



Construcción del antiguo observatorio de Rayos C3smicos de Ciudad Universitaria.

«The subject [of cosmic rays] is unique in modern physics for the minuteness of the phenomena, the delicacy of the observations, the adventurous excursions of the observers, the subtlety of the analysis, and the grandeur of the inferences ».

Karl K. Darrow

Detección de rayos cósmicos y el Observatorio de RC en Ciudad Universitaria

El Observatorio de rayos cósmicos ubicado en Ciudad Universitaria forma parte de una red de más de cincuenta observatorios distribuidos en todo el mundo. Dependiendo del lugar donde se encuentren los detectores, la intensidad y cantidad de energía de la radiación cósmica detectada será afectada por el campo magnético de la Tierra. Detectores localizados a bajas latitudes registran un menor número de partículas, mientras que detectores localizados cerca de los polos magnéticos de la Tierra registran una mayor cantidad. A este efecto se le conoce como *efecto latitudinal*. La cantidad y distribución de observatorios de RC, nos ayuda a mapear la llegada de la radiación cósmica a nuestro planeta[1].

Los métodos que se utilizan para la detección de rayos cósmicos son diversos y con ayuda de tecnologías modernas se ha logrado decifrar la información que estos *mensajeros* nos traen desde el universo. Sin embargo, no siempre ha sido así. Las técnicas empleadas para determinar la magnitud y naturaleza de este fenómeno han tenido que cruzar un largo camino, y una serie de mejoras tras fuertes dificultades en la historia.

El presente capítulo está dedicado al estudio de los detectores de radiación cósmica; su historia y evolución, así como la contribución que ha hecho la Universidad Nacional Autónoma de México.

2.1. Rescatando rayos cósmicos

Se requiere un flujo de 10^{19} *electrones* por segundo para producir una corriente de 1A de intensidad. Un tostador eléctrico convencional requiere de 10A para su funcionamiento. En contraste, el arribo de una partícula de RC por

segundo constituye una corriente de $10^{-19} A$. En otras palabras, no es fácil medir la masa, carga y velocidad de una partícula que pesa menos de $1,67 \times 10^{-27} kg$. Luego entonces, ¿cómo puede una partícula de tan pequeñas dimensiones ser detectada?

Una partícula cargada se puede detectar a través de la ionización que produce. Como se explicó en el capítulo anterior, los RC colisionan con núcleos de átomos atmosféricos produciendo iones. La ionización que una partícula produce, depende de la razón Z^2/v^2 [2], donde Z representa la carga eléctrica de la partícula y v su velocidad. Esta razón nos indica que partículas con menor velocidad provocan mayor ionización, debido a que su campo eléctrico tiene mayor tiempo para interactuar con el medio, lo que no sucede con aquellas de mayor velocidad.

Los RC poseen energía cinética que es la fuente de la energía que se ocupa para la ionización. Durante la trayectoria de una partícula, ésta cede energía al chocar con la estructura atómica de la materia. Finalmente, cuando toda su energía cinética ha sido transferida, la partícula queda en reposo. A la distancia que la partícula recorrió antes de detenerse, se le nombra *rango*.

Si podemos medir la energía cinética de la partícula a través del *rango* y su velocidad mediante el nivel de ionización producido, entonces podemos conocer la carga y la masa de dicha partícula. Con base en esto, se busca que un detector de RC nos brinde la información necesaria para poder caracterizar la radiación cósmica.

Los detectores de partículas se pueden clasificar en dos grupos dependiendo de la información que nos brinden. El primer grupo de detectores se caracteriza por mostrar la *traza* de la trayectoria de la partícula; permitiendo medir el rango de forma directa y registrar el nivel de ionización.

El segundo tipo de detectores tan solo mide el nivel de ionización. Si se desea conocer la traza de la partícula es posible utilizar más de un detector y *registrar* el paso de la partícula a través de ellos.

Uno de los primeros instrumentos que se utilizó para el estudio de la radiación cósmica fue el *electroscopio*. Este instrumento nos ofrece una medida del flujo total de RC y fue ampliamente utilizado para determinar las variaciones de la intensidad de RC a diferentes alturas.

Un electroscopio común se compone de dos placas de oro suspendidas sobre una barra metálica y contenidas en un recipiente de vidrio sellado herméticamente. La parte superior de la barra se encuentra fuera del recipiente y al entrar en contacto con un material cargado las láminas de oro se repelen. Tras retirar el material cargado, el electroscopio pierde su carga gradualmente y las láminas terminan en su posición inicial. Este efecto se presenta sin importar el gas con el que este lleno el recipiente. Hasta la década de los treinta personajes

como Arthur Compton y Robert Millikan utilizaron esta herramienta en sus investigaciones.

Arthur Compton, años más tarde, ocupó la *cámara de ionización* para medir las variaciones de la intensidad de RC a diferentes latitudes (Fig. 2.1). La *cámara de ionización* es un instrumento que, al igual que el electroscopio, sólo nos permite medir el flujo total de RC. Está conformada por un contenedor esférico, lleno de Argón, y blindado con placas de Bronce para evitar la contaminación por radioactividad local. En la parte interior de la cámara se encuentra un electrodo conectado a una fuente de alto voltaje (Fig. 2.2). Cuando una partícula penetra el blindaje, ioniza el gas y los iones positivos y negativos son acelerados, por el alto voltaje, hacia el contenedor y el electrodo, respectivamente. Como consecuencia de esto se produce una pequeña corriente eléctrica que puede ser medida por medio de un amperímetro.

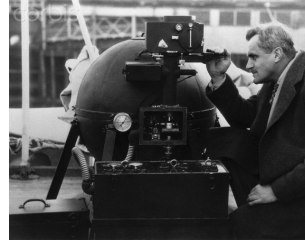


Figura 2.1: Dr. Arthur Compton abordo del HMS Aorangi, el cual llevaría los instrumentos de Compton de las costas de Canadá hasta Australia para medir las variaciones de RC.

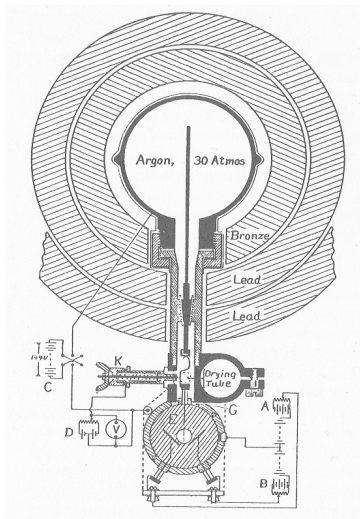


Figura 2.2: Cámara de ionización.

(Fig. 2.3).

Al instrumento que desarrolló Geiger, se le llama “contador” debido a que cada partícula que pasa por él produce un pulso idéntico, permitiendo contar las partículas pero sin decirnos nada sobre su energía.

En 1911 Hans Geiger inventó un instrumento contador de partículas: *Contador Geiger*. Dicho contador está constituido por un alambre delgado que cruza un cilindro de metal y está aislado de tal manera que no toca al cilindro. Entre el tubo y el alambre se conecta una batería de muy alto voltaje. El principio de funcionamiento es muy similar al dispositivo que ocupó Compton; no obstante, el voltaje que se ocupa para polarizar el tubo es mucho más grande que el de una cámara de ionización[3]. Esto provoca que en el circuito, que se forma entre el alambre, el gas y el cilindro, circule una pequeña corriente y al colisionar una partícula dentro de él se produce un pulso eléctrico. A este régimen de operación se le conoce como *saturación*

Los *contadores proporcionales* son contadores Geiger que no operan en su punto de saturación, es decir, trabajan a voltajes menores de aproximadamente 1200V[3]. Esto permite conocer la energía de la partícula, porque al no llegar a la saturación, las partículas que llegan a ionizar el gas producen un pulso cuya amplitud y ancho dependen de su energía y del tiempo de relajación del gas.

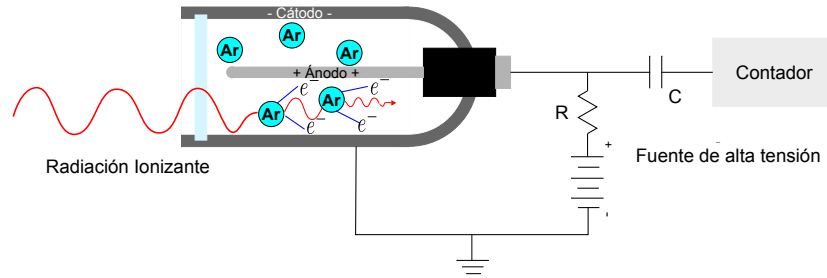


Figura 2.3: Diagrama del funcionamiento de un contador Geiger.

De forma general podemos concebir la cámara de ionización, el contador Geiger y el contador proporcional, como *tubos de descarga* polarizados a diferentes niveles de voltaje. En la figura 2.4 se muestran las regiones de operación del *tubo de descarga* con respecto a su voltaje de alimentación. La región A es el punto de operación de la cámara de ionización. En la región B operan los contadores proporcionales. Finalmente en la región C trabajan los contadores Geiger.

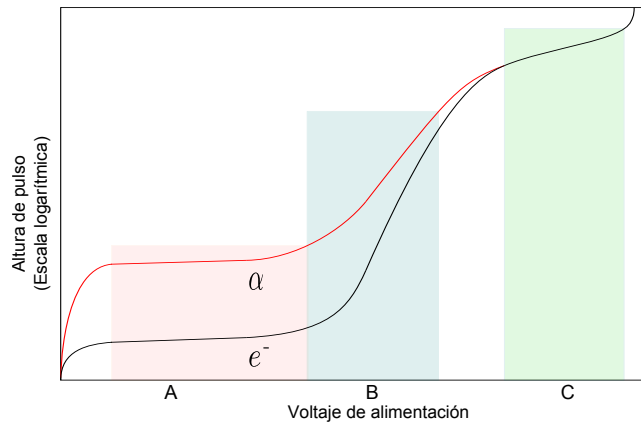


Figura 2.4: Magnitud del pulso de salida de un tubo de descarga como función del voltaje de alimentación. La curva roja muestra la respuesta a una partícula α mientras que la curva negra muestra la respuesta a un e^- .

Uno de los primeros detectores capaz de trazar la trayectoria de una partícula recibió el nombre de *cámara de niebla* y fue inventado por Charles Thomson Wilson (Fig. 2.5). En su forma más sencilla, una cámara de niebla es un recipiente que contiene vapor de agua saturado a bajas temperaturas. Cuando

una partícula cargada interacciona con el vapor, lo ioniza. Los iones resultantes actúan como núcleos de condensación alrededor de los cuales se forman gotas de agua. Al paso de la partícula se va produciendo su traza. Esta traza tiene una forma distintiva, es decir, la traza de una partícula α es ancha y recta, mientras que la de un *electrón* es más fina. La implementación de esta tecnología trajo consigo el descubrimiento del *positrón* (e^+) y del *muon* (μ).

Como las cámaras de niebla se disparaban de forma aleatoria, era muy difícil tener trazas de rayos cósmicos. Fue Bruno Rossi el que desarrolló una técnica para mejorar la sensibilidad de un telescopio RC. Usando dos contadores Geiger en fila, es posible generar una señal de *coincidencia* cuando una partícula pasa por ambos detectores. Si se sabe que las partículas de RC provienen de una dirección, la señal de coincidencia nos permite descartar contar partículas con trayectorias no permitidas. Años después la cámara de niebla se usaría en conjunto con los contadores Geiger para mejorar la técnica.



Figura 2.5: Cámara de niebla de Wilson en el museo del Laboratorio Cavendish, en la universidad de Cambridge.

El primer registro de trazas de rayos cósmicos primarios se hizo por medio del llamado *método fotográfico*[2]. Cuando la luz cae en una emulsión fotográfica produce una reacción química que se muestra después de un tratamiento conocido como revelado. Al incidir una partícula cargada en la emulsión se produce un cambio similar, y su traza se observa después del revelado. El ancho de la traza es directamente proporcional al nivel de ionización que la partícula produce. Las partículas masivas y con mayor velocidad producen trazas gruesas y de trayectoria recta (Fig. 2.6(a)). Partículas de menor masa y menor velocidad producen trazas más angostas y trayectorias dispersas (Fig. 2.6(b)).

Las emulsiones fotográficas fueron utilizadas en experimentos de alta montaña, en los Pirineos y en la cordillera de los Andes. En 1950, Cecil Powell aplicando el método fotográfico probó la existencia del *pion*.

Con el advenimiento de la Segunda Guerra Mundial y la revolución electrónica, se crearon nuevos sistemas de detección capaces de medir la cantidad de energía de una partícula y con un tiempo de respuesta mucho menor.

Los *centelladores* están formados por un material que al ser impactado por una partícula cargada emiten luz. Disponiendo de un elemento transductor, tal como un tubo fotomultiplicador —PMT por sus siglas en inglés—, cada una de estas emisiones de luz puede ser detectada y transformada en una señal eléctrica[4].

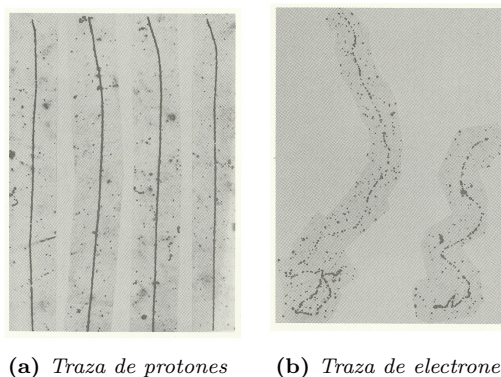


Figura 2.6: Trazas de partículas obtenidas por medio de emulsiones fotográficas.

Por otro lado, los *contadores Cherenkov* se utilizan para detectar partículas de muy alta velocidad. Estas partículas al pasar a un medio donde su velocidad supera la velocidad de la luz, emiten radiación electromagnética que puede ser detectada por tubos fotomultiplicadores.

Hasta aquí se ha dado un panorama general del avance de los equipos para la detección de rayos cósmicos, sin embargo, es materia del presente trabajo hacer alusión al *Super Monitor de Neutrones*.

2.2. El Super Monitor de Neutrones

Entre 1948 y 1950 John Alexander Simpson de la Universidad de Chicago diseñó el monitor de neutrones IGY —International Geophysical Year—. Este detector fue estandarizado en el año Geofísico Internacional —1957— para medir las variaciones de intensidad de radiación cósmica cerca de la tierra. Se colocaron más de una docena en distintas localidades del mundo, entre ellas: Colorado, Perú, México, Sacramento y Chicago. Uno de los monitores de neutrones IGY más destacados fue el de Climax, Colorado. Instalado en 1950, tiene más de 60 años operando en forma continua, lo que lo hace el detector de neutrones más antiguo del mundo.

El monitor IGY usa contadores proporcionales, de 86cm de largo y 4cm de diámetro, y puede producir una razón de conteo de hasta 25000 cuentas por hora[5].

En 1964 Hugh Carmichael diseñó el Super Monitor de Neutrones NM64 y fue el detector de rayos cósmicos estándar en el congreso International Quiet Sun Year —IQSY—. En comparación con el detector IGY, el Super Monitor es de dimensiones mayores y tiene una resolución de hasta 750000 cuentas por

hora.

El NM64 se compone de cuatro partes fundamentales: *productor*, *moderador*, *reflector* y *contador proporcional* (Fig 2.7).

Los neutrones que se detectan en el monitor son producidos localmente por anillos de plomo que cubren a los contadores proporcionales[5]. La producción de neutrones es función de la densidad atómica del anillo y de la desintegración nuclear —reacción nuclear que ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños—. Se ocupa plomo como *productor* debido a que su producción es ocho veces mayor que si se ocupará carbón.

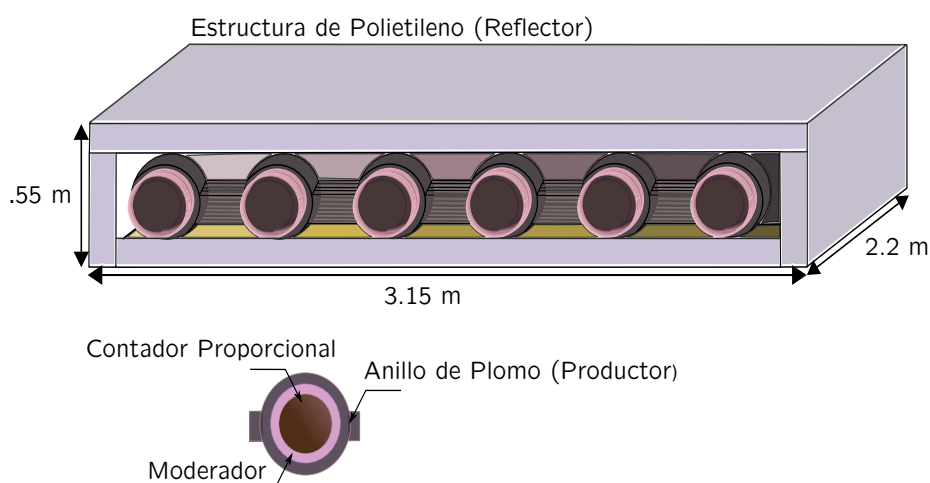


Figura 2.7: Esquema del monitor de Neutrones 6-NM64

El *moderador*, en el caso del NM64, es una capa de polietileno que rodea a los contadores proporcionales. El objetivo de éste es disminuir la velocidad de los neutrones incidentes en los contadores y así poder aumentar la probabilidad de que éstos sean detectados.

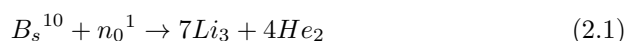
Los materiales utilizados como moderador deben tener una masa atómica baja, lo cual se consigue a través de compuestos que contienen hidrógeno, como la parafina, agua o polietileno.

Alrededor del moderador, los contadores proporcionales y el productor, se pone un armazón de polietileno que sirve como *reflector*. Esta capa de polietileno impide que los neutrones creados en el productor escapen y que los neutrones de baja energía producidos en el exterior del monitor afecten la respuesta del mismo.

El principio de funcionamiento del Super Monitor de Neutrones se basa en una reacción química que se produce dentro de los contadores proporcionales.

En el interior de cada contador se encuentra BF_3 gaseoso enriquecido al 96 % con B^{10} a una presi3n de 0,27bar.

Los neutrones al llegar al interior del tubo producen una reacci3n qu3mica exot3rmica con el Boro, cuyo resultado son n3cleos de *Litio* y *Helio* (Ec. (2.1)). Las part3culas de Helio son recolectadas en el c3todo del cilindro y provocan una corriente el3ctrica que puede ser detectada.



En un 94 % de las reacciones que se llevan a cabo dentro del contador los productos tienen una energ3a de 2,3MeV y en el resto de ellas de 2,78MeV. Aun cuando en el 77 % de los casos, el total de part3culas producidas son originadas por neutrones, existen otras part3culas que al arribar al tope del detector producen pulsos adicionales. El 15 % de los pulsos totales es producido por protones, el 7 % por muones y el 1 % por piones y otras part3culas inestables[6].

El monitor cuenta con tres unidades el3ctricamente independientes y cada unidad puede estar formada por 1, 2, 3 o 6 contadores de BF_3 . De acuerdo a esto, un monitor se identifica con el n3mero total de contadores, es decir; un monitor con un s3lo contador por secci3n es llamada 3 – NM64, uno con dos contadores por secci3n 6 – NM64, uno con tres contadores por secci3n 9 – NM64 y uno con seis 18 – NM64.

La mayor parte de las cuentas, en el monitor, se debe a radiaci3n c3smica, N_{cr} , pero existe una peque1a tasa de cuentas, N_f , que es producida por interferencias el3ctricas. La N_f debe ser constante si los contadores funcionan adecuadamente.

N_f representa alrededor del 1 % del total de las cuentas en un monitor de gran altura —2400m al nivel del mar— y menor al 1 % a nivel del mar. Si el monitor se encuentra cerca del ecuador Terrestre, la N_f se incrementa hasta 1,8 % [7].

2.3. El observatorio de Rayos C3smicos

El Insituto Carnegie en 1946 instal3 en la Ciudad de M3xico una c3mara de ionizaci3n, la cual ser3a el primer detector de radiaci3n c3smica operando en forma continua en nuestro pais.

Ocho a1os m3s tarde la Universidad de Chicago, con motivo del A1o Geof3sico Internacional, don3 un monitor IGY y fue instalado en el *Pabell3n de Rayos C3smicos* en Ciudad Universitaria. A cargo de este proyecto se encontraba Oscar Troncoso en colaboraci3n con la Dr. Ruth Gall —de nacionalidad Polaca

y naturalizada mexicana, qui3n fund3 el departamento del Espacio Exterior en el Instituto de Geof3sica de la UNAM.



Figura 2.8: Estaci3n de rayos c3smicos Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu.

En 1964, con equipo donado por el Dr. John Bland de la Universidad de Calgary, el Instituto de Geof3sica comenz3 la instalaci3n de un monitor de neutrones NM64 en las afueras de Ciudad Universitaria (Fig. 2.8 y 2.9). Este nuevo monitor trabajar3 en conjunto con el monitor IGY hasta principios de 1975.

Para 1970 los encargados de ambas estaciones de rayos c3smicos eran los f3sicos; Oscar Troncoso, Gerardo Centeno y Alejandro Hurtado.

El monitor IGY utilizaba un sistema de adquisici3n de datos basado en un contador mec3nico. Una c3mara cinematogr3fica tomaba pel3cula del registro del contador cada 15 minutos. Los datos contenidos en esta pel3cula, eran posteriormente procesados por los encargados de la estaci3n.

En 1975 el monitor IGY fue desmantelado y el Pabell3n de Rayos C3smicos paso a ser propiedad de la Facultad de Odontolog3a de la UNAM. Actualmente el monitor IGY se encuentra en exhibici3n en el museo de Geof3sica de la Ciudad de M3xico en Tacubaya.

Desde su instalaci3n, el monitor NM64 recogi3 datos en forma similar al monitor IGY pero con un tiempo de acumulaci3n de 5min. Sin embargo, la operaci3n del monitor no era la adecuada debido a errores en su construcci3n.

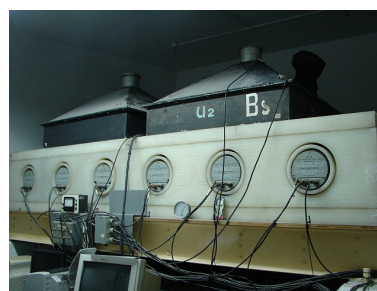


Figura 2.9: Monitor 6NM64 instalado en el observatorio de CU.

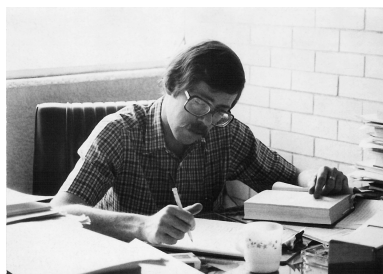


Figura 2.10: *Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu*

A principios de 1976 el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu (Fig. 2.10) se hace cargo del observatorio, tras un estudio de la calidad de los datos del monitor, decide desmantelar el NM64 y comenzar su reconstrucción hacia el año de 1982.

Los siguientes siete años el observatorio de Rayos Cósmicos entra en una etapa de modernización y mantenimiento, y con la colaboración del Ing. Octavio Musalem Clemente se desarrolla un sistema de adquisición de datos basado en tecnología digital (Fig. 2.11 y 2.12).

Dentro del proceso de modernización se reconstruyen los anillos de plomo del detector, las placas de polietileno y los datos pasan a almacenarse en cintas magnéticas. Años más tarde, con la participación del Físico Alejandro Hurtado, se logra almacenar los datos en una PC.

Para 1989, el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu determina que el funcionamiento del monitor es correcto y en 1990 se publican por primera vez los datos obtenidos en el monitor.



Figura 2.11: *Ing. Octavio Musalem trabajando en la construcción del nuevo sistema de adquisición de datos.*

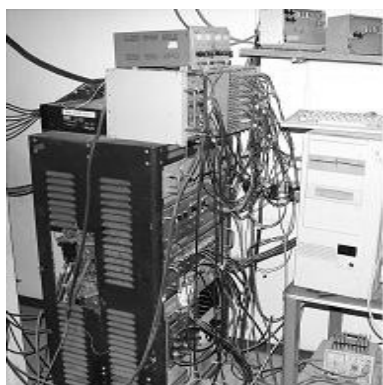


Figura 2.12: *Sistema de adquisición de datos diseñado por el Ing. Octavio Musalem.*

Hacia el año 1995 el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu fallece y se hace cargo del observatorio el Dr. José Francisco Valdés-Galicia, que había sido alumno suyo años atrás.

Con la dirección del Dr. José Francisco Valdés-Galicia se instaló un telescopio de muones en el observatorio de Rayos Cósmicos —a partir del año 2008 se encuentra trabajando en forma continua— y en el año 2003 se comenzó la instalación de un telescopio de *neutrones solares* en Sierra Negra, Puebla.

Finalmente, el trabajo realizado en el observatorio ha contribuido de manera considerable a la investigación de los rayos cósmicos. Durante los últimos 21 años, el monitor ha sido testigo fiel de

la actividad solar y ha esclarecido los misterios de un Sol activo y un Universo en movimiento.

Algunas de las aportaciones del observatorio a la comunidad cient3fica son:

- Detecci3n de protones solares de hasta 15GeV el 29 de septiembre de 1989. Fue el evento solar m3s grande que se ha podido detectar en los 3ltimos a3os.
- Detecci3n del evento de neutrones solares del 24 de mayo de 1990[8]. Este hallazgo fue crucial para establecer definitivamente la posibilidad de detectar neutrones solares en la superficie terrestre.
- Hallazgo de una variaci3n de 115 d3as en el ciclo solar[5].
- An3lisis de los efectos de campos el3ctricos atmosf3ricos en los rayos c3smicos detectados en la superficie[9].
- En 1995 investigadores de la Universidad de Roma utilizaron los datos del monitor de M3xico para calibrar los detectores utilizados en un recorrido latitudinal[10] [11].

Adem3s de estas aportaciones, con datos del observatorio se han producido: una tesis de doctorado, tres tesis de maestr3a y dos de licenciatura. Actualmente se estan realizando m3s trabajos de investigaci3n.

El monitor se encuentra en una localidad de $19,33^\circ$ latitud, $99,18^\circ$ de longitud y 2274m sobre el nivel del mar, detectando part3culas con una rigidez umbral de $8,23\text{GV}$ y trabajando las 24hrs del d3a, los 365 d3as del a3o. Sus datos pueden consultarse en tiempo real por internet —<http://132.248.105.25>— y es considerado uno de los detectores de neutrones m3s estables del mundo.

Referencias

- [1] Javier A. Otaola y José F. Valdés-Galicia. *Rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de cultura económica, México, 1992.
- [2] Michael W. Friedlander. *Cosmic Rays*. Harvard University Press, Boston, EU, 1989.
- [3] Raghbir S. Khandpur. *Handbook of modern analytical instruments*. Tab Books, Blue Ridge Summit, 1981.
- [4] Jesús Alvarez Castillo. Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2008.
- [5] Rogelio A. Caballero López. *Estudio de las fluctuaciones de la radiación cósmica detectadas en la superficie terrestre durante los ciclos solares 22 y 23*. PhD thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2001.
- [6] E. B. Hughes y P. L. Marsden. Response of a standard igy neutron monitor. *Journal of Geophysical Research*, 71:1435–1444, 1966.
- [7] H. Carmichael y M. Bercovitch. Analysis of iqsy cosmic-ray survey measurements. *Canadian Journal of Physics*, 47:2073–2093, 1966.
- [8] C. R. Barrat H. Debrunner, J. A. Lockwood *et al.* Energetic neutrons, protons and γ rays during the 1990 may 24 solar cosmic-ray event. *The astrophysical journal*, 479:997–1011, 1997.
- [9] Luis X. González Méndez. Efectos de los campos eléctricos atmosféricos en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2003.

- [10] L. I. Dorman N. Lucci, G. Villoresi and M. Parisi. Cosmic-ray survey to antarctica and coupling functions for neutron component near solar minimum (1996-1997) 2. meteorological effects and correction of survey data. *Proceedings ICRC, 1997 Salt Lake City*, 7:321, 1997.
- [11] L. I. Dorman N. Lucci, G. Villoresi and M. Parisi. Determination of neutron monitor barometric effect on the base of the altitude cosmic-ray intensity dependence as measured by the israelo-italian mobile laboratory. *Proceedings ICRC, 1997 Salt Lake City*, 7:371, 1997.