

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



FACULTAD DE FÍSICA

Departamento de Física de Partículas

**Construcción y test de los prototipos de
RPCs para el ToF-Wall para el experimento
R³B en FAIR**

Memoria presentada por:
David Pérez Loureiro como
Trabajo de Investigación Tutelado
dentro do programa de Doctorado
Física de Partículas
y **Dinámica no Lineal**

Septiembre 2006

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Ignacio Durán Escribano, Catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Santiago de Compostela,

CERTIFICA: que la memoria titulada **Construcción y test de los prototipos de RPCs para el ToF-Wall para el experimento R³B en FAIR** ha sido realizada por **David Pérez Loureiro** en el **Departamento de Física de Partículas de esta Universidad** bajo mi dirección y constituye el **Trabajo de Investigación Tutelado** dentro del programa de doctorado **Física de Partículas y Dinámica no Lineal** que presenta para optar al **Diploma de Estudios Avanzados**.

Santiago, 16 de septiembre de 2006

Fdo: Ignacio Durán Escribano

Índice general

Introducción	1
1. Fundamentos de RPCs	3
1.1. Cámaras de placas resistivas (RPCs)	3
1.1.1. Fundamentos	3
1.1.2. Extinción de la descarga	4
1.1.3. Formación de la señal	5
1.1.4. Tasa de contaje soportada	5
1.1.5. Modos de operación	5
1.1.6. Diferentes diseños	6
1.1.7. Prestaciones de las RPCs	7
1.1.8. Uso de RPCs en otros experimentos	11
2. Descripción de los prototipos y del dispositivo experimental	13
2.1. Descripción de los prototipos	13
2.1.1. Lectura de la señal	14
2.2. Descripción de los tests con RPCs	14
2.2.1. Medidas con cósmicos en Santiago	14
2.2.2. Medidas con ^{12}C en GSI	15
3. Análisis de los datos y resultados	21
3.1. Método de análisis	21
3.1.1. Selección del parámetro de caracterización	23
3.2. Presentación de los resultados	23
3.2.1. Dependencia con el voltaje	24
3.2.2. Dependencia con la mezcla gaseosa	26
3.2.3. Resultados obtenidos con cósmicos	28
3.2.4. Comparación entre rayos cósmicos y ^{12}C	28
3.2.5. Caracterización de la distribución de la integral	29
Conclusiones	33

A. La electrónica de lectura

35

Introducción

Este trabajo se enmarca dentro de la colaboración que el Grupo Experimental de Núcleos y Partículas (GENP) de la Universidad de Santiago de Compostela mantiene en el experimento R³B que va a construirse en las instalaciones de FAIR en Darmstadt (Alemania) [1]. En este experimento se pretende hacer estudios de reacciones nucleares inducidas por haces radiactivos a energías relativistas en cinemática completa [2]. Esto quiere decir que todos los fragmentos producidos han de ser identificados en masa y carga. Con el fin de hacer la identificación de los fragmentos se recurre a la medida combinada de rigidez magnética y tiempo de vuelo [3], por lo que, para los elementos más pesados, es necesaria una alta resolución temporal. Por ello, se ha propuesto un diseño de un muro de tiempo de vuelo basado en detectores del tipo RPC (*Resistive Plate Chambers*). Actualmente, se están desarrollando una serie de prototipos adaptados a la detección de iones pesados.

Las RPCs son detectores gaseosos en base a electrodos con geometría plano-paralela, que operan con campos eléctricos muy altos, proporcionando una respuesta temporal muy rápida y con una excelente resolución. Tiene, además que poseer una alta eficiencia de detección y permitir una operación segura evitando las descargas.

A diferencia de los detectores con geometrías cilíndricas, en las RPCs el campo es uniforme y la aceleración se produce inmediatamente después de la creación de cada par electrón-ión en cualquier punto del volumen activo de gas (que vamos a denominar *gap*, por abreviar), no siendo necesaria entonces una deriva hasta la región de multiplicación. Como consecuencia de esta diferencia, la resolución temporal vendrá determinada por las fluctuaciones estadísticas de la avalancha durante los procesos de ionización primaria y multiplicación en el gas.

El hecho más importante en la evolución de este tipo de detectores fue, sin duda, el desarrollo de detectores con *gaps* cada vez más pequeños (del orden de décimas de milímetro), lo que permitió mejorar la resolución temporal hasta los 50 ps [4, 5], presentándose como una alternativa a los centelleadores, con la ventaja de que el coste por canal es mucho más bajo, permitiendo

así multiplicar la segmentación. Otra ventaja adicional es el hecho de no verse afectados por los campos magnéticos, como ocurre con los tubos fotomultiplicadores.

Tanto el desarrollo inicial en los años 80, con los que se alcanza una resolución de 1 ns, como los diseños más actuales, con resoluciones de hasta 50 ps, han hecho posible el uso de este tipo de detectores para medidas de tiempo en experimentos tanto de física nuclear como de partículas [4, 6–8]. De hecho, la mayoría de los experimentos actuales de física de partículas han optado por el diseño y construcción de este tipo de tecnología en alguno de sus muros de detectores de tiempo de vuelo, por las ventajas mencionadas anteriormente.

Sin embargo, este tipo de detectores han sido poco utilizados con iones pesados y muy poco se sabe acerca de su comportamiento con ellos (eficiencia, resolución temporal, . . .) por lo que es necesario un importante esfuerzo en I+D para la caracterización de dicha respuesta.

En este trabajo se presentan la construcción y los primeros resultados del análisis de las respuesta de los prototipos de las RPCs de tiempo de vuelo desarrolladas para el experimento R³B. Para la evaluación de dicha respuesta, se hicieron varios tests con rayos cósmicos en Santiago de Compostela, así como un test con iones ¹²C a 500 MeV/u, además de con rayos cósmicos, en julio de 2006 en las instalaciones de GSI en Darmstadt (Alemania)[9].

El presente trabajo está dividido en las siguientes partes:

- En el primer Capítulo se hace una breve descripción de los fundamentos de las RPCs, así como un resumen de las prestaciones de este tipo de detectores en función de diferentes factores, como pueden ser la alta tensión aplicada y la mezcla gaseosa utilizada.
- En el segundo Capítulo se describe del dispositivo experimental utilizado en la realización de los test de RPCs, desde la descripción de los prototipos de RPC estudiados y los diferentes detectores auxiliares utilizados, hasta los sistemas de adquisición de datos.
- En el tercer Capítulo se explica el procedimiento de análisis usado, basado en el análisis por *software* de los pulsos producidos por las RPCs, digitalizados. Se realiza también una discusión de los resultados obtenidos.
- Por último se hace un resumen, con las conclusiones y los siguientes pasos a seguir en el proceso de I+D.

Capítulo 1

Fundamentos de RPCs

1.1. Cámaras de placas resistivas (RPCs)

Este tipo de detectores fueron desarrollados a principios de los años 80 [10] como alternativa a los *detectores de chispas de descarga localizada* de Pestov [11], los cuales proporcionaban una excelente resolución temporal ($\sigma \sim 25$ ps). La principal diferencia es que las RPCs trabajan a presión atmosférica, mientras que los detectores de Pestov requieren presiones mayores. Otro inconveniente de los detectores de Pestov es que la mezcla de gases utilizados es muy inflamable.

1.1.1. Fundamentos

Las RPCs son detectores gaseosos compuestos por dos placas paralelas que actúan como electrodos, entre los que se aplica una diferencia de potencial constante, de modo que se produce en el espacio entre electrodos (*gap*) un campo eléctrico uniforme. Al menos uno de estos electrodos tiene que ser de un material con una resistividad característica (alta, pero no excesivamente), que es lo que dio origen al nombre de «placas resistivas». El *gap*, cuyo rango varía entre centenas de micras y pocos milímetros, dependiendo de la aplicación, se llena con una mezcla gaseosa que ha de tener un alto coeficiente de absorción para los fotones ultravioletas, así como una excelente afinidad electrónica. Los electrones y los iones creados por una partícula cargada que atraviese el detector son acelerados hacia el ánodo y el cátodo respectivamente. Cuando la ionización primaria adquiere suficiente energía ioniza otras moléculas del gas y se crean electrones secundarios. Estos nuevos electrones son acelerados de nuevo, originando una avalancha.

El número total de electrones creados en un cierto recorrido x es [12]:

$$n = n_0 \exp(\alpha x) \quad (1.1)$$

donde n_0 es el número inicial de electrones y α es el primer coeficiente de Townsend. Al factor $e^{\alpha x}$ se le llama factor de multiplicación y en las cámaras proporcionales está limitado a 10^8 o $\alpha x = 20$ (límite de Raether) [13] ya que, por encima de este valor, se puede entrar en régimen de descarga (*streamer*), que es el equivalente al modo Geiger-Müller. Para evitar que la descarga se propague en el tiempo y en el espacio, los gases empleados incluyen en su mezcla componentes que favorecen la autoextinción de la avalancha (*self-quenching*).

1.1.2. Extinción de la descarga

En las cámaras de electrodos plano-paralelos con un *gap* lo suficientemente pequeño, la descarga se extingue a partir de los siguientes mecanismos:

- El recorrido útil para la producción de la avalancha es lo suficientemente pequeño como para que, aunque el campo eléctrico sea elevado, no se alcance el límite de Raether. Limitando el recorrido disponible para el desarrollo de la avalancha, tenemos la ventaja añadida de que se aumenta la tolerancia del paralelismo entre las placas. En efecto, si en una parte del detector la separación entre placas es menor, el campo eléctrico será más alto, pero la avalancha tendrá menor desarrollo.
- La absorción de los fotones ultravioleta por parte de la mezcla gaseosa, previniendo, de este modo, la producción de descargas secundarias debido a fotoionización del gas o los electrodos.
- La captura de electrones que se produce en las partes más externas de la avalancha, donde la densidad de carga es menor, debido a la alta afinidad electrónica de la mezcla, lo que reduce el tamaño de las descargas.

En las RPCs, el hecho de que al menos uno de los electrodos tenga una resistividad determinada, produce la súbita *desconexión* del campo eléctrico en torno al punto en que se ha producido la descarga. La duración de la descarga es mucho menor que el tiempo de relajación de los electrodos [14], que es del orden de $\rho\varepsilon = \tau \approx 10$ (ρ y ε son la resistividad y la permitividad eléctrica respectivamente) ms para el caso de un electrodo de vidrio, el material resistivo más usado actualmente. Por tanto, la carga necesaria para mantener el campo eléctrico no puede fluir con la suficiente rapidez.

1.1.3. Formación de la señal

A medida que los electrones y los iones derivan hacia el ánodo y el cátodo respectivamente, se induce un pulso en los electrodos. Este pulso producido puede ser leído de dos modos, directamente del electrodo en que se aplica el voltaje usando un condensador para desacoplar el pulso de la alta tensión, o bien a partir de la señal inducida en un electrodo de recogida, separado del de alimentación por un material aislante como pueda ser el Kapton® o PVC.

1.1.4. Tasa de contaje soportada

La alta resistencia de los electrodos, que evita la producción de chispas y otros procesos peligrosos para el detector (por ejemplo descargas permanentes), representa por otra parte una de las principales limitaciones de este tipo de detectores. Tras la producción de la señal, la carga producida por la avalancha permanece en la superficie del electrodo, y durante este tiempo, el campo efectivo en la región en que se ha producido la descarga es menor. Como consecuencia, si la tasa de contaje es lo suficientemente alta ($\approx 1 \text{ kHz/cm}^2$), uno espera fluctuaciones en el campo local causado por las avalanchas anteriores. La consecuencia más importante es una reducción de la eficiencia de detección y de la resolución temporal.

1.1.5. Modos de operación

Las RPCs pueden trabajar en dos modos de funcionamiento, modo avalancha y modo *streamer*.

Modo avalancha

El modo avalancha se introdujo para mejorar la tasa soportada reduciendo la cantidad de carga producida por avalancha. En este modo de operación, se genera una avalancha de Townsend en el gas, por lo que el voltaje de operación es menor que el caso del modo *streamer*. Debido a la baja amplificación producida por la mezcla de gas utilizada, la ganancia tiene que ser compensada usando amplificadores rápidos de gran ganancia, integrados en la electrónica de lectura.

Originalmente las RPCs se utilizaron con gaps relativamente grandes ($\sim 1 \text{ mm}$), en los que el tamaño final de la avalancha guardaba proporcionalidad con la ionización primaria. Sin embargo, actualmente, las RPCs están siendo utilizadas en modo de avalancha limitada por el *gap* ($\sim 300 \mu\text{m}$) (avalancha

restringida) , no sólo como detectores de *trigger*, sino también como detectores para la medida de tiempo. Se pierde proporcionalidad, pero se gana en estabilidad del *plateau* de alta tensión y en resolución temporal, a costa, en algunos casos, de una reducción de la eficiencia de detección.

Modo *streamer*

Un *streamer* es un proceso de la misma naturaleza que la avalancha, que produce una mayor cantidad de carga en comparación con el de una avalancha normal. Requiere mayores voltajes de operación. En este caso, la densidad de carga producida es tan grande que el efecto de carga espacial distorsiona el campo eléctrico. Las ionizaciones secundarias, causadas por los fotones emitidos por las moléculas de gas pueden causar nuevas descargas en el detector. Gases de *extinción* se añaden a la mezcla con el fin de controlar y localizar dicha descarga, obteniendo así alauto esxtinción de la avalancha. Este modo de funcionamiento pierde la proporcionalidad entre la ionización primaria y el tamaño de la avlancha, pero tiene la ventaja de producir señales mayores que pueden ser discriminadas sin amplificación. Sin embargo, debido a la gran cantidad de carga producida, la capacidad de tasa de conteo de este modo de funcionamiento es limitada. A pesar de este inconveniente, este modo de funcionamiento ha encontrado aplicación en sistemas en los que la tasa de conteo no sea un factor decisivo, como por ejemplo en detectores de rayos cósmicos, como ARGO [15].

1.1.6. Diferentes diseños

RPC de *gap* simple

La primera RPC contruida [10], consistía en dos electrodos paralelos de cobre cubiertos con placas de baquelita. Dichas placas estaban separadas una distancia de 1.5 mm entre sí. El espacio estaba relleno por una mezcla de argon/isobutano en una proporción 1:1. La señal producida se inducía en unos electrodos de recogida separados de la alta tensión por PVC. La alta tensión tiene que ser aplicada a través de un conductor no perfecto para que sea transparente a la señal inducida (ver Figura 1.1). Este tipo de detectores han evolucionado desde esta primera versión. La diferencia fundamental entre las RPCs actuales y la original, es el uso de electrodos de vidrio, que presentan una mejor rigidez mecánica así como un mejor acabado en la superficie.

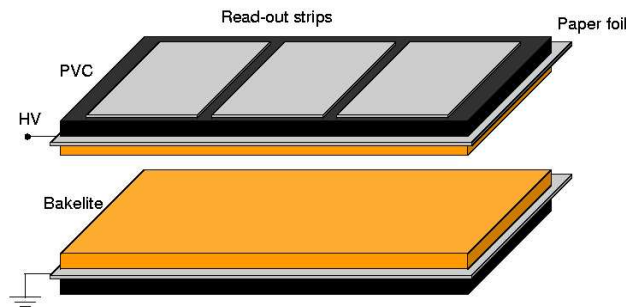


Figura 1.1: Ejemplo de una RPC de gap simple de acuerdo con el diseño original de Santonico y Cardarelli. Las dimensiones no son reales, en particular, el gap ha sido aumentado para distinguir los dos electrodos [6].

RPCs de *gap* múltiple

Este método de construcción fue propuesto en 1996 por E. Cerron-Zeballos y col. [16]. Consiste en apilar de forma equiespaciada placas resistivas que dividen el volumen de gas en diferentes *gaps* individuales (ver Fig. 1.2). La alta tensión se aplica a las superficies más externas. Inicialmente, las placas internas toman el voltaje correcto por la carga electrostática, después, se mantienen siempre al voltaje adecuado debido al flujo de electrones e iones creados en el gas por las avalanchas. Este principio de retroalimentación produce una ganancia similar en todos los *gaps*. Puesto que las placas pueden considerarse como dieléctricas, son transparentes a las señales y la lectura de las mismas se hace en las placas más exteriores. Este diseño supone una mejora, tanto en eficiencia como en resolución temporal. El principal inconveniente de este diseño es el alto voltaje requerido, al ser éste proporcional al número de *gaps*. Por ejemplo en una RPC de 5 *gaps*, el voltaje necesario es de ≈ 12 kV.

1.1.7. Prestaciones de las RPCs

Las prestaciones de las RPCs, a saber, resolución temporal y eficiencia, están determinados por diferentes factores, tales como la mezcla gaseosa, el número de *gaps* y la anchura del mismo, además del voltaje de operación. La electrónica de lectura, juega también un papel importante en la resolución temporal.

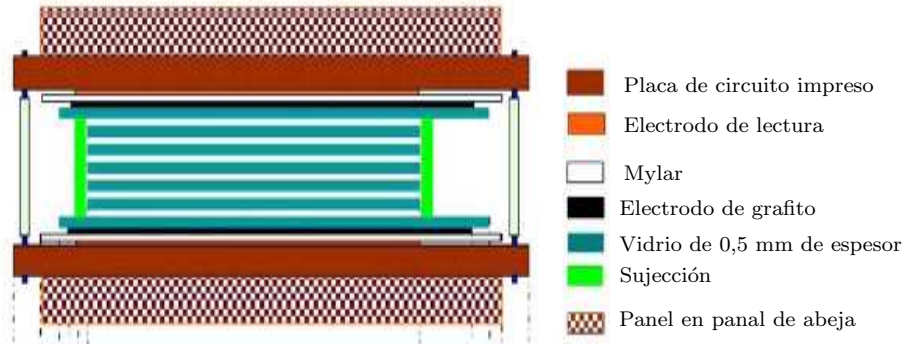


Figura 1.2: Ejemplo de una RPC de gap múltiple como las utilizadas en el experimento STAR [8].

Mezcla de gases

Las RPCs actuales, funcionando en modo de avalancha restringida, usan generalmente mezclas de tetrafluoroetano ($C_2H_2F_4$), con un 2%-5% de isobutano (iso- C_4H_{10}) y un 0,4%-10% de hexafluoruro de azufre (SF_6). La adición de SF_6 amplía la región de trabajo libre de *streamers* [17]. El aumento de la fracción de SF_6 desplaza por tanto la región plana (*plateau*) de la curva de eficiencia a voltajes mayores (Fig. 1.3). Por otra parte, el SF_6 puede capturar todos los electrones producidos en un *cluster* primario. Por tanto, aumentando la fracción de SF_6 , el número de clusters que generan una avalancha se reduce, lo que produce una degradación tanto de la resolución temporal como de la eficiencia. Como se observa en la figura, usando entre un 2% y un 5% de SF_6 , se obtiene un buen compromiso entre eficiencia y resolución temporal alcanzada.

Tamaño y número de *gaps*

El tamaño del *gap* es un factor que determina, de un modo significativo, la eficiencia y la resolución temporal que se pueden obtener con una RPC. Cuanto mayor sea el *gap*, mayor será la eficiencia. En el caso de partículas mínimamente ionizantes (MIPS), usando *gaps* de 2 mm se han alcanzado eficiencias de 98% por *gap* y resoluciones temporales entre 1 y 1.5 ns [15]. Con *gaps* menores, la eficiencia por *gap* se reduce ($\varepsilon = 75\%$), pero la resolución temporal mejora. Usando *gaps* entre 200 y 300 μm , se han encontrado resoluciones inferiores a 90 ps (σ) [4, 7]. Con el fin de mantener una eficiencia alta, se añaden más *gaps*. De hecho, la eficiencia aumenta con el número de *gaps* como

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_g)^n \quad (1.2)$$

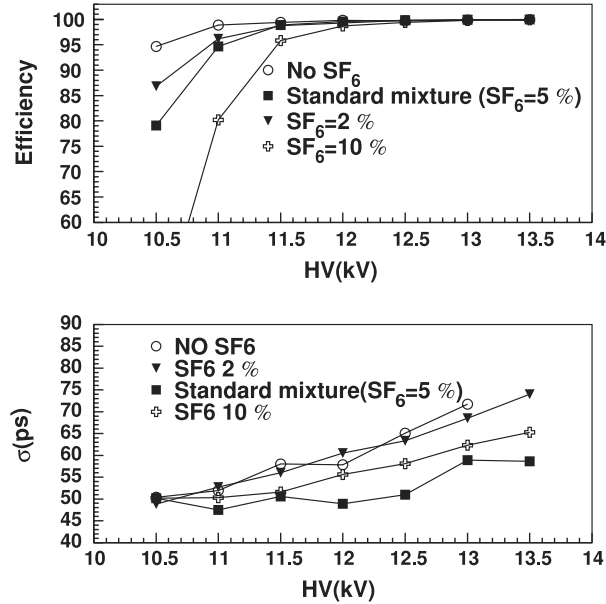


Figura 1.3: Eficiencia (panel superior) y resolución temporal (panel inferior) para diferentes fracciones de SF_6 en la mezcla [17].

en donde ε es la eficiencia total, ε_g es la eficiencia de cada *gap*, y n es el número de *gaps*. La resolución temporal también mejora, pero con \sqrt{n} .

Voltaje de operación

Otro factor determinante a la hora de evaluar las prestaciones de las RPCs es el campo eléctrico aplicado. Las RPCs usadas para medidas de tiempo trabajan a campos del orden de 10 kV/mm. Cuanto mayor sea este voltaje, la resolución temporal empeora (Fig. 1.3). La eficiencia también aumenta con el voltaje. Sin embargo, también ha de tenerse en cuenta que la probabilidad de que ocurran *streamers* aumenta con el voltaje. El punto de trabajo óptimo será un compromiso entre estos factores: alta eficiencia, buena resolución temporal y baja probabilidad de *streamers*.

El campo en el gap

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre las placas de un sistema como el de la Figura 1.4, donde cada uno tiene una constante dieléctrica (permitividad) ε_i . El campo en el gap, viene definido por una función de peso

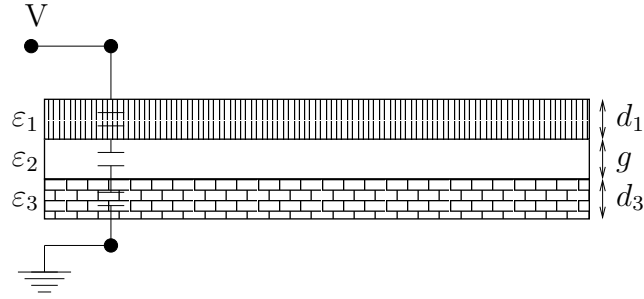


Figura 1.4: Ejemplo de una configuración de RPC con tres materiales de diferentes resistividades [6]

sobre el voltaje aplicado (*weighting field function*) W_i , que tiene dimensiones de $[L^{-1}]$ de modo que $E_{gap} = VW_{gap}$ que depende de las constantes ϵ_i y del espesor de los materiales [6]:

$$W_2 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{d_3 \epsilon_1 \epsilon_2 + d_2 \epsilon_1 \epsilon_3 + d_1 \epsilon_2 \epsilon_3} \quad (1.3)$$

En nuestro caso $\epsilon_1 = \epsilon_3$ y $d_1 = d_3 = v$, por tanto

$$E_{gap} = VW_{gap} = V \frac{\epsilon_1}{2v\epsilon_2 + g\epsilon_1} \quad (1.4)$$

Suponiendo que la ϵ_r del vidrio es 5 y la del gas es, aproximadamente, la unidad, poniendo el espesor del vidrio v en función del tamaño del *gap*, $v \approx 3,3g$, llegamos a

$$E_{gap} = VW_{gap} = V \frac{5}{11,6g} \approx \frac{0,43V}{g} \quad (1.5)$$

Electrónica de lectura

La electrónica de lectura es un elemento fundamental en la resolución temporal. Esto es debido al hecho de que la resolución intrínseca de la RPC es muy alta ($\sigma_i \approx 25$ ps) [4], por tanto, la resolución temporal total será la suma cuadrática de la resolución intrínseca del detector y la de la electrónica, que generalmente será mayor. Además, tanto el ruido de alta frecuencia como los rebotes de la señal debido a la mala adaptación de impedancias, producen alteraciones en el flanco de subida que se traducen en una pérdida de resolución temporal. Por esto, se han llevado a cabo diferentes desarrollos de electrónica de lectura y amplificación para minimizar esta contribución [7, 18].

RPCs con iones pesados

Muy poco se sabe acerca de las prestaciones de las RPCs para partículas altamente ionizantes como los iones pesados.

Para iones pesados se espera que la ionización producida aumente como Z^2 , donde Z es el número atómico, si bien hay que tener en cuenta que estamos trabajando en el modo de avalancha restringida, es decir, proporcionalidad muy limitada. Dos efectos han de ser tenidos en consideración:

- La pérdida de energía en los electrodos no debe detener al ion.
- La alta ionización primaria permite un campo eléctrico menor, y por tanto, un menor valor en el factor de multiplicación y la velocidad de deriva. La resolución temporal será una competición entre ambos efectos. La eficiencia siempre se puede mejorar añadiendo *gaps* adicionales.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de RPCs con iones pesados.

1.1.8. Uso de RPCs en otros experimentos

Las RPCs *multigap* se han utilizado para construir detectores de tiempo de vuelo que requieren una gran superficie, obteniendo resoluciones temporales del orden de $\sigma_{TOF} < 60$ ps para partículas mínimamente ionizantes (MIPS). Algunos ejemplos son los detectores de tiempo de vuelo de ALICE [4], STAR [8], HADES [5, 6] y FOPI [7].

ALICE y STAR utilizan un diseño muy similar, en el que los electrodos de lectura están depositados sobre placas de circuito impreso.

En ALICE, cada elemento consta de una tira larga ($120 \times 7,4$ cm²), con 96 electrodos de lectura dispuestos en dos filas. Cada tira está formada por dos pilas de 5 *gaps* de 250 μ m cada uno. Las placas resistivas son de vidrio comercial de 0.4 mm de espesor para las placas interiores y 0.5 mm para las exteriores. La distancia entre placas se mantiene constante con espaciadores de hilo de nylon. El ánodo está en el medio, y los dos cátodos en las superficies exteriores. Para la lectura, se obtiene una señal diferencial del ánodo y de los cátodos.

En el experimento STAR, los electrodos de lectura están divididos en 6 partes de $3,1 \times 6,0$ cm² cada una. El grosor del vidrio es de 520 μ m. Cada RPC está formada por 6 *gaps* de 220 μ m.

En FOPI, cada módulo de RPC consiste en un ánodo segmentado en 16 tiras con una anchura activa de 4,6 cm y una longitud de 90 cm. El tamaño del *gap* es 300 μ m, y el vidrio utilizado tiene 1.1 mm de grosor. La forma de

Voltaje (kV)	Tamaño <i>gap</i> (μm)	Número de <i>gaps</i>	ε (%)	Resolución σ (ps)	Ref.
14	220	6	90	90	[8]
9.5	300	6	97	<73	[7]
12	250	10	99.9	48	[4]
6.2	300	4	97	67	[5]

Cuadro 1.1: Resumen de los detectores de RPCs actuales y sus características.

las tiras ha sido adaptada a los cables de lectura con el fin de obtener una impedancia de 50Ω . Esto evita reflecciones dentro del detector, haciendo más fácil manipular la señal inducida.

El diseño de HADES es ligeramente diferente, consiste en celdas de RPC con electrodos de vidrio y aluminio dispuestos formando 4 *gaps*. Este diseño es más apropiado para este experimento, debido a las mayores tasas de contaje que puede soportar este tipo de detectores. Además las celdas están aisladas eléctricamente con el fin de evitar inducción de señales en tiras adyacentes.

El cuadro 1.1 presenta es un resumen de las características de los detectores basados en RPCs mencionados anteriormente. Se observa que en todos los casos la eficiencia es igual a superior al 90%. Todos los resultados recogidos en este cuadro para MIPS, excepto [5], en el que se usaron productos de la fragmentación de ^{12}C a 1 GeV/u.

Los prototipos de RPCs utilizados en este trabajo tienen un diseño basado en las RPCs de ALICE, y son descritos en el capítulo siguiente.

Capítulo 2

Descripción de los prototipos y del dispositivo experimental de prueba

En este Capítulo se presenta el diseño y la construcción de las RPCs estudiadas, así como una descripción del dispositivo experimental utilizado en ambas pruebas, tanto con iones de carbono como con cósmicos.

2.1. Descripción de los prototipos

Para la realización de este estudio comparativo se han construido dos RPCs según la configuración presentada en la Figura 2.1, donde

se puede apreciar el diseño, que consta de dos cámaras gemelas que comparten un electrodo central en el que se aplica la alta tensión. Las cámaras se completan con sendos electrodos exteriores. Todos los electrodos están compuestos de vidrio flotado cuyas dimensiones son 680 mm × 70 mm. Se han

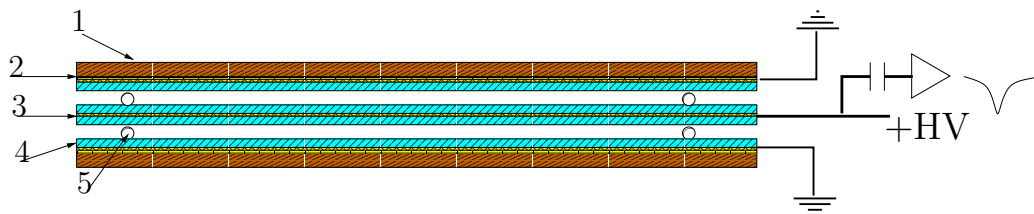


Figura 2.1: Representación esquemática de los prototipos construidos y estudiados. Cada número se corresponde con los diferentes materiales: 1 G10, 2 cinta de Kapton®, 3 cinta de cobre, 4 vidrio flotado, 5 hilo de nylon de 300 μm de diámetro.

construido dos tipos de detectores, unos con electrodos de vidrio de 1 mm de grosor, y otros con vidrio de 2 mm. Dichos electrodos están revestidos de una capa de cinta adhesiva de cobre para la polarización de los mismos. La tensión de alimentación típica está en torno a los 3200 V, lo que según la ecuación (1.5) produciría un campo eléctrico en el *gap* de unos 4,5 kV/m. Las placas que conforman el detector están separadas por hilo de *nylon* de 300 μm de diámetro para asegurar la uniformidad del *gap* de gas. Para proteger la cinta de cobre, además de hacer de aislante en el caso de que la alta tensión se aplique en los electrodos exteriores, se ha recubierto de cinta de Kapton®. Con el fin de dar rigidez mecánica al sistema y hacer soporte de los cables de alimentación y del sistema de lectura de las señales producidas se han recubierto los electrodos con dos placas de G10¹. Para mantener todo el sistema unido, se han utilizado gomas elásticas.

2.1.1. Lectura de la señal

La lectura de la señal producida por una partícula al atravesar el detector se realiza en el electrodo interior de la RPC, puesto que la señal inducida en el mismo es la suma de las producidas en ambos *gaps*. Se utiliza un condensador de alta tensión para desacoplar la señal. Antes de pasar al amplificador, el pulso formado pasa por un circuito RCL con el fin de eliminar las frecuencias más altas y hacer una adaptación de impedancias entre la RPC y el resto de la cadena electrónica. Para la amplificación de las señales se ha diseñado una tarjeta amplificadora que consta de dos amplificadores de carga en cascada (GALI S66 y MAXIM 4223). Las señales amplificadas tienen una amplitud suficiente para poder ser discriminadas y/o procesadas. Para una descripción detallada del mismo véase el Apéndice A.

2.2. Descripción de los tests con RPCs

Se realizaron dos tipos de tests diferentes con los prototipos construidos: medidas con rayos cósmicos en Santiago y medidas con ¹²C y rayos cósmicos en GSI en Darmstadt (Alemania).

2.2.1. Medidas con cósmicos en Santiago

Para la realización de este test, se preparó una estación de detección de cósmicos con un par detectores de plástico centelleador entre los cuales se coloca la RPC. El *trigger* de un cósmico vendrá dado por la coincidencia

¹Mezcla de fibra de vidrio y resina epoxídica, normalmente (60%-40%)

entre ambos centelleadores (Fig. 2.3). El sistema de adquisición utilizado ha sido un osciloscopio Tektronix TDS380 [19] conectado mediante una interfaz GPIB a un PC en el que se ejecuta un programa de adquisición que almacena las señales digitalizadas.

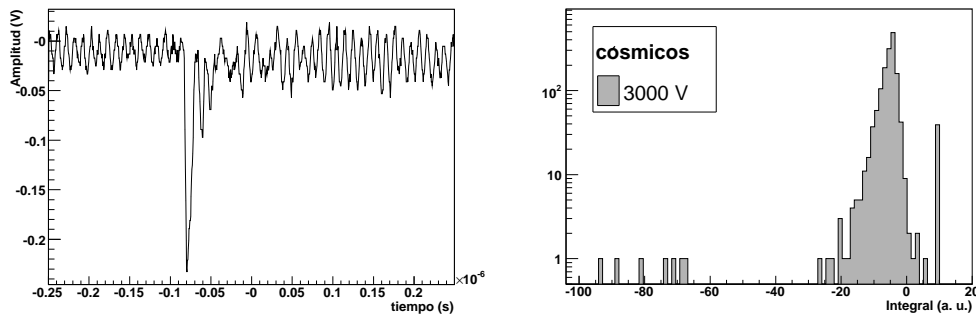


Figura 2.2: Ejemplo de señal digitalizada (panel izquierdo) y distribución de la integral de la señal producida por rayos cósmicos en la RPC a 3000 V de alta tensión (panel derecho).

Los resultados obtenidos (Fig. 2.2) hasta ahora no son muy concluyentes, y es necesario un análisis más profundo de los datos. Estas pruebas, han sido, sin embargo, útiles para desarrollar los prototipos, la electrónica y el sistema de adquisición, así como para desarrollar los programas de análisis.

2.2.2. Medidas con ^{12}C en GSI

El experimento fue realizado en el *Gesellschaft für SchwerIonenForschung* (GSI) situado en Darmstasdt (Alemania), esta instalación posee un sincrotrón que permite acelerar iones pesados hasta el uranio con una energía

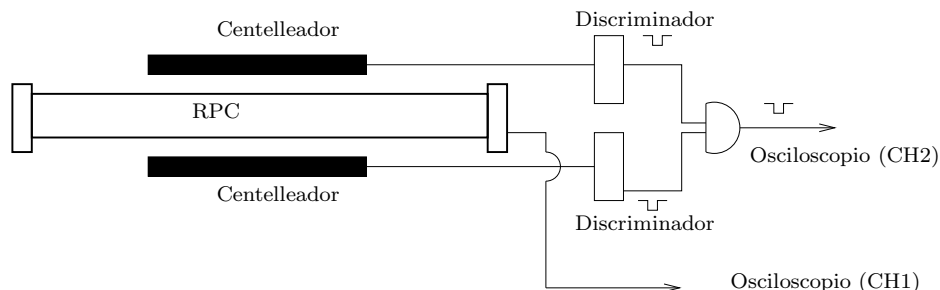


Figura 2.3: Dispositivo experimental utilizado para la detección de cósmicos en Santiago.

de hasta 1 GeV/u. En una de sus áreas experimentales se montó el dispositivo utilizado para nuestra prueba. El haz utilizado en este experimento era un haz pulsado de iones de ^{12}C a 500 MeV/u, y su intensidad se varió a lo largo del mismo, desde las 5000 hasta las 1000 partículas por pulso. La Figura 2.4, muestra un plano del GSI, en el que se puede ver el sincrotrón de iones pesados (SIS) y las diferentes áreas experimentales. El test fue realizado en el área denominada Cave C.

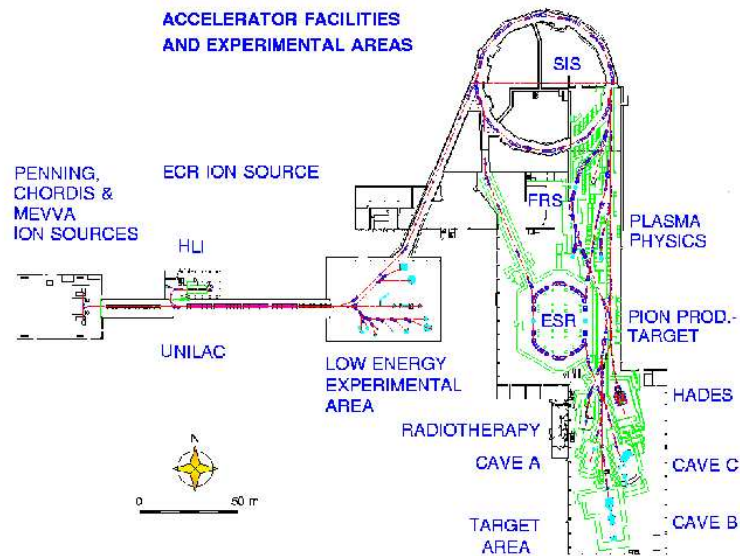


Figura 2.4: Plano del GSI, en el que se muestran el acelerador lineal (UNILAC), el sincrotrón (SIS), el separador de fragmentos (FRS), y las diferentes áreas experimentales. El test fue realizado en el área denominada Cave C.

Detectores

Los detectores utilizados en este experimento, fueron principalmente de dos tipos, detectores de plástico centelleador, que se utilizaron tanto para rastrear el haz como para el *trigger*, y las RPCs a estudiar. El centelleador usado, Bicron BC-420, se caracteriza por tener una respuesta temporal muy rápida, que junto con los tubos fotomultiplicadores empleados (Hamamatsu H2430) [20], presentan una excelente resolución temporal y una eficiencia para iones pesados que podemos asumir del 100 %.

En la Figura 2.5, se muestra la disposición de los detectores usados. El detector etiquetado como ROLU consta de cuatro plásticos centelleadores acoplados a cuatro tubos fotomultiplicadores. Dichos centelleadores plásticos

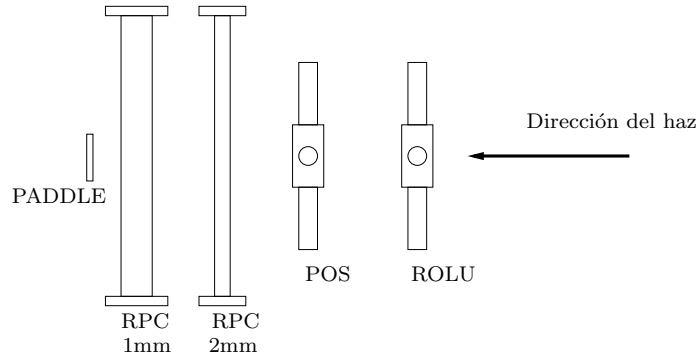


Figura 2.5: Esquema del dispositivo experimental utilizado en GSI. En él se puede ver la disposición de los detectores. Ver texto para una descripción detallada de los mismos.

se pueden mover vertical y/o horizontalmente, de modo que delimiten una ventana de un cierto tamaño. Este dispositivo actuará como veto, y cuando un ión produzca señal en alguno de estos centelleradores, el evento no es válido. El siguiente sistema de detección, etiquetado como POS, consta de dos plásticos de unos pocos milímetros de grosor dispuestos en cruz. Cada uno de ellos tiene dos fotomultiplicadores acoplados a sus extremos. De este modo, una cuádruple coincidencia en POS, significa que un ión ha pasado por el detector.

A continuación, están las dos cámaras de aluminio que contienen las RPCs estudiadas. El grosor de las paredes de las cámaras es de 2,5 mm. Las RPCs están contruidas exactamente como se describió en la sección anterior. Dichas cámaras están selladas a fin de mantener las RPCs en un flujo de gas constante. La mezcla utilizada es un mezcla de isobutano, tetrafluoroetano, y SF₆, en el cual la proporción entre ambos se varió a lo largo del experimento. El último de los detectores, etiquetado como PADDLE, consiste en un panel de centelleador de 10×10 cm y 5 mm de grosor acoplado a un tubo fotomultiplicador por medio de una guía de luz. Una señal en este detector implica que una partícula ha atravesado todo nuestro dispositivo experimental.

Sistema de *trigger* y de adquisición de datos

Durante este experimento se han utilizado dos sistemas de adquisición diferentes. Por un lado, un sistema basado en electrónica modular estándar (NIM y VME), y por otro un sistema que permite la completa digitalización de las señales producidas por las RPCs para poder hacer un análisis exhaustivo de las mismas mediante *software*.

Esquema del *trigger*

La Figura 2.6 muestra el esquema del *trigger* utilizado en el experimento. Las señales procedentes de los detectores, pasan por discriminadores (módulo CAEN N842 [21]), y se hacen una serie de coincidencias entre ellas (módulo NIM fabricado en GSI). Una es la coincidencia entre as cuatro señales procedentes de POS. La coincidencia entre esta cuádruple coincidencia y PADDLE, garantiza que un ion ha atravesado las RPCs. Esta señal será la que haga de *trigger* de los dos sistemas de adquisición utilizados.

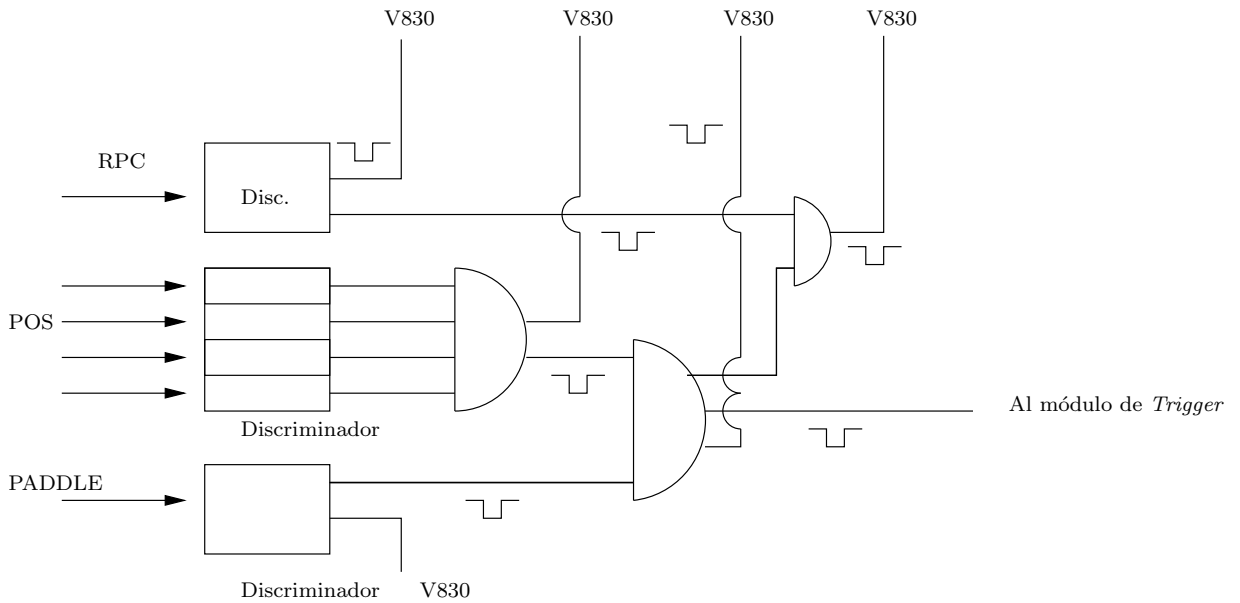


Figura 2.6: Esquema de la electrónica lógica utilizada.

Electrónica modular

Cada vez que el esquema de *trigger* produzca un evento válido, éste disparará todo el sistema de adquisición, que está basado en módulos VME [22]. Los módulos que contiene dicho sistema son los siguientes:

- Un procesador CES RIO3 [23], que controla todo el sistema, en este procesador se está ejecutando MBS [24], programa que gestiona, tanto el almacenamiento, como la transmisión de los datos a la herramienta de visualización en tiempo real.
- Un módulo de *trigger* TRIVA-3 [25] desarrollado en el GSI. Dicho módulo coordina las tareas de adquisición según el tipo de *trigger* recibido.

- Un contador VME CAEN modelo V830 [21]. Dicho módulo posee 32 contadores independientes.
- Un ADC CAEN modelo V785 que posee también 32 canales independientes y una resolución de 12 bits.
- Un ADC integrador de carga modelo V265. Este módulo permitirá obtener un espectro de carga de los pulsos producidos por las RPCs.

La Figura 2.7, presenta el esquema del sistema de adquisición utilizado. El esquema inferior representa la lógica del trigger necesaria para evitar colapsar la adquisición debido al tiempo muerto de la misma. Para la visualización de los espectros producidos en tiempo real, se desarrolló un sistema de visualización basado en el *framework* de análisis desarrollado en el GSI para experimentos de física nuclear Go4 [26] basado en ROOT [27].

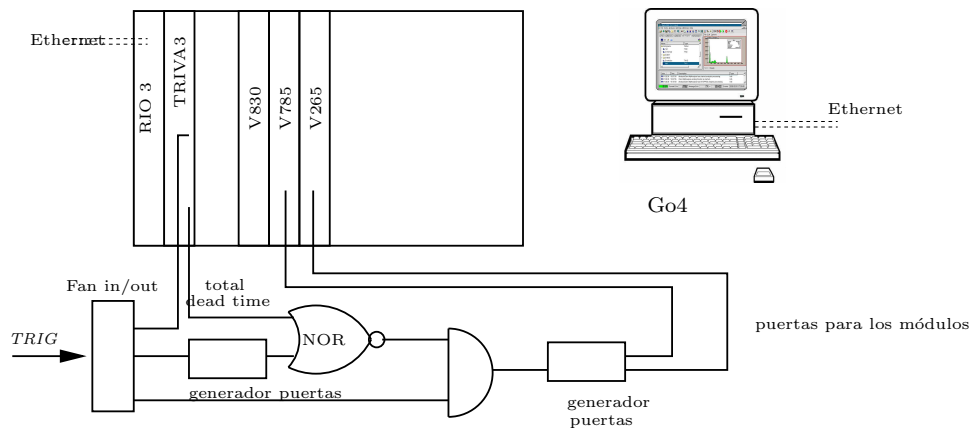


Figura 2.7: Esquema del sistema de adquisición utilizado basado en VME. Ver texto para una descripción detallada.

Digitalización completa de la señal

La segunda opción fue utilizar la digitalización completa de las señales producidas por la RPC.

Para este tipo de adquisición, se utilizó un osciloscopio digital Tektronix TDS7404 [19], que permite hacer una adquisición con una tasa de muestreo de hasta 20 GS/s y una resolución vertical de 8 bits, de modo que son posibles 255 valores digitalizados. Cuando se produce un *trigger* válido, el osciloscopio adquiere el pulso de la RPC completo y lo almacena en el disco duro. El principal inconveniente de este tipo de medidas, es que la tasa de adquisición es de aproximadamente un evento por segundo, por lo que para acumular la

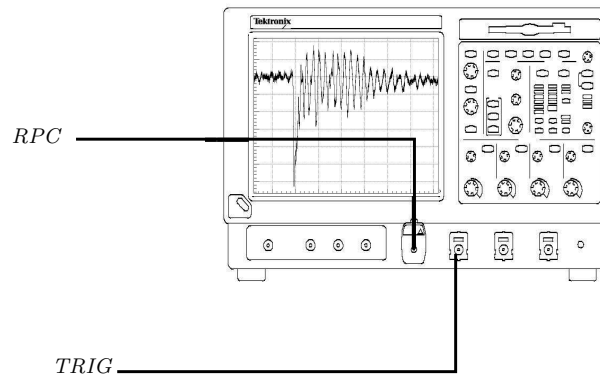


Figura 2.8: Esquema del dispositivo utilizado para la digitalización completa de las señales procedentes de la RPC. La señal procedente del detector (RPC), es adquirida por el osciloscopio siempre y cuando haya una coincidencia entre POS y PADDLE (TRIG).

suficiente estadística son necesarias varias horas de medida. El análisis de los mismos será realizado con una serie de programas creados para tal propósito como se describe en el Capítulo 3.

Capítulo 3

Análisis de los datos y resultados

En este Capítulo se presentan el método de análisis y los resultados obtenidos en el caso de la digitalización completa de las señales producidas por las RPCs, tanto con iones de ^{12}C a 500 MeV/u como con rayos cósmicos.

3.1. Método de análisis

Para poder hacer un estudio comparativo de las señales producidas en las RPCs se ha desarrollado una serie de herramientas de programación basadas en ROOT [27]. Se trata de un entorno de trabajo desarrollado en el CERN para el análisis de datos tanto de física nuclear como de partículas. Dichas herramientas consisten en un conjunto de macros que permiten hacer una caracterización de los pulsos. Para ello se definen una serie de parámetros como son la amplitud máxima que alcanza la señal y la integral de la misma en un intervalo de tiempo determinado.

Además, debido a que el *trigger* del osciloscopio viene dado por la coincidencia entre los centelladores situados antes y después de las RPCs, algunas de las señales registradas al ser de una amplitud muy pequeña, se confunden con el ruido, por lo que es necesario pasar por ciertos filtros que permitan discriminar las señales buenas de aquellas en las que la RPC no dio señal. Para ello se ha establecido diferentes criterios de corte:

- Cuando la amplitud del pulso es mayor que un cierto umbral en el tiempo adecuado.
- Cuando el valor absoluto de la integral de la señal es mayor que la integral de la línea de base del pulso.

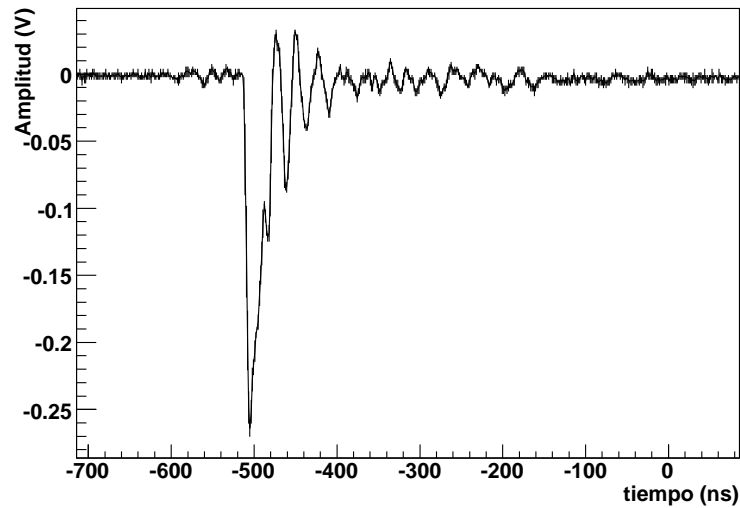


Figura 3.1: Ejemplo de señal producida en la RPC al ser atravesada por ^{12}C .

Si la señal pasa ambos criterios de corte, dicho pulso es considerado como bueno y los valores de los parámetros se almacenan para su posterior análisis. En caso contrario se le da un valor absurdo a dicho parámetros con el fin de eliminarlos durante el análisis imponiendo un corte en nuestros datos.

La Figura 3.1 muestra una señal típica producida por un ion de ^{12}C al atravesar la RPC. Como se puede ver, presentan un tiempo de subida muy rápido de unos pocos ns. A continuación del pulso aparece una oscilación debida a rebotes producidos por una adaptación de impedancias inadecuada. Se observa además unos 500 ns después del pulso ruido electrónico de unos 17 mV, llegando en algunos caso a ser superior. Este ruido tan elevado, impide poner un umbral de discriminación bajo. En el caso de querer deshacerse de ese ruido con una ventana de tiempo muerto, ésta tendría que ser muy ancha. En ambos casos, la consecuencia es una pérdida de eficiencia. En cuanto a la amplitud, varía debido a la naturaleza estadística de la avalancha. Ésta depende no sólo de las fluctuaciones de la ionización primaria, sino también de las fluctuaciones del factor de multiplicación [6].

Los parámetros de la señal pueden ser representados en histogramas y así comparar los resultados obtenidos en diferentes configuraciones del sistema. Se variaron los voltajes y las proporciones de la mezcla gaseosa con el fin de encontrar un punto de trabajo adecuado para iones.

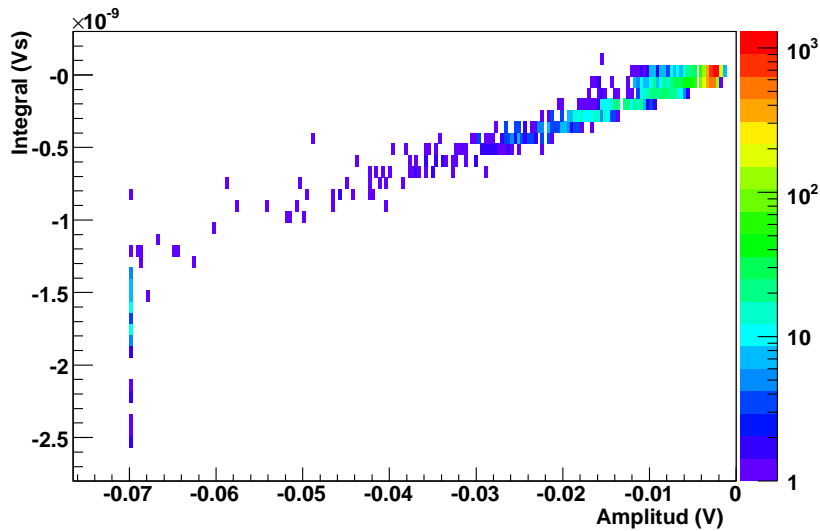


Figura 3.2: Representación de la amplitud frente a la integral de la señal para un voltaje de alimentación de 3250 V y una mezcla (85 % $C_2H_2F_4$, 10 % SF_6 , 5 % $iso-C_4H_{10}$).

3.1.1. Selección del parámetro de caracterización

Los dos parámetros definidos para la caracterización de los pulsos, es decir, la amplitud máxima y la integral de la señal en un intervalo determinado, son proporcionales. Por tanto, la representación de uno frente al otro debería mostrar una correlación lineal. Sin embargo, la amplitud digitalizada tiene un rango dinámico limitado por la escala vertical del osciloscopio. Si una señal tiene una amplitud mayor que este rango dinámico, ésta va a saturar, produciendo una zona plana en la misma, de modo que todas las señales mayores que esa amplitud máxima se van a acumular en el extremo del espectro. Se pierde entonces la proporcionalidad entre ambas. (Ver Figura 3.2). Como se puede apreciar a partir de 60 mV, los parámetros dejan de ser proporcionales y se aprecia una acumulación en torno a la amplitud máxima. Este hecho hace que la integral sea un parámetro más adecuado a la hora de hacer la caracterización del pulso.

3.2. Presentación de los resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los tests realizados con las RPCs. Se muestra la dependencia de la integral de la señal con el voltaje aplicado y la mezcla gaseosa. Se presentan también los

resultados obtenidos con los rayos cósmicos además de hacer un estudio de la forma de las distribuciones a partir de un ajuste totalmente empírico.

3.2.1. Dependencia con el voltaje

Para ver la dependencia de los parámetros definidos, se adquirieron las señales de la RPC con el osciloscopio, a diferentes voltajes de alimentación, dentro de un rango entre los 2700 y los 4000 V, y para diferentes mezclas gaseosas. La Figura 3.3 muestra la distribución normalizada de la integral del pulso para diferentes voltajes de alimentación con la mezcla estándar (85 % $C_2H_2F_4$, 10 % SF_6 , 5 % iso- C_4H_{10}). Se han utilizado distribuciones normalizadas a fin de poder comparar entre medidas con diferente estadística. Como se puede ver, a medida que el voltaje aumenta, también lo hace (en valor absoluto) el máximo de la distribución de integrales. Esto se explica si tenemos en cuenta que aumentando el voltaje aumentamos el campo eléctrico en el *gap*, por tanto, un mayor número de ionizaciones primarias son susceptibles de producir una avalancha, independientemente de la distancia del cátodo a la que se hayan producido. Un mayor voltaje favorece entonces la eficiencia de detección de la RPC. Sin embargo, para voltajes menores, más próximos a punto de trabajo de una RPC para partículas mínimamente ionizantes (MIPS), el valor máximo es muy bajo. Este hecho hace pensar que la mezcla gaseosa utilizada (considerada estándar) en nuestro caso no sea realmente la utilizada debido a una discrepancia entre las lecturas de los medidores de flujo y los valores reales. Esto podría explicar la baja ganancia observada.

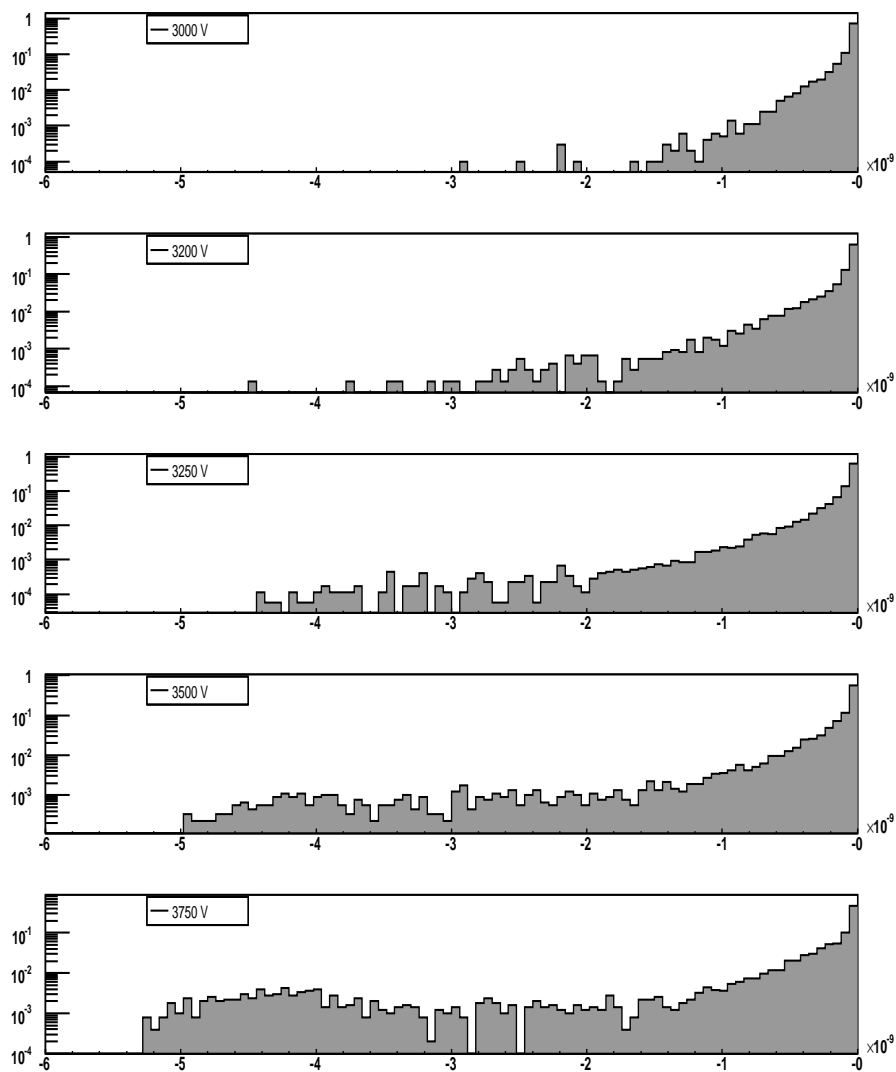


Figura 3.3: Distribución normalizada de la integral (en V·s) del pulso producido por iones de ^{12}C en la RPC de vidrio de 1 mm de grosor para diferentes voltajes de trabajo con la mezcla estándar.

3.2.2. Dependencia con la mezcla gaseosa

Con el fin de determinar el comportamiento de las RPCs con iones de ^{12}C con diferentes proporciones de los componentes de gas, se hicieron medidas con cuatro mezclas diferentes (ver cuadro 3.1). La primera mezcla utilizada etiquetada como *Mezcla 1*, se corresponde con la mezcla estándar. Sin embargo, como se mencionó en el apartado anterior, puesto que la ganancia obtenida es muy baja, los valores nominales no parecen correctos. Debido a este hecho, con el fin de incrementar la ganancia, se redujo la cantidad de SF_6 en 2 puntos dejando las otras constantes, (*Mezcla 2*). Las otras mezclas utilizadas son una reducción de nuevo del SF_6 en 5 puntos respecto a la mezcla inicial (*Mezcla 3*) y un aumento de la proporción de freón (*Mezcla 4*). Para cada una de las mezclas indicadas, se tomaron pulsos a diferentes voltajes de alimentación, obteniendo los espectros mostrados en la Figura 3.4.

	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (%)	SF_6 (%)	iso- C_4H_{10} (%)
Mezcla 1	85	10	5
Mezcla 2	86,5	8	6,5
Mezcla 3	87,5	5	7,5
Mezcla 4	90	5	5

Cuadro 3.1: Mezclas utilizadas durante el experimento.

Como se puede ver, la mezcla 1 es la que muestra la menor ganancia, y a medida que se disminuye la proporción de SF_6 , la distribución se desplaza hacia valores mayores de la integral. Se observa además que en las mezclas con mayor concentración de dicho gas, se produce una acumulación de los eventos en valores próximos al cero. Cuando esta proporción va disminuyendo, la acumulación se desplaza hacia la izquierda. Esto se explica en base a que el SF_6 se utiliza para limitar el crecimiento de las avalanchas producidas, por tanto, una disminución en la fracción de este componente favorece la producción de señales con mayor amplitud y/o carga.

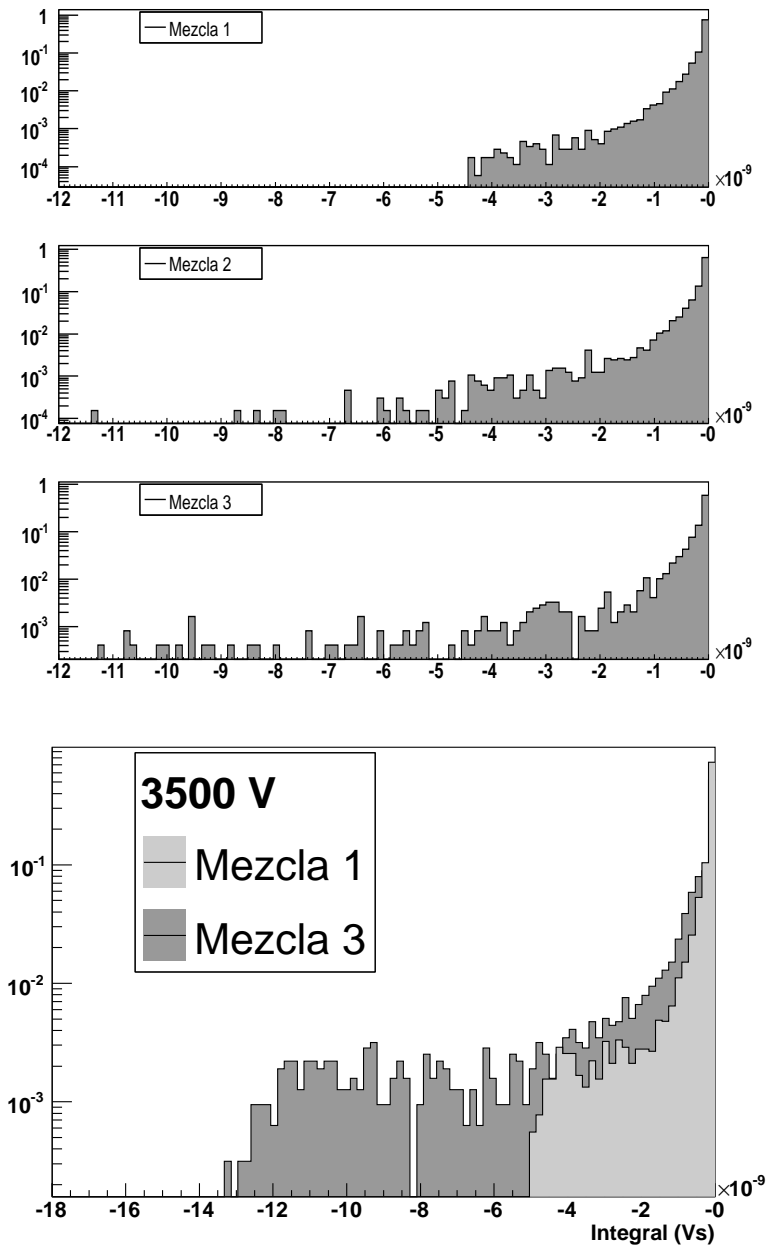


Figura 3.4: Distribuciones normalizadas de la integral de la señal producida por la RPC para diferentes mezclas gaseosas a 3250 V (panel superior) y 3500 V (panel inferior).

3.2.3. Resultados obtenidos con cósmicos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de los pulsos obtenidos con cósmicos, y se comparan con los obtenidos en el caso del carbono.

La Figura 3.5 muestra la distribución de la integral de la señal obtenida para cósmicos a 3250 V con la mezcla 1 y a 3500 V usando la mezcla 4, en la que además de disminuir la proporción de SF₆, se ha aumentado la de freón (ver cuadro 3.1).

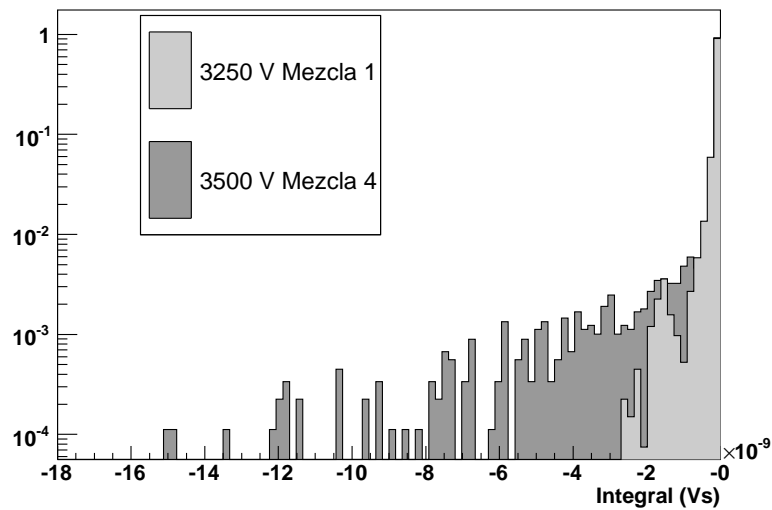


Figura 3.5: Distribuciones normalizadas de la integral de la señal producida en la RPC por rayos cósmicos .

Se observa el mismo comportamiento que en el caso de los iones de carbono. No se puede decir si la mezcla o el voltaje aplicado son el factor determinante, pero se observa que la medida con la mezcla presenta una ganancia muy baja por lo que la mayoría de los eventos se acumulan e torno al cero. Además el valor máximo que se obtiene de la integral es de $\approx 2 \times 10^{-9}$ V.s. Para la mezcla 4 operando a 3500 V, este valor máximo llega a los 15×10^{-9} V.s. Además, para esta configuración ya no se produce una acumulación de la distribución en torno al cero, sino que ésta se extiende a lo largo del rango.

3.2.4. Comparación entre rayos cósmicos y ¹²C

En la Figura 3.6 se muestran las distribuciones normalizadas de la integral de la señal tanto para cósmicos como para iones de carbono en las mismas

condiciones tanto de voltaje de alimentación como de mezcla gaseosa. Se observa que los valores máximo y medio (en valor absoluto) de dicha integral son mayores en el caso de carbono, debido a la mayor ionización producida por éste frente a los cósmicos. Sin embargo, esta ionización es menor de lo que uno esperaba, puesto que la carga de ^{12}C es 6 veces mayor que en caso de los rayos cósmicos, y la deposición de energía depende del cuadrado de la carga. Además la forma de la distribución en el caso de los rayos cósmicos presenta una acumulación significativa de sucesos en valores muy próximos a cero.

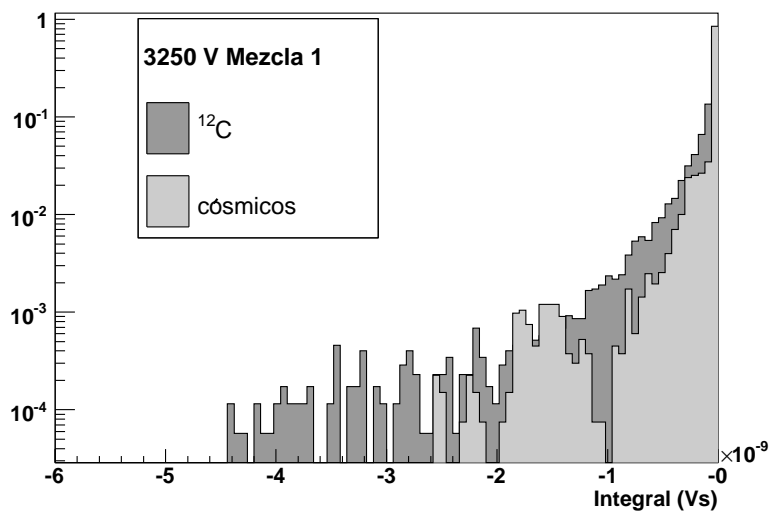


Figura 3.6: Distribuciones normalizadas de la integral de la señal producida en la RPC por rayos cósmicos y por iones de ^{12}C a 500 MeV/u para un voltaje de 3250 V y la mezcla 1.

3.2.5. Caracterización de la distribución de la integral

Con el fin de hacer una caracterización de las distribuciones de la integral se la señal se ha hecho un ajuste empírico de las mismas. Como se puede ver en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6, todas las distribuciones tiene más o menos la misma forma en la que se puede distinguir un fondo exponencial y tres acumulaciones. Esta acumulaciones pueden ser debidas a la existencia de tres procesos de ionización en el gas claramente diferenciados. En base a esto de ha definido la siguiente función

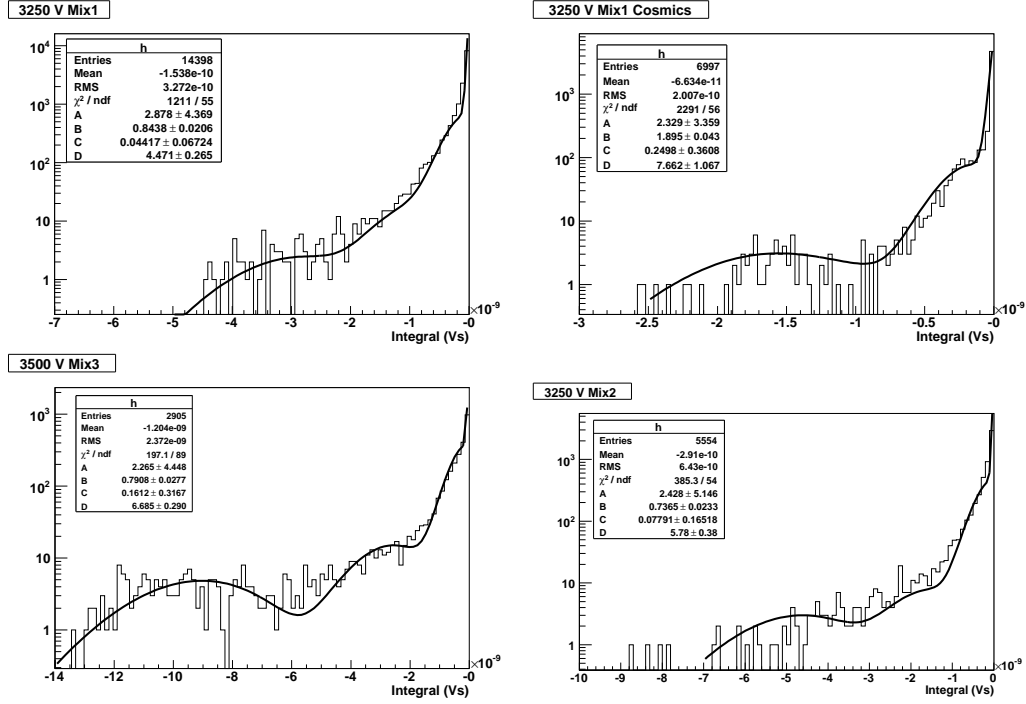


Figura 3.7: Ejemplo de ajustes de las distribuciones de la integral de la señal a la función de la ecuación (3.1). Panel superior izquierdo: HV=3250, mezcla 1, ¹²C. Panel superior derecho: ídem pero con cósmicos. Panel inferior izquierdo: HV=3500, mezcla 3, ¹²C. Panel inferior derecho: HV=3250, mezcla 2, ¹²C.

$$f(x) = K_1 \left[K_2 e^{\frac{x}{2 \cdot 10^{-11}}} + \frac{1}{A + (K_3 + 1)C} (AP(x, B) + K_3 CP(x, D) + CP(x, E)) \right] \quad (3.1)$$

en donde K_i son constantes de normalización que dependen de la estadística acumulada, $P(x, N)$ es una distribución de Poisson de parámetro N . Los parámetros a ajustar son A, B, C, D y E. La Figura 3.7 muestra algunos de los ajustes obtenidos.

Como se puede ver el acuerdo entre el ajuste y las distribuciones experimentales es muy bueno, y permite hacer una caracterización de las mismas de una forma más completa que la que obtenemos a partir de un único parámetro como puedan ser el valor medio o el mínimo. Se observa además que en el caso de los cósmicos en lugar de tres acumulaciones de puntos se observan tan sólo dos. Esto puede ser debido a que la tercera distribución se deba a un proceso que no tenga lugar cuando la ionización es producida por partículas mínimamente ionizantes. Este hecho debe ser estudiado con detalle. El cuadro 3.2 presenta los valores de los diferentes parámetros ajustados para

HV (V)	Mix	A	B	C	D	E	K ₃ C
2700	1						
3000	1	2,17	0,190	0,13	0,708	2,200	0,12
3200	1	2,24	0,234	0,1	0,813	2,100	0,2
3250	1	2,78	0,191	0,05	1,040	3,450	0,2
3500	1	2,34	0,271	0,2	1,511	3,680	0,14
3750	1	2,1	0,263	0,13	1,792	4,480	0,23
4000	1						
3250 (c)	1	2,32	0,227	0,25	0,919	1,680	0,08
3250	2	2,42	0,219	0,07	1,734	4,800	0,11
3250	3	2,42	0,349	0,14	2,696	7,200	0,13
3500	3	2,26	0,332	0,16	2,806	9,240	0,27
3250	4	2,57	0,248	0,11	2,801	9,240	0,17
3500 (c)	4	1,4	0,824	0,54	3,465	10,350	0,7

Cuadro 3.2: Valores obtenidos del ajuste de las diferentes distribuciones de la integral a la función de la ecuación (3.1). La c indica que esa medida se realizó con rayos cósmicos.

cada uno de los puntos de trabajo medidos durante este experimento¹.

La Figura 3.8 muestra la variación de los parámetros de las tres distribuciones tanto con la alta tensión como con la mezcla.

En el panel superior de la figura se representa cada uno de los parámetros frente al voltaje de alimentación en el caso de la mezcla 1. Se observa que a medida que el voltaje de alimentación aumenta, también lo hace el valor de los parámetros del ajuste. Esto es debido a que aumentando la tensión, el campo eléctrico aumenta, y por tanto el número de ionizaciones que producen avalancha también aumenta. La carga depositada es entonces mayor, y su valor medio por tanto crece.

En el panel inferior, se representa la variación de los parámetros corregidos con la fracción de SF₆. El parámetro corregido es aquel en que se ha sustraído la dependencia con la alta tensión para la mezcla 1 a partir de un ajuste lineal. Se observa una tendencia decreciente con la fracción de SF₆. Esto se explica debido a que este gas es el que se usa para la extinción de las descargas, y

¹La diferencia entre los valores de los parámetros de ajuste ajustes del cuadro y los de la Figura 3.7, es debido a que en el cuadro ya han sido multiplicadas por un factor de escala.

por tanto, aquellos eventos de una carga mayor relacionados por tanto con una ionización primaria mayor van a verse suprimidos.

Se observa también que la proporción entre dichas distribuciones cambia de modo que la primera ($P(x, B)$) disminuye en favor de las otras dos. Esto se puede explicar en base a que aumentar o bien el voltaje, o decrementar la proporción de SF_6 , la avalancha puede desarrollarse más, produciendo pulsos de mayor amplitud y carga. En base a estos resultados, parece que un punto de trabajo adecuado para iones en el caso de los detectores estudiados es el uso de un voltaje de unos 3500 V y una mezcla gaseosa intermedia entre la 2 y la 3 en la que la proporción de SF_6 sea adecuada para evitar descargas. Sin embargo, el punto de trabajo óptimo vendrá determinado por los requisitos de eficiencia y resolución temporal que no han sido discutidos en este trabajo.

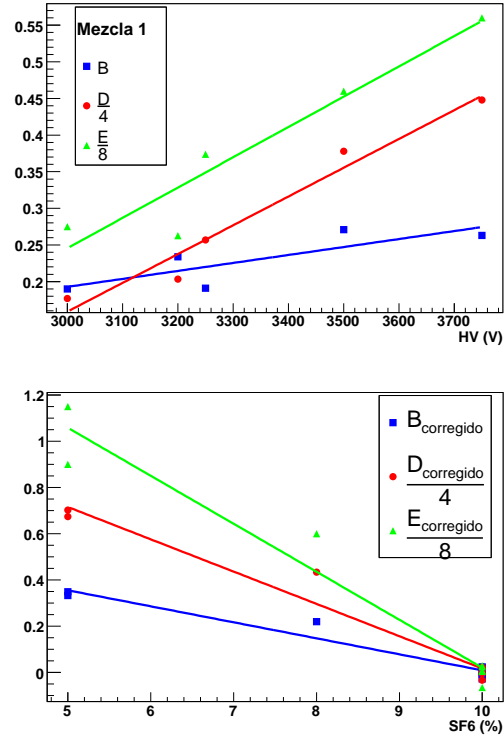


Figura 3.8: Representación de la variación de los diferentes parámetros de ajuste con el voltaje (panel superior) y de los parámetros corregidos con la fracción de SF_6 (panel inferior). Se ha realizado un ajuste lineal de los mismos con el fin de guiar al ojo.

Conclusiones

Se han construido una serie de prototipos para las RPCs del ToF-Wall de R³B que han sido estudiadas con cósmicos

Se han realizado medidas de las señales producidas por iones de ¹²C a 500 MeV/u en una RPC de vidrio de 300 μ m de *gap*, construida para tal efecto, con el fin de caracterizar el comportamiento de las mismas con iones pesados frente a partículas mínimamente ionizantes (MIPS) como son los rayos cósmicos. Para ello, se varió el voltaje aplicado entre electrodos y la mezcla gaseosa utilizada, jugando con la proporción del SF₆. Para la realización de las medidas se prepararon dos sistemas de adquisición diferentes: uno basado en el estándar VME, porque presenta una mayor capacidad de tasa, y otro basado en la digitalización completa de la señal por medio de un osciloscopio para poder un análisis mediante *software* de las mismas.

El análisis se ha realizado usando un conjunto de macros de ROOT desarrolladas para ello. Éstas permiten hacer la discriminación de los eventos no válidos. Además calculan una serie de parámetros que permiten hacer una caracterización de los pulsos. El parámetro utilizado es la integral de las señal en un tiempo determinado.

La distribución de la integral permite sacar conclusiones acerca de los voltajes y de las mezclas utilizados. A la vista de los resultados obtenidos el punto de trabajo adecuado para los iones sería en torno a los 3500 V y una mezcla con una proporción de SF₆ entre el 8% y el 5%, para que la ganancia de la misma sea la adecuada. La determinación concreta del punto de trabajo vendrá determinada por la resolución temporal que se puede alcanzar con las diferentes mezclas además de la eficiencia. Se ha realizado además un ajuste empírico de la forma de las distribuciones con el fin de caracterizar las mismas de una forma sistemática. Además, la proporción entre las diferentes distribuciones de Poisson de la ecuación (3.1), varía, disminuyendo el número de eventos de valor medio más bajo en favor de los dos de valor medio más alto. La explicación de esto es debida a que tanto un voltaje mayor como una menor fracción de SF₆ favorecen el crecimiento de las avalanchas producidas en el detector. Otra característica a destacar es una tendencia creciente entre

los valores medios de las distribuciones de Poisson ajustadas tanto con la alta tensión como con la mezcla utilizada.

El siguiente paso a realizar es finalizar el análisis con el estudio de la eficiencia y de la resolución temporal de este tipo de detectores con iones con el fin de determinar un punto de trabajo adecuado a los requisitos del detector, además de confirmar los resultados obtenidos con carbono con iones más pesados.

Apéndice A

La electrónica de lectura

La tarjeta electrónica de lectura *RPC-preamp* es un instrumento electrónico utilizado para adquirir y amplificar las señales recogidas por nuestro detector-RPC. Está basada en tres etapas claramente diferenciables:

- Una primera etapa, construida con elementos pasivos, se encarga de adaptar la impedancia del detector a la electrónica de adquisición, así como de amortiguar las altas frecuencias de las señales detectadas, para que la siguiente etapa electrónica pueda tratarlas sin pérdida de información. Las frecuencias superiores a 1 GHz (que no van a ser convenientemente transmitidas por los cables, ni amplificadas por la segunda etapa) son amortiguadas en un filtro RCL. Si los componentes fuesen ideales (condensador, resistencia e inducción puros), este filtro se puede calcular fácilmente para que se adapte a los $\approx 20\Omega$ de la impedancia característica de la RPC, manteniendo a 1 GHz unas pérdidas mínimas en las resistencias. El mayor problema encontrado es la calidad de los componentes, que presentan una impedancia compleja espuria y la dificultad de implementarlos a mano en un circuito impreso, en el que también se van a producir pérdidas en la señal (ver Fig. A.1).
- Una segunda etapa compuesta por dos chips amplificadores dispuestos en cascada: un GALI-S66 [28] y un MAX4223 [29] con un ancho de banda de 8GHz y 2GHz respectivamente y una ganancia total y controlable de 10 a 20dB (ver Fig. A.2).
- Una tercera etapa basada en un *Driver* que prepara la señal amplificada para ser transportada por un cable de decenas de metros y analizada en el ADC correspondiente (ver Fig. A.3).

Esquemáticamente y físicamente lo vemos representado en las siguientes figuras:

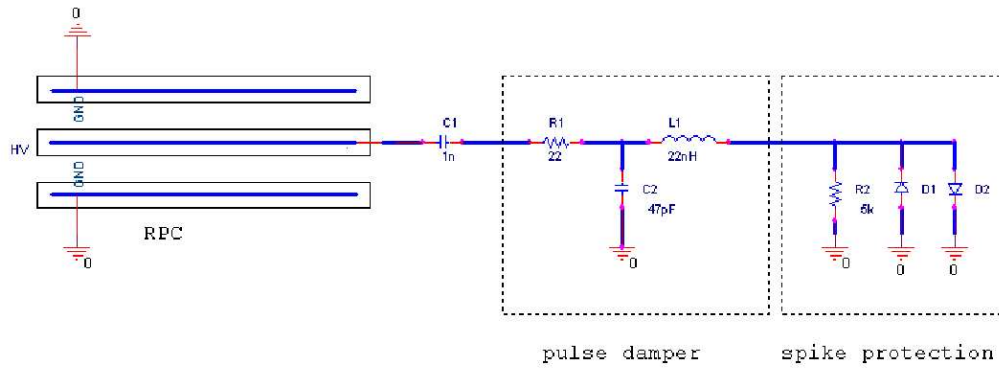


Figura A.1: Esquema de la primera etapa de la tarjeta. Ver texto para detalles.

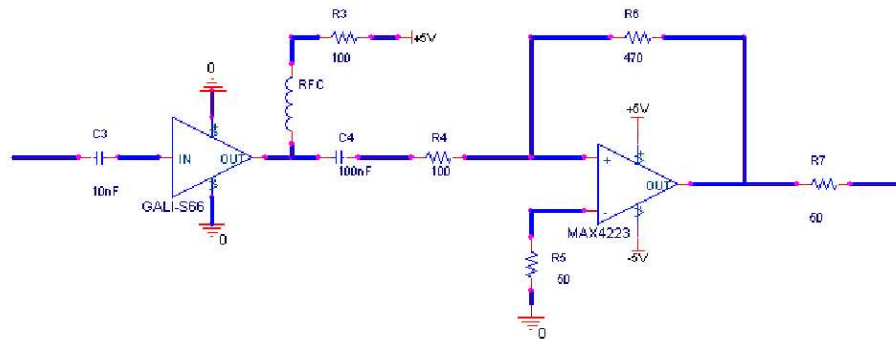


Figura A.2: Esquema de la segunda etapa de la tarjeta. Ver texto para detalles.

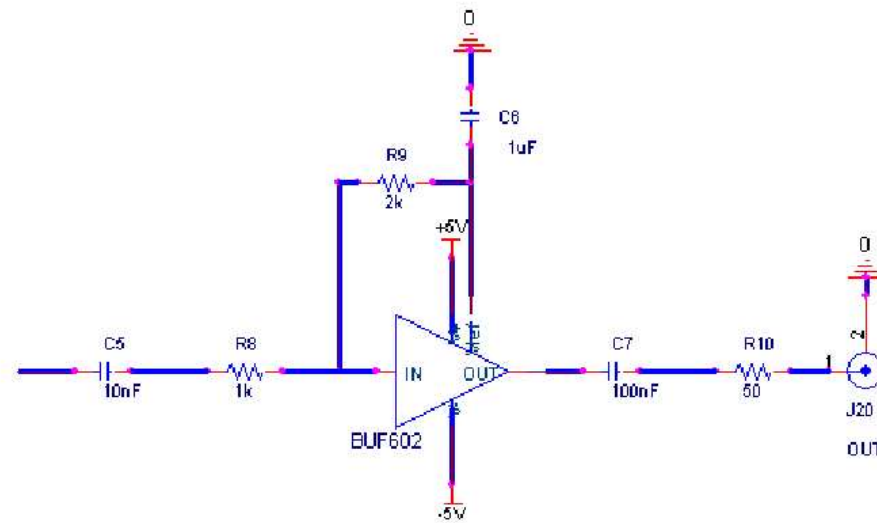


Figura A.3: Esquema de la tercera etapa de la tarjeta. Ver texto para detalles.

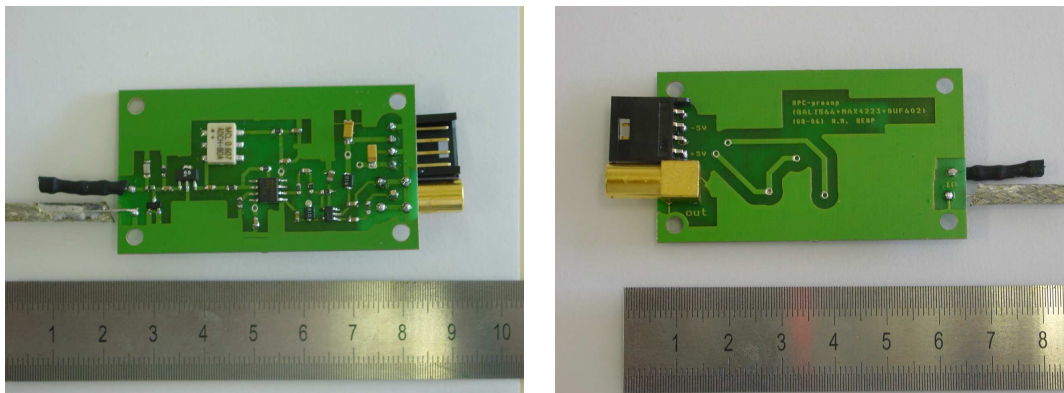


Figura A.4: Fotografías de la Tarjeta electrónica de lectura. Izquierda: Cara TOP. Derecha: Cara BOTTOM.

Bibliografía

- [1] http://www.gsi.de/fair/index_e.html.
- [2] <http://www-land.gsi.de/r3b>.
- [3] D. Pérez-Loureiro. *Conceptual Design of a Large Area Time-of-Flight Wall for the R³B experiment at FAIR*. Tesina, Universidad de Santiago de Compostela, 2005.
- [4] A.N. Akindinov et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 533:74, 2004.
- [5] H. Alvarez Pol et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 533:79, 2004.
- [6] D. González-Díaz. *Research and Development on Timing RPCs. Applications to the ESTRELA detector of the HADES experiment at GSI*. Tesis Doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 2006.
- [7] A. Schüttauf. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 533:65, 2004.
- [8] Wang Yi et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 538:425, 2005.
- [9] <http://www.gsi.de>.
- [10] R. Santonico and R. Cardarelli. *Nucl. Instr. and Meth.*, 187:377, 1981.
- [11] V. V. Parkhomchuck, Pestov Yu. N., and N. V. Petrovykh. *Nucl. Instr. and Meth.*, 93:269, 1971.
- [12] G. F. Knoll. *Radiation Detector and measurement*. John Wiley & sons, New York, second edition, 1989.
- [13] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987.
- [14] R. Cardarelli, R. Santonico, A. di Biagio, and A. Lucci. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 263:20, 1988.

-
- [15] C. Bacci. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 456:121, 2000.
- [16] E. Cerron Zeballos et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 374:132, 1996.
- [17] A. V. Akindinov et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 533:93, 2004.
- [18] F. Anghinolfi et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 533:183, 2004.
- [19] <http://www.tektronix.com>.
- [20] <http://www.hamamatsu.com>.
- [21] <http://www.caen.it>.
- [22] <http://www.vita.com/vme32.html>.
- [23] <http://www.ces.ch>.
- [24] <http://www-w2k.gsi.de/daq>.
- [25] http://www.gsi.de/informationen/wti/ee/elekt_entwicklung/triva3_e.html.
- [26] <http://www-w2k.gsi.de/go4>.
- [27] <http://root.cern.ch>.
- [28] <http://www.minicircuits.com/>.
- [29] <http://www.maxim-ic.com/>.