

LA DETECCIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA

Aurelio Vivar*

INTRODUCCION

A principios de este siglo los investigadores observaron un hecho que les llamó la atención: sus electros copios se descargaban sin haber una razón aparente. Supusieron que se trataba de una radiación ionizante desconocida. Al principio pensaron que esta radiación era debida a los materiales radiactivos en la corteza terrestre, pero después observaron, al hacer una ascensión en globo, que el electros copio se descargaba mucho más rápidamente, y encontraron que la radiación era mucho más intensa a 3,900 mts. de altura que al nivel del mar, por lo que deshecharon todas las hipótesis planteadas anteriormente.

Este descubrimiento, realizado por V. Hess, dio origen a una nueva rama de la Física: La física de los rayos cósmicos. Desde entonces se han acumulado un gran número de datos y estudios que han servido para proponer modelos que expliquen su origen, aceleración, composición, etc.

El estudio de esta radiación es sumamente importante pues se ha observado y determinado que se trata de las partículas de mayor energía que el hombre conoce; ningún acelerador en la Tierra puede alcanzar energías del orden de 10^{15} eV, comunes en la radiación cósmica. Por otro lado, los rayos

cósmicos son portadores de valiosa información sobre los confines más alejados del Universo, así como sobre el espacio galáctico en el cual se propagan.

Ahora bien, la radiación que nosotros detectamos en la superficie de la Tierra es producto de la interacción de la radiación cósmica primaria, proveniente del espacio exterior, con los núcleos de los elementos que constituyen la atmósfera terrestre, llamada radiación cósmica secundaria.

La radiación cósmica primaria se puede dividir, según sus fuentes, en: rayos cósmicos solares, rayos cósmicos galácticos y rayos cósmicos extragalácticos.

Los rayos cósmicos solares son emitidos esporádicamente durante grandes llamaradas o ráfagas solares y a veces alcanzan energías de hasta 10^{10} eV.

La radiación cósmica galáctica llega isotrópicamente al sistema solar, y su rango de energías va de 10^9 a 10^{17} eV, su origen es todavía cuestión de controversia.

Los rayos cósmicos de energías mayores de 10^{18} a 10^{20} eV son probablemente de origen extragaláctico.

TABLA I

Composición porcentual de los núcleos presentes en la radiación cósmica y en el universo:

GRUPO		ABUNDANCIA PORCENTUAL EN LA RADIACION COSMICA	ABUNDANCIA RELATIVA COSMICA (%)
P	H	93%	91
	He	6.3 %	9.1
L	Li, Be, B	0.10 %	4×10^{-7}
M	C, N, O, F	0.42 %	0.14
H	Ne - K	0.13 %	0.013
VH	Ca - Zn	0.05 %	2.7×10^3

* Instituto de Geofísica, UNAM

Las abundancias de rayos cósmicos se obtienen por medio del análisis de sus trazas en emulsiones nucleares, mientras que las abundancias cósmicas son determinadas por observaciones espectrales.

De la comparación entre los diversos grupos de la tabla I observamos que el 99.3% de la radiación primaria son protones y núcleos de helio. Es de notarse que los núcleos del grupo L (Li, Be, B), prácticamente ausentes en el universo, se encuentran en la radiación cósmica en cantidades muchísimo mayores.

Los elementos del grupo M y H son aproximadamente 5 veces más abundantes en la radiación cósmica primaria que en el cosmos y los del grupo VH, unas treinta veces más abundantes.

Earl (1961) encontró también electrones en la radiación cósmica primaria para energías mayores de 0.6 GeV.

VARIACIONES EN LA INTENSIDAD DE LA RADIA- CION COSMICA POR EFECTOS ATMOSFERICOS:

Ahora bien, cuando una partícula de la radiación primaria llega a la atmósfera, produce una cascada nuclear. Un protón de alta energía ($\approx 10^9$ eV) penetra aproximadamente $1\frac{1}{2}$ de la atmósfera antes de interactuar con los núcleos de los componentes atmosféricos, cuando lo hace, desintegra al núcleo produciendo varias componentes.

Los productos de la desintegración se pueden dividir en tres componentes:

1. Componente nucleónica, constituida por protones y neutrones.
2. Componente mesónica o dura, constituida por mesones.
3. Componente electromagnética o blanda, formada por fotones y electrones.

Los neutrones y protones de alta energía emitidos como productos de la desintegración, dan origen a la componente nucleónica. Al llegar a la baja atmósfera el flujo de esta decrece rápidamente con la profundidad atmosférica y es, a nivel del mar, sólo un pequeño porcentaje del flujo total. Las interacciones nucleares de las partículas primarias de baja energía producen casi siempre nucleones,

Cuando las energías primarias son más grandes ($\approx 10^{10}$ eV) se emiten mesones π a la vez

que nucleones, pero los mesones π son inestables y decaen rápidamente en otras partículas. Los piones cargados decaen en mesones μ cargados, que aunque también son inestables poseen una vida media (en el sistema de referencia que se mueve con ellos) lo suficientemente larga para permitir a muchos de ellos llegar a la superficie de la Tierra y aun a profundidades considerables por debajo de ellas. Los mesones π neutros decaen en rayos γ que, por medio de una sucesión de procesos electromagnéticos, producen partículas que se extienden sobre una superficie considerable. Algunos de los electrones producto del decaimiento de los mesones μ pueden ser lo suficientemente energéticos para iniciar nuevas cascadas de fotones y electrones.

DETECTORES:

Cualquier sistema de detección de partículas nucleares depende de los efectos de los procesos de colisión iniciados por el paso de una partícula cargada, a través de la materia que se encuentra dentro de un cierto volumen sensitivo; de manera que con sistemas de conteo o medición adecuados, se puede contar el paso de cada partícula o medir otras características físicas de la partícula. Lo ideal en un experimento concerniente al conteo continuo de partículas dentro de un cierto intervalo de tiempo sería contar cada una de las partículas que pasan a través de ese volumen, tan eficientemente como fuese posible. Cámaras de ionización, contadores Geiger-Müller y contadores proporcionales han sido usados con éxito en este tipo de investigaciones sobre los rayos cósmicos. La cámara de ionización, aunque es un instrumento importante en el estudio de variaciones temporales en la intensidad de la radiación cósmica, es esencialmente un instrumento omnidireccional, y sus dificultades de mantenimiento y construcción, aunados a su comparativamente grande constante de tiempo ($\approx 1\mu\text{seg}$) lo hacen un instrumento inútil para nuestro propósito.

Los contadores Geiger-Müller y proporcionales son mucho más fáciles de mantener y, con la ayuda de sistemas de coincidencia, pueden ser usados en forma de "telescopio". Además, el uso de sistemas de coincidencia hace posible el aislar adecuadamente la radioactividad de fondo del flujo de rayos cósmicos. Estas ventajas de los contadores Geiger-Müller están, en cierta forma, opacadas por el hecho de que se necesita de mecanismos externos para extender la vida

de los contadores a un periodo suficientemente grande de tiempo. Aun así, la multiplicación del gas descompone las moléculas de vapor que se utilizan para terminar o apagar la descarga dentro del contador y esto hace que las características del contador cambien con el tiempo, el umbral suba y, eventualmente, el contador quede inservible.

El uso de plásticos centelladores ha llegado a ser muy importante en el registro continuo de la radiación cósmica debido, principalmente, a su alta eficiencia y confiabilidad, y a la resolución en tiempo extremadamente alta que se obtiene.

La radiación de centelleo se genera cuando una partícula cargada pasa a través de ciertos materiales llamados centelladores. La máxima emisión de luz ocurre en el azul del espectro visible y, con sistemas adecuados de guía para enfocar la luz hacia un tubo fotomultiplicador (el cual tiene máxima sensibilidad para este rango de luz), es posible construir lo que se conoce como un detector de centelleo. El tubo fotomultiplicador convierte la luz en electrones, los cuales se multiplican dentro del tubo, de manera que a la salida se obtiene un pulso eléctrico apreciable cada vez que una partícula cargada pasa a través del centellador, la emisión del centellador depende del grado de ionización. La confiabilidad y funcionamiento del detector, así como su estabilidad ante cambios en la temperatura ambiental han dado buenos resultados.

TELESCOPIO DE CENTELLEO

Principios Generales

Las componentes básicas de un telescopio de centelleo son el plástico centellador, el tubo fotomultiplicador y el sistema de guía de luz, que dirige los fotones producidos en el plástico al fotomultiplicador. Todos estos se encuentran en una caja que no permite la entrada de luz.

Las características del tubo fotomultiplicador, el plástico, la caja, así como del sistema electrónico asociado, determinan la altura del pulso de salida y la eficiencia total del sistema.

Swank (1954) ha mostrado que la altura del pulso de salida en el ánodo puede expresarse como:

sarse como:

$$\text{donde; } V_{\text{max}} = \frac{NGESK_e}{C} \quad (1)$$

N = número total de fotones emitidos por el plástico al paso de una partícula cargada.

G = factor de multiplicación del tubo fotomultiplicador.

E = eficiencia de recolección de electrones en el sistema de dinodos del tubo fotomultiplicador.

S = fotosensitividad promedio del tubo fotomultiplicador.

K = número de electrones emitidos por el cátodo dividido por el número de fotones emitidos por el paso de una partícula.

C = capacitancia entre los dinodos.

e = carga del electrón.

$\gamma = \frac{RC}{\tau}$ constante de tiempo del circuito dividido por el tiempo de decaimiento de la fluorescencia.

Puesto que desde el punto de vista electrónico es deseable obtener un pulso de salida apreciable en el ánodo, el diseño del contador quedará sujeto al ajuste de los diferentes parámetros anunciados arriba.

El Plástico de Centelleo:

Los plásticos de centelleo utilizados son del tipo NE 102 A y consisten de planchas de Polyvinyl-Tolueno en el cual está disuelto un centellador orgánico. El material ha sido tratado de manera que exista un corrimiento, en la longitud de onda de máxima emisión, de 3800 Å a alrededor de 4500 Å. Esto permite que la distribución espectral de la emisión fluorescente coincida con la respuesta máxima del fotomultiplicador usado. Las principales características del centellador son las siguientes:

- Luz de salida; 65% de la de un cristal de entraceno de la misma geometría.
- Constante de decaimiento; 3 nanoseg.
- Longitud de onda de máxima emisión; 4550 Å.
- Gravedad específica; 1.032
- Temperatura a la que empieza a ablandarse; 75°C.
- Índice de refracción; 1.581
- Número de átomos/Barn; H:0525
C:0475
N: 1.8×10^6
O:18

h) Número de electrones/cm²; 3.4×10^{23}

El número de fotones emitidos por el paso de una partícula cargada a través del plástico es una cantidad útil para propósitos de diseño. Este puede calcularse por la energía perdida por una partícula de mínima ionización al atravesar el centellador y por la eficiencia de centelleo del plástico.

La energía perdida/gr.cm² de un material de $\frac{NZ}{A}$ (concentración de electrones) = 3.4×10^{23} , puede estimarse a partir de la relación dada por Rossi (1952) y es del orden de 2.2 MeV/gr. cm⁻².

De aquí que la energía total perdida al pasar a través de 3 cm de material sea de ≈ 6.8 MeV.

Se puede estimar el número de fotones emitidos por paso vertical de una partícula cargada, a partir del conocimiento de la energía perdida y del hecho de que la eficiencia del plástico es de 60% de la del antraceno. Este último material convierte, aproximadamente, de 4 a 6% de la energía perdida en radiación de centelleo. Por lo tanto 98.33 eV serán gastados por fotón emitido, comparados con los 49.17 eV en el caso del antraceno. El número total de fotones emitidos será, por lo tanto, de aproximadamente 6.9×10^4 . Una fracción de estos fotones será recolectada por el cátodo del tubo fotomultiplicador. Dicha fracción dependerá de las características del sistema guía de luz empleado.

Sistema de Cufa de Luz:

El acoplamiento entre el tubo fotomultiplicador y el plástico de centelleo es un factor importante en el diseño de un telescopio. En la práctica el diseño se efectúa con vistas a obtener la máxima obtención de luz en el cátodo del tubo fotomultiplicador. Un acoplamiento directo permitiría obtener una máxima recolección, sin embargo, sería poco práctico en el caso de emplear centelladores de gran tamaño. Lo que generalmente se hace es pintar las paredes internas de la caja con una pintura reflectora.

Los fotomultiplicadores se colocan en la base de una caja rectangular de la cual se excluye toda luz externa. El interior se pinta con un material llamado DARVIC que tiene un coeficiente de reflexión de 0.75.

La luz emitida por el paso de una partícula cargada a través del plástico es difundida y distribuida isotrópicamente en la caja.

En el caso de los telescopios del Instituto de Geofísica, los plásticos están colocados en contacto óptico directo en la base de la caja, y el fotomultiplicador ve al centellador desde arriba de la caja. La uniformidad en la obtención de luz puede determinarse midiendo la corriente oscura del tubo fotomultiplicador cuando una pequeña lámpara de tungsteno se mueve a través de la caja. Se encuentra que la eficiencia de obtención de luz permanece dentro de un 15% de aquella que se obtiene cuando un flash de luz ocurre directamente abajo del tubo y decae, únicamente en un 30%, en las esquinas de la caja.

Los Fotomultiplicadores:

Las características deseables en la selección del fotomultiplicador para contar centelleos son:

- a) Una alta fotosensitividad.
- b) Respuesta uniforme del Fotocátodo.
- c) Una alta sensibilidad al azul.
- d) Una buena eficiencia en la recolección de electrones del cátodo al primer dínodo.
- e) Una alta ganancia en el primer dínodo.
- f) Una alta estabilidad ante corrimientos en la ganancia.
- g) Bajo ruido (baja corriente oscura).

Con el conocimiento de la fotosensitividad del cátodo se puede estimar la amplitud de la señal obtenida, en la salida del fotomultiplicador, cuando una partícula de mínima ionización pasa a través del plástico centellador. Para encontrar este voltaje de salida se utilizará la ecuación (1). Como se puede notar, la mayor parte de las variables en esta ecuación son las características del tubo fotomultiplicador dadas por el fabricante, excepto K. Para encontrar K se hará lo siguiente:

Primeramente se calcula el número de fotones que el fotocátodo registra; para esto se utiliza la ecuación dada por Clark et al., (1957)

$$\text{donde: } g = \frac{N_{rn}}{1 - (1 - n)r} \quad (2)$$

N = número total de fotones emitidos por el centellador por el paso de una partícula

la cargada. (6.9×10^4).

r = coeficiente de reflexión de la superficie difusora (0.75).

n = razón del área del fotocátodo y el área de la superficie difusora (3.03×10^{-3}).

El valor que se encuentra para g es de 622 fotones. Como la fotosensitividad del cátodo es de $70 \mu\text{A/Lumen}$ se tendrá que, aproximadamente, 62.2 electrones son emitidos al primer dínodo. La razón de este número de electrones y el número total de fotones emitidos por el centellador por paso de una partícula cargada, da el valor de $K=9.01$. Si se sustituyen los valores de $K=9.01$; $N=6.9 \times 10^4$; $S=0.1$; $E=0.6$; $G=15 \times 10^6$; $C=30 \times 10^{-12}$ faradios; $e=4.1 \times 10^{19}$ coulombs y $\gamma=76.27 \times 10^{13}$ en la ecuación (1) se obtendrá un pulso de salida del fotomultiplicador de, aproximadamente, 213 mV.

EL TELESCOPIO DE CENTELLEO EN EL INSTITUTO DE GEOFISICA DE LA UNAM.

Actualmente el Grupo de Estudios Espaciales del Instituto de la UNAM se encuentra en proceso de poner en marcha el proyecto de la Estación de Rayos Cósmicos, la cual cuenta con un Monitor de neutrónes NM-64 que consta de seis contadores proporcionales divididos en tres secciones, de dos contadores cada sección, y un telescopio de mesones.

El telescopio de mesones consta de ocho ca-

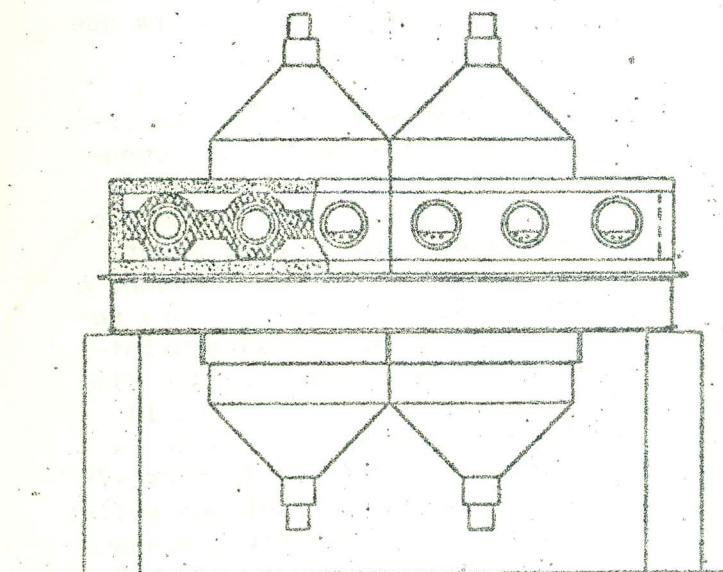


FIGURA 1

jas con cuatro centelladores en cada una. La geometría del telescopio es de arreglo cúbico, es decir que existe un metro cúbico entre los plásticos centelladores de cada caja, y éstas están colocadas verticalmente como se muestra en la figura 1. El monitor de neutrones se encuentra colocado entre las dos secciones de coincidencia del telescopio, esto sirve también para hacer una discriminación más efectiva de la radioactividad de fondo dado que el monitor se encuentra rodeado de una densa capa de plomo. Este arreglo permite, además, obtener una resolución angular en las características direccionales del instrumento, como se muestra en la figura 2.

El proyecto de la Estación de Rayos Cósmicos se encuentra bajo la dirección del Dr. J. Otaola y tiene la ventaja de que el equipo periférico para la captura de los datos que proporcionen estos dos detectores ha sido desarrollada y diseñada en el propio Instituto, por el Ing. O. Musalem. El ensamblaje del equipo electrónico está ya en la etapa final y se espera que en un plazo no mayor de tres meses se encuentre funcionando la estación, para realizar así las pruebas de estabilidad del instrumental construido en México.

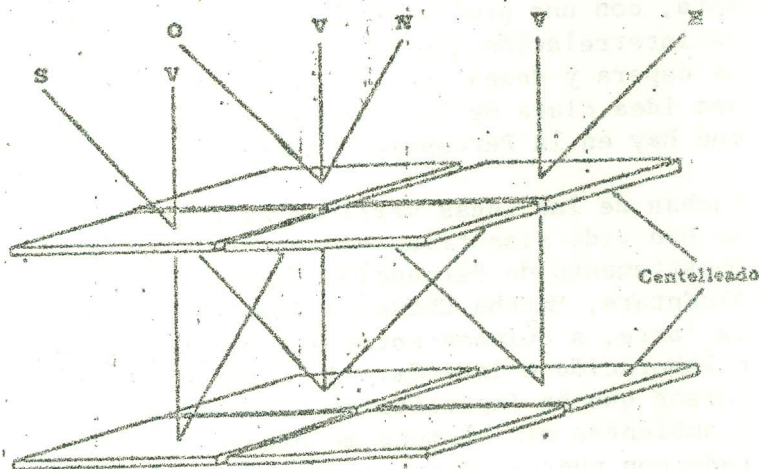


FIGURA 2