

# Repuestas Grupo IV Pareja VII

## Rayos cósmicos analógicos

16 de abril de 2025

### Índice

<b>1. Teoría</b>	<b>1</b>
<b>2. Indicaciones teóricas</b>	<b>2</b>
<b>3. Preguntas y respuestas</b>	<b>2</b>
3.1. Estudio de las características de los pulsos generados y respuestas de los detectores	2
3.2. Determinación del punto de trabajo de los detectores . . . . .	5
3.3. Determinación del valor de la ventana de coincidencias . . . . .	8
3.4. Caracterización de la estadística de la radiación cósmica . . . . .	9
3.5. Separación de las componentes “blandas” y “dura” de la radiación cósmica secundaria mediante el uso de absorbentes de hierro y plomo . . . . .	10
3.6. Evaluación de la aceptación geométrica del dispositivo y comparación con los resultados experimentales . . . . .	13
3.7. Determinación del flujo de muones en la superficie terrestre y comparación con resultados bibliográficos . . . . .	14
3.8. Determinación de la incidencia angular de la radiación cósmica incidente . . . . .	15

### 1. Teoría

Los rayos cósmicos son un tipo de radiación ionizante formada por partículas con una energía muy elevada debido a sus grandes velocidades, cercanas a la de la luz. Se generan en el espacio exterior, ya sea en nuestro Sol, en nuestra galaxia o incluso en otras galaxias lejanas, y recorren el espacio hasta alcanzar la atmósfera terrestre. En este punto, los rayos cósmicos están compuestos principalmente por protones y partículas alfa, y en menor medida, por electrones y partículas pesadas ionizadas. A esta radiación se le denomina radiación cósmica primaria.

Estas partículas cargadas interactúan con la atmósfera terrestre y se transforman en radiación cósmica secundaria. Como resultado de estas interacciones, se genera una cascada de partículas compuesta por una variedad de elementos como muones, fotones y neutrones, entre otros.

La proporción de cada tipo de partícula en la radiación secundaria depende del punto de la superficie terrestre en el que nos encontremos, debido a la influencia del campo magnético terrestre. En estas cascadas de partículas se pueden distinguir tres componentes principales: componente muónica, formada por muones y neutrinos resultantes, principalmente, del decaimiento de piones y kaones cargados; componente hadrónica, constituida esencialmente por protones y neutrones; y componente electromagnética, integrada por electrones, positrones y fotones.

A nivel del mar y en nuestra latitud, se sabe que la mayor parte de la radiación cósmica está compuesta por muones. En esta práctica, realizamos un estudio de la radiación cósmica secundaria al nivel del suelo mediante el uso de detectores centelladores, de los cuales hablaremos más adelante. Con estos dispositivos, entre otros métodos, buscamos caracterizar la radiación cósmica secundaria que llega a la superficie terrestre (compuesta principalmente por muones, electrones y positrones), analizando su comportamiento estadístico y cómo se atenúa al atravesar distintos materiales. Además, estudiaremos la distribución angular de los muones que componen esta radiación al nivel del suelo.

## 2. Indicaciones teóricas

La intención de la práctica es medir la radiación cósmica que alcanza nuestros detectores, caracterizando tanto los detectores como las propiedades básicas de esta radiación incidente. Para eso usaremos un sistema de dos detectores de centelleo acoplados a un fotomultiplicador cada uno. Los detectores, situados a diferentes distancias y en paralelo, nos permitirán estudiar la radiación cósmica secundaria, midiendo las coincidencias temporales de sus pulsos dentro de una ventana temporal estrecha.

Para obtener resultados cuantitativos procederemos a contar las coincidencias producidas: las señales pasan por un comparador que devuelve un pulso digital de amplitud constante cuando sobrepasen un umbral determinado. Este pulso va a un módulo de coincidencias que muestra el número de pulsos válidos registradas en cada detector y el número de coincidencias cuando las señales de ambos centelladores llegan dentro de una ventana temporal estrecha.

## 3. Preguntas y respuestas

### 3.1. Estudio de las características de los pulsos generados y respuestas de los detectores

- a) **Un osciloscopio tiene diferentes acoplamientos a la señal, modos de disparo,... ¿En qué acoplamiento a la señal, que tipo de disparo y umbral y que amplitud y tiempo en la ventana de observación se debe poner para observar los pulsos de la radiación cósmica?.**

Para observar los pulsos de la radiación cósmica es importante ajustar correctamente nuestros fotodetectores. Hay varios parámetros de ajuste:

- a) Acoplamiento de la señal: usamos AC (CA, corriente alterna).
  - b) Tipo de disparo: el tipo de disparo que empleamos fue el disparo por flanco, ya que los pulsos generados por la radiación cósmica tienen una respuesta rápida con un número brusco de señal.
  - c) Nivel de umbral: Con respecto al nivel de umbral lo ideal sería ajustar a un valor superior al ruido. Siguiendo el comportamiento de los detectores determinamos que con  $-40\text{mV}$  no medimos ninguna señal (da voltaje negativo las señales). Podemos determinar un umbral apreciable en donde detectemos un número significativo de cuentas, sobre los  $-250\text{ mV}$ . Destacando que a partir de los  $-800\text{ mV}$  son la mayoría son coincidencias.
  - d) Amplitud y tiempo en la ventana de observación: (ver según las gráficas que midamos), lo usual sería que en la escala de voltaje tuvieramos  $200\text{ mV}$  y para el tiempo de la ventana de observación  $5\text{ns}$ .
- b) **¿Qué características esperáis de un pulso generado por la luz de un plástico centellador de lectura a través de un fotomultiplicador? ¿Cuál creéis que es su amplitud típica, su tiempo de subida,**

**la anchura total del pulso generado, su forma...?**

Las características esperables son:

- Un pulso rápido con una subida abrupta seguida de una caída exponencial. Esto se debe a la naturaleza de los centelladores plásticos, que producen una señal de luz muy breve cuando son excitados por la radiación incidente. Cuanto más alto es el voltaje mayor es la caída.
- La amplitud del pulso depende de la energía depositada en el centellador y de la eficiencia del fotomultiplicador. Típicamente, la amplitud de los pulsos en detectores de centelleo con fotomultiplicadores está en el rango de un voltio, oscilando desde medio voltio a un voltio y medio para un trigger  $\sim 500$  V.
- El tiempo de subida del pulso (definido como el tiempo que tarda en ir del 10 % al 90 % de su amplitud máxima) está en el orden de nanosegundos (ns). Para centelladores plásticos, típicamente es del orden de 5 a 10 ns, en nuestro caso alrededor de 7 ns.
- La anchura total del pulso, medida como el tiempo durante el cual la señal es significativa, depende del tiempo de decaimiento del centellador. En centelladores plásticos, este tiempo de decaimiento está en el rango de 25 ns, aunque en la práctica la anchura del pulso que se observa con un osciloscopio puede ser del orden de decenas de nanosegundos, debido a la respuesta del fotomultiplicador y la electrónica asociada. También depende de la ganancia que le estemos dando.

Resumen: el pulso generado en un centellador plástico acoplado a un fotomultiplicador tiene una amplitud de decenas a cientos de milivoltios, un tiempo de subida de unos pocos nanosegundos, una anchura total del orden de decenas de nanosegundos y una forma que sigue una subida abrupta con una caída exponencial.

- c) **¿Cómo se os ocurre determinar que realmente estáis viendo pulsos que corresponden a un cósmico incidiendo en el detector y no otra radiación interna del detector, radiación ambiental, ruido electrónico, ... ? Recordad que tenéis dos detectores y que podéis colocarlos de la forma en la que queráis para asegurar el paso de la radiación.**

Se nos ocurren varias formas para determinar si realmente estamos viendo pulsos cósmicos. Por ejemplo podemos desalinear verticalmente los detectores, ya que la mayor parte de la radiación cósmica viene del cielo. Al desalinear los detectores, la radiación cósmica recibida es nula, ya que no hay coincidencias así. Entonces toda detección en este caso tendrá que venir dada por ruido ambiental o coincidencias espurias. Si la señal recibida es la misma que al estar alineadas podemos suponer que no estamos midiendo rayos cósmicos. También podríamos restar el ruido de fondo (medir tasa de eventos con y sin coincidencias). Recalcando que el ruido de fondo es mucho más potente que la radiación cósmica, ajustaremos el umbral de los detectores para que el próximas medidas no aparezca ruido.

- d) **¿Cuál es la velocidad aproximada que tienen los cósmicos al atravesar nuestros detectores? ¿Cuánto tarda esta radiación en cubrir la distancia entre los detectores? ¿Podéis comprobarlo? Recordad que la propagación y recolección de la señal suele incrementar esta diferencia de tiempo, sobre todo si la partícula pasa por diferentes posiciones de los detectores.**

Los rayos cósmicos que medimos nosotros están compuestos principalmente por muones, que poseen una masa en reposo de  $105.7 \text{ MeV}/c^2$  y energías entorno del orden de 4 GeV. Consiguientemente su velocidad está cerca a la velocidad de la luz. Suponiendo  $v \approx c$ , tenemos que el tiempo será:

$$t = \frac{d}{c}$$

siendo  $d$  ( $d=30$  cm) la distancia de un detector y tenemos dos detectores tardaríamos 2 ns (1 ns por detector). En general será mayor, por ejemplo, por la entrada en un ángulo no paralelo a la perpendicular de los detectores. Es fácil de comprobar, solo hay que disminuir el tiempo de coincidencia hasta que dejemos de detectar cósmicas, o usar un osciloscopio que lea la diferencia de tiempos entre ambos pulsos.

- e) **¿Cómo se comportan los pulsos al variar el voltaje de los fotomultiplicadores? ¿Podéis explicar el efecto observado?**

Si aumentamos el voltaje aumentamos la ganancia, lo que genera dos efectos: aumenta la amplitud del pulso, la anchura del pulso (ya que la caída exponencial tiene que ser más largo para que llegue a cero) y lo rápido que aparecen pulsos también aumenta, lo que también creemos se debe en parte al aumento del ruido.

También se observa que existe un voltaje de saturación en aproximadamente 2 KV (1.95), donde los aparatos de medida dejan de funcionar correctamente.

- f) **Si en vez de conectar el osciloscopio a la salida de los fotomultiplicadores, conectamos las salidas a dos canales separados del módulo de umbrales (módulo de electrónica NIM con 8 canales independientes de umbral) y la salida de estos al osciloscopio... ¿Qué tipo de señal se observa ahora en el osciloscopio? Describe en este caso la amplitud y anchura de las señales**

La señal observada en el osciloscopio tras el módulo de umbrales será un tren de pulsos cuadrados de amplitud fija (-824 mV en NIM). La anchura sería de entre 400-500 ns

Cuando medimos utilizando los fotomultiplicadores los resultados que obtenemos en las salidas son de señales físcias, en cambio cuando conectamos el osciloscopio al módulo de electrónica NIM, lo que hace este aparato es "corregir" la señal, filtrando el ruido por ejemplo, para que pueda medir señales electrónicas (cuadradas).

- g) **El valor del discriminador se puede fijar girando un tornillo del discriminador que va conectado a un potenciómetro interno. El nuevo valor del discriminador puede obtenerse con la ayuda de un polímetro (preguntad a un profesor por el procedimiento). Este valor es proporcional al valor del discriminador, pero no siempre coincide con él. Teniendo en cuenta que dispones de un osciloscopio que te permite ver la amplitud de la señal antes de pasar por el discriminador, ¿se te ocurre una manera sencilla de estimar la constante de proporcionalidad? ¿Podrías poner en el osciloscopio una señal de entrada de un detector junto a la salida del módulo de umbrales para el mismo canal?**

La mejor manera de estimar la constante de proporcionalidad sería usar la amplitud de la señal dada por el osciloscopio sin usar el discriminador y usando el discriminador. Dado que el discriminador tiene 400 ns de anchura, mientras que para la señal sin discriminar entorno a 20 ns sería, la constante de proporción será de 0.05.

Sí, colocando la señal del discriminador en el canal osciloscopio 1 y luego el out en el canal osciloscopio 2 para un mismo canal. Obtenemos la siguiente imagen:



Donde se puede ver el pico de la señal entrante a la izquierda y a la derecha la lógica dada por el discriminador. Que se encuentren en diferentes tiempos (12 ns) es obvio: el pulso aún tiene que recorrer unos centímetros de cable y ser discriminada.

- h) **¿Cómo cambia la señal lógica cuando modificamos el umbral? Estas señales de tipo lógico se utilizan para la obtención de las coincidencias en el módulo de coincidencias?**

El umbral del discriminador define el nivel mínimo de amplitud que una señal del fotomultiplicador (PMT) debe superar para generar una salida lógica en el módulo de umbrales. Aumentar el umbral reduce el número de señales lógicas generadas, mientras que disminuirlo aumenta la tasa de pulsos pero puede introducir ruido. La configuración óptima depende del balance entre detección eficiente y reducción de ruido. [La señal lógica no se modifica](#)

- i) **Una vez estudiadas en el osciloscopio todas las características de los pulsos físicos y lógicos, conecta las salidas del módulo de umbrales a los canales correspondientes del módulo de coincidencias. ¿Qué observas en cada canal y en el conteo de coincidencias? ¿Cómo varían estos contajes cuando cambias el umbral de cada uno de los canales? Intenta explicar estas variaciones. El módulo de coincidencias tiene una opción (indicada con el símbolo “x100”) que divide la cuentas por un factor 100, para que el contador no se dispare. Esta opción es necesaria cuando el número de cuentas es muy alto: pruébalo.**

Señales observadas en cada canal: cada canal del módulo de coincidencias recibe la señal lógica de los detectores de centelleo después de haber pasado por el módulo de umbrales. El módulo de coincidencias registra una coincidencia si detecta pulsos simultáneos en los canales dentro de una ventana de tiempo predefinida. Observaciones en el conteo de coincidencias: el contador del módulo de coincidencias muestra el número de eventos en los que se detectaron señales simultáneas en ambos detectores. Si el umbral es bajo: se registran más coincidencias, ya que se aceptan eventos de menor amplitud, incluyendo ruido. Si el umbral es alto: se reducen las coincidencias, ya que solo los eventos de alta energía generan pulsos que superan el umbral.

Al aumentar el umbral de alguno de los canales el número de cuentas disminuye pues es necesario producir una señal mayor, es decir, un número de cuentas mayor para superar el umbral del discriminador.

- j) **¿Notas algún tipo de diferencia en la tasa de llegadas cuando se tapan los centelladores y fotomultiplicadores de la luz? Los detectores de centelleo son extremadamente sensibles a la luz en la zona del espectro correspondiente al visible; esa es la razón por la que están recubiertos con cinta negra. ¿Puedes ver alguna dependencia de las cuentas con la luz del laboratorio? (por ejemplo, al subir o bajar las persianas, cubrir los centelladores con tela...). Si es así, entonces estás aumentando la probabilidad de que este tipo de señales den contribuciones espurias a tus coincidencias... Piensa en una manera inteligente y cómoda para evitarlo.**

Los detectores de centelleo con fotomultiplicadores (PMTs) son extremadamente sensibles a la luz visible debido a su mecanismo de funcionamiento. Si los centelladores y fotomultiplicadores no están bien aislados de la luz ambiental, se pueden observar efectos notables en la tasa de detección de eventos. Es por esto que intentamos minimizar el ruido de la luz tapando los fotomultiplicadores con una tela.

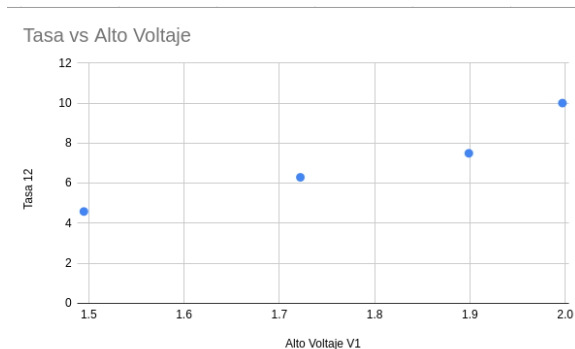
### 3.2. Determinación del punto de trabajo de los detectores

- a) **¿Cuántos parámetros podemos variar para estudiar la dependencia del umbral y del voltaje? Tenemos dos detectores... Parece complicado realizar un estudio detallado de ambos. Aprovechemos que son parecidos para realizar un estudio de uno de ellos, manteniendo como referencia el otro. Más adelante podremos optar por modificar los parámetros de este segundo detector si no está en la región correcta de medida.**

Existen dos parámetros principales. El voltaje del fotomultiplicador y el umbral del discriminador. El primero controla la ganancia, aumentando la señal generada (si es demasiado bajo se pierden eventos

y si es alto aumenta el ruido), y el segundo define qué señales se consideraran válidas. Tenemos uno de estos en cada uno de los detectores, así que tenemos 4 parámetros.

- b) Os sugerimos realizar un estudio barriendo uno de los parámetros primero (el voltaje del detector A, por ejemplo) mientras mantenemos fijos el resto de parámetros (el detector B y el umbral del detector A) en algún valor de referencia, como puede ser  $V_B = 1900$  V,  $U_B = 100$  mV y  $U_A = 100$  mV. ¿Cómo creéis que afectará a la determinación del punto de trabajo una variación en los parámetros que se sugieren para el sistema B que usamos como referencia? **ATENCIÓN: no sobrepaséis el voltaje máximo recomendado**



Dado que las coincidencias dependen de la correcta detección en ambos detectores, la configuración de  $V_B$  y  $U_B$  puede influir en la aparente eficiencia del detector A si el sistema B no está bien ajustado. Si están bien ajustadas, no debería influir en el sistema A.

- c) **En cada medida tendremos la posibilidad de obtener la información de cada contador y de las coincidencias entre ellos. Es importante que toméis las tres medidas ¿Sabrías adelantar por qué es importante? ¿Cuál es el conteo que se va a representar como indicador del comportamiento del detector para ver su variación frente el voltaje? Explica el porqué de la respuesta.**

Registrar los tres valores ( $C_A$ ,  $C_B$  y  $C_{AB}$ ) es esencial para diagnosticar la respuesta de los detectores y optimizar su operación. Estos son: contador del detector A (número de eventos detectados), contador B (número de eventos detectados por B) y  $C_{AB}$  el número de eventos detectados simultáneamente en ambos detectores dentro de la ventana de coincidencia. Al medir cada uno podemos evaluar las eficiencias relativas, identificar ruidos o señales espurias o evaluar la variación del voltaje y su impacto en la eficiencia. El conteo de coincidencias  $C_{AB}$  es la mejor métrica para evaluar la variación del voltaje, ya que es menos susceptible al ruido y refleja la detección real de partículas, ya que depende de que ambos detecten la misma partícula casi simultáneamente (el ruido no se comporta en coincidencia, y las señales espurias tampoco).

- d) **¿Cuánto tiempo tengo que medir para determinar razonablemente un comportamiento de los detectores con una incertidumbre razonable? ¿Puedes anticipar el tipo de estadística que tendrán nuestro proceso de detección? ¿Puedes anticipar la incertidumbre de cada conteo y establecer un criterio para reducirla lo más posible? Recuerda que tenemos un tiempo limitado para la realización de la práctica (el tiempo aproximado para cada parte se incluye en la descripción de los apartados). Realiza una pequeña tabla que te indique la incertidumbre relativa en función del número de cuentas medido**

Pues depende del número de cuentas. Para obtener una incertidumbre menor al 5 % necesitaríamos medir, aproximadamente 500 cuentas ya que la incertidumbre de la medida de  $N$  cuentas es:

$$\sigma(N) = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

ya que estamos ante una distribución de Poisson, que tiene una incertidumbre estandar de  $\sqrt{N}$ . Si la tasa es de  $T$ , tenemos que el tiempo de medida para obtener una incertidumbre relativa  $x$  es:

$$x = \frac{1}{\sqrt{t \cdot T}} \rightarrow t = \frac{1}{x^2 T} \quad (1)$$

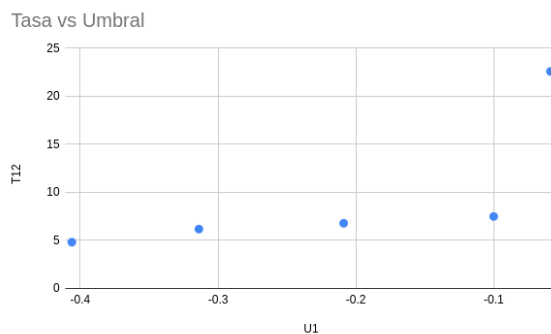
Con por ejemplo 5 minutos será suficiente. Nuestro proceso tendrá una distribución de Poisson:

Cuentas registradas ( $N$ )	Incertidumbre relativa ( $\frac{1}{\sqrt{N}}$ )
10	31.6 %
100	10.0 %
500	4.5 %
1000	3.2 %
5000	1.4 %
10000	1.0 %

Tabla 1: Relación entre el número de cuentas registradas y su incertidumbre relativa.

- e) Como se indica en la nota N11, buscamos un voltaje que permita asegurar la detección de los pulsos de interés, con amplitudes normalmente mayores que los que ofrece el ruido electrónico y otros efectos. Por ello, estaremos interesados en la región más aplanada de la curva de voltaje, y en especial en su final. ¿Crees que se debe barrer de forma homogénea el rango de posibles voltajes o que se debe uno centrar en alguna región en concreto?

El barrido no debe hacerse de manera homogénea en todo el rango posible de voltajes, sino que debe centrarse en la región en la que la curva se aplanan, lo que indica una estabilidad en la respuesta del detector. Sin embargo para encontrar el aplanamiento debemos hacer un barrido inicial.



- f) Una vez barridos los voltajes, pasaremos a fijar el voltaje y comprobar que ocurre cuando variamos el umbral (como antes los parámetros del detector B y ahora el voltaje del detector A se mantienen fijo). ¿En qué valor fijareis el voltaje del detector A tras el estudio anterior? De nuevo razona la respuesta y discútelo con un profesor en caso de duda

Tras realizar el barrido de voltaje del detector A, debemos fijarlo en un valor óptimo antes de proceder al ajuste del umbral. Según la metodología descrita en la práctica, el voltaje ideal debe cumplir con los siguientes criterios: debe encontrarse en la región más aplanada de la curva de respuesta del detector, donde la tasa de coincidencias se estabiliza y las variaciones de voltaje afectan mínimamente la eficiencia del detector, y debe maximizar la señal de los pulsos de interés mientras discrimina aquellos de baja amplitud asociados al ruido electrónico. Así el voltaje del detector A elegido es:

$$V_A = 1910 \text{ V}$$

- g) **Una vez barridos los valores del umbral podremos determinar los parámetros de voltaje y umbral óptimos, según las curvas características. ¿Aplicaríais estos parámetros al detector B? ¿Cómo podríais comprobar si la aplicación de estos parámetros al detector B es correcta? ¿Qué ocurriría si medís coincidencias con uno de los detectores fuera de la zona óptima de medida?**

No necesariamente. Aunque los detectores A y B sean similares, pueden tener diferencias en su respuesta debido a variaciones en la fabricación, envejecimiento, o diferencias en el fotomultiplicador y la electrónica asociada. Para verificar esto podemos comparar las tasas de conteo individuales (medir el número de cuentas detectadas por el detector B con los nuevos parámetros y compararlo con el detector A) o medir las coincidencias (si ambos están en la región óptima la tasa de coincidencia debe ser máxima y estable). En cualquier caso, el método más efectivo para ver si tienen la misma zona es medir la curva de características.

En el caso de no estar en la zona óptima perderemos eventos cósmicos (disminuyendo la eficiencia efectiva, haciendo que necesitemos más tiempo para medir lo mismo) y aumentaremos el ruido y falsas coincidencias.

### 3.3. Determinación del valor de la ventana de coincidencias

- a) **¿Cuál consideráis que es un valor razonable a priori para la ventana de coincidencia? De la observación de los pulsos sabéis cual es la anchura característica de un pulso... Por otro lado, tendremos el tiempo que tardan los cósmicos en llegar de un detector a otro (son relativistas, asume que su velocidad es una fracción alta de c), el tiempo de generación y propagación de las señales en los plásticos, la longitud de los cables... Intenta evaluarlo todo y sugerir un valor para la ventana.**

La ventana de coincidencias *se corresponde con el tiempo máximo de espera desde la llegada del primer puls lógico*. Como mínimo tendrá un valor igual al tiempo que tarda una partícula en ir de uno a otro calculado previamente. Los retardos en la propagación de la señal (3 ns) y la anchura del pulso (10 ns) aumenta este valor, por lo que podríamos decir entorno a 10 – 20 ns.

- b) **¿Cuál es la tasa de coincidencias al colocar los detectores en una disposición que evite el paso de cósmicos (detecciones reales) y solo podamos tener coincidencias accidentales? Utilizando la ecuación 17.28 del documento N10 ¿Cuánto tiempo necesitaríamos medir en esas condiciones para tener una incertidumbre del 10 % en la medida de la ventana (denotada como  $\tau$  en la ecuación)? ¿Y para tener una incertidumbre del 1 %? Asumid que la incertidumbre en cada conteo corresponde a la raíz cuadrada del conteo realizado (lo comprobaremos más adelante)**

La tasa de coincidencias viene dado por:

$$r_{acc} = 2\tau \cdot r_1 r_2 \quad (2)$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son las tasas individuales y  $\tau$  es el tiempo de ventana. Dado que nosotros hemos medido los datos durante 3 minutos obteniendo un error relativo del 5 %, entendemos que para obtener un error del 10 % bastaría con un tiempo de 40 segundos, mientras que para obtener un error del 1 % necesitaríamos casi una hora.

**Nuestro tiempo de ventana de coincidencia nos dio del orden de 5-10 microsegundos.**

- c) **¿Dependerá la ventana de coincidencia de la tasa individual de cada detector? ¿Dependerá la tasa de coincidencias accidentales de la tasa individual de cada detector? Explica tu respuesta.**

La ventana de coincidencia no depende de la tasa individual de cada detector, depende del tiempo de vuelo de las partículas cósmicas, duración de los pulsos de los detectores, retardos electrónicos y



ruido electrónico. Sin embargo, la tasa de coincidencias accidentales sí depende de la tasa individual en cada detector, en virtud de la ecuación 17.28. Tiene sentido ya que la tasa de que coincidan tiene que venir dada por la probabilidad de que se vea en ambas en un tiempo dado, y dado que los eventos en el caso accidental no están correlacionados, la tasa accidental debe ser proporcional al producto de ambas.

- d) **Para conseguir determinar la ventana en un tiempo razonable con menor incertidumbre necesitamos incrementar las tasas. ¿Qué se os ocurre hacer para incrementar la tasa de coincidencias accidentales? Recordad que el método se basa en que todas las coincidencias medidas deban ser accidentales, no de partículas reales.**

Lo mejor para incrementar la tasa de coincidencias accidentales es reducir los umbrales (así aumenta el número de accidentales registradas) o aumentar el voltaje de ganancia (así al ser más sensible el apartado es posible que llegue a medirlos).

- e) **Intenta determinar la ventana de coincidencias bajo diferentes condiciones de medida (voltaje y umbral de los detectores) para asegurar que la medida tiene baja incertidumbre y ofrece valores homogéneos para distintos parámetros. ¿Observáis alguna tendencia sistemática en el valor de la ventana al medirla variando los parámetros de trabajo de los detectores?**

Las posibles tendencias se pueden dar:

- Al variar el voltaje de los fotomultiplicadores. Si  $V$  es muy baja la ganancia hace que algunos pulsos accidentales no se vean, y si es muy alta puede ocurrir que se amplifiquen señales no deseadas, lo que ensancharía el ruido.
- Al variar el umbral discriminador, si es muy bajo puede detectarse señales débiles y ruidosas aumentando la tasa de coincidencias accidentales, y si es muy alto puede ser que no se vean reduciendo la ventana.

También puede ser que al variar la alineación se modifique el tiempo de ventana medio

- f) **Notad que también existe un límite superior al método de determinación de la ventana: la aproximación deja de funcionar si la probabilidad de que lleguen más de dos cuentas en la ventana temporal es alta. ¿A qué tasa del detector tendríamos una probabilidad alta (digamos, mayor del 20 %) de tener dos cuentas en el intervalo de la ventana?**

La probabilidad de que lleguen dos eventos a la vez viene dada por:

$$P = \frac{(T\tau)^2 e^{-T\tau}}{2} \quad (3)$$

siendo  $T$  la tasa de cuentas por segundo y  $\tau$  la ventana de coincidencia en segundos. Entonces si queremos que  $P = 0.2$  tenemos que:

$$\lambda < 5 \cdot 10^7 \text{ cuentas/s}$$

en la ecuación anterior.

### 3.4. Caracterización de la estadística de la radiación cósmica

- a) **¿Por qué creéis que se pide realizar el estudio con un número medio de coincidencias bajo, menor que 5? Cuando los conteos tienen un promedio alto (en cuentas por unidad de tiempo), la distribución estadística que siguen no se distingue de una distribución de Gauss. ¿Cuál creéis que es un promedio que os permita diferenciar la distribución de Gauss de una de Poisson? Intentad representar ambas distribuciones. ¿Sabéis como se**

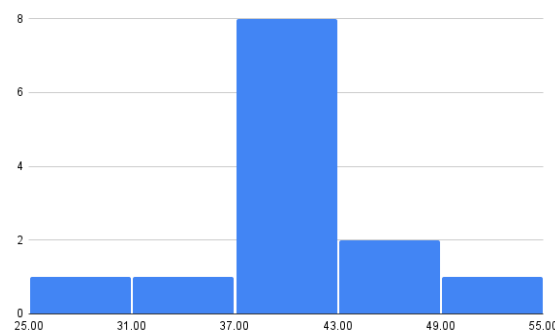


Figura 1: Histograma de coincidencias por frecuencias iguales

### ¿Llama la distribución de Gauss que toma valores discretos (enteros) en vez de continuos?

Haciendo un vídeo de 1 hora y media, contamos las coincidencias cada 5 segundos, como no nos daba tiempo para pasar todos los datos, únicamente seleccionamos 1 minuto del vídeo para hacer este histograma. Unque sé puede distinguir la tendencia de una distribución de Poisson. Pensamos que tratando con estas cuentas, el intervalo de 5 segundos es apropiado para distinguir bien la ambas distribuciones, aunque tendríamos que estudiar mejor su varianza.

La distribución de Gauss que toma valores discretos se denomina distribución binomial.

- b) **Mostrad la distribución de las medidas tomadas o de una parte de ellas (aunque lo realicéis con una cámara podéis tomar una serie de medidas a mano para representar resultados preliminares). ¿Cuál es la media observada en el conteo en vuestro intervalo de tiempo seleccionado? ¿Qué forma funcional os parece que tienen los resultados? ¿Es la distribución simétrica? ¿Cuál es el porcentaje de casos con cero cuentas en el intervalo de tiempo detectadas?**

La medida más observada es de 40 en el intervalo de 5 segundos, esto es, una frecuencia de 8. Pues en este intervalo parece que tiene una forma poissoniana, aunque tendríamos que tener más datos para evaluar correctamente la forma (o un bin menor). La distribución **no es simétrica**. En este intervalo el porcentaje de ceros es nulo.

- c) **Aseguraos de que tomáis suficientes medidas para realizar un estudio estadístico completo. ¿Cuántas? Si vamos a agrupar nuestras medidas para estudiar intervalos de tiempo 5 veces mayores que los que estamos considerando tendremos 5 veces menos medidas... Realizad una estimación de cuantas medidas tendréis en la peor de las situaciones y si es viable en esas circunstancias realizar un test estadístico.**

El número de medidas será entorno a 500. Si agrupamos entorno a 5 tiempos, tendríamos 100 medidas. Sí, porque tras la agrupación aún se tienen 200 medidas, lo que es suficiente para aplicar estadística inferencial con confianza (normalmente se requiere un mínimo de 30 muestras para tests estándar como la prueba de normalidad o hipótesis).

### 3.5. Separación de las componentes “blandas” y “dura” de la radiación cósmica secundaria mediante el uso de absorbentes de hierro y plomo

- a) **¿Cuántas láminas de hierro y cuantas de plomo tienes disponibles? ¿Cuál es su grosor? ¿Cuál es su espesor másico por lámina y total de las láminas disponibles? ¿Cuál es**

**la incertidumbre asignable a estas cantidades? ¿Cómo la combinarías para obtener la incertidumbre total?**

Tenemos *numero* de láminas de hierro y *numero* de plomo. Su grosor es de *grosor*. Su espesor másico  $x_m$  por lámina viene dada por:

$$x_m = \rho \times d \quad (4)$$

donde  $d$  es el grosor, y  $\rho$  son las densidades tales que

$$\rho_{Pb} = 11.34 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{Fe} = 7.87 \text{ g/cm}^3 \quad (5)$$

Los grosores que medimos son: plancha de hierro 1.6 mm de espesor y la plancha de plomo 7.5 mm. Luego los espesores másicos son de  $1.2592 \text{ g/cm}^2$  y  $8.505 \text{ g/cm}^2$  respectivamente.

La incertidumbre del espesor másico dependerá de la incertidumbre de  $\rho$  y de la incertidumbre de  $d$ . Pues la incertidumbre total viene dada por:

$$s_{tot} = \sqrt{N_{lamina}} s_{lamina} \quad (6)$$

donde  $s_{lamina}$  es la incertidumbre de una sola lámina. Dado que la lámina la medimos con un aparato que medía hasta 0.05 mm, podemos suponer una distribución uniforme tal que el valor de la incertidumbre del detector es  $s = \frac{1}{\sqrt{12}} 0.05 \text{ mm}$ .

- b) **Una posible forma de realizarlo es poner las láminas de hierro de dos en dos y tomar las medidas del contador de coincidencias ¿Cuánto tiempo estimas que es necesario en cada medida para obtener una incertidumbre del 1 %, del 5 % o del 10 %?**

Pues depende del número de láminas, ya que cada una de ellas reduce el número de cuentas y por tanto con mas capas de hierro más tiempo vamos a necesitar. Habría que estimar cuanto puede reducir una sola capa de plomo nuestras medidas. Dado que nosotros tuvimos 400 cuentas en 40 segundos, para obtener 10000 cuentas necesitaríamos 16 minutos y medio (error del 1 %) mientras que para obtener un error del 10 % bastaría con 10 segundos.

- c) **En principio, el hierro es poco denso ( $\rho(\text{Pb})=11.340 \text{ g/cm}^3$  y  $\rho(\text{Fe})=7.874 \text{ g/cm}^3$ ) como para afectar a la componente dura, pero es capaz de atenuar la componente blanda. ¿Observas una caída del conteo en coincidencia corregido cuando introduces las láminas de hierro? ¿Puedes intentar obtener un “coeficiente de atenuación” asociado a la componente blanda de la radiación? Para ello suele ser útil representar el logaritmo de las coincidencias corregidas frente al espesor másico interpuesto.**

En principio debería observarse una caída del conteo, ya que reduce la energía de las partículas y si la reduce lo suficiente como para que tenga menos energía que la umbral, entonces no se va a detectar. El coeficiente de atenuación  $\mu$  se define como la sección eficaz total macroscópica, tal que:

$$\mu = N\sigma_T \quad (7)$$

siendo  $\sigma_T$  la suma de todas las posibles (Compton, producción de pares, fotoeléctrico...). Así pues, si usamos las ecuaciones de la lámina delgada, el número de coincidencias al atravesar un material de espesor  $x$ :

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

siendo  $N_0$  el número inicial de coincidencias (esto es, sin láminas de hierro/plomo). Podemos hacer una regresión con los valores que vamos obteniendo, tal que:

$$\log \left( \frac{N(x)}{N_0} \right) = -\mu x \quad (9)$$

de lo que se deduce que al aumentar  $x$  el número de coincidencias se reduce. Si se usa el másico tenemos que:

$$\mu = -\frac{\rho}{\lambda} \quad (10)$$

En las imagenes 2 y 3 podemos ver esta caída experimental para varios datos que hemos medido. No nos da tiempo a realizar el cálculo del coeficiente de atenuación.

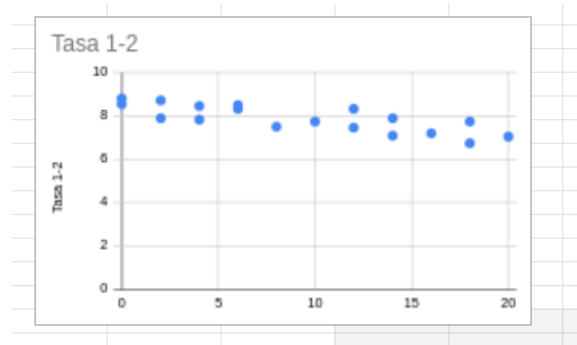


Figura 2: eje x: número de placas de hierro

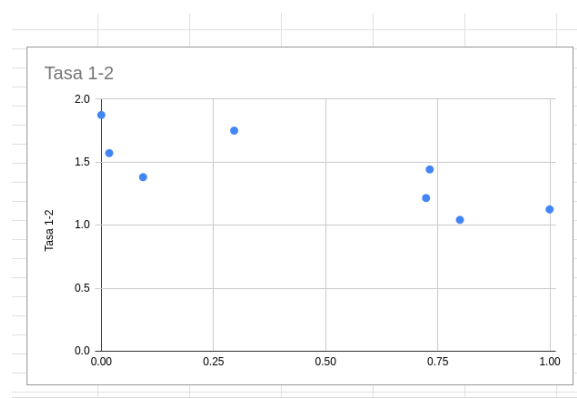


Figura 3: eje x: número de placas de plomo, con 20 de hierro

- d) Una posible opción es añadir al frenado dado por el hierro placas de plomo para intentar frenar la componente dura o acabar de frenar la componente blanda. ¿Notas en algún momento un cambio en la pendiente de la representación al colocar las láminas y bloques de plomo? ¿Podrías obtener algún tipo de “coeficiente de atenuación” asociado a la componente dura?

Debería notarse mucho más, dado que la componente dura (muones) es la principal componente de rayos cósmicos secundarios. Teniendo en cuenta que ya hemos calculado  $\mu_{blanda}$  sería posible calcular  $\mu_{dura}$  ya que ahora hay que hacer lo mismo pero tal que:

$$\log \left( \frac{N}{N_0} \right) = -\mu_{blanda} x_{Fe} - \mu_{dura} x_{Pb} \quad (11)$$

- e) ¿Puedes evaluar a partir de los resultados cual es la tasa de llegada de la componente electromagnética (blanda) y cuál es la tasa de llegada de la componente muónica (dura)? Piensa que en la región donde se observa el frenado de la componente dura has parado la gran mayoría de la componente blanda y puedes extrapolar la curva obtenida en esa región al punto de espesor interpuesto igual a cero...

Si definimos  $N_0 e^{-\mu_{blanda} x_{Fe}} = N_{0dura}$  entonces es fácil de obtener  $N_{0blanda}$  tal que:

$$N_{0blanda} = N_0 - N_{0dura} \quad (12)$$

Es probable que exista una forma extrapolando, pero no se me ocurre.

- f) **¿Qué pasa si ahora quitas todo el material y comienzas de nuevo con las láminas de plomo? ¿Eres capaz de reproducir el frenado de la componente blanda como antes?**

Pues lo que podríamos esperar, se redujo muy rápido con el aumento de láminas de plomo. En el eje x encontramos el número de láminas de plomo, y en el eje y la tasa de coincidencias. 4.

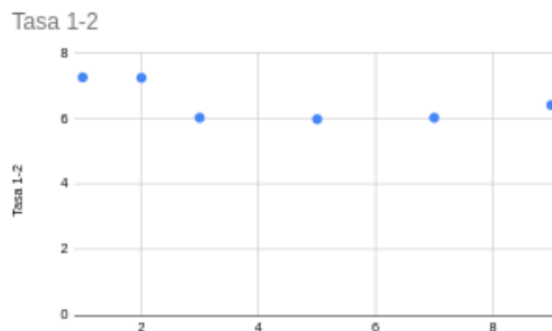


Figura 4: Caption

### 3.6. Evaluación de la aceptación geométrica del dispositivo y comparación con los resultados experimentales

- a) **¿Cómo puedes medir con precisión la distancia entre los plásticos centelleadores? ¿Obtienes la misma medida midiendo en diferentes puntos de los plásticos? ¿Obtienes valores compatibles midiendo la distancia desde la parte superior que desde la parte inferior de ambos plásticos? ¿Puedes evaluar a partir de estas medidas cual puede ser la incertidumbre real en la distancia entre los plásticos?**

La distancia entre los plásticos centelleadores es difícil de medir, dado que hay un metal que recubre los bordes de los plásticos y que impide el cálculo correcto con una regla. Nosotros lo que hicimos fue medir la distancia de uno a otro borde con una regla milimétrica, y luego corregimos la distancia aumentandola por unos pocos milímetros, que es el grosor del metal. No obtenemos las mismas distancias, ya que se inclinan ligeramente, y por tanto tomamos una medida media. Si, podríamos asignarle una incertidumbre de entorno a 1 cm, ya que entre todos los factores podría estar ahí.

- b) **En el soporte de madera utilizado se pueden colocar los plásticos muy cercanos si se colocan los centelleadores mirando en sentidos opuestos. ¿Cuáles son las distancias mínima y máxima a las que puedes ponerlos? ¿Cuántos pasos intermedios puedes dar con suficiente estadística? Recuerda evaluar el conteo en los extremos (muy alejados tendremos un conteo extremadamente bajo) para decidir el número de puntos y el tiempo (o mejor, el conteo mínimo) en cada uno de los puntos.**

Tenemos como distancia más pequeña (sin corregir distancia metal/centellador) entorno 3.3 cm y la más grande (sin corregir) de 54.5 cm. Podemos dar 11 medidas con suficiente estadística (es decir, sin mucho error).

- c) **Representa el conteo en coincidencia corregido y determina qué tipo de curva tiene la aceptación geométrica. Necesitaréis un estudio Monte Carlo para comprobar si sigue la caída esperada**

para la distribución angular de los cósmicos incidentes. Dejaremos esa parte para la memoria detallada de prácticas.

Como podemos ver en los datos, el conteo en coincidencia cae con la distancia cuadrado. El eje x es la distancia 5.

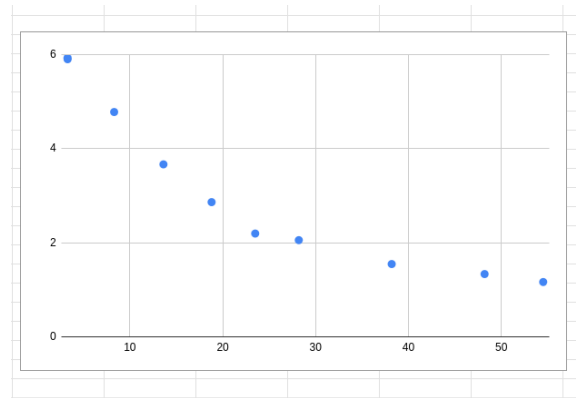


Figura 5: Caption

### 3.7. Determinación del flujo de muones en la superficie terrestre y comparación con resultados bibliográficos

- a) ¿Cuál es el flujo de partículas incidentes obtenido en los diferentes apartados y con que incertidumbre en cada caso? ¿Son los valores compatibles?

Con los datos obtenidos en apartados anteriores calculamos el flujo de rayos cósmicos que inciden sobre el par de detectores aplicando :

$$J = \frac{N}{At}$$

En donde el flujo (J) se interpreta como el flujo que atraviesa un detector plano horizontal independientemente de la dirección de incidencia de la radiación entrante, es igual al número de coincidencias corregidas (N) por área del detector (A) y por el tiempo medido (t).

Aquí tenemos que colocar nuestros datos con las respectivas incertidumbres (?)

- b) ¿Cuál es el flujo de muones (componente dura)? ¿Y el de la componente electromagnética? Aquí tenemos que incluir nuestros datos.

Los valores medidos en situaciones parecidas son de:

$$J = 180 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

con flujos parciales  $J = 130 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  componente muónica

con flujos parciales  $J = 50 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  componente electromagnética

(pensamos que están correctos pero no nos dio tiempo a dar una medida cualitativa)

- c) ¿Creéis que el número de cósmicos que llega al detector es invariable a lo largo del día? ¿Observáis alguna dependencia horaria? ¿Se os ocurre como realizar medidas que permitan comprobar si hay variaciones?

Como ya mencionamos los detectores son muy sensibles a la luz así que no debemos confundir la alteración debida a la modificación de la luz ambiental con la posibilidad de que la radiación tenga alguna dependencia horaria.

Dicho esto, es probable que efectivamente el número de cósmicos que detectemos no permanezca constante, esto se podría explicar por varios factores externos como el cambio en la atmosfera terrestre a lo largo del día, la actividad solar y la influencia del campo magnético terrestre. Tiene sentido que al ser todos ellos procesos que no son constantes a lo largo del día y que evidentemente sean capaces de alterar los rayos cósmicos que detectamos, estos también tengan una dependencia horaria. También ocurre que a lo largo del día la bóveda celeste cambia, de tal modo que los astros que produjeron la radiación cósmica a lo largo del día van cambiando.

Una forma de estudiar esto sería intentar tomar las mismas medidas en intervalos del día bastante separados, como por ejemplo el viernes por la mañana, al mediodía y de noche. Como estos son aspectos del día en los que claramente varía la luz ambiental, lo ideal sería hacer la toma de datos intentando tapar los detectores.

Sin embargo no podemos decir analíticamente/cualitativamente como es esta variación, necesitaríamos un estudio detallado.

### 3.8. Determinación de la incidencia angular de la radiación cósmica incidente

- a) **¿Con que resolución estimáis que se puede obtener el ángulo con la vertical? ¿Cómo podéis utilizar la escuadra y el cartabón para definir con precisión ángulos a 30, 60 y 45 grados?**

Pues depende del método, aunque una precisión estimada sería de 0.5 a 2 grados hexadecimales. Nosotros usamos el traspondedor en vez de escuadra y cartabón, por lo que no podemos decir como se usaría.

- b) **Para un ángulo de incidencia determinado ¿Consideráis que debe dar lo mismo cuando colocáis el dispositivo a un ángulo determinado apuntando a una pared interna o apuntando hacia una ventana o pared exterior del edificio? ¿Podrías comprobar vuestras suposiciones?**

Lógicamente el número de coincidencias se reducirá si apuntamos a una pared, ya que la componente blanda/electromagnética tiene un poder de penetración bajo a través de las paredes. La componente dura no debe verse tan afectada, por lo que la reducción no será tan notable.

- c) **Medid con precisión la distancia entre los detectores. ¿Cómo pensáis que se puede definir el ángulo sólido que cubren alrededor de la dirección de incidencia perpendicular a la superficie de los detectores? Dos artículos que os ofrecemos como complemento (A1AngularDistrOfAtmosphericMuons.pdf y A4AngularDistributionOfCosmics.pdf) os pueden dar pistas de cómo realizar este estudio en la memoria final**

Usamos la distancia de 33.3 cm entre los dos detectores. Pues con la distancia entre los dos centelladores y sus tamaños (ancho, largo) podríamos hacer fácilmente. ¿Cómo? Pues así: si tenemos que el ancho es de 6.6 cm y el largo es de 24.1, pues el ángulo sólido cubierto será aprox

$$\Omega = 2\pi \left[ \frac{1}{2} \times (\arctan(24.1/33.3) + \arctan(6.6/33.3)) \right] \approx 2.58 \quad (13)$$

Ya que será  $2\pi$  por la media del ángulo máximo y mínimo posible (que vendría dado por el arcotangente de la división de los catetos) (estimación muy muy arbitraria, pero podría dar un valor decente). Por

desgracia no nos da tiempo a argumentar dicha ecuación mucho más, y ni siquiera sabemos si es del todo correcto.

- d) **Representad los resultados del conteo en coincidencia corregido en función del ángulo respecto a la vertical. ¿Tiene una dependencia de tipo coseno cuadrado? ¿Creeis que hace falta un término adicional para explicar los cósmicos que aparecen cuando los detectores están a 90 grados (cósmicos horizontales)?**

Respuesta 1

SI tiene una dependencia con coseno cuadrado exceptuando por los ángulo de 30 grados respecto la vertical que nos dan un resultado bastante malo. Como podemos ver en el eje x tenemos el ángulo respecto la vertical

