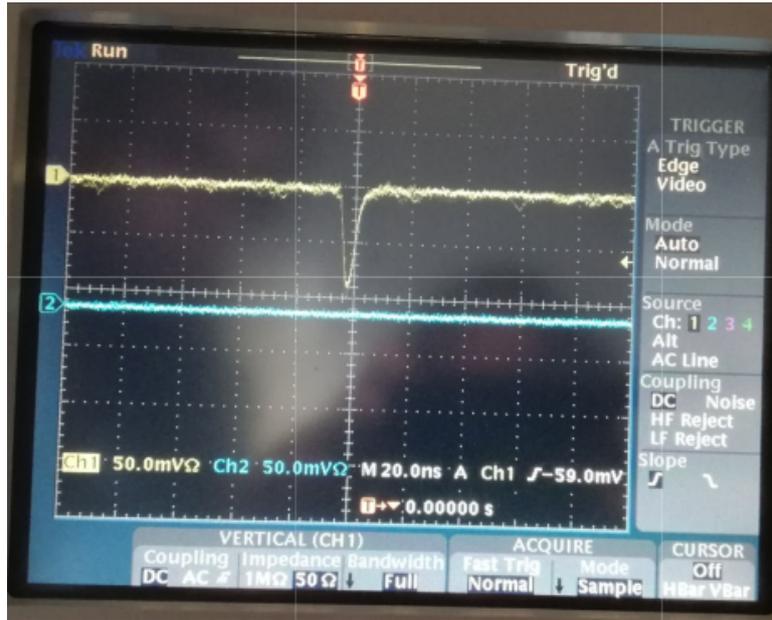


Figura 2.3: Señal de salida del fotomultiplicador del detector plástico de 8 mm (amarilla) observada en el osciloscopio usando las fuentes de la Tabla 2.2.

Para favorecer esta característica, así como la amplificación, se han utilizado distintos PMTs en el plástico y en el phoswich. El fototubo acoplado al phoswich es un fototubo Hamamatsu R5380 [18] y para el plástico un fototubo Hamamatsu R7600u [19]. Las características de los tres tipos de cristales centelleadores empleados se adjuntan en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3: Características de los cristales centelleadores

Centellador	Emisión de luz (% del NaI)	Light yield (fotones/keV)	Tiempo de decaimiento (ns)	Longitud de onda max (ns)	Densidad g/cm^3
LaBr ₃	165	63	16	380	5.08
LaCl ₃	70-90	49	28	350	3.85
Plástico (BC-408)	25	10	2.1	425	1.03

2.1.2. Diseño del dispositivo de coincidencias

En este apartado se va a diseñar un dispositivo para obtener espectros en coincidencia. El primer paso va a ser medir un espectro de tiempos para después hacer una ventana de coincidencias.

Medida del espectro de tiempos

Para ello se va a duplicar la señal de salida del amplificador proveniente del detector phoswich. El amplificador mesytec MDS-8 tiene dos señales de salida diferentes, la señal de energía y la señal de tiempo (Fig. 2.4). Se puede usar la primera para obtener un espectro de energía tomando la señal de tiempos para definir la coincidencia. Esta señal de tiempo es más rápida que la señal de energía y tiene un tiempo de decaimiento menor.

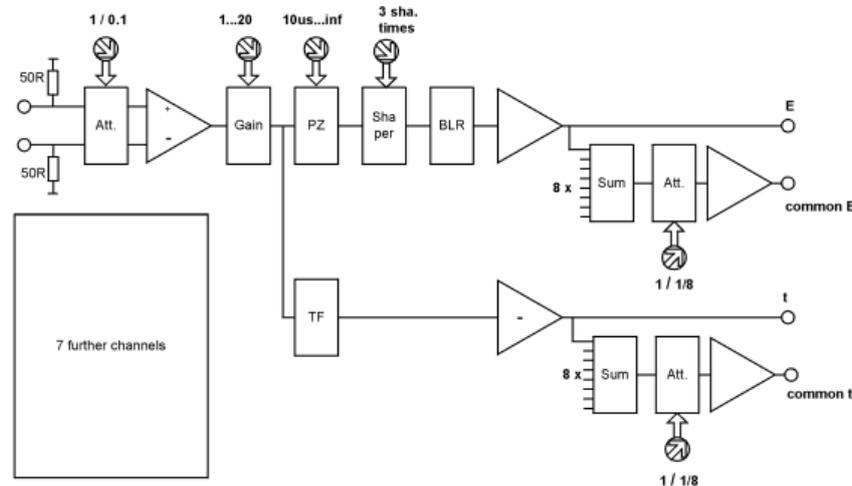


Figura 2.4: *Circuito interno mediante el cual el amplificador obtiene las señales de energía y tiempos a partir de la misma señal de entrada usando amplificadores operacionales. Imagen tomada de referencia [14].*

Se duplica la señal de tiempos al conectar dos cables en la salida de tiempos del amplificador, y se envían al CFD (Constant Fraction Discriminator) cuyas salidas son señales lógicas con una amplitud de 1 V. El CFD que se usa en el dispositivo es un módulo NIM Caen n843 de 16 canales [20]. El funcionamiento del CFD es emitir una señal cuando el pulso de entrada alcanza una cierta amplitud respecto a la amplitud total del pulso.

A continuación, una de las señales del CFD es retrasada mediante un *delay amplifier*, modelo ORTEC 427A [21]. De forma que se puede observar la misma señal, normal (amarilla) y retrasada (azul) en la Fig. 2.5.

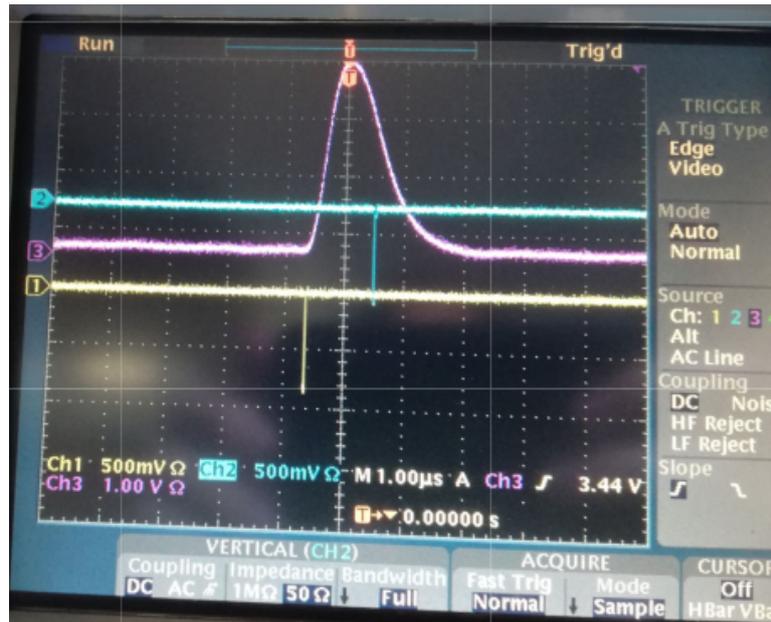


Figura 2.5: Señales de tiempos lógicas normal (amarilla) y retrasada (azul) procedentes de la salida del CFD y del "delay amplifier" respectivamente, así como la señal de energía (rosa) correspondiente a la salida del amplificador. Las tres generadas por el detector phoswich empleadas las fuentes de la Tabla 2.2.

Si se usa la señal sin retrasar como "start" y la señal retrasada como "stop" en un módulo TAC (Time to Amplitud Converter), se puede variar el retraso entre ambas señales mediante el *delay amplifier* y así obtener el espectro de tiempos (Fig. 2.6). El TAC que se ha utilizado es un módulo ORTEC 467 [22].

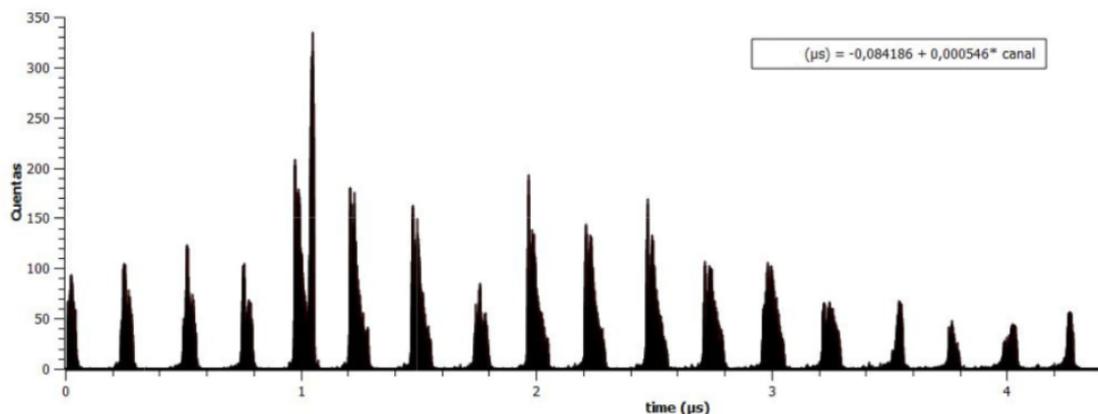


Figura 2.6: Espectro calibrado de tiempos obtenido al variar el retraso introducido mediante el "delay amplifier" entre las dos señales del CFD provenientes de la salida de tiempos del amplificador.

Medidas de coincidencias

Para acabar el trabajo inicial, se han montado y testeado los detectores que se van a usar en el dispositivo de coincidencias, es decir, dos centelleadores plásticos de 3 mm de espesor y el detector CEPA4. El primer paso ha sido, usando los dos centelleadores plásticos, observar simplemente sus señales de los fototubos, y ver si se detecta alguna coincidencia usando las fuentes de ^{22}Na y ^{60}Co . El resultado puede verse en la Fig. 2.7, las señales de ambos detectores son similares diferenciándose solamente por un pequeño retraso causado por la diferencia entre la longitud de los cables que los conectan con el osciloscopio.

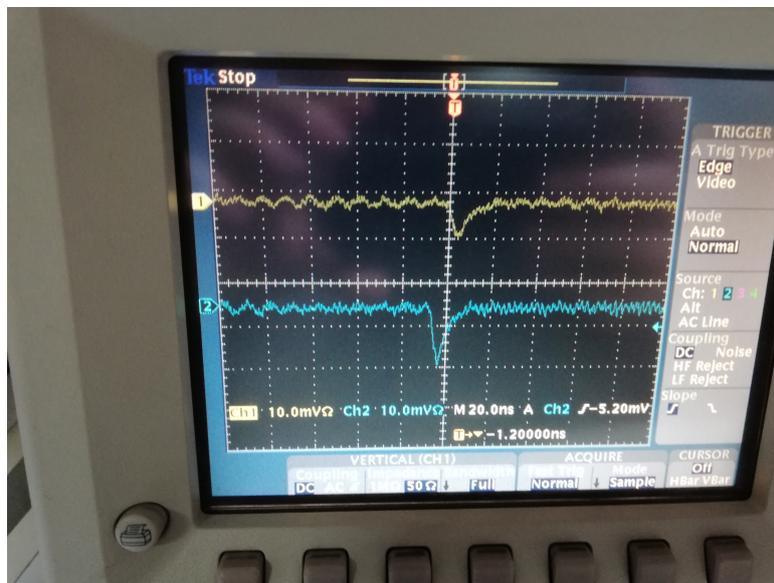


Figura 2.7: Señales de los PMTs de los dos centelleadores plásticos al detectar una coincidencia usando las fuentes de ^{22}Na y ^{60}Co . El retraso de 6 ns es debido principalmente a la diferente longitud de los cables de conexión al osciloscopio.

A continuación, se ha hecho una cadena electrónica para obtener una buena señal de tiempos idéntica para ambos plásticos. Debido al corto tiempo de decaimiento de las señales de los plásticos, los preamplificadores que se usaban para los otros detectores no son adecuados debido a la brevedad de la señal, por ello se utiliza un *fast amplifier* Caen N979. La señal amplificada se lleva al amplificador MDS-8 del cual se obtiene la señal de tiempos. Esta señal se envía CFD, obteniéndose las señales lógicas que se van a usar para hacer la ventana de coincidencias. Los módulos son los que se han mencionado anteriormente y el "fast amplifier" es un módulo Caen N979 de 16 canales [23].

Manteniendo la señal de un plástico, se ha retrasado la señal del otro del plástico y se ha obtenido un espectro de tiempos con el objetivo de definir una ventana de coincidencias utilizando las señales de ambos plásticos.

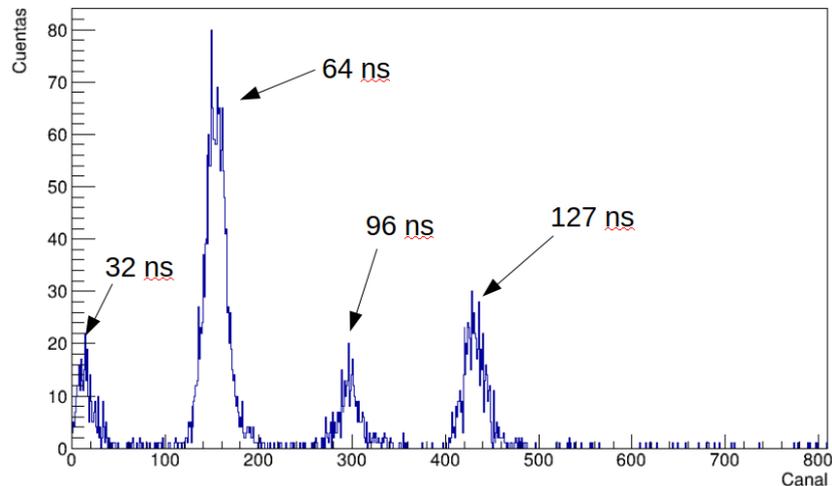


Figura 2.8: Espectro de tiempos obtenido al retrasar la señal de uno de los plásticos 32, 64, 96 y 127 ns, manteniendo la señal del otro plástico.

Se ha realizado una calibración en tiempos usando esos 4 picos obteniendo la recta de calibración correspondiente a la ecuación: $T(ns) = 29.0506 + 0.2266 * canal$. De esta forma, se ha ajustado la ventana de coincidencias con los plásticos ajustando el retraso de uno de ellos de forma que la señal de energía entrara dentro de la ventana, el retraso introducido ha sido el máximo de 127 ns. Se ha obtenido los espectros de energías con uno de los cristales del CEPA4 usando primero la fuente de ^{22}Na (Fig. 2.10) y luego la fuente de ^{60}Co (Fig. 2.13).

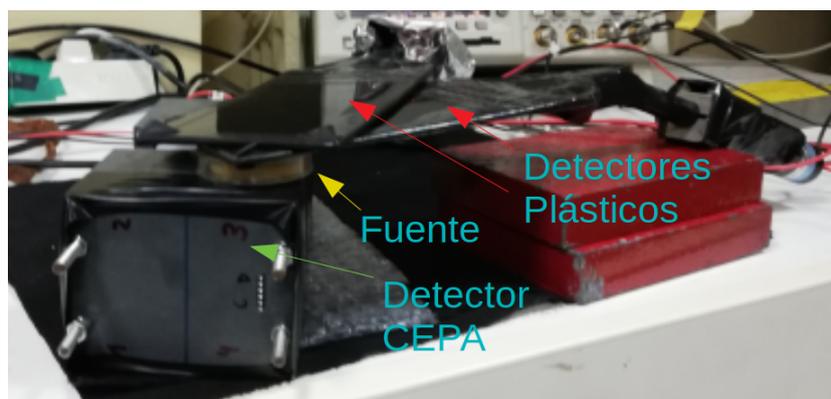


Figura 2.9: Fotografía del primer dispositivo experimental mediante el cual se han obtenido espectros en coincidencias usando el CEPA y dos centelleadores plásticos.

Con este dispositivo se han realizado dos medidas en coincidencia variando el voltaje para ajustar el rango dinámico. La primera medida se ha realizado usando un voltaje de 1550 V para los plásticos y de 640 V para el cristal del CEPA, y se ha usado como fuente el ^{22}Na . El resultado se muestra en la Fig. 2.10.

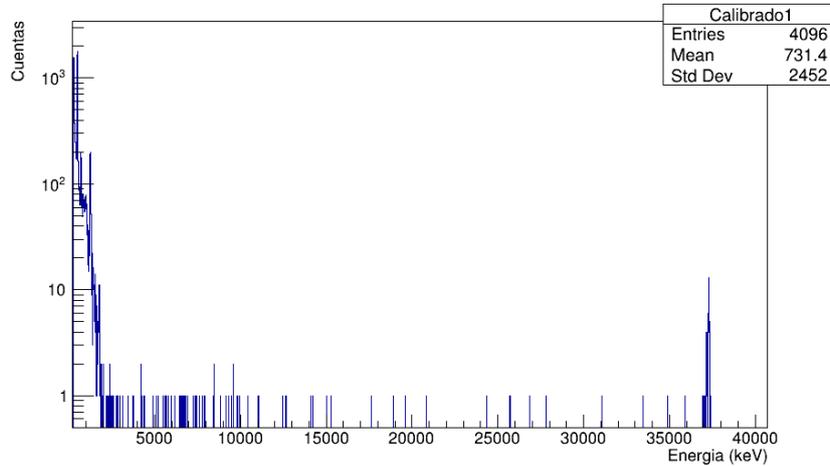


Figura 2.10: *Primer espectro obtenido usando el dispositivo de coincidencias entre CEPA4 y dos plásticos usando ^{22}Na como fuente.*

Al calibrar el espectro usando la fuente de ^{22}Na el rango energético cubierto en la medida es de aproximadamente 38 MeV con la recta de calibración $E(\text{keV}) = 227.24 + 9.88 * \text{canal}$. Si ampliamos el espectro a bajas energías (Fig. 2.11) podemos ver los picos de 511 y 1274 keV para el LaBr_3 y LaCl_3 como se indicaba en la Fig. 1.4.

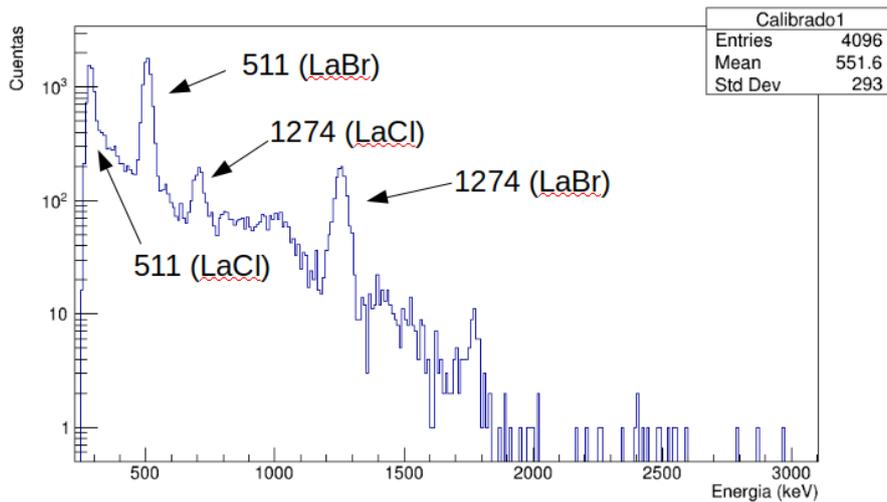


Figura 2.11: *Primer espectro obtenido usando el dispositivo de coincidencias y el ^{22}Na como fuente centrado en la parte de bajas energías para ver el espectro de la fuente.*

La resolución que se tiene del fotopico de 1274 keV es de 4.2 % para el LaBr_3 y del 5.6 % para el LaCl_3 (Fig. 2.12), con lo que se cumple el requisito de una resolución para γ menor al 6 %.

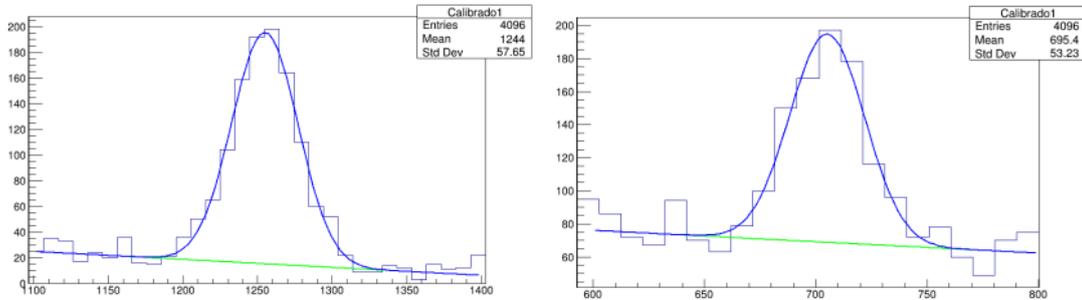


Figura 2.12: *Ajuste gaussiano con background lineal al fotopico de 1274 keV del ^{22}Na para los cristales de LaBr_3 (izquierda) y LaCl_3 (derecha) del CEPA4.*

Debido a que se han observado algunas cuentas a altas energías en la Fig. 2.10, se ha realizado una segunda medida aumentando el tiempo para intentar obtener un espectro de los muones atmosféricos. Para esta medida se ha utilizado la fuente de ^{60}Co .

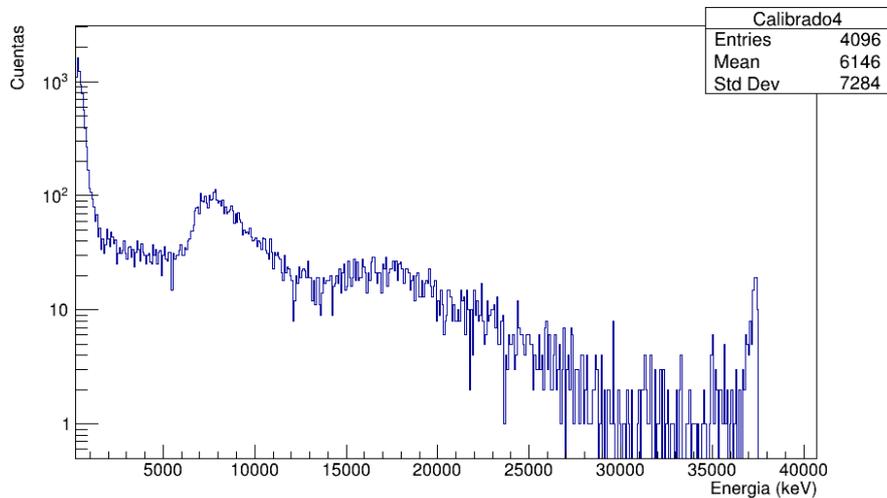


Figura 2.13: *Primer espectro obtenido usando el dispositivo de coincidencias y el ^{60}Co como fuente, calibrado en energía.*

Con el nuevo espectro obtenido, se ha comprobado la calibración y se ha comparado con el espectro de ^{22}Na . Esta vez se han obtenido más cuentas a altas energías y se pueden observar dos estructuras que pueden corresponder a picos a energías alrededor de los 8 y 18 MeV. En los siguientes capítulos se discutirá si estas estructuras son debidas a los muones.

2.1.3. Piezas de apoyo

Junto a los componentes fundamentales del dispositivo experimental existen otro tipo de piezas mecánicas que son necesarias para su correcto funcionamiento y que han sido diseñadas y construidas específicamente para estas medidas.

Soporte para detectores centelleadores plásticos

La primera de estas piezas es un sistema de soporte para posicionar correctamente los centelleadores plásticos durante la medida y realizar un acople adecuado entre el centelleador plástico y su fotomultiplicador.

Para conseguir la máxima estadística posible durante la medida de los muones, los plásticos han de cubrir completamente la superficie del detector CEPA4. Para ello es necesario el diseño de una pieza que sujete adecuadamente el detector, manteniéndolo en la posición adecuada, y que además ayude al acople entre el centelleador y el PMT. El diseño de esta pieza ha comenzado elaborando los planos técnicos, como se puede ver en la Fig. 2.14, y ha sido fabricada por el taller del CSIC.

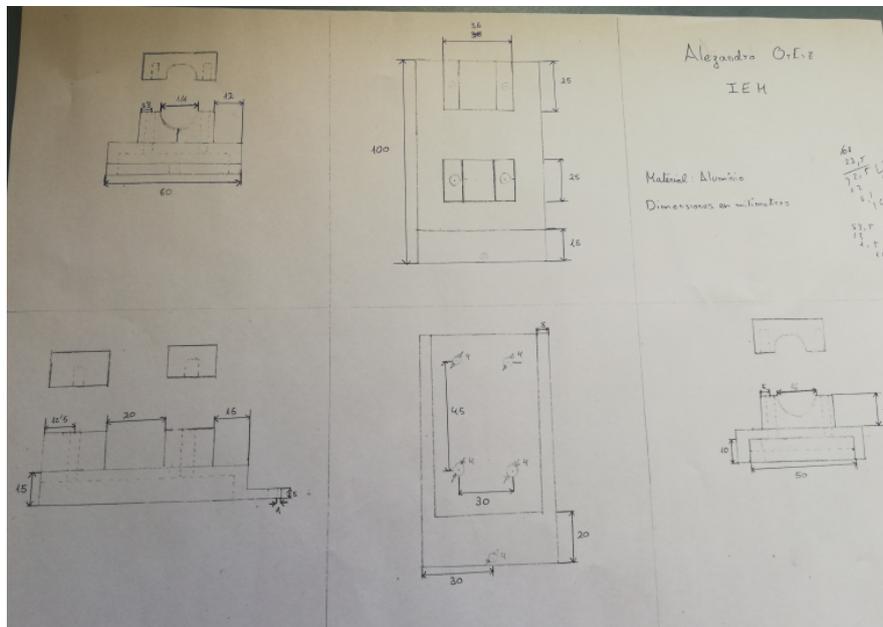


Figura 2.14: Plano con las medidas de la pieza que se ha diseñado como soporte para los detectores centelleadores plásticos.

La pieza diseñada contiene dos puntos de agarre, uno para el detector y otro para el PMT. Esto se debe a que además de posicionar correctamente la pieza, es muy importante conseguir un acoplo óptico entre el centelleador plástico y el tubo fotomultiplicador. También garantiza una buena sujeción, para mantener este acoplamiento.

En la Fig. 2.15 se puede ver la pieza ya fabricada y su funcionamiento. El detector y el tubo fotomultiplicador se colocan tal como se observa en la fotografía y se realiza el acople óptico sobre el soporte.



Figura 2.15: Fotografía en la que se muestra la pieza soporte junto a uno de los detectores plásticos (izquierda) y el PMT (derecha).

Caja de protección de la placa electrónica del tubo fotomultiplicador

La segunda pieza que se ha añadido al dispositivo son unas cajas para cubrir las placas de los PMT de los centelleadores plásticos. Son necesarias debido a que las placas proporcionadas por el fabricante del PMT estaban desnudas, lo que conllevaba problemas de ruido, aparte de ser peligrosas debido al alto voltaje que circulaba por ellas.

Debido a la diferencia de tamaño entre las placas, siendo las proporcionadas por el fabricante más grandes que las cajas que se disponían, se han tenido que soldar nuevas placas de menor tamaño, pero siguiendo el mismo esquema electrónico que las del fabricante.

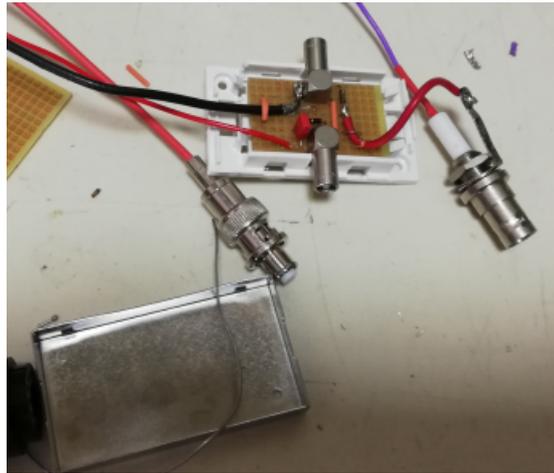


Figura 2.16: *Fotografía de las cajas utilizadas para cubrir las placas de los PMTs de los centelleadores plásticos.*

2.2 Dispositivo para la detección de muones

La electrónica utilizada anteriormente ha estado encaminada a testear los componentes. A continuación se va a describir el montaje experimental que se ha utilizado para la medida del espectro de muones atmosféricos. En la medida se ha utilizado el sistema de adquisición de datos MIDAS (Multi Instance Data Acquisition System) [24].

Usando este sistema, los datos obtenidos mediante el dispositivo experimental se guardan en un fichero en modo lista estructurado en forma de eventos. Cada evento nos da información acerca de lo que ha sucedido en un cierto intervalo de tiempo definido por la ventana de coincidencias y se guardan las señales elegidas. Más tarde, los ficheros generados son convertidos y analizados, como se explicará en la sección 2.2.3.

2.2.1. Papel de la electrónica en el dispositivo

Se va a comenzar explicando cual va a ser la función de la electrónica en este dispositivo. Para ello se va a separar la explicación del tratamiento de la señal en tres partes: la señal de energía, la señal de tiempos y las señales de la ventana de coincidencias y de disparo (trigger).

Como cada detector tiene dos señales de salida en el tubo fotomultiplicador, una de estas señales se usará para obtener la señal de energía, y la otra para obtener la señal de tiempos. Las señales de la ventana de coincidencias y el disparo se obtendrán a partir de uno de los módulos de la cadena de la señal de tiempos.

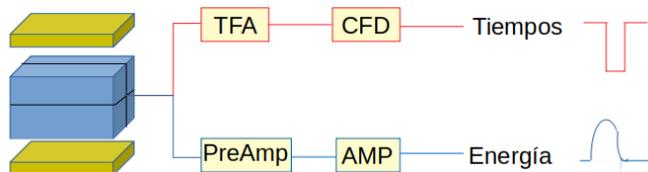


Figura 2.17: Esquema del tratamiento de la señal de tiempos y energía comenzando por la salida del PMT de cada uno de los detectores (representado solo para el CEPA₄).

La señal de energía se obtiene desde la salida de cada tubo fotomultiplicador, pasando por el preamplificador el cual aumenta la amplitud de la señal y luego al amplificador que transforma la señal en una gaussiana de mayor amplitud. Esta señal gaussiana es la señal de energía y una vez obtenida se envía al ADC para convertir la amplitud del pulso en una señal digital y almacenarla en el ordenador.

Por otro lado, la cadena de la señal de tiempos comienza desde la segunda salida del PMT de cada uno de los detectores dirigiéndose a un "timing filter amplifier" que prepara la señal de la misma forma que el preamplificador, pero para la señal de tiempos, y luego entra al CFD el cual emite la señal de tiempos (procesado rápido) en forma de señal lógica. Esta señal se convierte en entrada del TDC convirtiendo la diferencia de tiempos entre esa señal y el disparo, del que se hablará a continuación, en una señal digital que se almacenará en el ordenador.

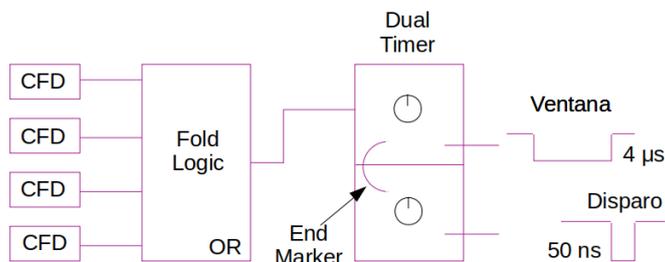


Figura 2.18: Esquema del tratamiento de la señal para obtener las señales de la ventana de coincidencias (gate) y de el disparo (trigger) comenzando por la salida del CFD de cada uno de los detectores.

Las señales de salida de los CFD que aparecen en las cadenas de tiempos de los detectores se envía a un módulo "Fold Logic" que genera una pulso cada vez que recibe una o varias señales de entrada. Esto ocurre porque está configurado en modo OR. Este pulso entra en el "Dual Timer" el cual es un módulo tipo "Gate & Delay", aquí se genera la señal de salida de la ventana de coincidencias y se envía otro pulso al acabar la señal ("End Marker"), este último pulso entra en otra sección independiente del "Dual Timer" el cual genera la señal de disparo.

La señal de la ventana de coincidencia se introduce en el ADC de un modo diferente al de las señales de energía. Esto es debido a que el ADC es "Peak Sensing", es decir, durante la duración de la señal de la ventana de coincidencias el ADC lee las señales de energía buscando si ha habido algún pico dentro de ese lapso de tiempo y si lo ha habido convierte la amplitud de ese pico en una señal digital.

Por otro lado, la señal de disparo se envía al TDC. Esta señal sirve como señal de referencia para comparar la señal de tiempos y también sirve como señal de STOP indicándoles al ADC y al TDC que envíen la información al ordenador.

2.2.2. Esquema electrónico

El objetivo de la electrónica es obtener los espectros de tiempos (línea roja) y energía (línea azul) mediante el TDC y el ADC, respectivamente. Por otro lado, es necesario generar una ventana y un disparo (trigger) para lo que se necesita un tratamiento de la señal (línea morada) como se muestra en la Fig. 2.19.

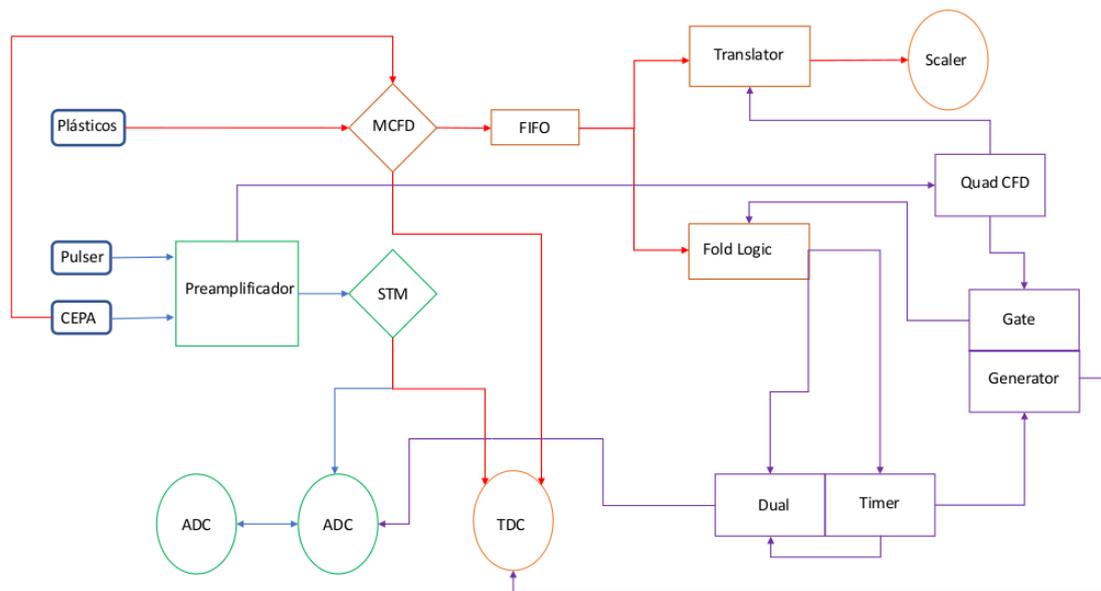


Figura 2.19: Esquema electrónico empleado en el dispositivo experimental indicando el flujo de señal. Las líneas azules corresponden a la señal de energía, las líneas rojas, a la señal de tiempos, y las moradas al tratamiento de señal para la elección de la señal de disparo y las coincidencias.

Debido a la complejidad del esquema mostrado en la Fig. 2.19 y para facilitar su comprensión se ha dividido en 7 partes y cuya explicación se detalla a continuación.

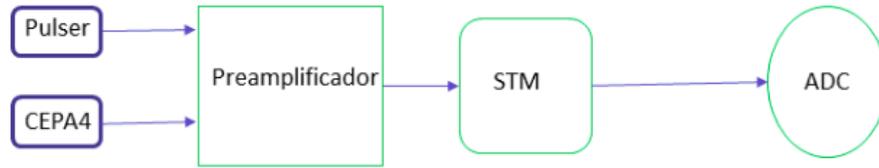


Figura 2.20: Parte del esquema electrónico que comprende el tratamiento de la señal de energía.

La señal de energía se obtiene de los cristales del CEPA4 y del pulser, pasando por un preamplificador diferente la señal de cada detector. El preamplificador es del mismo tipo que el usado anteriormente [13]. La señal del pulser se utiliza para conocer el tiempo real de la medida y así corregir por tiempo muerto. La frecuencia del pulser es de 5 Hz.

Esta señal preamplificada pasa por el STM (Shaping/Timing filter amplifier with discriminator and Multiplicity trigger) de mesytec de 16 canales [25]. De este módulo se obtiene la señal amplificada de energía, de forma equivalente al del amplificador que usábamos en las medidas anteriores. Se obtiene el espectro energético transformando la señal en el ADC (Analog to Digital Converter). El ADC es un módulo *Peak Sensing ADC* de Caen mod.785 de 32 canales [26].

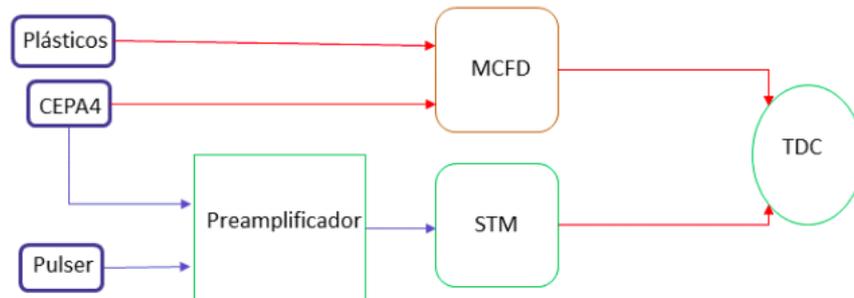


Figura 2.21: Parte del esquema electrónico que comprende el tratamiento de la señal de tiempos.

Del STM también se obtiene una señal de tiempos por cada señal de energía. La separación en señales de energía ("shaper out") y tiempos ("timing out") se realiza a partir del circuito interno del módulo STM que muestra la Fig. 2.22. Las señales temporales se usan como entrada en el TDC (Time to Digital Converter) para obtener de ella un espectro de tiempos. Este módulo es un modelo de 128 canales de *multihit TDC* de Caen mod.1190A [27].

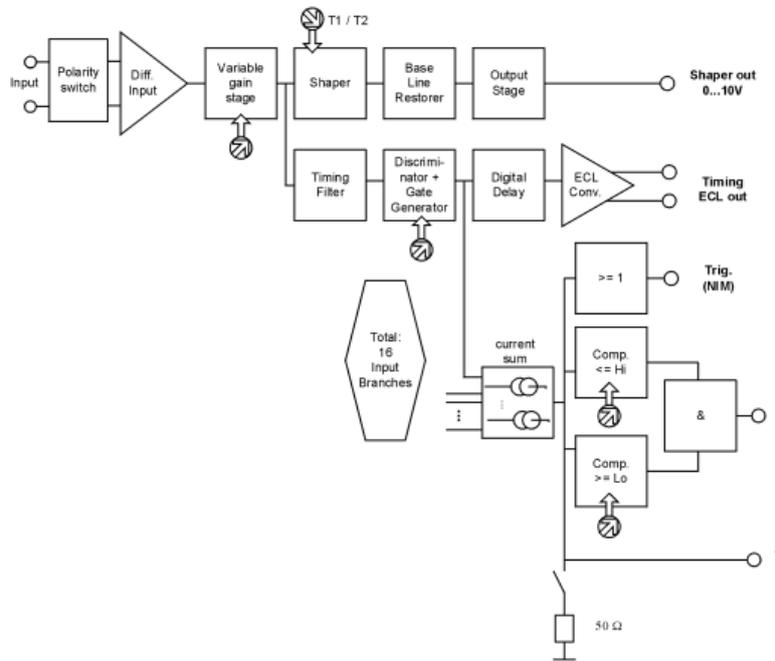


Figura 2.22: Circuito interno del módulo STM-16 mediante el cual se obtienen las señales de tiempos (timing ECL out) y energía (shaper out). Imagen tomada de referencia [25].

Estas señales de salida del STM no son las únicas señales de tiempos que entran en el TDC (Fig. 2.21). Además de estas señales se han tomado las señales de salida de los fototubos del detector CEPA y de los plásticos. Estas señales se utilizan como entradas del CFD (Constant Fraction Discriminator), de donde se obtiene una señal lógica de tiempos que se lleva también al TDC para obtener nuevos espectros con las señales que superen un umbral. El CFD empleado es el MCFD-16 de mesytec [28].

Aparte de la señal para el espectro de tiempos del CFD, se genera una señal a partir de una puerta lógica en modo OR. Al estar implementado en modo OR cada vez que una o varias de las entradas del CFD, siendo estas las señales de los dos detectores del CEPA4 y los dos centelleadores plásticos, supere el umbral establecido se enviará una señal al FIFO (Fan-In Fan-Out), en el cual, al entrar la puerta lógica, duplicará la señal enviando una al Translator y otra al Fold Logic. De esta forma, cada vez que dispare uno o varios detectores habrá un evento y el CFD emitirá una señal de disparo. Esta señal permitirá hacer el análisis de datos evento a evento. Estos tres módulos corresponden a los modelos de Caen Fan-In Fan-Out, Translator y Fold Logic mod. N454 [29], N658 [30] y N405 [31], respectivamente.

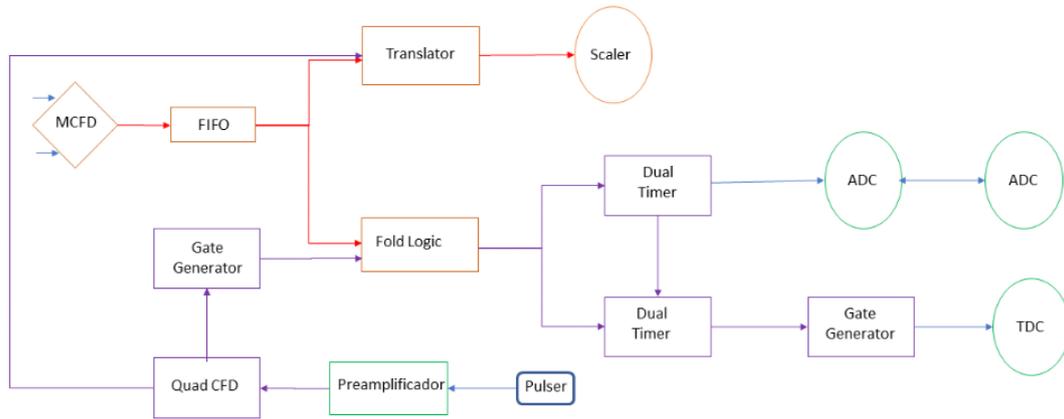


Figura 2.23: Parte del esquema electrónico que comprende las señales de disparo y ventana de coincidencias.

Para tratar la señal emitida por la puerta lógica se combinan una serie de módulos cuyo objetivo es generar la señal de disparo (*trigger*) del TDC y la ventana (*gate*) del ADC, así como retrasar la señal para sincronizarla con la señal del STM, la cual tiene un procesamiento más lento. Estos módulos son el Fold Logic que se ha mencionado anteriormente, el Dual Timer modelo de Caen N93B [32], el Gate Generator y el Quad CFD. Los dos módulos son de ORTEC, el Gate Generator modelo GG8020 [33] y el Quad CFD modelo 934 [34].

El Fold Logic genera la señal de disparo (Master trigger) a partir de una puerta lógica funcionando en modo OR recibiendo como entradas la señal del Fan-In Fan-Out (que replica la señal de los detectores proveniente del MCFD) y la salida de una de las secciones del Gate Generator (pulser), por lo que emitirá una señal por cada señal del MCFD o del Gate Generator. Tiene dos salidas estando cada una conectada como entrada a cada una de las dos secciones del Dual Timer.

La salida del Fold Logic (Master trigger) entra en el Dual Timer, teniendo esta sección dos salidas, el End Marker, que se comentará después, y la otra salida (ventana) sirve como VETO para la otra sección del Dual Timer. En esta segunda sección entra como input la señal lineal del Fold Logic, la amplitud de esta señal es proporcional al tiempo de duración de la entrada que la provoca en el Fold Logic. Por tanto, usando la señal lineal y vetando algunas señales con la otra sección del Dual Timer obtenemos la señal de salida que se usa para crear la ventana en el ADC, usando esta salida del Dual Timer y otro ADC interconectando las *Gates* de ambos ADCs.

Por otro lado, la señal del End Marker del Dual Timer que se ha mencionado anteriormente se usa como entrada en una de las dos secciones del Gate Generator cuya salida se usa para definir el disparo (*trigger*) del TDC.

La otra sección del Gate Generator es cuya salida se usa como la otra entrada del Fold Logic, y la entrada proviene del Quad CFD. Este módulo genera señales rápidas negativas cuando la señal de entrada, en este caso la señal del preamplificador del pulser, supera un umbral definido. El módulo también introduce un retraso definido de 10 ns y tiene dos salidas que funcionan como señales de entrada en el Gate Generator y en el Translator.

Por último, el Translator envía la señal al Scaler que funciona como contador, usando las señales del MCFD (detectores) y del Quad CFD (pulser). El Scaler es un modelo de Latching Scaler de Caen mod. V830 [35].

2.2.3. Análisis de datos

Usando este esquema electrónico, la información acerca de la energía y de los tiempos es enviada al ordenador desde el ADC y el TDC, además de las señales del Scaler, usando un módulo CPU como procesador de datos, este es un modelo MVME 5500 de Motorola [36].

En el ordenador el programa de adquisición de datos MIDAS [24] transforma los datos y son almacenados en formato binario en modo lista organizados evento a evento. A continuación, se usa un código, escrito en lenguaje C++, para convertir los datos de MIDAS de un formato binario a un formato en el que puedan ser analizados usando ROOT. ROOT es una herramienta de análisis de datos científicos a gran escala desarrollada en el CERN en lenguaje C++ [37]. La estructura de datos basada en *trees*, *branches* y *leaves*, que utiliza esta herramienta permite agrupar e identificar fácilmente los datos, además de contener un amplio abanico de librerías para su posterior tratamiento y análisis.

Para poder analizar los datos adquiridos por MIDAS se usa un código C++ cuyo objetivo es generar un fichero en el que los datos están separados en eventos mediante una estructura tree de ROOT.

Cada evento aportará información sobre lo que ha sucedido en cada uno de los detectores y canales de datos provenientes del ADC, TDC y Scaler en esa ventana de coincidencia generada cada vez que hay un disparo (Master trigger). El ADC aporta información acerca del detector pudiendo ser uno de los del CEPA4 o el pulser, el número de *Hits* (número detectores que han generado una señal) que han sucedido y la energía depositada en cada uno. El TDC aporta información de los detectores del CEPA4, el pulser y los detectores plásticos, indicando cual de ellos ha disparado, cuántos han sido y el valor de tiempos de cada uno. Y lo mismo del Scaler.

El objetivo del análisis es la obtención de los espectros de energía en los phoswich del CEPA4 sin coincidencia y con coincidencias con 1 o 2 detectores plásticos. Para ello se usa la estructura evento a evento para saber qué ADCs y TDCs han disparado, y obtener los espectros que deseamos imponiendo las condiciones de coincidencia.

El motivo de usar el pulser y el Scaler es para comprobar que no ha habido ningún problema durante la medida, manteniéndose la adquisición de datos constante. El pulser genera señales con una frecuencia fija lo que permite saber a partir del número de cuentas el tiempo real de la medida. Además, si ha habido algún cambio de ganancia durante la medida se reflejará en un cambio de la posición del pico en el espectro del pulser. Por otro lado, el Scaler almacena información sobre las frecuencias de adquisición (tasa de contaje) de cada detector.

Las coincidencias se consiguen poniendo como condición los disparos de los TDCs, y en el caso de que las condiciones de coincidencia para cada detector y para cada caso particular se cumplan para ese evento se guarda el valor de energía del ADC en un espectro concreto. Un ejemplo de esto sería la condición de coincidencia con un plástico. La condición de coincidencia sería la señal de tiempos de plástico en el TDC y se guardaría la señal de energía del CEPA4 que hubiera en la ventana de coincidencia del ADC en ese momento en el espectro que correspondiera a coincidencias con 1 centelleador plástico.

3

SIMULACIONES

En este capítulo se va a tratar el tema de las simulaciones de Monte Carlo. Para comprobar que en la medida experimental se están detectando muones, así como para conocer el comportamiento de éstos y la señal que se espera que produzcan al ser detectados, se han realizado simulaciones usando el código Monte Carlo Geant4 [3].

Geant4 es una herramienta informática que se utiliza para simular la interacción radiación-materia desarrollada en una colaboración internacional [3]. Es muy útil para la simulación de la interacción de las partículas con los detectores permitiendo el seguimiento de cada partícula de forma individual, esto se debe a que el programa esta basado en el método de Monte Carlo. Este método reproduce la naturaleza estocástica de los procesos de interacción radiación materia, mediante el tratamiento con algoritmos pseudoaleatorios partiendo de distribuciones de probabilidad definidas y asignando a cada evento números aleatorios entre 0 y 1 los cuales son los que determinan la siguiente acción. Estas distribuciones de probabilidad son calculadas teniendo en cuenta las secciones eficaces de cada posible interacción de la partícula siendo transportada.

Como se ha comentado en la sección 1.3 los muones son partículas de mínima ionización y, por tanto, con buena aproximación depositan energía dependiendo únicamente de la densidad y longitud del material que atraviesan. No todos los muones tienen exactamente 4 GeV, siendo esta la energía promedio, ni atraviesan la misma longitud efectiva de material, por lo que el espectro de energía depositada por ellos es un continuo. Por ello, se quiere seleccionar los muones que atraviesan una dirección específica mediante un dispositivo de coincidencias. De esta forma, el objetivo de las simulaciones es conocer cuál es el espectro esperado en el detector CEPA4, y poder compararlos con las medidas experimentales correspondientes a la energía depositada según el espesor atravesado en el detector.

Primero se va a proceder a hacer el diseño de la geometría comprobando que el detector está definido correctamente mediante el uso de fuentes radiactivas de calibración y luego se realizará la simulación de los muones usando las dos geometrías utilizadas en el experimento: tumbado y de pie.

3.1 Diseño de la geometría

Para comenzar a realizar las simulaciones se ha procedido a definir la geometría del experimento. De los dos tipos diferentes (sección 1.4) que se van a utilizar se ha decidido comenzar por el tumbado, es decir, con los plásticos paralelos a los laterales de los cristales (Fig. 3.1), el motivo es que es más simple puesto favorece que los muones que solo atraviesen uno de los dos tipos de cristales (LaBr_3 o LaCl_3).

El diseño del CEPA está compuesto por los 4 cristales de LaBr_3 y los otros 4 de LaCl_3 , ambos tipos de cristales dopados con un 5 % de Ce, y siendo sus medidas las mostradas en la Fig. 1.3. Además, el detector tiene un recubrimiento de teflón de 1 mm y está dentro de una caja de aluminio.

Por otro lado los detectores plásticos (BC-408) están compuestos por un 91.5 % de Carbono y un 8.5 % de Hidrógeno, en porcentaje másico. Sus medidas son $58 \times 100 \text{ mm}^2$ de superficie y 2 mm de espesor.

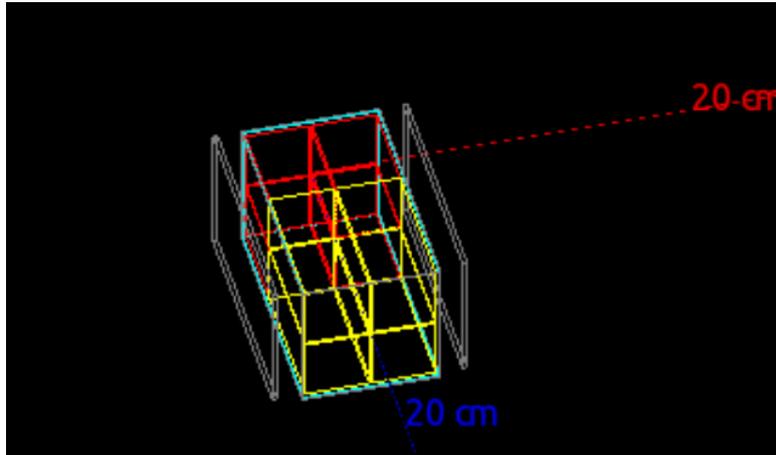


Figura 3.1: Simulación de los detectores usados en el dispositivo experimental. En rojo los cristales de LaBr_3 , en amarillo los cristales de LaCl_3 y en gris los detectores plásticos. El recubrimiento de teflón y la caja de aluminio aparecen transparentes para poder ver los cristales.

Usando la geometría que se muestra en la Fig. 3.1 se va comprobar si los espectros simulados coinciden con los obtenidos experimentalmente. Esta coincidencia no es evidente debido a que al estar utilizando detectores tipo phoswich aparecen los mismos picos a distintas energías para cada cristal en el mismo espectro como se muestra en la Fig. 3.2.

Las fuentes simuladas se han definido como fuentes planas circulares de medio milímetro de radio de emisión isotrópica situadas a 1 mm del centellador plástico a la altura de la unión entre los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 .

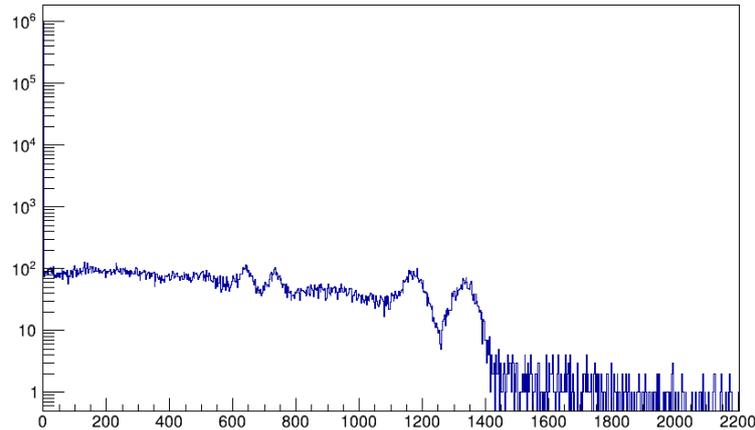


Figura 3.2: *Espectro simulado de una fuente de ^{60}Co en un detector phoswich.*

La calibración en energía se va a realizar utilizando los picos del LaBr_3 . La relación entre el canal en el que aparece una energía en el LaBr_3 y en el LaCl_3 , se ha obtenido a partir de la emisión de luz respecto al % del NaI (*photoelectron yield*) que aparece en la Tabla 2.3. Si se divide el valor máximo del LaCl_3 (90) entre el valor del LaBr_3 (165) se obtiene un valor de 0.55 el cual hace referencia a la relación entre la cantidad de electrones emitidos en el PMT para un fotopico a la misma energía.

Para reproducir en las simulaciones el efecto causado por la diferente producción de fotoelectrones de cada cristal se aplica un factor de 0.55 a la energía depositada en el cristal de LaCl_3 . Para comprobar la fiabilidad de ese factor se van a comparar los espectros simulados con las medidas experimentales de las fuentes de calibración γ (Fig. 3.3).

Los espectros coinciden en gran medida, las mayores diferencias son que en el espectro en el que se ha usado la fuente de ^{22}Na el pico de 1274 keV es más ancho en la simulación, probablemente debido a la inexactitud calibración preliminar del espectro experimental. La otra diferencia es que en el espectro experimental en el que se ha usado la fuente de ^{60}Co aparece un pico alrededor de los 1460 keV que no aparece en la simulación. Sin embargo este pico es debido al ^{40}K procedente de la radiación ambiental natural que no ha sido introducido en la simulación.

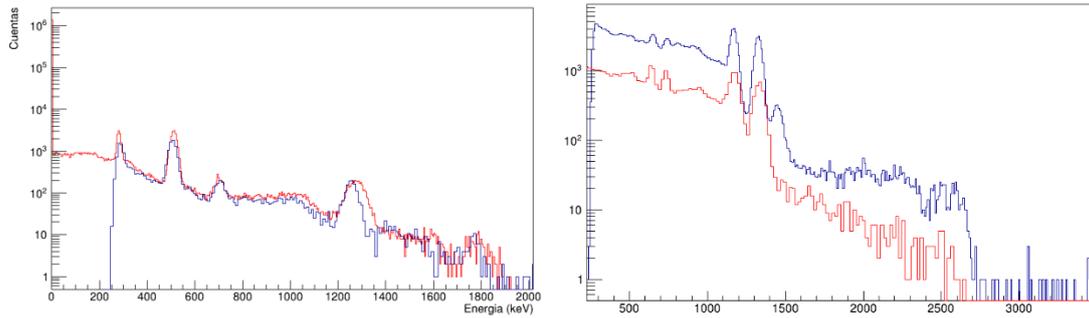


Figura 3.3: Comparación de espectros experimentales (azul) y simulados (rojo) para uno de los detectores phoswich del CEPA4 tomados con la fuente de ^{22}Na (izquierda) y ^{60}Co (derecha).

3.2 Simulación de la detección de muones

Una vez definido adecuadamente el detector se va a emplear para deducir el espectro esperado en la detección de muones atmosféricos. Para realizar estas simulaciones se tiene que crear un generador de muones que actúe de forma que reproduzca las propiedades de los muones atmosféricos en la corteza terrestre. Para ello, se ha definido la superficie de una esfera de 20 cm de radio rodeando el dispositivo. Pese a que los muones que se detectan mediante el dispositivo experimental pueden tener carga positiva o negativa, como este hecho no afecta a la detección, se han simulado solamente μ^- . La fuente emite muones con una energía inicial de 4 GeV en todas las direcciones siguiendo una distribución espacial tipo coseno [38] como se puede ver en la Fig. 3.4.

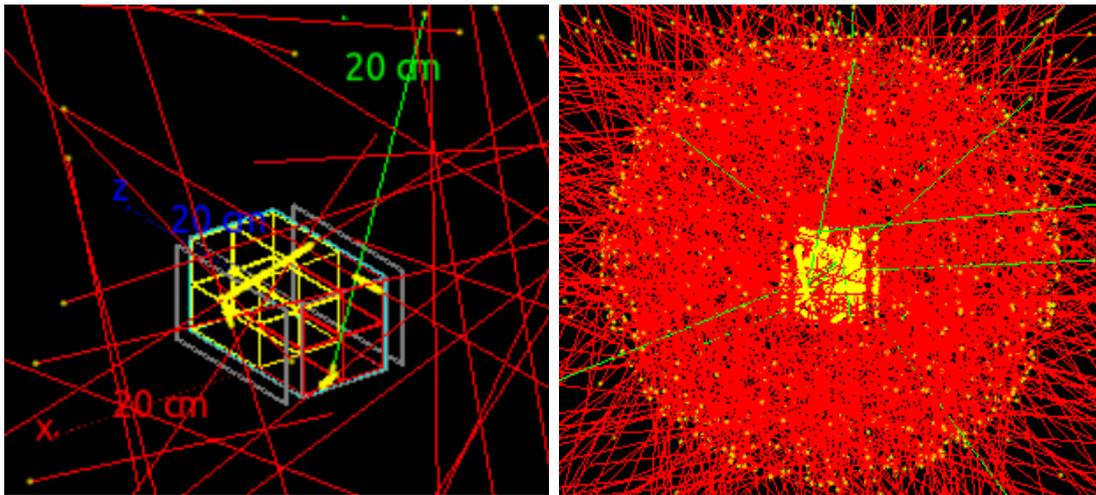


Figura 3.4: Generador de muones atmosféricos en Geant4. En la figura de la izquierda se observa la generación en todas las direcciones y en la de la derecha se observa la generación empleando un número más elevado de muones generados.

Con la fuente definida se pueden obtener los espectros de los detectores. A diferencia de las medidas experimentales, las simulaciones pueden proporcionar de forma separada los espectros de los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 , lo cual permite entender más fácilmente la forma de estos. De esta forma se pueden analizar los espectros en función de la energía que se espera que depositen los muones atmosféricos en cada uno de los detectores.

La energía depositada por centímetro al atravesar cada cristal para muones de 1 GeV es de 7.38 MeV/cm en el LaBr_3 y de 5.64 MeV/cm para el LaCl_3 , y al ser partículas de mínima ionización (MIP) estos valores se pueden extrapolar a 4 GeV. Estos valores se han obtenido mediante simulaciones con la herramienta web nucleonica [39].

Estando el detector CEPA4 en posición tumbada, es decir, los muones atraviesan solamente un tipo de cristal, la longitud de detector que atraviesan los muones en el CEPA4 es de 2.7 cm (Fig. 1.3). Por lo que la energía depositada en cada uno de los cristales será de 19.93 y 15.23 MeV, para los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 respectivamente. En estos valores de energía es donde se espera encontrar picos en el espectro tanto simulado como experimental.

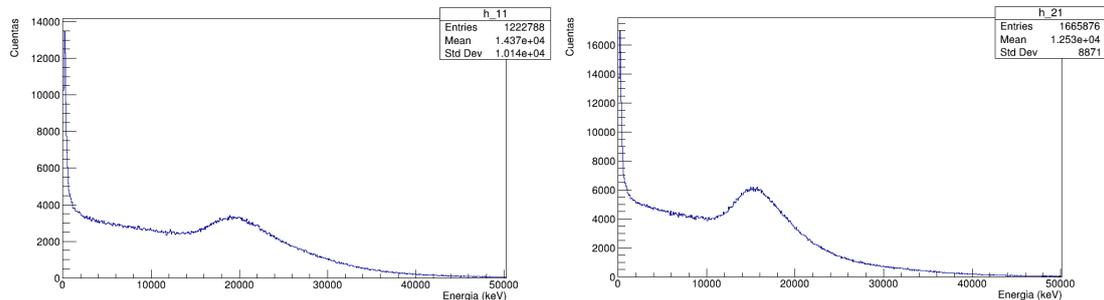


Figura 3.5: *Espectros simulados de los muones para el cristal de LaBr_3 a la izquierda y para el cristal de LaCl_3 a la derecha con el detector CEPA4 en posición tumbada.*

Como se puede observar en la Fig. 3.5, los muones forman un continuo, sin embargo se pueden apreciar unos picos a las energías de 19.93 y 15.23 MeV que corresponden a los muones que atraviesan los cristales de forma perpendicular, y por tanto atravesando exactamente 2.7 de los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 , respectivamente. La definición de esos picos se puede mejorar mediante el uso de las coincidencias con los plásticos de forma que solo se muestren en el espectro los muones que atraviesen los dos plásticos además del CEPA4, puesto que de esta manera se restringen las posibles trayectorias a aquellas verticales con un cierto rango angular (Fig. 1.6).

Este espectro estará calibrado para los picos de LaBr_3 , de forma que, como se ha comentado anteriormente, el pico de 15.23 MeV de los muones al atravesar el cristal de LaCl_3 aparecerá escalado en energía por un factor de 0.55, este cambio en el valor aparente de la energía lo llamaremos *energía aparente* debido a que realmente no es la energía real depositada en el cristal de LaCl_3 .

En el espectro mostrado en la Fig. 3.6 se presenta el espectro que se obtendría experimentalmente mediante coincidencias, apareciendo los picos del LaCl_3 y del LaBr_3 a las energías de 8.26 y 19.93 MeV, respectivamente.

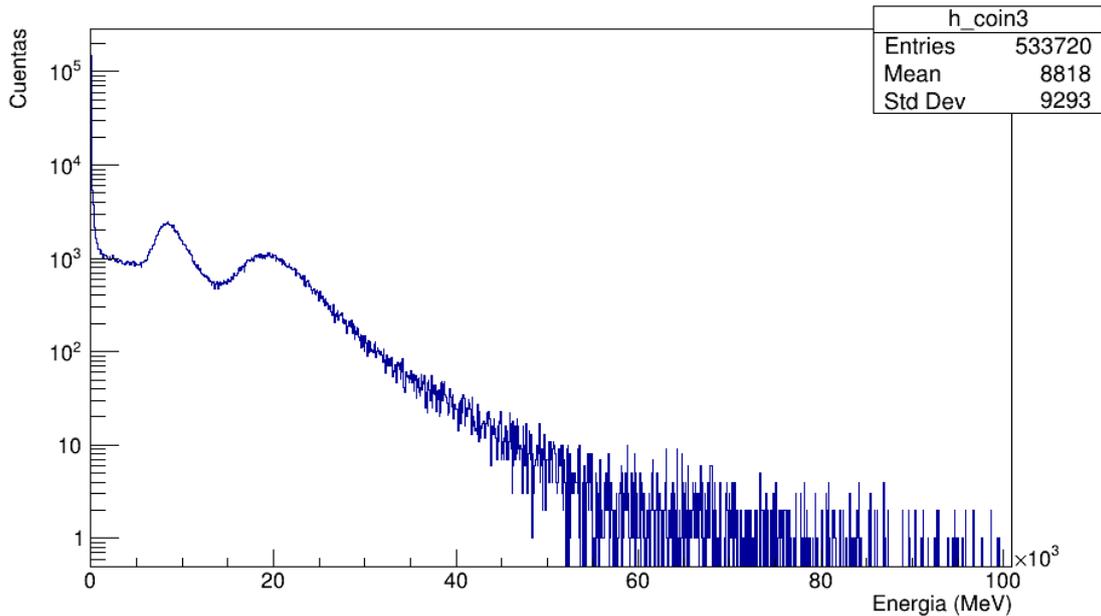


Figura 3.6: *Espectro simulado de los muones para uno de los phoswich del detector CEPA4 exigiendo la condición de coincidencia con los dos plásticos estando colocado en posición tumbada.*

El espectro mostrado en la Fig. 3.6 corresponde al que se quiere obtener con el dispositivo experimental para la geometría en la que el CEPA4 esta tumbado.

La otra geometría, denominada "de pie", consiste en situar los detectores plásticos de forma que al hacer las coincidencias los muones atraviesen el detector CEPA4 en la dirección del eje del phoswich, es decir, que atraviesen longitudinalmente los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 . Para ello uno de los plásticos se situará sobre los cristales de LaBr_3 y el otro bajo los PMTs. Para mejorar la eficiencia de las coincidencias los detectores plásticos se posicionarán en forma de cruz como se muestra en la Fig. 3.7.

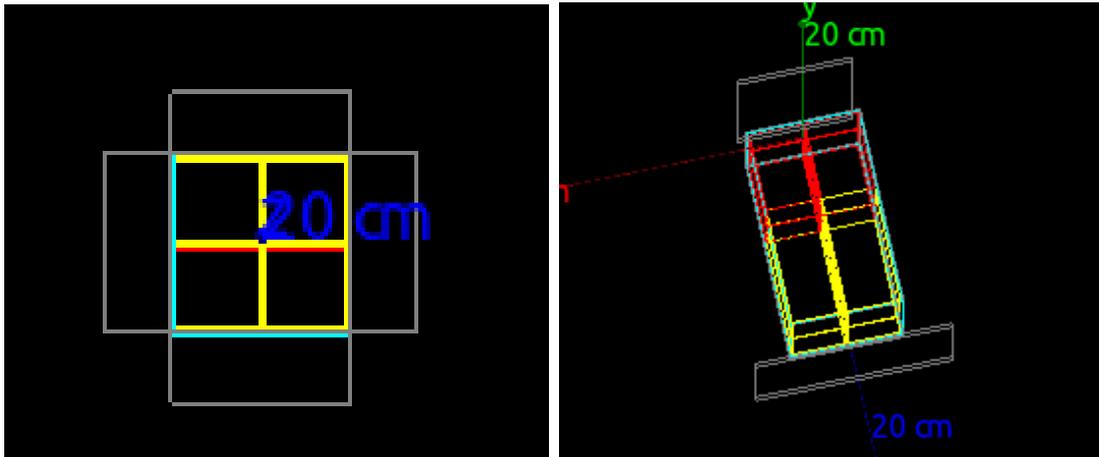


Figura 3.7: Geometría del dispositivo en posición de pie empleada en las simulaciones con *Geant4*.

Usando esta posición los muones depositarán más energía en el detector puesto que atraviesan una mayor longitud. Las nuevas distancias que atraviesan de cada cristal es de 4 cm para el LaBr_3 y 6 cm para el LaCl_3 (Fig. 1.3), por tanto, al atravesar perpendicularmente estos cristales centelleadores los muones depositarán una energía de 29.54 y 33.84 MeV para el LaBr_3 y para el LaCl_3 respectivamente.

Al comprobar estos valores mediante las simulaciones usando condiciones de coincidencias, se obtienen los espectros que se muestran en la Fig. 3.8. Estos valores corresponden a los de cada cristal (LaBr_3 y LaCl_3) experimentalmente si tuvieran una cadena electrónica independiente.

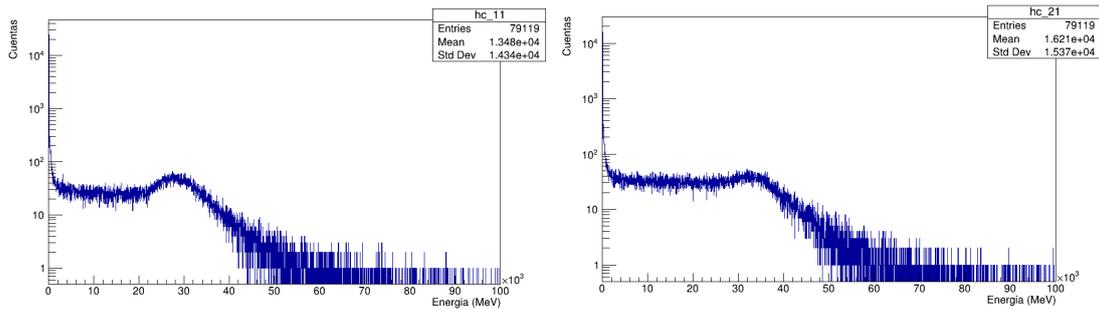


Figura 3.8: Espectros simulados de los muones para el cristal de LaBr_3 (izquierda) y para el cristal de LaCl_3 (derecha) con el detector CEPA en posición de pie.

Pese a haber utilizado el mismo número de muones que en la simulación anterior, la estadística de la Fig. 3.8 es mucho menor a la que se ha obtenido en la Fig. 3.5 debido a que la superficie que representa el detector CEPA4 es 3.7 veces menor, reduciéndose el contaje, como se explicó en la sección 1.3.

A diferencia de lo que pasaba en la posición tumbado, Los dos picos procedentes de los cristales no van a aparecer en el espectro. En este caso el mismo muon atraviesa ambos cristales apareciendo un solo pico en el espectro, debido a que comparten un mismo PMT.

Tabla 3.1: *Energías depositadas por los muones en los cristales centelleadores en ambas posiciones y la que se espera que aparezca en el espectro del CEPA4*

Cristal centellador	Energía depositada (MeV)	Energía aparente en el espectro (MeV)
<i>Posición Tumbada</i>		
LaBr ₃	19.93	19.93
LaCl ₃	15.23	8.26
<i>Posición De Pie</i>		
LaBr ₃	29.54	48.15
LaCl ₃	33.84	

El espectro energético obtenido en la simulación del detector de pie sin exigir coincidencias es el que se muestra en la Fig. 3.9.

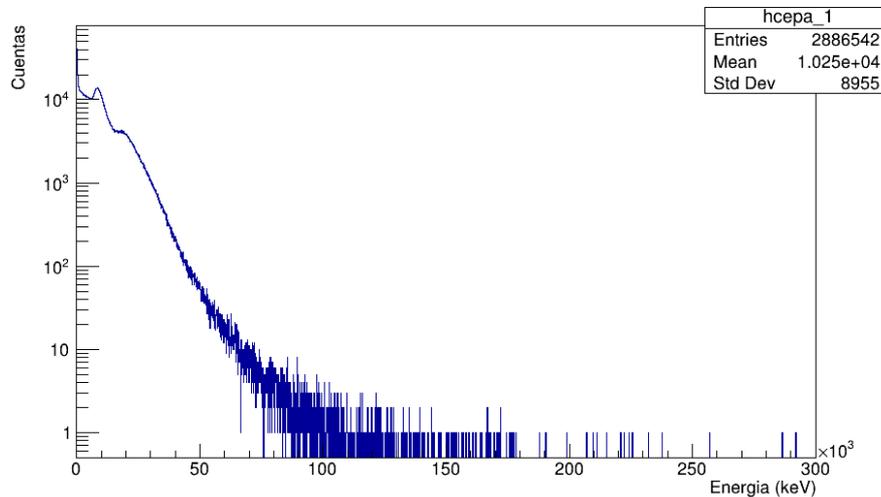


Figura 3.9: *Espectro simulado de los muones para uno de los phoswich del detector CEPA4 sin hacer coincidencias con los plásticos estando colocado en posición de pie.*

El espectro es el mismo que se ha obtenido con el dispositivo en configuración tumbada. Si se exige la condición de coincidencias con los dos detectores plásticos se obtiene el espectro energético de la Fig. 3.10.

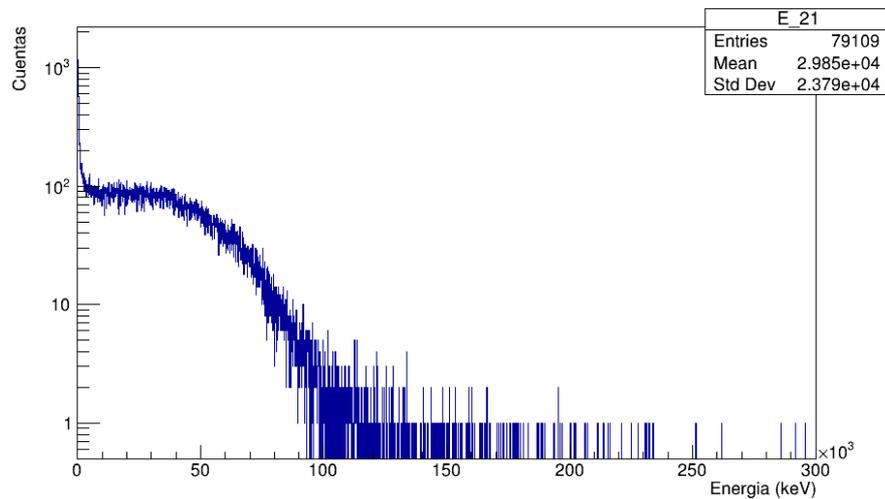


Figura 3.10: *Espectro simulado de los muones para uno de los phoswich del detector CEPA4 haciendo coincidencias con los plásticos estando colocado en posición de pie.*

En este espectro, la energía está mucho más distribuida siendo imposible distinguir el pico a la energía esperada pareciéndose el espectro mucho más a un continuo que empieza a decaer a partir de los 50 MeV.

Por otro lado, la estadística del espectro es muy pobre debido a que muy pocos de los muones que se han simulado son detectados por el dispositivos de coincidencias. En el programa se han generado 10^8 muones, de los cuales solo 79109 cumplen las condiciones de coincidencia.

Sin embargo, si no se exigen las condiciones de coincidencia se obtiene el espectro de la Fig. 3.9, que pese a tener una estadística mucho mayor, habiéndose detectado 2886542 muones, no es posible distinguir los que atraviesan completamente el phoswich en la dirección definida. Este hecho demuestra la importancia de implementar un dispositivo de coincidencias.

Al atravesar ambos cristales se puede separar las señales de ambos cristales y crear una estructura similar a un detector tipo telescopio, pudiendo generar espectros en dos dimensiones mostrando en un eje la energía depositada en uno de los cristales (normalmente el LaBr_3), y en el otro eje la energía depositada en el total del detector [1].

Usando el detector CEPA4 como telescopio se pueden obtener espectros bidimensionales de muones como se muestra en la Fig. 3.11. Sin embargo, experimentalmente no se han podido obtener debido a que no se disponia la electrónica necesaria para digitalizar y analizar la señal.

Esta forma de utilizar el detector CEPA ha sido anteriormente estudiada para protones [1], con una energía y dirección mejor definida que los muones que se ven en la Fig. 3.11.

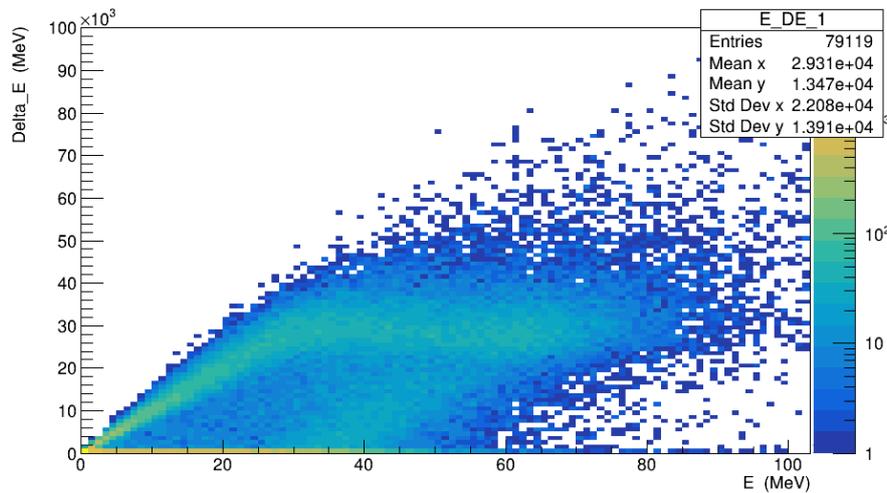


Figura 3.11: *Espectro simulado de la energía depositada por los muones en el cristal de LaBr_3 , respecto a la depositada en todo el detector ($\Delta E/E$).*

En la Fig. 3.11 se puede observar cómo los muones atraviesan el detector depositando energía de formas muy diferente pero que se concentra formando una línea ascendente la cual corresponde a los muones que atraviesan distintos espesores, unicamente el bromuro. Esa línea se va difuminando hasta acabar en una línea horizontal paralela al eje X que corresponde a los muones que después de depositar toda la energía posible en el LaBr_3 han depositado, además parte de su energía en el LaCl_3 .

4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el transcurso de este capítulo se van a mostrar y analizar los resultados obtenidos mediante el dispositivo experimental. Estos resultados han sido obtenidos en dos medidas separadas usando las dos geometrías introducidas en el capítulo 3 y cuyo análisis ocupará los dos primeras secciones del capítulo, dejando la tercera para exponer las conclusiones.

Los detectores del CEPA4 que se han utilizado para realizar las medidas son los phoswich 2 y 3 que usan unos fototubos Hamamatsu R7600 de 10 dínodos y R11187 de 8 dínodos, respectivamente.

4.1 Dispositivo en posición tumbada

La primera medida ha sido realizada colocando el dispositivo en posición tumbada, es decir, horizontal con los detectores plásticos en posición paralela a los laterales del CEPA4 como se muestra en la Fig. 4.1. Los detectores estuvieron midiendo durante 69 horas 11 minutos y 21 segundos, con un voltaje de 600 V en el detector 2, 500 V en el detector 3 y 1100 V en los plásticos.

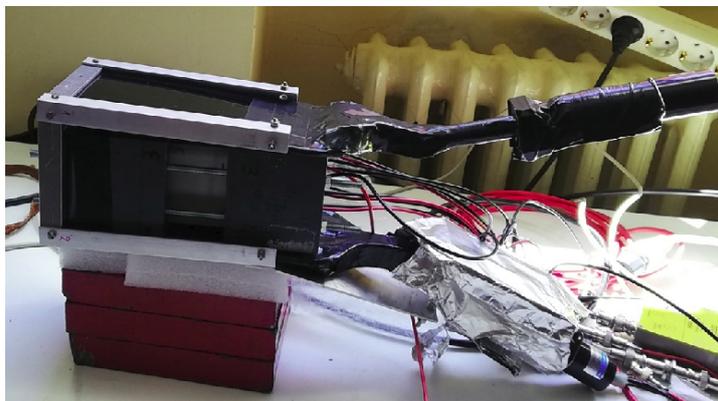


Figura 4.1: *Fotografía tomada del dispositivo experimental en posición tumbada.*

Para calibrar en energía, así como para obtener la resolución para bajas energías, se han utilizado las fuentes de calibración γ ^{22}Na y ^{60}Co . Estas fuentes se han colocado de forma separada cada una más próxima a uno de los detectores.

La calibración inicial se ha hecho solamente usando las fuentes γ para identificar los picos y luego se procederá a un análisis mas detallado.

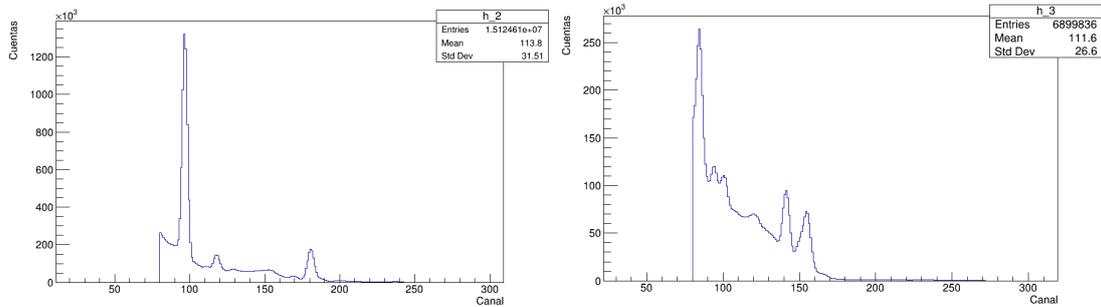


Figura 4.2: *Espectros lineales sin calibrar del CEPA₄ tumbado. A la izquierda el espectro del detector 2 en el que se ven los picos del ^{22}Na y a la derecha el espectro del detector 3 donde se ve el pico de 511 keV del ^{22}Na y los picos del ^{60}Co .*

Como se ha comentado anteriormente la calibración se va a realizar usando los picos generados por el cristal de LaBr_3 , debido a esto solo se usarán dos picos para el detector 2 (511 y 1274) y tres picos para el detector 3 (511, 1173 y 1332). Las rectas de calibración se pueden ver en la Fig. 4.3.

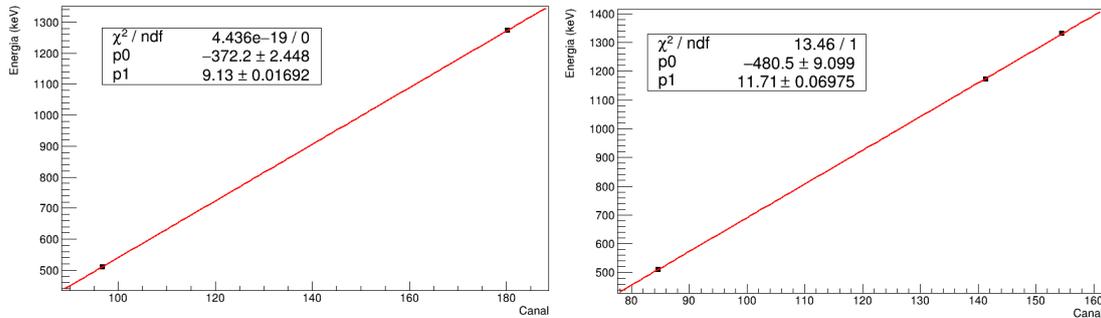


Figura 4.3: *Rectas de calibración preliminar para los detectores 2 (izquierda) y 3 (derecha) en posición tumbada.*

Los espectros calibrados se muestran en la Fig. 4.4. Al mostrar el espectro de energías en escala logarítmica, se pueden apreciar con más detalle las estructuras de baja estadística que aparecen.

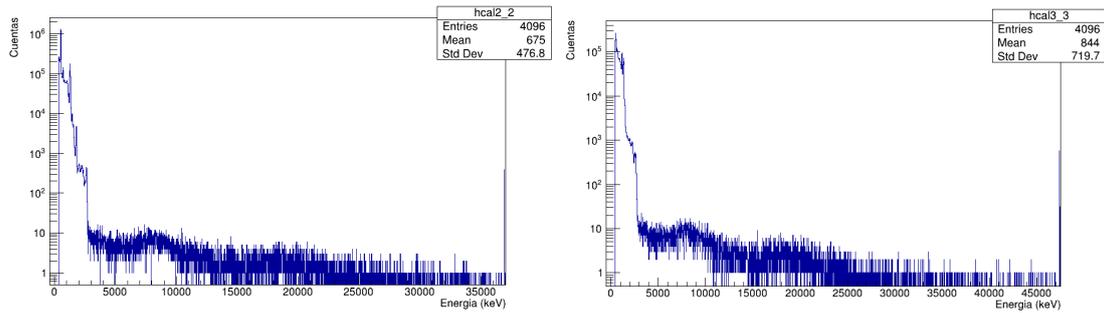


Figura 4.4: *Espectros logarítmicos con primera calibración usando las fuentes del dispositivo tumbado. A la izquierda el espectro del detector 2 y a la derecha el espectro del detector 3.*

El primer hecho que llama la atención a simple vista es que el rango dinámico conseguido con el detector 3 es mucho mayor que el obtenido mediante el detector 2, esto se debe al fototubo utilizado en el detector 3 con un menor número de dinodos.

Si nos centramos en la parte de bajas energías hasta 3 MeV, como se muestra en la Fig. 4.5, se observan muchas más cuentas que las debidas a las fuentes en el rango aproximado de 1.5 MeV hasta 3 MeV.

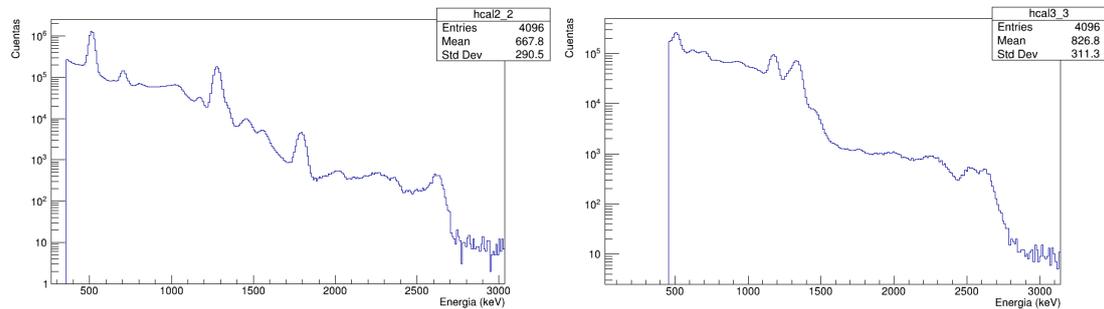


Figura 4.5: *Espectros logarítmicos con primera calibración usando las fuentes del dispositivo tumbado, mostrando el rango de energía de 0 a 3 MeV. A la izquierda el espectro del detector 2 y a la derecha el espectro del detector 3.*

Estas cuentas son debidas principalmente a la radiación interna de los cristales del detector phoswich. El isótopo del lantano ^{138}La , con una abundancia del 0.09%, se desintegra naturalmente emitiendo radiación γ , β y α [40].

Este hecho genera un autoconteo en el detector producido por esta contaminación. En la Fig. 4.6 se muestra el espectro de contaminación interna de un cristal de LaBr_3 .

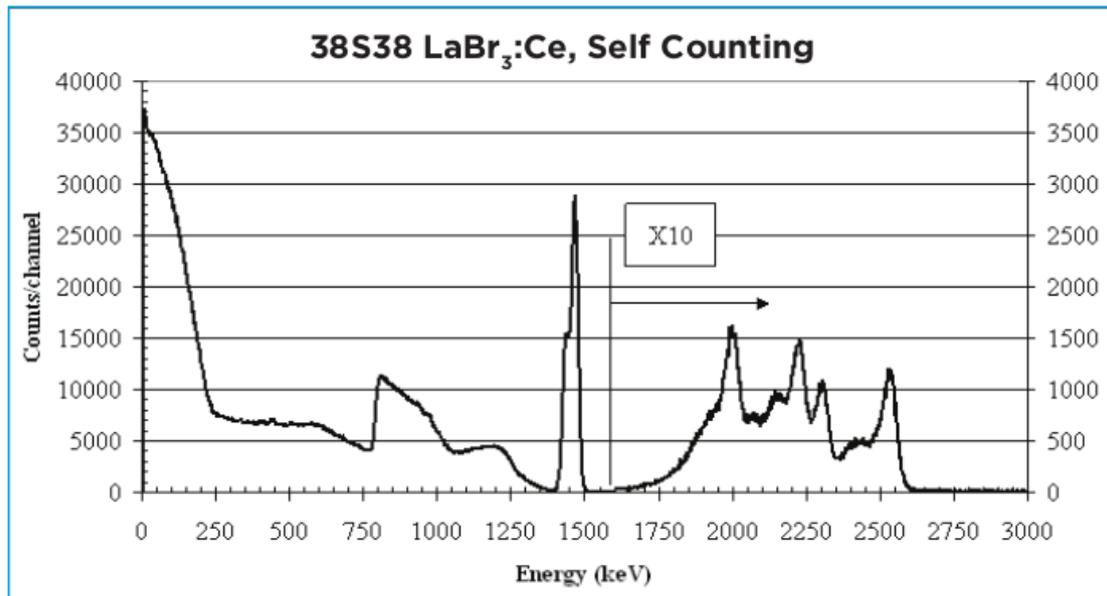


Figura 4.6: Contaminación interna del LaBr_3 . Hasta 250 keV corresponde al continuo β^- , a 789 keV se emite un γ ensanchado por otro continuo β , aparece otro γ a 1436 keV junto a rayos X y por último, un espectro α debido al ^{227}Ac [40].

Como se muestra en la figura los picos de 789 keV y 1436 keV se emiten en coincidencia con emisión β^- y rayos X, debidos al decaimiento del ^{138}La en ^{138}Ce y ^{138}Ba , respectivamente. Por otro lado, el espectro α no es debido al lantano, sino a la contaminación debida al ^{227}Ac que forma parte de la cadena de desintegración del ^{235}U [40].

El actinio es parte de la misma familia que el lantano en la tabla periódica por lo que comparten las mismas propiedades químicas haciendo difícil la separación. No se ha llegado a una conclusión de donde provienen las energías medidas en el espectro, sin embargo se sabe que proceden del ^{227}Ac y se han medido las energías sabiendo que el alfa más energético es de alrededor de 2630 keV [41].

En el espectro obtenido mediante el detector 2 en la Fig. 4.5 se observan claramente estos picos debidos a la contaminación interna, además del pico suma del ^{22}Na y el gamma emitido por el ^{40}K , como se muestra en la Fig. 4.7. El espectro obtenido mediante el detector 3 es mucho más plano apareciendo menos picos, sin embargo sigue siendo posible ver el efecto del espectro α hasta los 2700 keV. Debido a que en ambos espectros se observa el pico más energético de la contaminación α se va a utilizar para la calibración final.

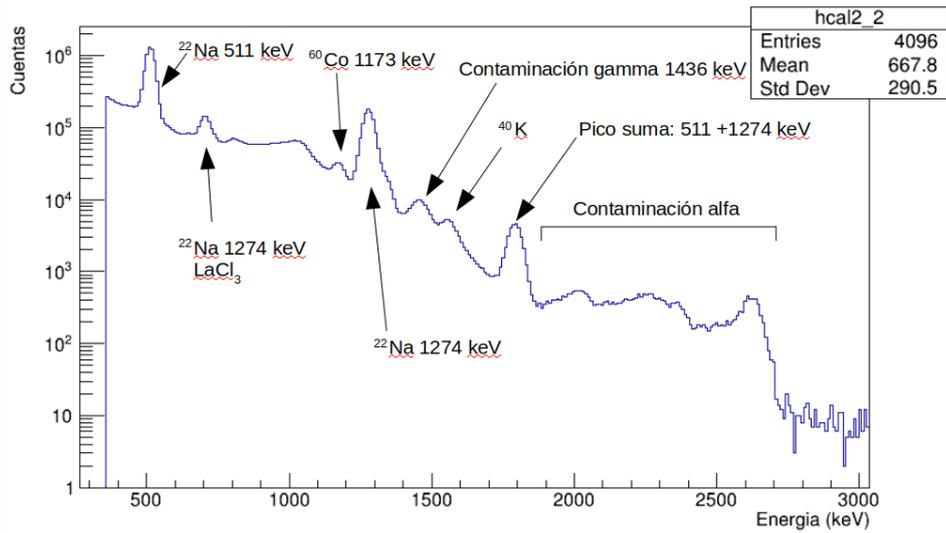


Figura 4.7: Analisis del espectro del detector 2 mostrando la procedencia de cada pico a bajas energías.

Si añadimos el alfa de más energía a la calibración se obtienen las rectas de calibración que se muestran en la Fig. 4.21, los valores utilizados se muestran en la Tabla 4.1.

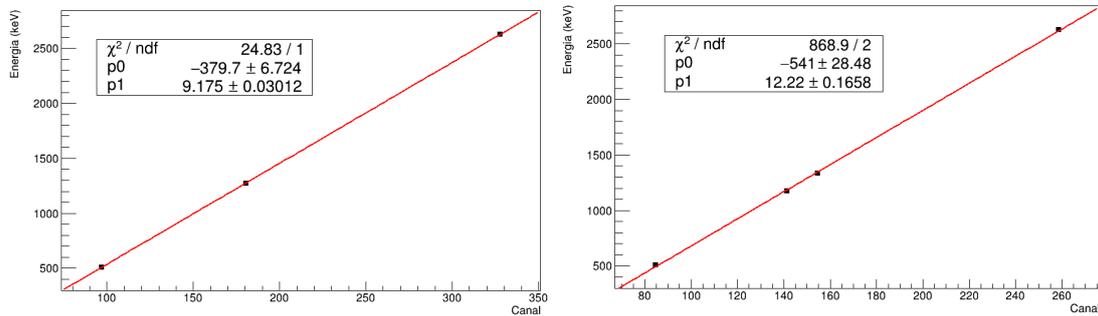


Figura 4.8: Rectas de calibración obtenidas al añadir el pico alfa de 2630 keV a la calibración.

Tabla 4.1: Valores de canal y energía de cada punto que se ha utilizado para la recta de calibración para los detectores 2 y 3 del CEPA4.

Detector	Energía (keV)	Canal	Detector	Energía (keV)	Canal
<i>Detector 2</i>			<i>Detector 3</i>		
	511	96.80		511	84.61
	1274	180.68		1173	141.42
	2630	327.88		1332	154.56
				2630	258.69

Una vez hecha la calibración se va a proceder a calcular el tiempo real y el tiempo muerto de la medida utilizando el espectro del pulser que se muestra en la Fig. 4.9.

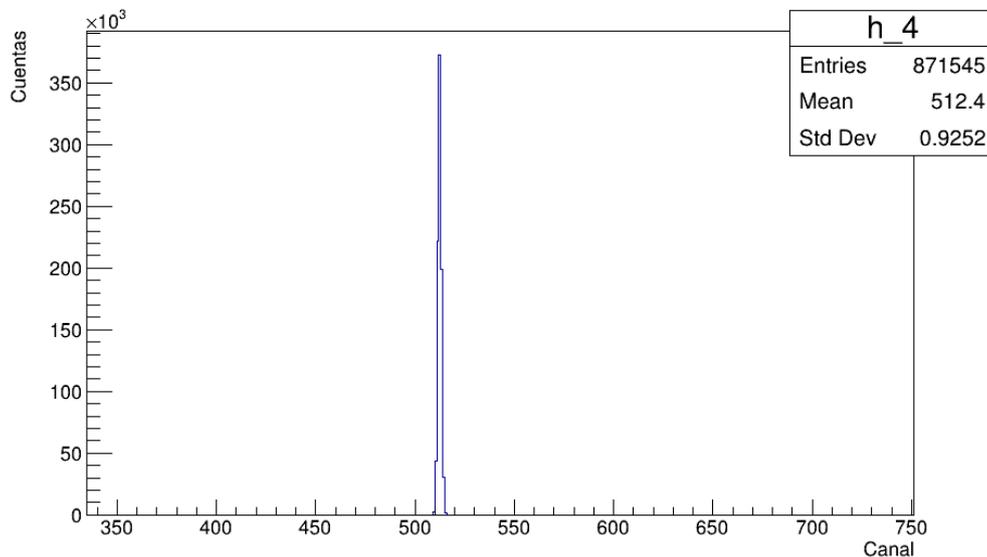


Figura 4.9: *Espectro del pulser obtenido con el dispositivo en posición tumbada.*

La integral del pulser tiene un valor de 871545 cuentas, teniendo en cuenta que la frecuencia del pulser es de 5 Hz, se obtiene un tiempo activo de medida de 174309 segundos. Si se compara este valor con el tiempo de la medida (249081) se obtiene que el tiempo muerto ha sido del 30 %.

Si se comparan estos espectros con los obtenidos mediante las simulaciones se puede comprobar si los valores experimentales concuerdan con lo esperado.

Lo primero que se va a comparar es el número de muones detectado mediante el dispositivo experimental. El número estimado es de $0.45 \mu/s$ (sección 1.3), sin embargo, usando las simulaciones se ha visto que el cociente entre los seleccionados por la condición de coincidencia y el número total de muones es del 0.21, es decir que la tasa esperada de detección sería de $0.096 \mu/s$.

Si multiplicamos este valor por el tiempo activo de medida obtenemos un valor de 16758.15 muones. Este valor engloba los muones de todas las energías, sin embargo, debido a las cuentas generadas por la fuente, es difícil saber que cuentas son debidas a los muones y cuales a la fuente. Para solucionar este problema se van a aceptar solamente a los muones que han depositado una energía mayor a 3 MeV. El porcentaje de muones que depositan más de 3 MeV respecto al número total de muones es de 0.61. Por tanto el valor esperado es de 10277,1, y el valor real es de 1924 en el detector 2 y 1774 en el detector 3.

El valor obtenido es 5 veces menor que el valor esperado, esto se cree que es debido a que el valor umbral de la energía para los detectores plásticos es cercano o mayor a 500 keV siendo demasiado alto, perdiendo mucha estadística, respecto a la simulación en la que no hay un umbral definido.

El siguiente paso va a ser comparar la forma de los espectros simulados con los obtenidos experimentalmente. La comparación se va a realizar para los espectros en coincidencia con 1 y 2 detectores plásticos.

La comparación haciendo coincidencias solamente con un centelleador plástico se muestra en la Fig. 4.10.

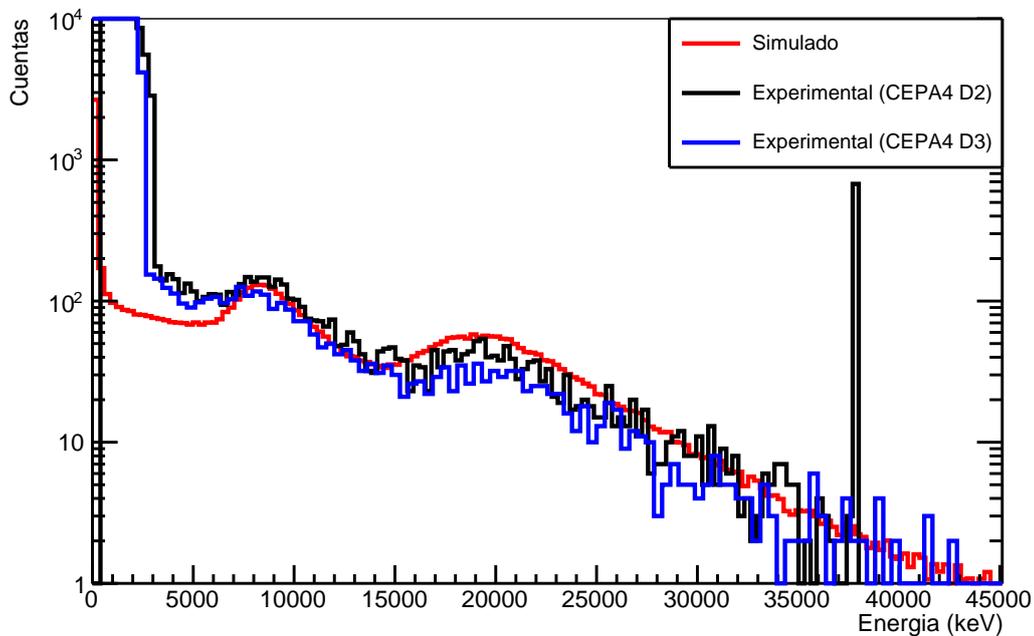


Figura 4.10: *Comparación de los espectros experimentales y simulados de coincidencia con 1 plástico.*

En la Fig. 4.10 se observa claramente que los picos a altas energías de los espectros experimentales corresponde a los muones que han atravesado los cristales de LaBr_3 y LaCl_3 . La forma de los espectros es similar a excepción de que en los espectros experimentales aparecen más cuentas a bajas energías y que en el detector 2 del CEPA4 hay un acumulamiento de cuentas en el último canal debido a que la energía que ha depositado estaba fuera del espectro. Las cuentas a bajas energías se deben a las fuentes y la contaminación interna.

La misma comparación haciendo coincidencias con dos plásticos se muestra en la Fig. 4.11.

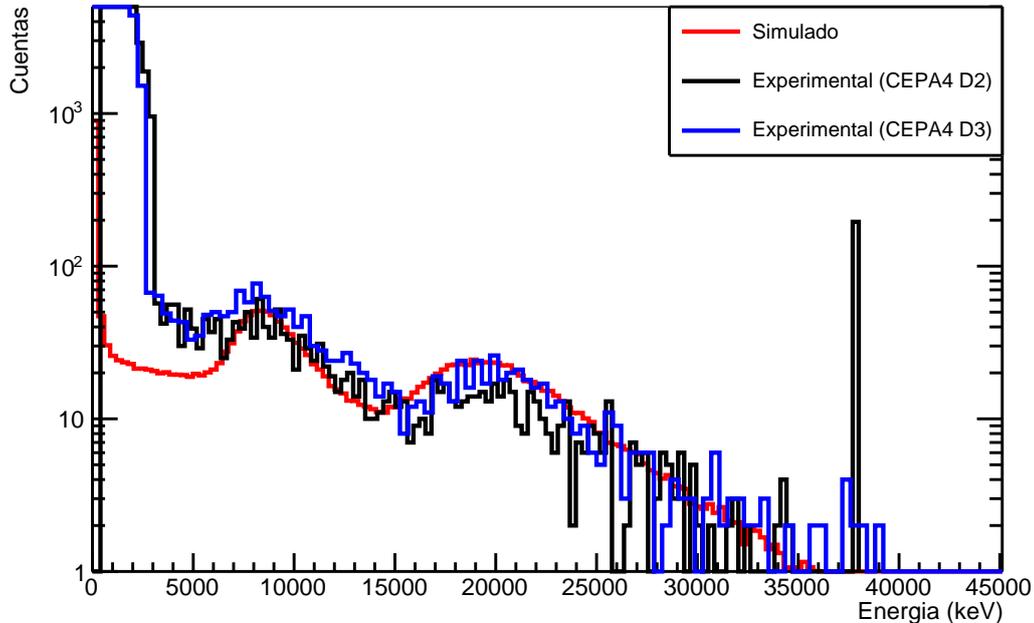


Figura 4.11: *Comparación de los espectros experimentales y simulados de coincidencia con 2 plásticos.*

Los espectros experimentales se ajustan a los espectros simulados tanto en la posición de los picos como en la anchura de estos. El rango dinámico se ha conseguido adecuar y se puede ver todo el espectro de los muones. Es cierto que aparecen algunas cuentas que sobrepasan el rango para el detector 2 (pico a 39 MeV), sin embargo esto no sucede para el detector 3 ni para el simulado. Además se puede ver la caída de la cola del continuo que forman los muones.

El último paso del análisis para el dispositivo en posición tumbada va a ser calcular la resolución en energía. No se puede calcular adecuadamente la resolución de los picos de muones. Como el espectro simulado se adecúa a los picos de altas energías se podría estimar suponiendo que la resolución de ambos es la misma o similar. Sin embargo, la anchura de este pico depende más del ángulo de incidencia con la energía depositada que con la resolución intrínseca del detector. La resolución de los γ generados por las fuentes se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores de la resolución y su error para los picos gamma detectados.

Detector	Fuente	Energía (keV)	Resolución (%)	Error (%)
Detector 2	^{22}Na	511	6.90	0.006
Detector 2	^{22}Na	1274	3.58	0.012
Detector 3	^{60}Co	1173	4.83	0.023
Detector 3	^{60}Co	1333	5.88	0.035

Los valores de resolución para la radiación γ emitida por la fuente está por debajo del 6% $\Delta E/E$ el cual era el requisito. La única resolución que está por encima de ese valor es el pico de 511 keV, sin embargo, esto es debido a que no es un γ característico, sino que se produce por aniquilación electrón-positrón, lo que empeora su resolución.

4.2 Dispositivo en posición de pie

Esta segunda medida ha sido realizada colocando el dispositivo en posición de pie, es decir, vertical con los detectores plásticos colocados, uno sobre la ventana de LaBr_3 y el otro bajo el fotomultiplicador del CEPA4 como se muestra en la Fig. 4.12. Los detectores estuvieron midiendo durante 68 horas 27 minutos y 59 segundos, con un voltaje de 600 V en el detector 2, 500 V en el detector 3 y 1100 V en los plásticos.

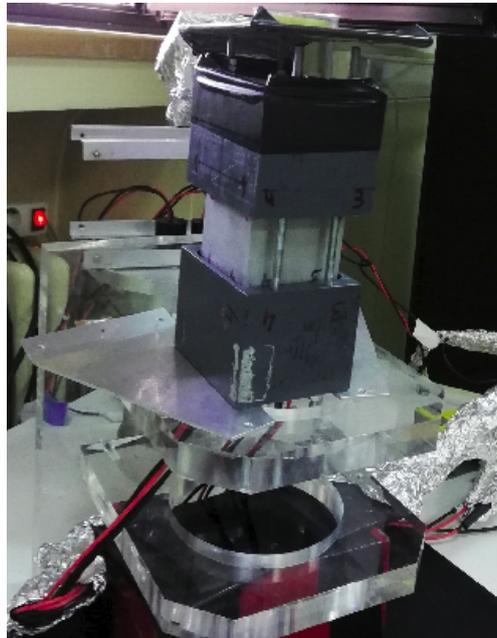


Figura 4.12: Fotografía tomada del dispositivo experimental en posición de pie.

Al igual que en el apartado anterior se ha utilizado una fuente de ^{22}Na para sacar la resolución a bajas energías, así como para calibrar adecuadamente el espectro. El efecto de estas fuentes se observa claramente en la Fig. 4.13.

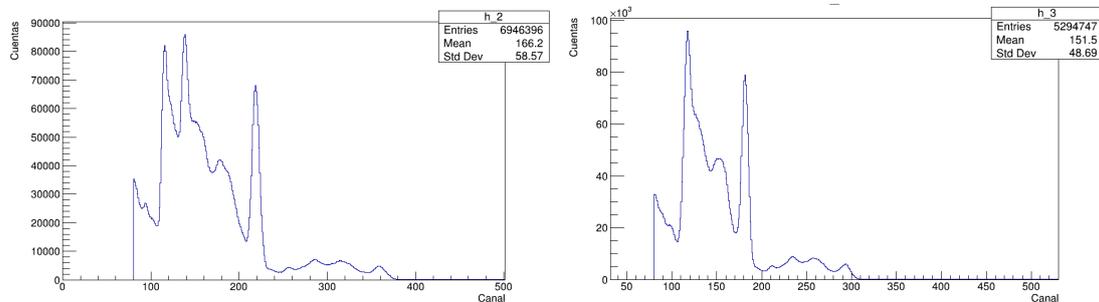


Figura 4.13: *Espectros lineales sin calibrar de los detectores 2 (izquierda) y 3 (derecha) del CEPA4 depie utilizando una fuente de ^{22}Na .*

Al estar utilizando solamente una fuente, es sencillo identificar los picos que aparecen en el espectro, debido a ello se van a identificar antes los picos, para luego realizar la calibración usando los más característicos. Los picos que aparecen en el detector 2 se muestran en la Fig. 4.14.

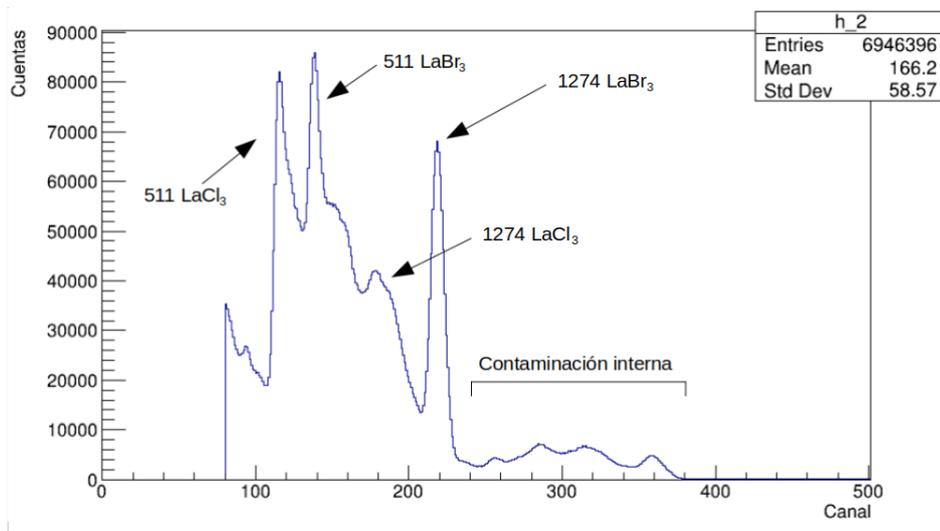


Figura 4.14: *Análisis del espectro del detector 2 mostrando la procedencia de cada pico a bajas energías.*

Al igual que en el espectro tumbado se muestra el efecto de la contaminación interna y, por tanto, se añadirá el α de mayor energía para realizar la calibración como punto de mayor energía.

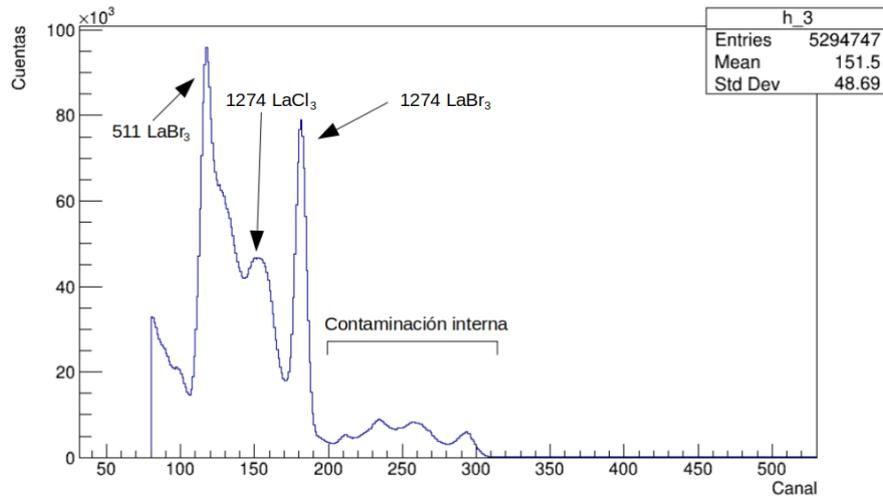


Figura 4.15: *Análisis del espectro del detector 3 mostrando la procedencia de cada pico a bajas energías.*

En el espectro del detector 3 mostrado por la Fig. 4.15, se ve claramente como el umbral de energía mínimo corta el pico de 511 keV para el cristal de LaCl₃. Sin embargo, se ven claramente todos los picos del cristal de LaBr₃ lo que hace sencilla la calibración.

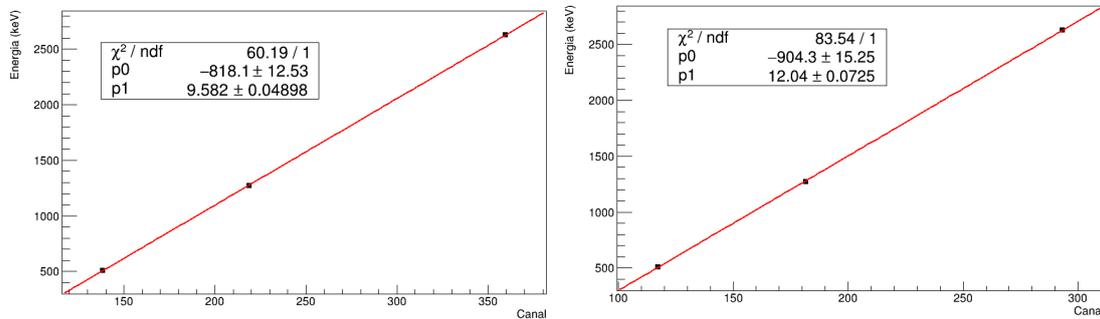


Figura 4.16: *Rectas de calibración obtenidas para los dos detectores en posición de pie.*

Tabla 4.3: *Valores de canal y energía de cada punto que se ha utilizado para la recta de calibración.*

Detector	Energía (keV)	Canal	Detector	Energía (keV)	Canal
<i>Detector 2</i>			<i>Detector 3</i>		
	511	138.3		511	117.17
	1274	219		1274	181.55
	2630	359.63		2630	293.35

Una vez hecha la calibración se va a calcular el tiempo muerto usando el pulser.

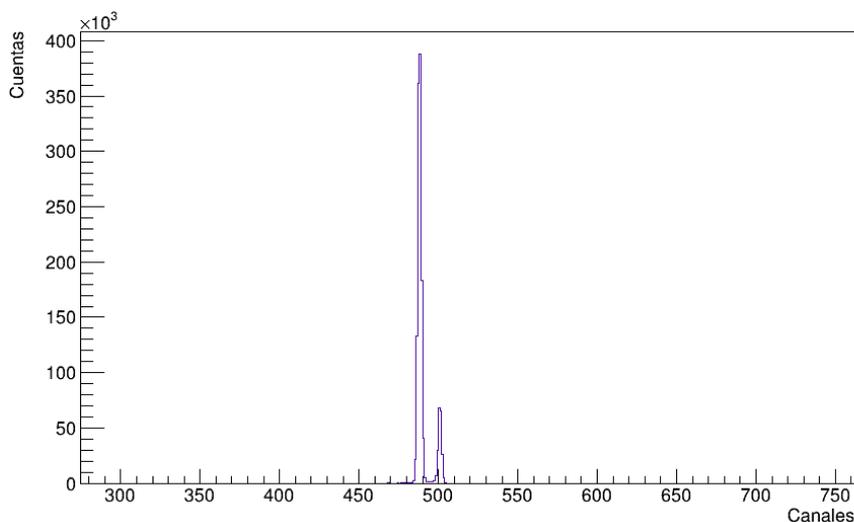


Figura 4.17: *Espectro del pulser para el dispositivo de pie*

La integral del pulser tiene un valor de 1140229 cuentas, siendo la frecuencia del pulser es de 5 Hz, se obtiene un tiempo de 269453 segundos. Si se compara este valor con el tiempo de la medida se obtiene que el tiempo muerto ha sido del 7.5 %.

Si se comparan estos espectros con los obtenidos mediante las simulaciones se puede comprobar si los valores experimentales concuerdan con lo esperado.

Lo primero que se va a comparar es el número de muones detectado mediante el dispositivo experimental. El número supuesto es de $0.1215 \mu/s$, sin embargo, usando las simulaciones se a visto que la diferencia entre el número total de muones y los seleccionados por la condición de coincidencia es del 0.027, es decir que el número real sería de $0.00333 \mu/s$.

Si multiplicamos este valor por el tiempo de medida obtenemos un valor de 3796 muones. Este valor engloba los muones de todas las energías, sin embargo, debido a las cuentas generadas por la fuente, es difícil saber que cuentas son debidas a los muones y cuales a la fuente. Para solucionar este problema se van a aceptar solamente a los muones con una energía mayor a 3 MeV. El porcentaje de muones que depositan más de 3 MeV respecto al número total de muones es de 0.86. Por tanto el valor esperado es de 3275, y el valor real es de 2060951 en el detector 2 y 1561004 en el detector 3.

Esta discrepancia indica que el dispositivo de coincidencias no ha ido bien para coincidencias con dos plásticos, ya que es imposible que el número de muones detectados sea mayor que el esperado, al menos en tal magnitud.

Si cree que este fallo se ha debido a que el plástico de abajo ha fallado. Si se compara los espectros experimental y simulados para un único plástico se obtiene el resultado mostrado en la Fig. 4.18.

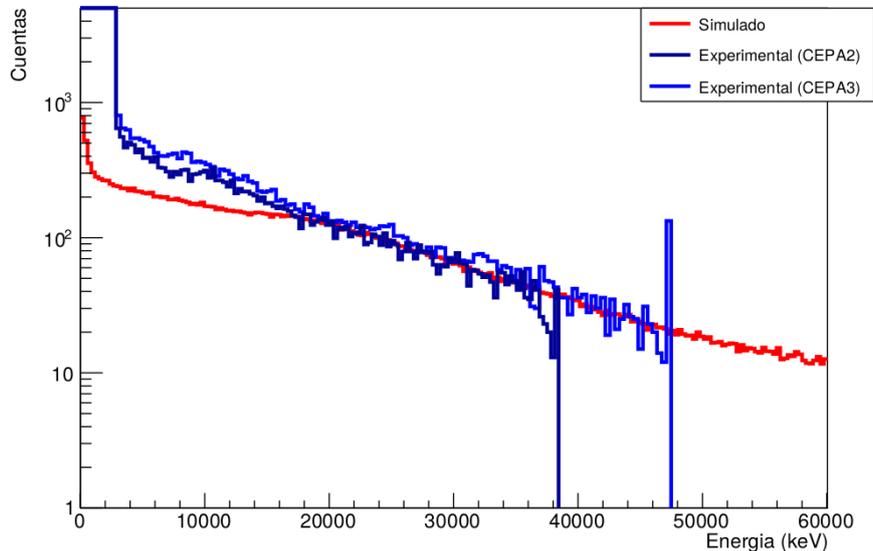


Figura 4.18: Comparación de los espectros experimental (azules) y simulado (rojo) con coincidencias usando un sólo plástico con el dispositivo en posición de pie

El espectro coincide, apareciendo unas pocas más cuentas a bajas energías en los espectros experimentales. Sin embargo, debido a que el rango energético no se ha cubierto y a los problemas del plástico se ha repetido la medida.

Para asegurar un buen rango dinámico, así como para intentar menguar las cuentas a bajas energías se ha dividido la siguiente medida en dos. Una con fuente para calibrar en energía y obtener las resoluciones, y otra solamente con los muones.

El voltaje aplicado a los detectores es de 388 V para el detector 2, 456 V para el detector 3 y 1600 V para los plásticos. La fuente que se ha utilizado es ^{60}Co .

Al aumentar el rango dinámico se ha dificultado la visualización de la radiación gamma procedente de las fuentes de calibración debido a su baja energía en comparación. Debido a este hecho, en el espectro a bajas energías del detector 2 en estas condiciones mostrado en la Fig. 4.19, no se puede ver el pico de bajas energías del ^{60}Co . En el espectro a bajas energías del detector 2 en estas condiciones mostrado en la Fig. 4.20, se distinguen correctamente los dos picos.

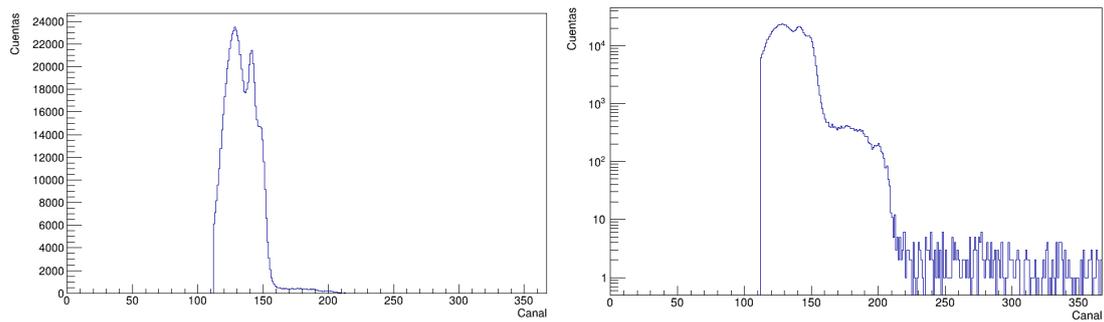


Figura 4.19: *Espectro en lineal (izquierda) y logarítmico (derecha) del ^{60}Co en el detector 2 de pie.*

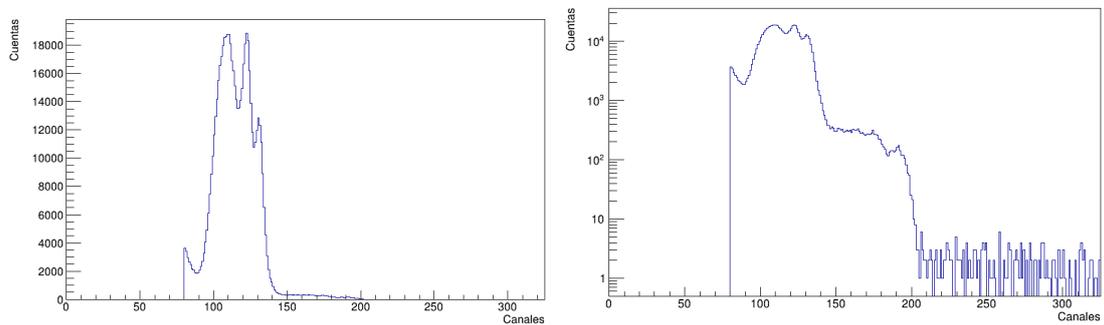


Figura 4.20: *Espectro en lineal (izquierda) y logarítmico (derecha) del ^{60}Co en el detector 3 de pie.*

En ambos espectros aparecen claramente los picos generados por la contaminación interna del detector por lo que se añadirá a la calibración.

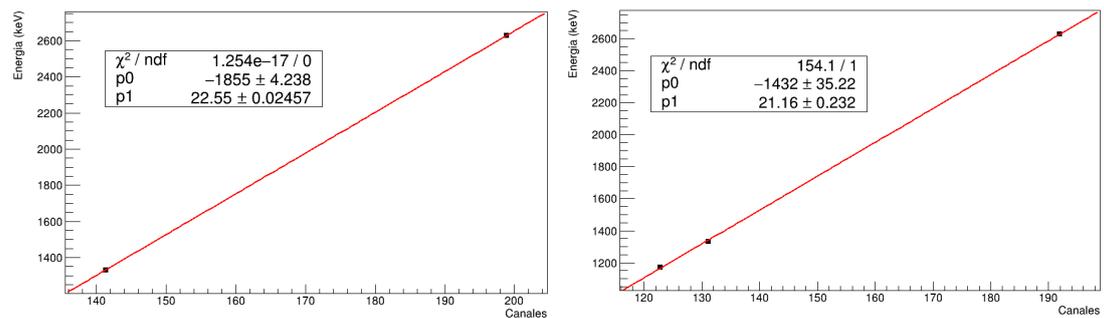


Figura 4.21: *Rectas de calibración obtenidas para la segunda medida de los dos detectores en posición de pie buscando un mayor rango.*

Con estas nuevas calibraciones el rango energético alcanza aproximadamente 90 MeV para el detector 2 y 85 MeV para el detector 3.

La resolución que se ha conseguido para la radiación γ emitida por el ^{60}Co es la que se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: *Valores de la resolución y su error para los picos gamma detectados.*

Detector	Fuente	Energía (keV)	Resolución (%)	Error (%)
Detector 2	^{60}Co	1333	7.9	0.245
Detector 3	^{60}Co	1173	9.5	0.372
Detector 3	^{60}Co	1333	7.8	0.22

La resolución de todos los picos debidos a la radiación γ emitida por la fuente de calibración es mayor al límite impuesto de $6\% \Delta E/E$. Al ajustar el rango dinámico ha energías tan grandes se pierde resolución en el límite de bajas energías, sin embargo, debido a que los γ que se quieren detectar serán más energéticos durante los experimentos, tal vez se cumpla el límite de $6\% \Delta E/E$, pero no se puede comprobar con los medios que se disponen en el laboratorio.

La medida del espectro de muones atmosféricos sin fuentes de calibración γ . El espectro obtenido con coincidencias usando un plástico se muestra en la Fig. 4.22, comparándolo con la simulación en Geant4.

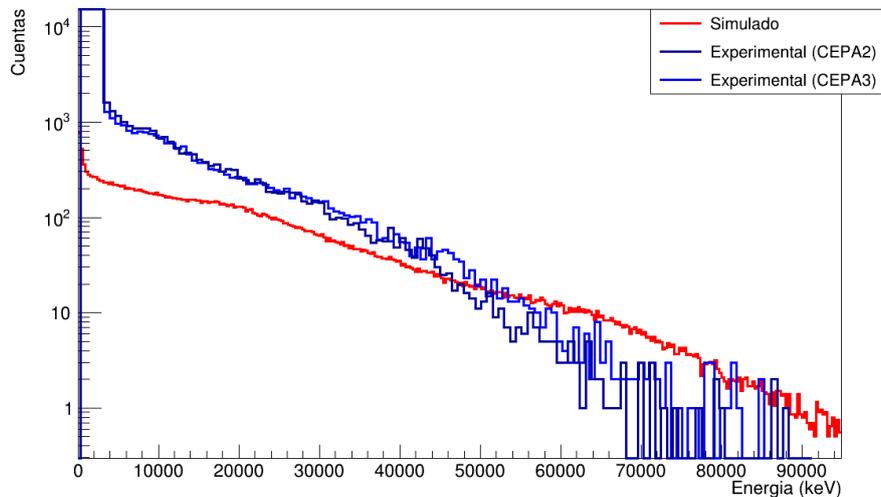


Figura 4.22: *Comparación de los espectros experimental (azules) y simulado (rojo) con coincidencias usando un sólo plástico con el dispositivo en posición de pie con un rango energético mayor*

La comparación para esta configuración no es tan satisfactoria como para el caso tumbado y no se ha conseguido un buen espectro haciendo coincidencias usando los dos centelleadores plásticos. Una de las posibles razones de estas discrepancias puede ser la pérdida de linealidad del fototubo al reducir su voltaje en más de 150 V.

Esta configuración es más compleja que con el dispositivo tumbado, debido no solo al mayor rango dinámico que se quiere conseguir, sino que además la señal que recibe el fototubo tiene dos componentes una por cada cristal. Un estudio más exhaustivo requeriría la utilización de electrónica adicional, como por ejemplo un digitalizador, de la que no se dispone actualmente.

4.3 Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido la creación de un dispositivo para testear los componentes electrónicos para la puesta a punto del detector CEPA4. Se ha buscado cubrir un rango energético para γ de hasta 30 MeV y protones de hasta 300 MeV con buena resolución en energía ($\approx 6\% \Delta E/E$).

Para garantizar el paso de los muones a través del detector CEPA4 se han utilizado 2 detectores centelleadores plásticos conectados en coincidencia con el CEPA4 y se han comparado los resultados con simulaciones de Monte Carlo realizadas usando Geant4.

De las dos configuraciones que se han realizado en este trabajo, la posición tumbada en la que los muones atraviesan principalmente un solo tipo de cristal (LaBr_3 o LaCl_3) se han conseguido resultados satisfactorios, muy similares a los que se habían predicho mediante simulaciones. Se han podido distinguir claramente en el espectro los dos picos, cada uno debido al paso de los muones por cada cristal. Consiguiéndose un rango dinámico con una energía máxima aproximada de 40 MeV.

Respecto a la otra configuración, dispositivo en posición de pie, en donde se buscaba un rango energético mucho más amplio debido a que la longitud de detector atrevesado es mayor, se han realizado dos pruebas. En la primera de las pruebas se han saturado los fototubos. En la segunda prueba, para evitar este hecho se ha disminuido el voltaje de los fototubos, obteniéndose un rango dinámico mayor (hasta 90 MeV). Sin embargo, en este segundo caso, no se ha conseguido la resolución esperada para γ de baja energía. Y el espectro energético obtenido en esta segunda prueba no se ajusta a las predicciones de la simulación tan bien como con la otra configuración.

Se piensa que la configuración de pie no ha funcionado bien debido a que se ha bajado demasiado el voltaje de los fototubos perdiendo la linealidad. Una forma de solucionar este hecho sería empleando un fototubo con dos salidas en la cual se usen menos dínodos para protones que para gammas, o reduciendo el número de dínodos del fototubo.

En este trabajo se han sentado las bases para continuar este proyecto, y se seguirá trabajando sobre este dispositivo cambiando los componentes electrónicos para conseguir los objetivos propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Nácher et al. 'Proton response of CEPA4: A novel LaBr₃(Ce)-LaCl₃(Ce) phoswich array for high-energy gamma and proton spectroscopy'. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 709 (2015), pp. 105-111. doi: 10.1016/j.nima.2014.09.067.
- [2] PRONTO-CM B2017/BMD-3888
- [3] Toolkit Geant4 - CERN <https://geant4.web.cern.ch>.
- [4] Technical Report for the Design, Construction and Commissioning of The CALIFA Barrel: The R3B CALorimeter for In Flight detection of γ rays and high energy charged pArticles. 30rd Nov. 2011. http://igfae.usc.es/~r3b/documentos/califa_talks/CALIFA_BARREL_TDR_web.pdf.
- [5] G. Bruni, Master thesis, Chalmers Univ. Tech. (2017).
- [6] O. Tengblad, T. Nilsson, E. Nacher, H.T. Johansson, J.A. Briz, M. Carmona-Gallardo, C. Cruz, V. Guglierman, A.Perea, J. Sanchez del Rio, M. Turrion-Nieves, J. Bergstrom, E. Blomberg, A. Bulling, E. Gallneby, J. Hagdahl, L. Jansson, K. Jareteg, R. Masgren, M. Nordstrom, G. Risting, S. Shojaee, H. Wittler, 'LaBr₃(Ce):LaCl₃(Ce) Phoswich with Pulse Shape Analysis for High Energy Gamma- ray and Proton Identification', Nucl. Instr. and Meth. A704, 19-26, (2013)
- [7] María Inmaculada Posadillo "Desarrollo de un prototipo con DSSDs para realizar imagen médica con protones", Trabajo Fin de Master, Universidad de Sevilla, 2019
- [8] Vicente García Tavora "Simulaciones Monte Carlo para el desarrollo de un prototipo de tomógrafo de protones con aplicación en protonterapia", Trabajo Fin de Master, Universidad de Sevilla, 2019
- [9] O. Tengblad, Digital pre-processing at frontend, *European Nuclear Science and Application Research 2*. Report D9.4 reference 654002 (2018)
- [10] Review of Particle Physics, July 2010, pág 270.
- [11] https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/metal-package-type/index.html
- [12] Review of Particle Physics, July 2010, pág 286.
- [13] Preamplifier mesytec MPR-1 <https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MPR-1.html>.

- [14] Amplifier mesytec MDS-8 <https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MDS-8.html>.
- [15] M. Shamsuzzoha Basunia, Nucl. Data Sheets **127** (2015) 69.
- [16] E. Browne, and J.K. Tully, Nucl. Data Sheets **114** (2013) 1849.
- [17] E. Browne, and J.K. Tully, Nucl. Data Sheets **108** (2007) 2173.
- [18] PMT Hamamatsu R5380 http://neutron.physics.ucsb.edu/docs/High_energy_PMT_TPM00007E01.pdf.
- [19] PMT Hamamatsu R7600u https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R7600U_TPMH1317E.pdf.
- [20] Caen CFD n843 <https://www.caen.it/products/n843/>.
- [21] Delay Amplifier ORTEC 427A <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/427a-mnl.pdf>.
- [22] Time to Pulse Height Converter ORTEC 467 https://groups.nslc.msu.edu/nslc_library/manuals/eggortec/467.pdf.
- [23] Caen Fast Amplifier N979 <https://www.caen.it/products/n979/>.
- [24] Sistema de adquisición de datos MIDAS npg.dl.ac.uk/MIDAS/.
- [25] Mesytec STM-16 <https://www.mesytec.com/products/datasheets/STM-16+.pdf>.
- [26] Caen peak sensing ADC 32ch mod. 785 <https://www.caen.it/products/v785/>.
- [27] Caen multihit TDC 128ch mod.V1190A <https://www.caen.it/products/v1190a-2esst/>.
- [28] Mesytec MCFD-16 <https://www.mesytec.com/products/nuclear-physics/MCFD-16.html>.
- [29] Caen Fan-In Fan-Out mod. N454 <https://www.caen.it/products/n454/>.
- [30] Caen NIM/ECL - ECL/NIM Translator mod. N638 <https://www.caen.it/products/n638/>.
- [31] Caen 3 Fold Logic mod. N405 <https://www.caen.it/products/n405/>.
- [32] Caen Dual Timer mod. N93B <https://www.caen.it/products/n93b/>.
- [33] ORTEC Octal Gate Generator GG8020 <https://www.ortec-online.com/products/electronics/delays-gates-and-logic-modules/gg8020>.

-
- [34] ORTEC EGΣG Quad CFD 934 https://wwwusers.ts.infn.it/~rui/univ/Acquisizione_Dati/Manuals/ORTEC%20934.pdf.
- [35] Caen Latching Scaler mod. V830 <https://www.caen.it/products/v830/>.
- [36] Motorola MVME 5500 <http://npg.dl.ac.uk/documents/edoc249/installation.pdf>.
- [37] Root CERN <https://root.cern.ch>.
- [38] Ejemplo de Geant4 para muones atmosféricos http://geant4.lngs.infn.it/corso_infn/doxygen/task3/task3b
- [39] <https://www.nucleonica.com>
- [40] Saint-Gobain Lanthanum Bromide Scintillators Performance Summary (Revision: April, 2019) <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/labr-performance-summary-2019.pdf>
- [41] T.W. Hossbach, W.R. Kaye, E.A. Lepel, B.S. McDonald, B.D. Milbrath, R.C. Runkle, L.E. Smith. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 547, 2-3, pp 504-510, August 1, 2005