

16. PRÁCTICA 4.- ESTUDIO DE LA RADIACIÓN CÓSMICA Y DETERMINACIÓN DE LA VIDA MEDIA DEL MUON.

16.1 Introducción

El estudio de la radiación cósmica, su composición, intensidad, energía, etc., ha sido crucial en el marco de la Física Experimental desde sus inicios, contribuyendo al desarrollo de las nuevas técnicas de detección, al conocimiento del microcosmos y de sus leyes y al de las partículas elementales.

La radiación cósmica fue una fuente natural de partículas de prueba en el campo de la Física de Altas Energías, antes de que se construyeran los primeros aceleradores de partículas y gracias a ella se descubrió la primera antipartícula, el positrón. Sin embargo, después de la aparición de los grandes aceleradores de partículas, la Física de las Altas Energías se ha desprendido progresivamente de los rayos cósmicos. Los rayos cósmicos, que permitieron descifrar el dominio de lo infinitamente pequeño y que contienen partículas de energía desigual, se han convertido en una herramienta para el estudio del Universo y su historia. Su existencia también planteó y plantea problemas a los experimentales que trabajan con detectores de partículas ya que su presencia constituye un fondo, el cual perturba y molesta para la detección de fenómenos poco frecuentes.

La radiación cósmica llega a la atmósfera terrestre en cantidad aproximada de 1000 partículas por metro cuadrado y segundo, está compuesta en general por núcleos ionizados, alrededor del 90% son protones, un 9% son partículas α y el resto núcleos pesados, la mayoría de estas partículas son relativistas, pudiendo llegar a alcanzar algunas de ellas energías de hasta 10^{20} eV.

Cuestiones fundamentales de la física de la radiación cósmica son: ¿de dónde procede? y en particular, ¿cómo las partículas pueden alcanzar tales energías? Las respuestas no están del todo claras, sin embargo se sabe que en su mayoría son partículas procedentes de fuera del sistema solar, pero del interior de la galaxia. Por tratarse fundamentalmente de hadrones, su sección eficaz de interacción fuerte es elevada y en consecuencia poseen un recorrido libre medio pequeño. Entre los productos de las reacciones se hallan los muones que no interaccionan fuertemente (son leptones) lo que les permite atravesar toda la atmósfera terrestre y ser detectados a nivel del mar, habiendo sufrido tan sólo una pérdida de energía por la interacción de Coulomb con el gas atmosférico. Las leyes de la absorción en la atmósfera originan la dependencia angular que se observa en $\cos^2\theta$. El hecho de que los muones lleguen a la superficie terrestre sólo es posible por la dilatación temporal relativista de los relojes en movimiento: para un reloj sobre la superficie terrestre, la vida media del muon en movimiento se dilata. Otro modo es pensar en el sistema de referencia en que el muon se halla en reposo: por delante de él la atmósfera pasa tan deprisa que su grosor se contrae. El hecho indiscutible es que detectamos y medimos muones sobre la superficie terrestre.

Sea cual sea su naturaleza, la radiación cósmica se transforma profundamente al atravesar la atmósfera terrestre. En la radiación secundaria tomada a nivel del mar, se reconoce la existencia de dos componentes: una blanda, la cual se puede detener con espesores de unos 10 cm de plomo y otra dura, que no se reduce a la mitad más que al atravesar un metro de plomo.

16.2 Objetivos de la práctica.

El objetivo de esta práctica es doble, por una parte se trata de familiarizarse y aprender la técnica de la detección de partículas mediante detectores de centelleo, así como de la electrónica de señales rápidas asociada y el manejo del osciloscopio. La segunda parte consiste en estudiar distintos aspectos característicos de la radiación cósmica, llegando a determinar la vida media del muon.

Los puntos a seguir se pueden clasificar del siguiente modo:

- a) Manejo del osciloscopio y verificación de la cadena electrónica (Fuentes de alta tensión, electrónica NIM, fotomultiplicadores).
- b) Determinación de los puntos de trabajo (Voltaje de alimentación y nivel de discriminación). Curvas *plateau*.
- c) Estudio de la dependencia angular del flujo de rayos cósmicos.
- d) Determinación de la componente dura y blanda de la radiación.
- e) Medida de la vida media del muón.

16.3 Dispositivo experimental.

El dispositivo experimental que se va a utilizar para el desarrollo de la práctica consta fundamentalmente de:

1. Estructura metálica giratoria de soporte, diseñada con geometría proyectiva para tres posiciones del telescopio (distancia entre contadores: 0.25, 0.5 y 1 m).
2. Tres contadores de centelleador plástico, provistos de dos guías de luz y dos fotomultiplicadores cada uno.
3. Fuente de alta tensión y repartidor.
4. Repartidor de señal al 75% y 25%.
5. *Crate* y módulos estándar NIM (Nuclear Instrument Module) para el tratamiento de señales rápidas.
6. Sistema informático para el tratamiento de datos (ver 8.11).
7. Osciloscopio (ver 8.12).
8. Juego de cables y conectores (alta tensión y señal) (ver 8.13).
9. Polímetro.

16.3.1 El sistema de detección.

Para el desarrollo de la práctica se va a utilizar como detector una torre con tres contadores de centelleador plástico (NE114). Los tres contadores poseen una anchura de 15 cm y un grosor de 3.3 cm, siendo sus longitudes 50, 75 y 100 cm, respectivamente. Los contadores se disponen sobre una estructura mecánica (ver figura 47), con capacidad de giro alrededor de un eje paralelo a los contadores, de modo tal que el dispositivo es siempre perpendicular a una determinada dirección de entrada de la radiación cósmica, manteniéndose la posición relativa y el paralelismo entre los tres contadores. La estructura mecánica posee cinco bandejas de apoyo, lo cual permite variar el ángulo sólido de cobertura de la radiación, variando la distancia entre los contadores y manteniendo su geometría proyectiva para tres posiciones distintas de los contadores. El sistema constituye un típico montaje telescópico de detección y medida de la radiación cósmica.

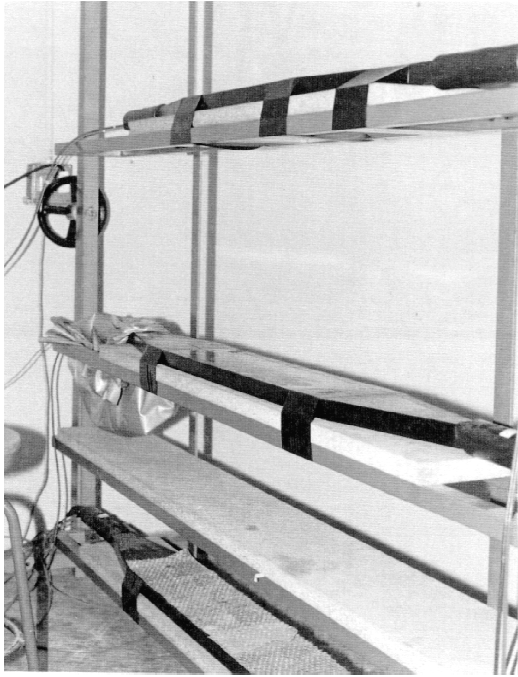


figura 47 .-Torre de contadores para la detección de rayos cósmicos.

En los extremos de los centelleadores se disponen dos guías de luz, de 30 cm de longitud y fabricadas con plexiglas. Al final de cada guía se acopla, mediante grasa óptica, un fotomultiplicador con un diámetro de 5 cm. Los fotomultiplicadores transforman la señal luminosa del centelleador en un pulso de electrones que se amplifica en la serie de dínodos del fotomultiplicador.

Se utilizan dos fotomultiplicadores en cada centelleador para reducir en lo posible el número de cuentas que no se corresponden con el paso de una partícula. Cuando se utilizan dos fotomultiplicadores en coincidencia, el número de cuentas debidas al ruido se puede evaluar como:

$$R = 2 N_1 N_2 \Delta t$$

donde N_i representa el número de cuentas del fotomultiplicador i ($i=1,2$) y Δt es el intervalo de tiempo definido para la coincidencia, el cual suele ser del orden de 10-20 nanosegundos. La técnica de coincidencias permite reducir prácticamente a cero el ruido de fondo de un fotomultiplicador, valor que suele ser considerable. El ruido ambiental (radiactividad de los materiales de construcción, por ejemplo) se puede eliminar considerando coincidencias entre más de un contador.

16.3.2 Fuente de alta tensión y repartidores.

La señal luminosa producida en los centelleadores es convertida en señal eléctrica en los PMs, para ello es necesario suministrar a estos últimos un alto voltaje procedente de una fuente de alta tensión y alta estabilidad. El repartidor de alta tensión separa en paralelo la señal de la fuente y la distribuye entre los seis tubos fotomultiplicadores. El repartidor permite variaciones de un 10% sobre cada PM (del orden de 100 V) sobre el voltaje que suministra la fuente.

El separador de señal, conectado a la salida de cada PM, permite dividir la señal en dos componentes a porcentajes del orden del 75% y 25% de la que se obtiene directamente del PM. Ello permite utilizar una misma señal a través de dos vías distintas. Para el tratamiento posterior de las señales, se elegirá un porcentaje u otro de la señal de cada PM de modo que los pulsos no tengan amplitudes muy diversas.

Es imprescindible que el alumno se familiarice con el uso del osciloscopio, observando tanto las señales directas de los fotomultiplicadores como las que se van transmitiendo a lo largo de toda la cadena electrónica.

El esquema básico de montaje es el que aparece en la figura 48, el cual se mantendrá durante todo el experimento.

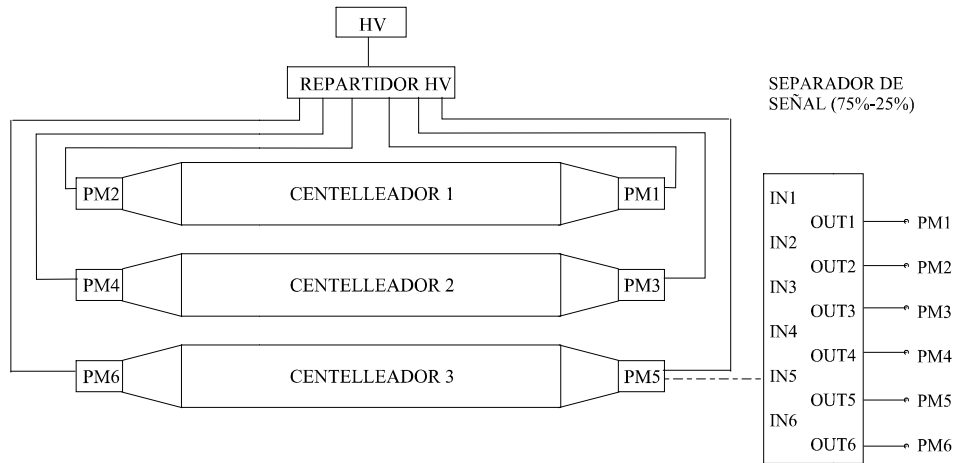


figura 48 .- Esquema básico de montaje.

16.3.3 La cadena electrónica.

Para que una radiación ionizante que incide en el detector y produce un pulso en el PM sea procesada, es necesario tener un adecuado sistema electrónico que nos permita tratar convenientemente la información encerrada en este pulso.

A continuación se describen algunos de los módulos NIM que constituyen la cadena electrónica para el tratamiento de señales rápidas. Los módulos se ubican en una *crate* NIM estándar que les sirve de soporte y conexión, como se observa en la figura 49.

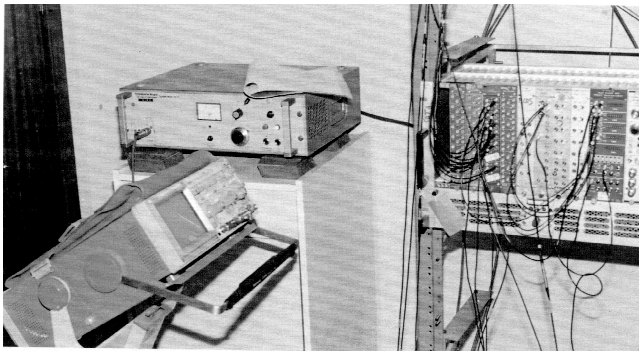


figura 49 .- Cadena electrónica para el tratamiento de señales.

16.3.3.1 Discriminadores.

Los discriminadores reciben señales analógicas y sólo si su amplitud supera un cierto umbral, generan una señal lógica estándar, perdiéndose por tanto la información analógica de la señal.

El umbral o *threshold* del discriminador se ajusta mediante un tornillo; en ciertos discriminadores es así mismo posible variar y regular la anchura del pulso lógico de salida. El umbral de discriminación se mide con un polímetro y la anchura del pulso mediante el osciloscopio.

Su utilidad fundamental es la eliminación del ruido electrónico, mejorando así la relación fondo-sígnal. Los discriminadores pueden ser también de tipo diferencial (o doble *threshold*), generando el pulso lógico sólo si el valor de la señal se encuentra entre un umbral inferior y otro superior.

16.3.3.2 Fan-in/Fan-out.

Los *fan-out* son circuitos que distribuyen una señal de entrada en varias señales a la salida pero con la misma forma y altura. El *fan-in* acepta varias señales a la entrada y divide su suma algebraica en varias salidas. Ambos tienen dos variedades: lineales o lógicas, los primeros pueden aceptar señales tanto analógicas como lógicas, mientras que los segundos sólo admiten señales lógicas. En nuestro caso se dispone de un módulo *fan-out*.

16.3.3.3 Unidades de coincidencia.

Determinan si dos o más señales lógicas coinciden en tiempo, en cuyo caso generan una señal lógica. Formas alternativas de definir coincidencias se basan en el uso de puertas lineales o mediante un discriminador que actúa sobre la suma de dos señales con umbral superior a una de ellas.

La coincidencia de dos señales viene afectada de una precisión llamada *tiempo de resolución* (*resolving time*), la cual depende de las anchuras de las señales y del mínimo solapamiento exigido por la electrónica.

Las unidades de coincidencia son un caso particular de las llamadas puertas lógicas, las cuales llevan a cabo operaciones *booleanas* sobre las señales lógicas de entrada. La respuesta de alguna de estas unidades (NOT, AND y OR) se muestra en las tablas de verdad de la figura 50, donde sólo aparece el caso de dos entradas A, B y una salida C.

En muchos experimentos es necesario seleccionar una particular reacción en presencia de un ruido de fondo grande u otros sucesos que con ella compiten. Ello exige, por tanto, imponer criterios tales como la coincidencia entre dos o más señales entre los distintos detectores. Sólo aquellos sucesos que cumplan la condición preestablecida serán admitidos. La electrónica lógica requerida para esta selección es lo que se conoce con el nombre de *trigger*.

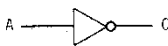
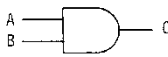

<u>OPERATION</u>	<u>SYMBOL</u>	<u>TRUTH TABLE</u>	<u>MATHEMATICAL EXPRESSION</u>															
NOT		<table><tr><th>A</th><th>C</th></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr></table>	A	C	1	0	0	1	\overline{A}									
A	C																	
1	0																	
0	1																	
AND		<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	A	B	C	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	$C = AB$
A	B	C																
1	1	1																
1	0	0																
0	1	0																
0	0	0																
OR (inclusive)		<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	A	B	C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	$C = A + B$
A	B	C																
1	1	1																
1	0	1																
0	1	1																
0	0	0																

figura 50.- Tablas de verdad (NOT, AND y OR) para el caso de dos entradas.

16.3.3.4 Mean-timer.

Un módulo *mean-timer* es una unidad de coincidencias con características específicas. Se utiliza fundamentalmente para obtener un pulso de salida a partir de los pulsos de los dos PMs de cada detector, cuando estos tienen lugar simultáneamente dentro del intervalo temporal generado por el mismo módulo, dicho pulso coincidirá en general con el paso de una partícula por el correspondiente detector.

El módulo recibe el nombre de *mean-timer* porque su pulso de salida es independiente del punto de impacto de la partícula en el centelleador. El diseño del dispositivo se basa en el hecho de que la suma de los tiempos invertidos por la luz en recorrer la longitud del centelleador $T_1 + T_2$ es una constante independiente del punto de impacto de la partícula en el centelleador.

Tal y como se ve en la figura 51, la suma de las longitudes recorridas por la luz desde su producción hasta llegar al fotocátodo de ambos PMs es constante. Siendo:

$$T_1 = \frac{x}{v} + \delta_1, \quad T_2 = \frac{L-x}{v} + \delta_2$$

$$T_1 + T_2 = \frac{L}{v} + \delta_1 + \delta_2$$

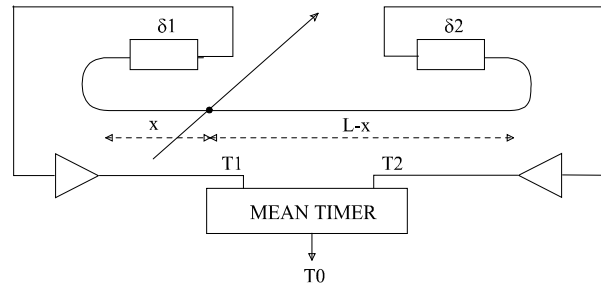
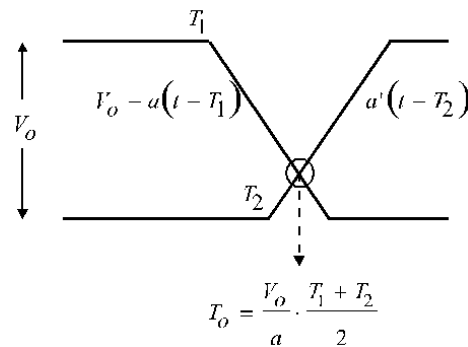


figura 51 .- Tiempos de propagación de la luz en un centelleador.

En general los circuitos que realizan coincidencias entre dos señales emiten el pulso de salida en un instante t después de la recepción de la segunda señal. Sin embargo, el circuito generador del tiempo medio (*mean-timer*), emite la señal de respuesta en un tiempo T_0 , después de la recepción de la primera señal, que es proporcional a la suma de los tiempos de propagación de la luz en el contador, desde el punto de incidencia hasta los respectivos fotomultiplicadores. El principio de funcionamiento del circuito es el siguiente: en T_1 y T_2 (tiempos de llegada de las señales) se generan dos rampas, una de ellas desde un voltaje de referencia $V=V_0$ y la otra desde $V=0$, siendo las ecuaciones:

$$V_1(t) = V_0 - a(t - T_1)$$

$$V_2(t) = a'(t - T_2)$$



ambas rampas se cruzan en un instante $t = T_0$, en el que $V_1(T_0) = V_2(T_0)$. Si además, $a = a'$ se cumplirá que $T_0 \propto T_1 + T_2$, con lo cual se demuestra que el instante de emisión del pulso no depende del punto de impacto de la partícula en el centelleador. Se propone como ejercicio determinar el tiempo de resolución del *mean-timer*, variando para ello la anchura de las señales de entrada, procedentes de los dos discriminadores asociados a sendos fotomultiplicadores de un contador.

16.3.3.5 Líneas de retraso.

Se trata de módulos que permiten retrasar de modo regulable la llegada de una señal a un determinado dispositivo, en general otro módulo. Su finalidad fundamental es conseguir que señales coincidentes que han seguido diferentes caminos, y por tanto invertido tiempos distintos, lleguen simultáneamente a un módulo de coincidencias. Otra utilidad es la de hacer coincidir en el tiempo señales que, si bien no se han producido simultáneamente, corresponden al mismo fenómeno físico de causa-efecto. Cuando el retraso que se quiere programar es de unos nanosegundos se utilizan módulos pasivos, mientras que para retrasos del orden de microsegundos los módulos son activos (ver apartado 8.6).

16.3.3.6 Módulo de contaje (Scaler).

Es una unidad que cuenta el número de pulsos que recibe, enviando dicha información a una escala visual. Para la realización de la práctica disponemos de un módulo de contaje bastante sofisticado y con distintas opciones y posibilidades. Se trata del módulo *QUAD SCALER AND PRESET COUNTER-TIMER* modelo *NI45* de la marca *C.A.E.N.*, el cual consta de 4 contadores, temporizador (*timer*), salidas *End Marker*, *Out*, etc. (ver manual del módulo).

16.3.3.7 Generador de pulsos.

Se trata de un módulo capaz de generar pulsos con una desviación muy pequeña en su amplitud. El modelo *TC813* genera señales a una frecuencia de 50 Hz (ver apartado 8.5). Para su uso se ha de elegir la polaridad conveniente y la amplitud que se desea. El módulo posee un selector de altura de pulso, así como salidas directa y atenuadas. En el caso que nos ocupa se utilizará para la calibración del módulo *Conversor Tiempo Amplitud (TAC)*, que se describe en el siguiente apartado; así como para la medida de la linealidad del ADC.

16.3.3.8 Conversor Tiempo Amplitud (TAC).

Se dispone de un módulo *TAC* marca *Tennelec* modelo *TC 862* (ver apartado 8.9). En el desarrollo de la práctica se utilizará para determinar la linealidad diferencial del sistema de medida y para obtener la distribución temporal de muones y así medir su vida media.

16.4 Desarrollo de la práctica.

16.4.1 Verificación de la electrónica.

En primer lugar se llevará a cabo la verificación, mediante el osciloscopio, del funcionamiento de los detectores y de los fotomultiplicadores. Con el fin de obtener señales de amplitudes similares en todos los fotomultiplicadores puede utilizarse el separador de señales, fijando para cada PM la salida del separador al 25% o al 75%. Las señales observadas deben ser las típicas de un centelleador rápido.

Los pulsos procedentes de los PMs se pasarán a través de los distintos módulos NIM, para verificar así mismo el estado de la electrónica, y familiarizarse con las señales de respuesta de cada uno de ellos y su significado físico.

El alumno tomará anotaciones gráficas de la forma de los pulsos y las transcribirá a la memoria de la práctica, con las observaciones y definiciones correspondientes.

16.4.2 Determinación de los puntos de trabajo.

Para llevar a cabo medidas con un centelleador, lo primero es establecer las condiciones en que estos van a funcionar: tensión de alimentación y nivel de discriminación.

En primer lugar se determinarán, para cada uno de los PMs, las curvas *plateau*. Utilizando una escala semilogarítmica, se representará en ordenadas el número de cuentas cuando se varía:

- a) Tensión de alimentación a nivel de discriminación fijo.
- b) Nivel de discriminación a tensión fija.

El procedimiento consistirá en hacer llegar al módulo *scaler* las señales discriminadas de los fotomultiplicadores.

En segundo lugar se obtendrán curvas análogas a las (a) y (b), pero ahora para cada uno de los centelleadores. Es decir, representando el número de cuentas por intervalo temporal de la señal que llega al *scaler* procedente de la coincidencia de los dos PMs de un mismo contador, obtenido mediante el módulo mean-timer. Estas curvas nos proporcionarán con mayor verosimilitud el flujo de partículas que atraviesan nuestros detectores.

Los valores adoptados como condiciones de trabajo no serán variados a lo largo del desarrollo de la práctica.

El alumno deberá presentar las gráficas obtenidas, comentando sus resultados y los criterios adoptados para la determinación de las condiciones de trabajo.

16.4.3 Determinación de la eficiencia de los contadores.

Se trata en este apartado de determinar las eficiencias de los tres contadores en función de la posición y obtener, a ser posible, las funciones matemáticas que gobiernan dichas eficiencias. El conocimiento de las eficiencias permitirá corregir el número de cuentas, obtenido con cada uno de los contadores, para posteriormente determinar el flujo real de partículas que atraviesa nuestro sistema.

Para ello se utilizarán dos pequeños detectores, con forma de paleta, que se situarán arriba y abajo del detector en estudio. Se efectuarán diferentes medidas a lo largo de cada detector (coordenada y de acuerdo con el sistema de referencia de la figura 52). La medida de las coincidencias de las dos paletas (P_{12}), una vez sustraídas las coincidencias casuales (R_{12}), y de la triple coincidencia de ambas paletas con el detector (T_i) permitirá determinar la eficiencia $\epsilon_i(y)$ de éste. El número de coincidencias casuales entre las paletas se puede estimar a partir de la tasa de cuentas en cada una de ellas (P_1 y P_2) y de la anchura Δt de las señales:

$$R_{12} \approx 2P_1P_2\Delta t$$

Pudiéndose, por tanto, evaluar la eficiencia en función de la coordenada y del contador i -ésimo como:

$$\epsilon_i(y) = \frac{T_i(y)}{(P_{12} - R_{12})f_a}$$

donde f_a representa el factor de solapamiento de las paletas con el detector (factor de área). Nótese que en la expresión anterior no se ha tenido en cuenta la contribución de coincidencias casuales a la triple coincidencia, dado que se supone bastante pequeña. Por

otra parte, las cantidades P_{12} y R_{12} han de ser similares (salvo fluctuaciones estadísticas) en todas las medidas, ya que únicamente dependen de la configuración de las paletas, lo cual nos servirá para verificar que las medidas se están realizando correctamente. Asimismo, todos los valores han de estar normalizados al mismo intervalo temporal, por ejemplo: cuentas por segundo.

Represéntense las curvas de eficiencia para los tres contadores, tomando un origen de coordenadas común, y las funciones matemáticas que mejor ajustan a las medidas experimentales.

16.4.4 Dependencia angular del flujo de rayos cósmicos.

El flujo de rayos cósmicos presenta una dependencia respecto del ángulo de incidencia con la vertical, así como de la latitud terrestre en que se mide.

La torre giratoria que sirve de soporte a los centelleadores constituye un telescopio de observación de radiación cósmica. Sin embargo, la extensión de nuestros detectores provoca que para una determinada inclinación de la torre sean muchas las direcciones de incidencia (ángulo θ respecto a la vertical) que pueden cubrir los tres centelleadores en coincidencia. Este problema deberá ser tenido en cuenta a la hora de analizar las medidas.

Las medidas corresponderán a coincidencias de los tres centelleadores (seis PMs) a distintos ángulos, α , de inclinación de la torre; buscando posteriormente la correlación entre dichas medidas y el ángulo. Los centelleadores se situarán en las bandejas de la torre de modo que la separación entre dos contadores consecutivos sea de 50 cm.

La dependencia con el ángulo de incidencia, θ , respecto a la vertical es de la forma:

$$I(\theta) = I_o \cos^2(\theta)$$

donde $I(\theta)$ es el número de cuentas por unidad de tiempo, superficie y ángulo sólido, para un determinado ángulo θ , e I_o el valor correspondiente al flujo vertical.

El ángulo sólido que subtiende el dispositivo viene determinado por la posición de los centelleadores 1 y 3. Un modo de evaluar el número de partículas que atraviesan el dispositivo consiste en resolver la siguiente integral:

$$\dot{n}(\theta) = \int I_o \cos^2 \theta \frac{(d\vec{S}_1 \cdot \vec{n})(d\vec{S}_3 \cdot \vec{n})}{d^2}$$

donde $\dot{n}(\theta)$ son las partículas que atraviesan el detector por unidad de tiempo, para un determinado ángulo θ con respecto a la vertical. Las cuentas en función del ángulo obtenidas experimentalmente deberán corregirse utilizando las eficiencias calculadas en el apartado anterior. Nótese que nuestras medidas no corresponden a valores de θ definidos, sino a los diferentes valores α del ángulo de inclinación de la torre, hecho que se ha de tener en cuenta al resolver la integral.

La integral puede resolverse analíticamente, si bien a continuación se propone un método numérico para su evaluación. La integral puede ser calculada mediante cualquier otro método alternativo que se proponga por parte de los alumnos que realicen la práctica.

16.4.4.1 Evaluación de la integral mediante el método de Monte-Carlo.

Para el cálculo geométrico de la integral consideraremos únicamente los contadores 1 y 3, ya que el segundo contador queda contenido en el ángulo sólido subtendido por estos. Sin embargo, sí que hay que considerar en la integral las eficiencias de los tres contadores en función de la coordenada y .

Consideremos el esquema de la figura 52, donde los sistemas de ejes (X_1, Y_1, Z_1) y (X_3, Y_3, Z_3) son paralelos, por ser los sistemas de referencia fijos a los contadores, al sistema de referencia del laboratorio lo denominaremos (X, Y, Z) . Los ejes Z_1 y Z_3 forman un ángulo α (ángulo de inclinación de la torre) con el eje Z , mientras que X_1 , Y_3 e Y son paralelos.

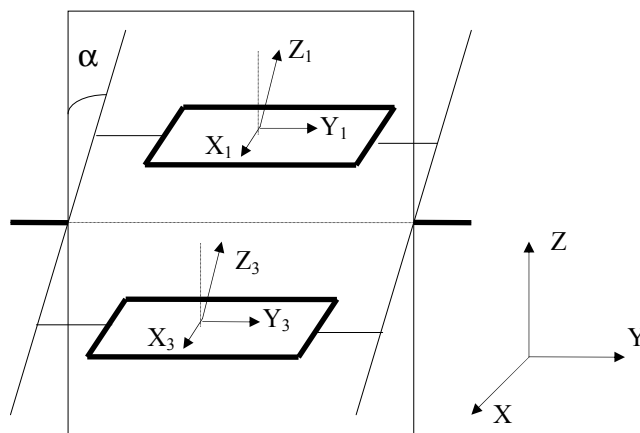


figura 52.- Sistemas de referencia para la torre de contadores

Supongamos ahora que una partícula, incidiendo con un ángulo θ , con respecto a la vertical, atraviesa los contadores por los puntos (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) y (x_3, y_3, z_3) , según se esquematiza en la figura 53, donde para simplificar el dibujo se ha supuesto $\alpha=0$ y no se ha incluido el segundo contador. Téngase en cuenta que los valores z_1, z_2, z_3 son parámetros que quedan fijados por la posición de los contadores en las bandejas de la torre y que las coordenadas x_2, y_2 se pueden obtener como:

$$x_2 = (x_1 + x_3)/2 \quad y_2 = (y_1 + y_3)/2$$

De acuerdo con el esquema, \vec{n} es el vector unitario que define la dirección de vuelo de la partícula, el cual viene definido por: $\cos\theta = \vec{n} \cdot \vec{u}_z$. Si la torre forma un ángulo α con la vertical, el vector unitario se escribirá como: $\vec{u}_z = (-\sin\alpha, 0, \cos\alpha)$, ya que se trata de una rotación de ángulo α alrededor del eje Y .

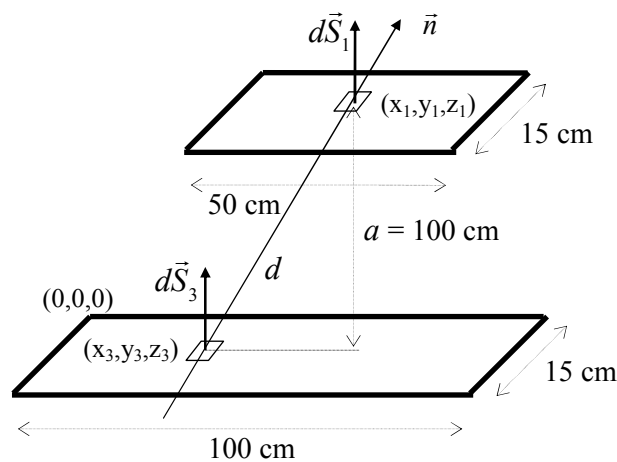


figura 53.- Dirección de vuelo de la partícula en los contadores.

Analicemos los distintos términos que aparecen en la integral:

$$d = [(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + a^2]^{1/2} \quad \text{donde } a = z_3 - z_1 = 100 \text{ cm}$$

$$\vec{n} = \frac{(x_3 - x_1, y_3 - y_1, a)}{d}, \quad d\vec{S}_1 = (0, 0, dx_1 dy_1), \quad d\vec{S}_3 = (0, 0, dx_3 dy_3)$$

$$\cos \theta = \vec{n} \cdot (-\sin \alpha, 0, \cos \alpha) = \frac{-\sin \alpha (x_3 - x_1) + a \cos \alpha}{d}$$

Sustituyendo obtenemos una expresión para la integral que sólo depende de los puntos de cruce de la partícula por los contadores, de la distancia entre ambos y del ángulo de inclinación de la torre.

$$\dot{n}(\alpha) = I_o a^2 \int \frac{[-\sin \alpha (x_3 - x_1) + a \cos \alpha]^2}{[(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + a^2]^3} dx_1 dy_1 dx_3 dy_3$$

donde ahora $\dot{n}(\alpha)$ son las partículas que atraviesan nuestro detector por unidad de tiempo, para un determinado ángulo α de inclinación de la torre y para todos los posibles valores de θ contenidos en el ángulo sólido definido por el sistema.

Para poder llevar a cabo la representación gráfica de las medidas experimentales (ordenadas) en función de los valores de la integral (abscisas) se han de introducir en la integral las parametrizaciones de las eficiencias, quedando la expresión como:

$$\dot{n}_c(\alpha) = I_o a^2 \int \frac{[-\sin \alpha (x_3 - x_1) + a \cos \alpha]^2}{[(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + a^2]^3} [\epsilon_1(y_1) \epsilon_2(y_2) \epsilon_3(y_3)] dx_1 dy_1 dx_3 dy_3$$

donde $\dot{n}_c(\alpha)$ son las partículas que atraviesan nuestro detector por unidad de tiempo y que han sido contabilizadas.

La integral es muy fácil de resolver por el método de Monte-Carlo, sin más que considerar que las variables se distribuyen uniformemente en los intervalos:

$$x_1 \in [0, 15] \quad , \quad y_1 \in [25, 75] \quad , \quad x_3 \in [0, 15] \quad , \quad y_3 \in [0, 100]$$

La representación del número de cuentas por unidad de tiempo en función del valor de la integral debe corresponderse con una recta de pendiente $I_0 a^2$ si se verifica la ley del coseno cuadrado.

Por tanto, el alumno llevará a cabo las siguientes tareas:

- a) Evaluar la integral para las distintas inclinaciones de la torre correspondientes a las medidas efectuadas.
- b) Representar $\dot{n}_c(\alpha)$ en función de la integral evaluada y ajustar una línea recta.
- c) Obtener del ajuste el valor de I_0 correspondiente al flujo vertical y compararlo con los que aparecen en la bibliografía.
- d) Efectuar un test de χ^2 para la función modelo.

16.4.5 Estudio de las componentes dura y blanda de la radiación.

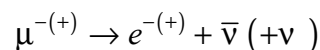
La relación entre los flujos correspondientes a la componente dura y blanda se determinará a partir de las medidas de las cuentas en coincidencia de los tres centelleadores para un ángulo $\alpha = 0^\circ$, posición vertical de la torre.

La componente dura se obtendrá colocando una capa uniforme de plomo entre el segundo y tercer contador. El plomo actuará de absorbente para la componente de la radiación de menor energía. La componente blanda se obtendrá, por tanto, restando del total de cuentas la parte correspondiente a la componente dura. Contrástense los valores obtenidos con los que aparecen en la bibliografía.

16.4.6 Determinación de la vida media del muon en reposo.

Nuestro detector de cósmicos puede ser utilizado para la determinación de la vida media del muon, ya que estos constituyen una de las componentes de la radiación.

Los muones, producto de la desintegración de los piones que se producen en las capas altas de la atmósfera, son altamente penetrantes y alcanzan la superficie terrestre sin ser absorbidos. Estos muones pueden ser detenidos en la materia y observados a partir de la desintegración:



El sistema experimental típico para medir la constante de desintegración del muon es el que se presenta en la figura 54, utilizaremos una capa de ladrillos de hierro, en lugar de plomo, con el fin de obtener mayor estadística.

Los muones atraviesan los contadores A y B, frenándose en el hierro y desintegrándose posteriormente con una vida media $\tau = 2.19703(4) \mu s$. El electrón será detectado en los contadores B o C, según sea su dirección de salida. La técnica para la determinación experimental de la vida media del muon en reposo será la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre la señal del muon detectado en los contadores A y B, y la detección del electrón producto de la desintegración.

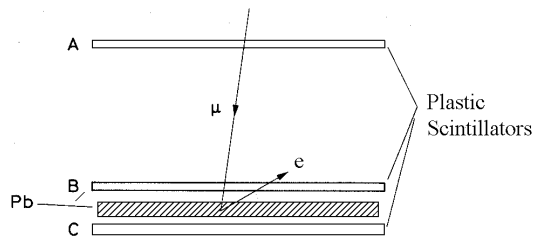


figura 54 .- Disposición de los detectores para el frenado de muones.

La distribución de tiempos se obtendrá utilizando el módulo *TAC* (convertor de tiempo en amplitud), debidamente calibrado (ver apartado 8.9.1 y manual del *TAC*) y el sistema de adquisición constituido por el ordenador y la tarjeta *PCA*.

Durante la realización de las medidas, la señal de *START* deberá corresponder al paso del muon y el *STOP* será generado por la detección del electrón. Cada vez que se detecte un muon se abrirá en el *TAC* una puerta de 10 μ s, en espera de la llegada del electrón.

El esquema lógico que se propone para la medida de la vida media del muon es el que aparece en la figura 55.

El alumno debe:

- Calibrar el TAC y estudiar la linealidad diferencial e integral de la PCA.
- Obtener el espectro temporal de desintegraciones del muon y ajustarlo mediante una exponencial. Discútase la conveniencia o no de agrupar canales en el ajuste.
- Realizar el test de χ^2 y discutir sobre la bondad de los resultados.

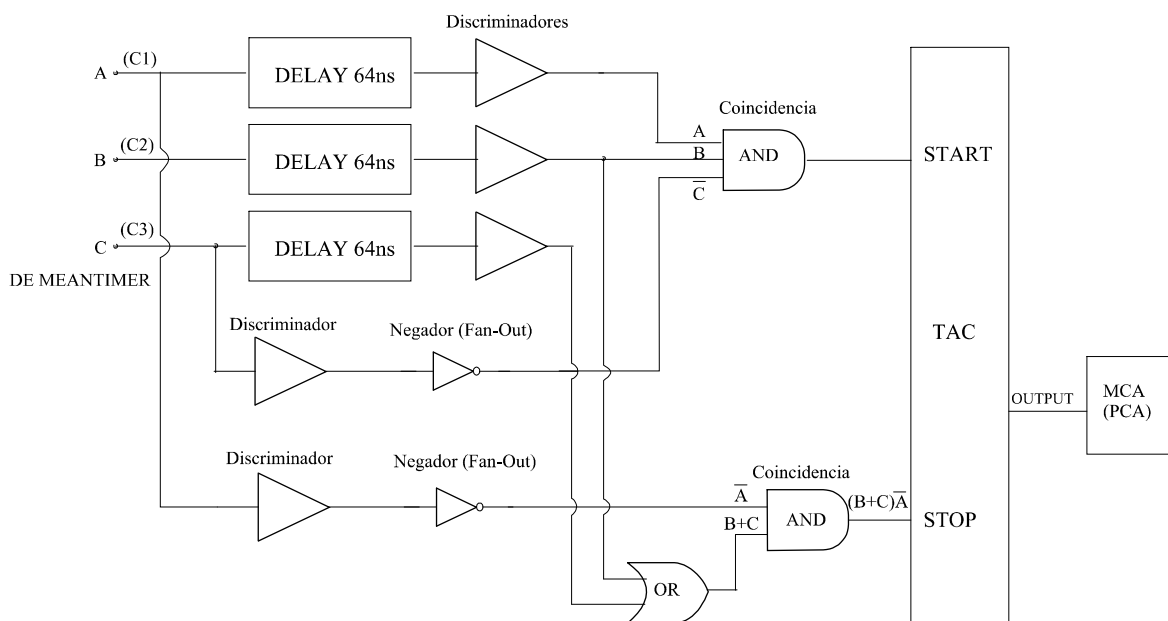


figura 55.- Esquema lógico para la medida de la vida media del muon.

16.5 Referencias

A Simplified Muon Lifetime Experiment for the Instructional Laboratory.

R.E. Hall, D.A.Lind and R.A. Ristinen. American Journal of Physics. Vol. 38. N 10. 1970.

Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.

William R. Leo. Ed. Springer Verlag, 1994.

Radiation Detection and Measurement.

Glenn F. Knoll. Ed. John Wiley & Sons. New York, 1969.

Cosmic Rays.

L.L. Dorman. North-Holland Publishing Company. New York. 1974.

Cosmic Rays.

A.M. Hillas. Pergamon Press. Oxford. 1972.

Cosmic Rays and Particle Physics.

T.K. Gaisser. Cambridge University Press. Cambridge. 1990.

Mètodes Numèrics per a la Física.

R. Guardiola, E. Higón, J Ros. Ed. Universitat de València. 1995.

Probability and statistics in particle physics.

A.G. Frodesen, O. Skjeggstad, H. Tofte. Ed. Universitetsforlaget. Bergen. 1979.

Data reduction and error analysis for the physical sciences.

Ph. R. Bevington. Ed. McGraw-Hill Book Co. 1969.

Análisis de errores.

C. Sánchez del Río. Ed. Eudema Universidad. 1989.

Manuales de los distintos módulos.