



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Construcción y caracterización de un detector  
Cherenkov de agua para la discriminación de cascadas  
hadrónicas y electromagnéticas

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

Alejandro Román Vásquez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Andrés Sandoval Espinosa

2009





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del jurado
1. Datos del alumno Vásquez Alejandro Román 56 65 15 93 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 404036988
2. Datos del tutor Dr. Sandoval Espinosa Andrés
3. Datos del sinodal 1 Dr. D'Olivo Saez Juan Carlos
4. Datos del sinodal 2 Dr. Belmont Moreno Ernesto José Maria de la Salette
5. Datos del sinodal 3 Dra. González Sánchez María Magdalena
6. Datos del sinodal 4 M. en C. León Rossano Luis Manuel
7. Datos del trabajo escrito Construcción y caracterización de un detector Cherenkov de agua para la discriminación de cascadas hadrónicas y electromagnéticas 120 p 2009

# Índice

Introducción	7
<b>1. El universo a través de los rayos gamma</b>	<b>11</b>
<hr/>	
1.1. Los rayos gamma	11
1.1.1. Rango de energías (definiciones)	11
1.1.2. Motivación de la astronomía de rayos gamma	12
1.2. Telescopios espaciales de alta energía	14
1.3. Telescopios terrestres de muy alta energía	18
1.4. Observatorio Cherenkov de agua a gran altura: HAWC	24
1.4.1. Diseño de HAWC	25
1.4.2. La ciencia de HAWC	26
<b>2. Interacciones físicas fundamentales para la producción y detección de los rayos gamma</b>	<b>28</b>
<hr/>	
2.1. Interacciones físicas fundamentales	28
2.1.1. Conceptos preliminares	28
2.1.2. Interacción de partículas	30
2.1.2.1. Interacción con materia	30
2.1.2.2. Interacción con campos de radiación electromagnética	35
2.1.2.3. Interacción con campos magnéticos	36
2.2. Los rayos gamma en el cosmos	37
2.3. Los rayos gamma que llegan a la Tierra	40
2.3.1. Cascadas de partículas	40
2.3.2. Proceso de creación de la cascada	40
2.3.3. Parámetros de una cascada extensa	43
2.3.4. Solución numérica y simulación	43
2.3.5. Muones atmosféricos	48
<b>3. Detectores de centelleo y detectores Cherenkov</b>	<b>49</b>
<hr/>	
3.1. Detectores de partículas	49
3.1.1. Características generales de los detectores	49

<b>3.2. Fotomultiplicadores</b>	<b>51</b>
3.2.1. Elementos de los fotomultiplicadores	52
3.2.2. Parámetros de operación de los fotomultiplicadores	54
3.2.3. Resolución y respuesta temporal	56
3.2.3.1. Tiempo de tránsito	56
3.2.3.2. Ruido	57
3.2.4. Factores ambientales que afectan el desempeño de los fotomultiplicadores	58
<b>3.3. Detectores de centello</b>	<b>58</b>
3.3.1. Centelladores plásticos	60
3.3.2. Montaje de un detector de centelleo	61
<b>3.4. Detectores Cherenkov</b>	<b>62</b>
3.4.1. Detectores Cherenkov de agua	66
<b>4. Construcción del arreglo experimental</b>	<b>67</b>
<hr/>	
<b>4.1. Características de las señales</b>	<b>67</b>
4.1.1. Señales analógicas y señales digitales	67
<b>4.2. Electrónica para el procesamiento de las señales</b>	<b>68</b>
4.2.1. Sistemas electrónicos	68
4.2.2. Módulos de electrónica	69
<b>4.3. Diseño y construcción experimental</b>	<b>71</b>
4.3.1. Tanque	72
4.3.2. Agua	73
4.3.3. Fotomultiplicadores	73
4.3.4. Atravesadores	75
4.3.5. Circuito desacoplador	76
4.3.6. Detectores de centelleo	77
4.3.7. Montaje del tanque	78
4.3.8. Arreglo experimental	79
4.3.9. Especificaciones técnicas de los cables	80
4.3.10. Especificaciones técnicas de la electrónica	81
<b>4.4. Caracterización de algunos elementos del detector Cherenkov de agua</b>	<b>82</b>
4.4.1. Primer análisis de las señales	82
4.4.2. Opacidad del tanque	83

<b>5. Caracterización del detector Cherenkov de agua</b>	<b>88</b>
<hr/>	
5.1. Verificación de la detección de muones verticales	88
5.2. Reflector de aluminio	92
5.3. Caracterización de las señales	96
5.3.1. El estudio de los muones verticales	98
5.3.2. Identificación de los electrones del decaimiento y de los muones que decaen	102
5.3.3. Búsqueda de electrones atmosféricos	107
5.3.4. Los parámetros de los pulsos y su comparación	109
Conclusiones	117
Bibliografía	119

# Introducción

HAWC (High Altitude Water Cherenkov) es un proyecto destinado a establecer un observatorio astrofísico de altas energías en México. Se construirá en la planicie ubicada a un costado del volcán Sierra Negra, Puebla, a 4100 metros sobre el nivel del mar. Su principal objeto de estudio es el universo a través de la detección de rayos gamma muy energéticos que se producen en fenómenos cosmológicos muy violentos como son las explosiones de supernovas, los centros activos de galaxias, las explosiones de rayos gamma, los pulsares, entre otros. La detección de esta radiación permitirá entender y resolver muchas de las incógnitas relacionadas con estos sucesos astrofísicos y generará conocimiento nuevo en varias ramas de la física: astronomía, astrofísica, cosmología, física de altas energías, entre otras áreas.

Este proyecto es vanguardista y único en el mundo, en el rango de energías que se pretende estudiar. Es la mejora del proyecto Milagro, un observatorio de rayos gamma de altas energías, que operó del año 2000 al 2007 en los Álamos, Nuevo México, a una altitud de 2400 m sobre el nivel del mar. El grupo de científicos que dirigió ese proyecto buscó hacer un nuevo observatorio que fuera más sensible. Las mejoras en el instrumento incluían ubicar el observatorio a una altura mucho mayor a la que estaba Milagro para que la detección de rayos gammas de menor energía fuera más eficiente. Su propósito era ubicarlo a más de 4000 metros sobre el nivel del mar. Gracias a la colaboración de instituciones científicas mexicanas (y también a otros factores como cercanía e infraestructura) se pudo traer el proyecto al país. De esta forma HAWC será un observatorio que mejorará la sensibilidad de su antecesor Milagro, en 15 veces. Esta gran mejoría hace pensar en la posibilidad de no solamente comprender mejor el universo que nos rodea, si no también poder, porque no, descubrir nuevos sucesos astrofísicos sumamente energéticos (lo que emociona y llena de curiosidad al mundo científico y a la humanidad). La importancia y trascendencia de este observatorio queda clara: se convertirá en una ventana del desarrollo científico e intelectual mexicano e internacional.

Los rayos gamma con energías mayores a cientos de GeV no se pueden observar directamente. Por la energía que poseen, interactúan con la atmósfera produciendo cascadas electromagnéticas compuestas de electrones, positrones y rayos gamma. Esta radiación secundaria es la que se tiene que analizar. En el proyecto Milagro, el estudio se hacía utilizando un detector Cherenkov de agua. Un detector de este tipo tiene un elemento que emite radiación electromagnética cuando lo cruzan partículas cargadas que poseen una velocidad que supera a la de la luz en ese medio. Se generan en un cono de luz que se propaga en la misma dirección que la partícula; este fenómeno recibe el nombre de radiación Cherenkov. Se producen tan pocos fotones que el ojo humano no los puede ver, y deben ser detectados por un dispositivo muy sensible. En el proyecto Milagro se empleó como radiador una piscina llena de agua pura que cubría un área de 5000 m<sup>2</sup> (60m x 80m) hasta 8 metros de profundidad y usaban 750 dispositivos sensibles a la luz, llamados fotomultiplicadores. Éstos estaban colocados dentro del depósito, en dos niveles formando una cuadrícula. Además se usaron 175 tanques con un fotomultiplicador dentro colocados alrededor de la piscina central. En HAWC se pretenden emplear

estos 900 fotomultiplicadores, pero usarlos en tanques aislados de 5m de altura por 4 m de diámetro en un arreglo denso que abarcará un área de 24 000 m<sup>2</sup> (160m x 150 m).

La detección de la radiación secundaria que producen los gamma no es fácil de llevar a cabo. Esto se debe a otro fenómeno: los rayos cósmicos. Esta radiación (compuesta generalmente de protones, partículas alfa y otros núcleos de elementos más pesados) interacciona también con el aire produciendo de igual forma chubascos de partículas cargadas (piones, Kaones, muones, electrones) que descienden en la atmósfera. Todas estas partículas que se crean pueden dejar señal en los detectores Cherenkov de agua. Debido a esto se pueden tener eventos producidos por rayos gamma o eventos generados por cascadas hadrónicas. En un principio esto podría significar un problema, pero gracias a que la componente muónica que contienen las cascadas producidas por los rayos cósmicos se dispersa mucho más que la componente electromagnética producida por las gammas, es posible discriminarlos.

En términos generales, en Milagro se lograba esta diferencia observando la distribución de amplitud de las señales depositadas en los fotomultiplicadores. Si ésta era homogénea, lo más probable era que el evento había sido generado por gammas. Pero si la distribución no era homogénea, y se generaban grupos de señales energéticas que estaban aisladas, era factible que el evento tuviera muones, y por ende ser producto de un chubasco hadrónico. En HAWC se pretende utilizar un criterio parecido. Gracias a las mejoras que tendrá respecto a Milagro, será más fácil hacer la distinción de las cascadas. Sin embargo los estudios y simulaciones hasta el momento dejan entrever que todavía habrá eventos indeterminados. Debido a esto se pretende buscar otras opciones que sirvan como complemento para lograr una mejor discriminación de la señales. Es aquí donde inicia este proyecto.

La electrónica de Milagro medía la carga de los pulsos a través de una técnica llamada Time-over-Threshold. En este método se seleccionaba un umbral de voltaje, y cuando los pulsos sobrepasaban este nivel un capacitor era cargado. Con el tiempo de descarga se podía medir el área de la señal (carga) y asociarle una amplitud. En su momento se decidió usar esta técnica pues era más rápida, menos costosa que los sistemas analógicos-digitales convencionales de esa época. Actualmente ya se cuentan con sistemas electrónicos a costos accesibles que pueden digitalizar las señales con una velocidad muy grande (del orden de GHz) lo que hace posible guardar información que permite desplegar la forma del pulso. Al emplear este tipo de electrónica para analizar las señales se puede obtener en esencia la forma de los pulsos. Al conocer el perfil de las señales se pueden medir algunos parámetros característicos como su tiempo de ascenso, su tiempo de descenso, su altura, su ancho a diversos porcentajes (10%, 50%), su carga, ente otros. La hipótesis que se pretende demostrar en este trabajo es que las señales que dejan en un detector Cherenkov de agua los muones que conforman la cascada hadrónica poseen parámetros distintos a la señal que deposita la parte electromagnética que domina la cascada de rayos gamma. Si la hipótesis fuera cierta, medir estas características con este tipo de electrónica será un complemento para lograr una mejor diferenciación entre los chubascos. Pero el alcance no termina aquí, en dado caso que la técnica sea mucho más eficiente y óptima que el método propuesto para HAWC, podría ser el sistema principal de discriminación.



La hipótesis se origina del hecho de que la generación de luz dentro del tanque es distinta para muones y para electrones. Como los muones son partículas de mínima ionización, casi no pierden energía y conservan su dirección generando un cono de Cherenkov que posee casi siempre el mismo ángulo. En cambio los electrones interactúan rápidamente con el agua y son dispersados y absorbidos deteniéndose por completo. Esto hace que el cono Cherenkov cambie en dirección y ángulo al variar la dirección y velocidad de la partícula. Este cambio en la producción de luz hace que los ritmos a los cuales los fotones llegan al fotomultiplicador sean distintos. Esta diferencia se podría traducir en un cambio en la forma de las señales. Además de esto se tiene el antecedente de un trabajo realizado por un grupo de investigadores [1], donde en un detector Cherenkov de agua observaron que los tiempos de ascenso para los muones y electrones presentan diferencias de hasta 40 ns. El experimento descrito en esta tesis es parecido al trabajo de Salazar-2005 [1], pero las condiciones no son las mismas. En el detector de Salazar-2005 [1] el fotomultiplicador está colocado en la parte superior del tanque de agua, y los fotones llegan a él a través de reflexiones difusas en un material. Si bien hay elementos parecidos, esta diferencia es fundamental y motiva a hacer las pruebas experimentales de este proyecto para ver si esas diferencias se presentan en tanques que presentan una configuración tipo HAWC (fotomultiplicador en el fondo mirando el volumen de agua por encima de él).

El trabajo desarrollado en esta tesis se centró en la caracterización y comparación de las señales que se generan en un detector Cherenkov de agua para verificar o refutar la hipótesis. El detector posee las mismas características de los de los tanques que se van a usar en HAWC sólo que a una escala más pequeña. La labor involucró en un principio el armado del arreglo experimental, que incluyó la construcción del detector Cherenkov de agua, la reparación y el uso de detectores de centello auxiliares para la identificación de las partículas, y la implementación de los sistemas electrónicos y de adquisición de datos. Una vez armado el dispositivo se caracterizó el tanque, para proceder a la toma de datos y su análisis.

Esta tesis está dividida en 5 capítulos. Los primeros tres aportan el marco teórico que sustenta el trabajo. El primer capítulo habla sobre los rayos gamma brindando un panorama histórico y actual sobre los principales detectores y observatorios; se introducen los proyectos Milagro y HAWC proporcionando información importante sobre ellos. En el capítulo 2 se estudian las características principales de cascadas de partículas. Se reseñan las interacciones básicas que permiten la generación de los chubascos así como su detección. En el tercer capítulo se estudian las propiedades básicas de los detectores de centello y Cherenkov. Se estudia el funcionamiento del componente principal: el fotomultiplicador. Los últimos dos capítulos involucran el desarrollo del proyecto. En el cuarto se describe todos los pasos que se siguieron para la construcción del arreglo experimental. Se detallan cada una de las partes que conforman el experimento. Se proporciona una breve explicación de la electrónica y los sistemas de adquisición de datos. Finalmente en el capítulo 5 se muestran el análisis y los resultados de la caracterización. Por último se presentan las conclusiones del proyecto y las correspondientes referencias bibliográficas.

# Capítulo 1

## El universo a través de los rayos gamma

En este capítulo se brinda un panorama general sobre los rayos gamma que llegan al planeta desde el universo. En la primera parte se contempla la importancia que tiene el estudio de esta radiación desde varios puntos de vista: astronómico, astrofísico, cosmológico. En la segunda y tercera sección se explican los tipos de detección (espacial y terrestre), así como, los diversos telescopios y observatorios desde un panorama histórico y actual. Se hace énfasis en los arreglos de detectores para cascadas de partículas, haciéndose una mención especial del observatorio Milagro. Finalmente en la última sección se describe en buena medida el proyecto HAWC: importancia, generalidades, diseño, ciencia, objetivos y motivaciones.

### 1.1. Los rayos gamma

El conocimiento del cosmos más allá de la tierra proviene principalmente de la radiación electromagnética. Esto hace que los astrónomos necesiten estudiar toda la banda del espectro para lograr una mejor comprensión del universo. Antes de la segunda guerra mundial, la parte “visible” de la radiación era la única que se estudiaba a través de los telescopios ópticos. Después de esta guerra la radio-astronomía toma fuerza (gracias a la invención del radar). Hasta ese momento el estudio astronómico se podía llevar a cabo pues a esas longitudes de onda la radiación es transparente a la atmósfera. En los años 60's, con la revolución satelital, fue posible desarrollar observaciones en otras longitudes de onda: ultravioleta y rayos X.

Hasta este momento, la astronomía de bajas energías (radio, óptica, ultravioleta) estaba enfocada a estudiar un universo dominado por procesos térmicos: el espectro de radiación de cuerpo negro domina esta escena desde el Big Bang, el sol y las estrellas. Pero existe un universo que no se podía estudiar, un universo extraordinario, relativista, con partículas que exceden las energías que los humanos podían y pueden alcanzar en aceleradores y cuya procedencia sólo se puede explicar con fenómenos no térmicos. De esta forma, a partir de finales de los años 60's y principios de los 70's, las técnicas astronómicas más energéticas como los rayos gamma comienzan a jugar un rol importante para el estudio del universo relativista.

#### 1.1.1. Rango de energías (definiciones)

El término de rayos gamma es genérico pues es utilizado para describir fotones cuya energía va desde 100 KeV ( $10^5$  eV) hasta 100 EeV ( $10^{20}$  eV). Dentro de este intervalo las energías accesibles por la capacidad y sensibilidad de los detectores actuales es por debajo de 100 TeV.

El rango que va desde 100 KeV hasta 30 MeV es conocido como el rango de energía media, ME por el idioma inglés (Medium Energy). La interacción Compton domina en este intervalo por lo que se utilizan telescopios tipo Compton para su estudio. De 30 MeV hasta GeV se conoce como intervalo de alta energía HE (High Energy). En este intervalo se utilizan telescopios satelitales que toman ventaja del proceso de producción de pares pues es la interacción dominante. El rango que va de 100 GeV hasta 100 TeV se denomina de muy alta energía, VHE por sus siglas en inglés (Very High Energy). De igual forma el proceso sobresaliente es el de producción de pares.

Los telescopios en el rango de VHE utilizan la cascada electromagnética generada en la atmósfera para detectar los rayos gamma. Entre 100 TeV y 30 PeV se tienen los rayos gamma ultra energéticos UHE (Ultra High Energy). Por último se tiene el intervalo por arriba de 30 PeV que se conoce como extremadamente energético EE (Extremely Energy).

El término astronomía de rayos gamma es comúnmente utilizado en los intervalos energéticos de ME, HE y VHE<sup>I</sup>. Se han realizado esfuerzos para hallar fuentes de rayos gamma en los intervalos de UHE y EE, pero desafortunadamente han sido infructuosos<sup>II</sup>.

### 1.1.2. Motivación de la astronomía de rayos gamma

Los rayos gamma de HE poseen características importantes que los convierten en entes ideales para obtener información de los procesos astrofísicos no-térmicos:

- a) Copiosa producción de rayos  $\gamma$  en ambientes galácticos y extragalácticos debido a fenómenos cosmológicos muy violentos.
- b) Propagación libre en el espacio sin deflexión en campos magnéticos y eléctricos.
- c) Detección efectiva por detectores espaciales y terrestres.

De esta forma la astronomía de rayos gamma se encamina a jugar un papel importante en el estudio del cosmos. Las principales motivaciones de esta astronomía se pueden encerrar en 4 áreas: i) Astrofísica de flujos cósmicos relativistas, ii) Origen de los rayos cósmicos, iii) Cosmología y iv) Aportaciones a la física.

#### Astrofísica de flujos cósmicos relativistas

Algunos de los objetos astrofísicos más extremos en el cosmos como pulsares, núcleos de galaxias activas, microcuasares y explosiones de rayos gamma están ligados a flujos de partículas relativistas<sup>III</sup>. Estos objetos poseen cuerpos compactos como estrellas de neutrones u hoyos negros que emiten partículas muy energéticas formando flujos concentrados que son conocidos como jets. La teoría

---

I En algunas ocasiones durante el texto se utilizan las abreviaturas en inglés para denotar los distintos rangos de energía.

II En el experimento Tibet AS $\gamma$  (sección 1.3) se buscaron durante 7 años fuentes de rayos gamma con energías de PeV. Sin embargo los resultados no fueron estadísticamente significativos [2].

III Información concerniente a estos objetos astronómicos se proporciona en el siguiente capítulo.

de flujos relativistas es compleja y no comprendida en su totalidad. Por ejemplo, todavía no se tienen respuestas definitivas concernientes al origen de estos flujos así como respecto a los procesos energéticos que los mantienen. El estudio de los rayos gamma emitidos en los jets proporciona información valiosa para poder comprender mejor estos fenómenos pues a partir de identificar los procesos de producción de los rayos  $\gamma$  se puede colegir más sobre la composición, energía, y mecanismos de aceleración de las partículas relativistas en estos flujos cósmicos.

### **Origen de los rayos cósmicos**

Por más de 40 años se ha pretendido que la astronomía de rayos gamma juegue un papel crucial para resolver el problema de los rayos cósmicos galácticos GCR (Galactic Cosmic Rays). Uno de los objetivos es tratar de probar la hipótesis de que la mayoría de los rayos cósmicos galácticos hasta energías de  $10^{15}$  eV provienen de los remanentes de supernovas SNR (Supernova Remnants). Esta conjetura se sostiene pues los SNR poseen la energía y los mecanismos necesarios para ser la fuente principal de los rayos cósmicos. La identificación del decaimiento del mesón  $\pi^0$  produciendo rayos gammas de energías de cientos de TeV va a ser un indicio que sustente el poder de aceleración que tienen los remanentes de supernovas.

Los sitios y los mecanismos de aceleración de los rayos cósmicos extragalácticos que pueden alcanzar energías de hasta  $10^{20}$  eV continúa siendo un misterio. Se cree que los jets de los núcleos activos de galaxias podrían acelerar protones a tales energías. Se busca sustentar esta hipótesis buscando rayos gamma de energías de TeV producidos por radiación sincrotrón. Además si los protones pueden ser acelerados a estas energías podrían interactuar con los campos de fotones y producir mesones  $\pi^0$  que decaerían en rayos gamma. La búsqueda de estas gammas sería otro indicio para sustentar la conjetura. También se cree que los destellos de rayos gamma podrían ser una fuente de estos rayos cósmicos extragalácticos, ya que estas explosiones son los fenómenos más energéticos que se conocen en el universo. El estudio de los rayos gammas procedentes de estos objetos servirá para aprobar o refutar esta hipótesis.

### **Cosmología**

Se puede inferir información de la evolución de las galaxias y del cosmos al analizar la radiación de fondo extragaláctica. Fotones por encima de los 100 GeV son utilizados para obtener información de este campo de radiación. Esto se debe, a que a energías de TeV los rayos gamma interactúan con campos de fotones de baja energía (UV, óptico e infrarrojo) produciendo un par electrón-positrón. Analizando la absorción de la radiación gamma se puede obtener información sobre la radiación de fondo y de esta forma inferir sobre la evolución del universo [3].

### **Aportaciones a la física**

El estudio de los rayos gamma puede brindar información trascendental para comprender la *material oscura*. El movimiento de las estrellas o galaxias no puede ser explicado en su totalidad

---

I Los procesos de emisión de rayos gamma son descritos en la sección 2.1 del capítulo 2.

usando simplemente la materia visible en el universo. Sólo se pueden comprender invocando materia extra, conocida comúnmente como materia oscura. Desde hace más de 70 años se ha tratado de comprender este fenómeno pero no ha sido posible observarla en ninguna longitud de onda. Actualmente, la teoría de supersimetrías predice la existencia de partículas masivas de interacción débil (WIMP por sus siglas en inglés) que al interactuar unas con otras se aniquilan produciendo partículas secundarias así como rayos gamma en cierto intervalo de energías [4]. La búsqueda de esta radiación podría ser un indicio que esclarezca el misterio de la materia oscura.

De acuerdo a la teoría especial de la relatividad de Einstein, toda la radiación electromagnética viaja a la misma velocidad en el vacío. En otras palabras, fotones de muy alta energía viajan a la misma velocidad que radio fotones de baja energía. Sin embargo, algunos modelos de gravedad cuántica, predicen que los fotones de muy alta energía viajan a una velocidad un poco diferente a otras formas de radiación. De acuerdo a la mecánica cuántica, a escalas pequeñas el espacio-tiempo se vuelve turbulento. Si estas turbulencias o fluctuaciones provocan pequeños agujeros negros (como lo sugieren algunas versiones de la teoría de gravedad cuántica), fotones de muy alta energía que poseen una longitud de onda tan pequeña podrían sentir estas turbulencias, lo que los aceleraría o retrasaría un poco [4]. Estudiando fuentes que emitan rayos gamma de muy alta se podrá saber si este fenómeno ocurre en realidad.

Como ya se mencionó, en la siguiente sección se hablará sobre los telescopios espaciales. Se hace una pequeña reseña histórica y después se detallan las características y funcionamiento de dos tipos de estos telescopios: los Compton y los de producción de pares. Resulta imperioso decir que durante estas secciones se hace una mención breve de los dispositivos y procesos físicos que son necesarios para entender el funcionamiento de estos telescopios. Posteriormente (capítulos 2 y 3) se hace un estudio más a fondo de todo esto para lograr un entendimiento más completo del tema<sup>I</sup>.

## 1.2. Telescopios espaciales de alta energía

En 1965 el telescopio Explorer XI realizó las primeras demostraciones prácticas de observaciones de rayos gammas en el espacio. A pesar de su tecnología limitada, pudo observar que existía un flujo de rayos gamma que llegaba a la Tierra, pero no pudo identificar su origen. A partir de aquí varios grupos de estudiosos desarrollaron telescopios que utilizaban cámaras de chispa (que utilizaban la producción de pares) colocándolas en globos alrededor de la Tierra. Fue hasta 1973 cuando la NASA<sup>II</sup> lanzó al espacio su primer telescopio de cámara de chispa: SAS-2. A pesar de su corta duración (seis meses) este aparato pudo mapear el plano galáctico, encontrando fuentes discretas y estableciendo el fondo difuso de rayos gamma. Toda esta información fue corroborada por un

---

I Lo anterior también aplica a la sección de telescopios terrestres.

II La NASA (National Aeronautics and Space Administration) es la agencia gubernamental estadounidense responsable de los programas espaciales.

telescopio colocado en un satélite Europeo, COS-B, que trabajó desde 1975 hasta 1982. Ya en 1991, se puso en órbita el observatorio Compton de rayos gamma, el cual mapeó el cosmos durante 9 años complementando toda la información recabada hasta el momento y descubriendo nuevas fuentes y fenómenos astrofísicos [5].

### Telescopios Compton

Para detectar rayos gamma en el rango de energías de 100 KeV hasta 100 MeV comúnmente se utilizan detectores de centelleo. Cuando la radiación gamma incide en el centellador libera partículas cargadas a través del efecto fotoeléctrico o efecto Compton. Estas partículas interactúan en el detector de centelleo emitiendo luz. Finalmente estos fotones son convertidos en señales eléctricas utilizando otros dispositivos conocidos como fotomultiplicadores<sup>I</sup>.

Un detector más sofisticado en este rango de energías es el telescopio Compton. Consiste en dos centelladores que operan en serie. El primer centellador capta los rayos gamma, los cuales son dispersados por los electrones (efecto Compton), y redirigidos a un segundo centellador que los absorbe en una segunda dispersión Compton. El primer centellador debe tener una sección transversal deseada para la interacción; por lo regular el material es de una baja  $Z^{\text{II}}$ . El segundo centellador debe tener una alta  $Z$  para absorber el rayo gamma secundario. Al medir la energía depositada en los centelladores (energía de los electrones dispersados) se puede determinar la energía y procedencia de rayo gamma primario. Cualquier partícula cargada que incida en el detector podría dejar señal. Para evitarlo se coloca una cubierta de centelladores alrededor del telescopio que indican el paso de partículas cargadas. El telescopio de imagen Compton (COMPTEL figura 1.1) ubicado en el observatorio Compton de rayos gamma (CGRO por sus siglas en inglés) es un dispositivo de este tipo.



Fig.1.1. Telescopio COMTEL del observatorio Compton de rayos gamma.

I Un fotomultiplicador es un dispositivo que convierte fotones en señales eléctricas medibles. En la sección 3.2 del capítulo 3 se proporciona una descripción detallada de estos aparatos. Los fotomultiplicadores son denotados en el idioma inglés como PMT que viene de photomultiplier tube. En algunas ocasiones se utilizará esta abreviación para denotarlos.

II  $Z$  es el número atómico.

### Telescopios espaciales de producción de pares

Como su nombre lo indica, el funcionamiento de estos telescopios se basan en la detección del par electrón-positrón producido por la interacción de un rayo gamma con el campo coulombiano de un núcleo (sección 2.1.2). Comúnmente el material empleado para producir el par es uno con una alta  $Z$ , lo cual favorece la reacción. La dirección del  $\gamma$  se determina al analizar las trazas producidas por el par en un trazador, que comúnmente es una cámara de chispas. La mayoría de estas cámaras consisten en un arreglo de placas conductoras sometidas a un alto voltaje; entre las placas hay gas que al ser ionizado por el par electrón-positrón produce una descarga entre las placas. Al mapear el conjunto de descargas se puede trazar la trayectoria del electrón y del positrón y de esta forma determinar la dirección del rayo gamma. La energía del rayo gamma se determina al medir la energía del par. Ésta se cuantifica utilizando un calorímetro, el cual registra la energía perdida por el par al ionizar un cristal. De igual forma que los telescopios Compton, los de producción de pares se cubren con un veto de centelladores para evitar que partículas cargadas generen señales no deseadas.

EGRET es un telescopio de producción de pares ubicado en el observatorio Compton de rayos gamma CGRO. Fue un telescopio muy sensitivo en el rango de altas energías (30 MeV-30 GeV). En EGRET se tenían 28 placas de plomo creadoras del par  $e^-e^+$  con un área de detección de  $1600\text{ cm}^2$ , intercaladas por 28 cámaras de chispa compuestas por cuadrículas de alambre que envolvían placas conductoras; cada alambre fue recubierto con cinta magnética para poder guardar información. El calorímetro era un cristal NaI(Tl). Durante los 9 años en los que operó (1991-2000) hizo grandes aportaciones a la astronomía y astrofísica de rayos gamma [5]. La figura 1.2 muestra el telescopio espacial EGRET.

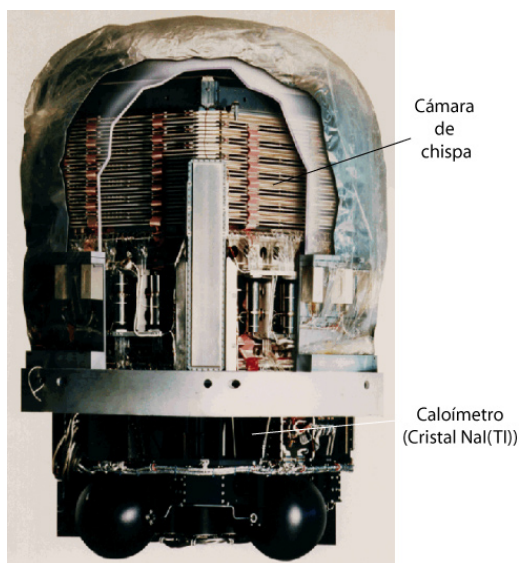


Fig.1.2. Telescopio espacial EGRET del observatorio Compton de rayos gamma.

AGILE (Light Imaging Detector for Gamma Ray Astronomy) es un proyecto Italiano que fue lanzado al espacio en el 2003 [6]. Tiene un telescopio de rayos-X (10 KeV- 40 KeV) llamado Super-AGILE y un telescopio para rayos gamma de altas energías llamado GRID (Gamma Ray Imaging Detector). Este detector cubre la banda de energías de 30 MeV a 30 GeV. Al igual que en EGRET posee placas de Tungsteno en las cuales se producen los pares. Ha sido el primero en utilizar la tecnología de semiconductores en las cámaras de chispa. Su sensibilidad es muy parecida a la de EGRET por lo cual no se considera como un telescopio de la nueva generación.

El Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi, conocido anteriormente como GLAST (Gamma ray Large Area Space Telescope), es considerado como la nueva generación pues es más compacto, más eficiente, posee una mejor resolución angular y energética (supera a EGRET en un factor de entre 10-40 en todos los parámetros) [4]. De igual forma que GRID utiliza tecnología de estado sólido. Consiste en 19 placas de Tungsteno (producción de pares) intercaladas por placas de silicio (trazador). Las placas de Si están compuestas de dos planos de tiras de silicio, uno orientado en la dirección x y el otro en la dirección y. El calorímetro consiste en 8 placas de CsI(Tl). La figura 1.3 muestra una fotografía de este telescopio.

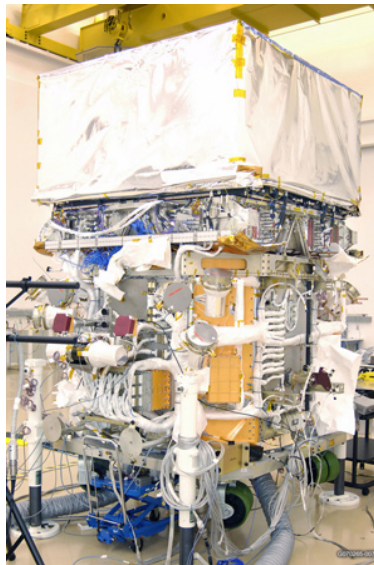


Fig.1.3. Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi.

Para detectar rayos gamma de energías superiores a los 100 GeV, es necesario emplear telescopios terrestres, ya que la energía de los fotones es tanta que es poco probable que se produzcan pares en las placas de los detectores espaciales; se necesitarían placas mucho más gruesas para asegurar la interacción. El gran tamaño de la atmósfera brinda un medio idóneo para que se presente este fenómeno. Sin embargo la observación en los telescopios terrestres debe ser de forma indirecta y se hace a través del chubasco de partículas que es generado por el par electrón-positrón. En



la siguiente sección se brindaran los aspectos generales de estos observatorios mencionando sus principales características.

### 1.3. Telescopios terrestres de muy alta energía

Poco después del descubrimiento de la radiación Cherenkov atmosférica (a mediados de los años 50's), se trató de encontrar fuentes discretas de rayos cósmicos. El esfuerzo fue infructuoso. Durante estas fechas (inicio del año 1958) Phillip Morrison acuñaba ya el término de astronomía de rayos gamma dándole una perspectiva favorable. Después de la publicación de Morrison, Cocconi (un importante teórico de altas energías del CERN<sup>1</sup>), motivado por el efecto Cherenkov atmosférico y la nueva expectativa de los rayos gamma propone la construcción de telescopios que consistían en arreglos de detectores. Se realizaron dos experimentos, uno en Polonia y otro en Bolivia, pero como el umbral de energías era muy alto no se pudo detectar fuentes discretas. Continuando por el camino de analizar la radiación Cherenkov producida en las cascadas electromagnéticas, el grupo soviético del instituto de Lebedev construyó en 1960 (en la región de Crimea) un ambicioso telescopio *Cherenkov Atmosférico*, que consistía en un arreglo de 12 detectores ópticos. A pesar de que tras cuatro años de trabajo este grupo no pudo encontrar alguna fuente discreta de rayos gamma (pese a que estudiaron fuentes propuestas por Coccocini, como por ejemplo algunos remanentes de supernovas), marcó una pauta positiva para el futuro desarrollo de esta técnica [5].

En los años que siguieron una docena de experimentos buscaron extender las observaciones y mejorar las técnicas de detección. Uno de estos experimentos se realizó en 1968 en el sur de Arizona en el observatorio Whipple. Se mejoró el aspecto del umbral de energías, pero la captación del flujo de partículas no sufrió mejoras. La detección aparente de una señal proveniente de la binaria de rayos X (Cygnus X-3) por grupos en la Unión Soviética, en Alemania y en la Gran Bretaña incrementó la actividad experimental pero no existieron mejoras en la técnica de detección. No fue si no hasta finales de los años 80's cuando la astronomía de rayos gamma en tierra mejoró sustancialmente con la llegada de los telescopios de *imagen Cherenkov atmosférica* [5]. El primer Observatorio en implementar esta nueva técnica fue el de Whipple donde se pudo detectar la nebulosa del cangrejo en 1989.

Ya en los noventas surgieron los *arreglos de detectores de cascadas extensas* en la superficie como los proyectos ARGO-YBJ y Milagro que han permitido monitorear el cielo y mejorar la astronomía de rayos gamma muy energéticos.

#### Telescopios Cherenkov atmosféricos

Un telescopio Atmosférico Cherenkov es realmente un sistema simple. Consiste básicamente en un detector de luz (que generalmente es un fotomultiplicador) ubicado en el plano focal de un espejo y acoplado a un sistema electrónico que contabiliza la altura de los pulsos.

---

I El CERN es el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares.

Existen varios factores que se deben considerar en esta técnica. Se tiene que cuidar que las condiciones atmosféricas sean las adecuadas y que el brillo producido por fuentes artificiales sea el mínimo así como la luz de fuentes naturales (luna). Una dificultad mayor resulta el hecho de que los rayos cósmicos producen cascadas en la atmósfera que generan también radiación Cherenkov. El problema se acentúa por el hecho de que los eventos de rayos cósmicos son  $10^3$  veces más numerosos que la fuente discreta más fuerte de rayos gamma. Pero como las cascadas generadas por gammas presentan distribuciones laterales y angulares distintas a las cascadas producidas por hadrones, la generación de luz Cherenkov también cambia, propiciando un parámetro para distinguirlas.

### Telescopios de imagen Cherenkov atmosféricos

El desarrollo de esta técnica dio la primera forma efectiva de distinguir las cascadas producidas por rayos gamma de aquellas producidas por rayos cósmicos. Se coloca un arreglo de fotomultiplicadores en el plano focal de un reflector óptico; dejando a un lado el conteo de los pulsos (como en los telescopios Cherenkov atmosféricos) este dispositivo constituye una cámara que sirve para tomar una fotografía de la luz producida en la cascada. El telescopio registra la imagen cuando dos o más fotomultiplicadores detectan luz por encima de un nivel de disparo.

Para discernir entre cascada electromagnética y cascada producida por rayos cósmicos se tiene que analizar la simetría de la imagen. Las cascadas de los rayos gamma producen imágenes a las que se les pueden ajustar elipses con un alto grado de simetría, mientras que las cascadas hadrónicas forman imágenes sin forma (figura 1.4).

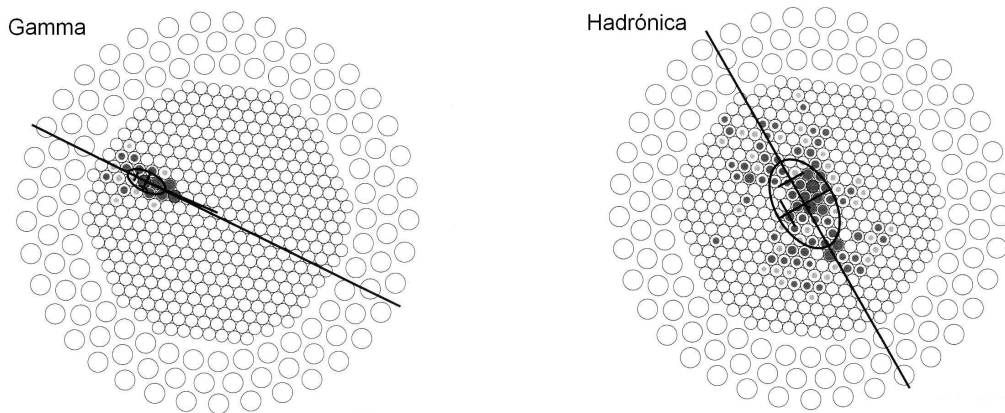


Fig.1.4. Imágenes típicas de la luz recolectada por una cámara Cherenkov.

Este tipo de técnica tiene una resolución angular de  $0.1^\circ$  que es mejor que la de  $1^\circ$  de los telescopios atmosféricos. Además poseen una resolución en energía de entre el 10% y el 15%. La energía se

mide directamente de la cantidad de luz Cherenkov que llega al detector que es una buena medida del número de partículas y por lo tanto de la energía. La siguiente tabla muestra algunos de los detectores que utilizan esta técnica.

Experimento	Ubicación	Altitud (km)	Area del espejo (m <sup>2</sup> )	Umbral (GeV)
Whipple	Arizona, E.U.A.	2.3	75	250
CANGAROO	Woomera, Australia	0.2	75	400
SHALON	Tien-Shan, Rusia	3.3	10	1000
CAT	Pirineos, Francia	1.6	18	250
MAGIC	La Palma, España	2.2	236	60

Tabla 1.1. Detectores de imagen Cherenkov Atmosféricos

Para mejorar la resolución angular, el umbral de energías, la discriminación entre cascadas, la determinación del máximo de la cascada, entre otros aspectos, se utilizan arreglos de múltiples telescopios que generan una visión estereoscópica del fenómeno. Múltiples imágenes de la misma cascada tomadas de distintos ángulos ofrecen todas estas ventajas. El primer arreglo de este tipo y que probó por primera vez todas mejoras de la visión estereoscópica fue HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy), un proyecto español-alemán que consistía en cinco pequeños detectores colocados en La Palma<sup>I</sup> en 1997. Después el proyecto estadounidense-británico VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) corroboró todas estas ventajas con un arreglo de 4 telescopios situados en Arizona (figura 1.5).



Fig.1.5. Se muestra una fotografía del observatorio VERITAS con sus cuatro telescopios reflectores.

I La palma es una isla perteneciente a las islas Canarias.

Siguieron arreglos como CANGUROO-III que consistía en un arreglo de cuatro telescopios colocados en Australia, y como HESS (High Energy Stereoscopic System) que es un sistema de cuatro telescopios colocados en Namibia (tabla 1.2)

Experimento	Ubicación	Altitud (km)	Colectores	Umbral (GeV)
HEGRA	La Palma, España	2.2	5	50
VERITAS	Arizona, E.U.A.	1.5	7	50
HESS	Gamsberg, Namibia	1.8	4	50
CANGAROO-III	Woomera, Australia	0.2	4	50

Tabla 1.2. Arreglos de detectores de imagen Cherenkov Atmosféricos (visión estereoscópica)

### Arreglos de detectores para cascadas extensas

Desde cientos de GeV hay suficientes partículas provenientes del chubasco (generado por el rayo gamma) que alcanzan el nivel de la corteza terrestre por lo que la energía puede ser estimada y la dirección determinada. Para lograrlo se utilizan grandes arreglos de detectores en superficies extensas. Experimentos de este tipo tienen resoluciones angulares de  $1^\circ$ , energéticas de 30% y áreas de colección que pueden rondar los 10 000 m<sup>2</sup>. El primer proyecto que utilizó este concepto fue Cygnus en Los Álamos Nuevo México.

La siguiente generación de detectores de cascadas extensas logró reducir el umbral de energías para que existiera un traslape con aquéllas de los arreglos de telescopios de imagen Cherenkov atmosféricos y de esta forma hacer comparaciones y estudiar fuentes conocidas. Al reducir el umbral también se obtuvo un mayor flujo de partículas lo que permitió observar objetos más lejanos. Además de esto se buscó mejorar la técnica para diferenciar los tipos de chubascos de partículas.

Por ejemplo se tiene el experimento Tibet ASy construido en el Tibet China, a una altura de 4300 m [7]. Uno de los objetivos de proyecto es encontrar fuentes de rayos gamma de energías del orden de TeV, para estudiar el espectro de energías y la composición química de los rayos cósmicos. El arreglo consiste en dos cuadrículas formadas por contadores de centelleo: una de 697 centelladores con espaciamiento de 7.5 m y la otra de 36 centelladores con espaciamiento de 15 m. Cada plástico contador tiene un área de 0.5 m<sup>2</sup> y 3 cm de grosor. Para captar la luz cada centellador está equipado con un fotomultiplicador de 2 pulgadas de diámetro. El tiempo y la carga medida por cada fotomultiplicador se utilizan para determinar la dirección y la energía del chubasco. La resolución angular de este detector es del orden de  $1^\circ$ .

Otro de estos proyectos -auspiciado por el Instituto Nacional de Física Nuclear IFNF en Italia- es ARGO-YBJ (Astrophysical Radiation Ground Base Observatory) ubicado en el Tibet China a una

altura de 4300 metros sobre el nivel del mar [8]. Está enfocado a estudiar los rayos gamma a energías mayores a 100 GeV. El detector consiste en una capa de Placas Resistivas Contadoras RPC (por sus siglas en inglés) hechas de bakelita (resistividad  $5 \times 10^{11}$  ohms/cm) con dimensiones de  $128 \times 282$  cm<sup>2</sup> (figura 1.6); un conjunto de 12 placas forma un cluster. El experimento está dividido en una parte central de  $100 \times 100$  m<sup>2</sup> compuesta de 130 clusters y un anillo que la rodea de 24 clusters. Todo el arreglo cubre una superficie de aproximadamente 6700 m<sup>2</sup>. Las placas resistivas contadoras está cubiertas por una capa de 0.5 cm plomo que aumenta el número de partícula cargadas al convertir los fotones del chubasco vía producción de pares.



Fig.1.6. Taller del experimento ARGO. Se muestran algunas de las Placas Resistivas Contadoras.

El proyecto Milagro, ubicado cerca de Los Álamos, Nuevo México, es un arreglo extenso de detectores que utiliza la radiación Cherenkov que las partículas cargadas producen en el agua para detectarlas [9]. Experimentos de este tipo reciben el nombre de *arreglos de detectores Cherenkov de agua*.

Así como las partículas relativistas producen luz Cherenkov en el aire, de igual forma lo hacen en el agua. Pero utilizar agua tiene sus ventajas. Una de ella es que el índice de refracción del agua es mayor que el del aire lo cual produce dos efectos importantes: **i)** El número de fotones producidos por el efecto Cherenkov es mucho mayor en el agua que en el aire (por un factor de 1400) y **ii)** El ángulo del cono de luz Cherenkov en el agua es de  $41^\circ$  mientras que en el aire es de  $1^\circ$ . La otra ventaja es que por la densidad del agua los rayos gamma interaccionan más rápido que en el aire creando un número mayor de pares electrón-positrón que emiten luz Cherenkov en el agua. Todo esto mejora la eficiencia, la resolución angular y la diferenciación entre cascadas.

Milagro consiste en un detector central (piscina) que cubre un área de 5000 m<sup>2</sup> rodeado de 175 tanques que cubren un área de 40 000 m<sup>2</sup> El detector central está conformado por una piscina de

más de 38 toneladas de agua pura (60m x 80m x 8m) en cuyo interior hay un arreglo de 723 tubos fotomultiplicadores de 8 pulgadas colocados en dos capas. La primera capa de PMT's, se conoce como *Air Shower Layer*; se encuentra a 1.5 m de profundidad y está compuesta de 450 PMTs. Ésta capa analiza la componente electrónica: reconstruye la geometría de la cascada a partir de observar la señal en cada PMT y su tiempo de llegada. La segunda capa se conoce como *Capa Muónica*, consiste de 273 PMT's desplegados en una red con espaciamiento de 2.8m a 6 metros de profundidad. Esta capa mide la componente hadrónica y muónica, y sirve para el rechazo de cascadas los hadrónicas. El arreglo exterior consiste en 175 tanques de agua; el tamaño de los tanques es de 2.4 m de diámetro por un metro de altura (aproximadamente 4.6 toneladas de agua). Cada tanque posee un PMT mirando hacia abajo. Para mejorar la captación de la luz estos tanques están cubiertos por una superficie reflectora (Tyvek). El uso de los tanques exteriores tiene el objetivo de agrandar el área de detección a 40 000 m<sup>2</sup> para lograr una mejor determinación de la posición del centro de la cascada lo que permite una mejor resolución angular y energética.

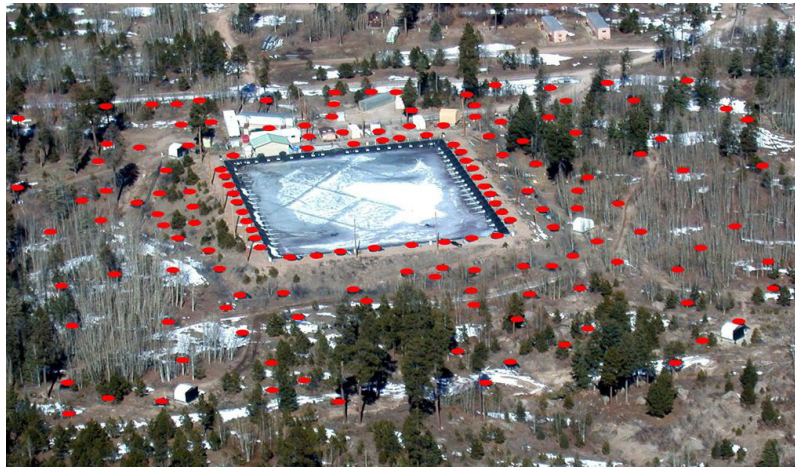


Fig.1.7. Fotografía aérea de Milagro. Se observan la piscina y el arreglo exterior de tanques (puntos rojos).

La técnica Cherenkov en agua tiene ventajas respecto a otros arreglos superficiales de chubascos de partículas. Es menos costoso utilizar agua para detectar los rayos gamma que usar plomo como en el experimento ARGO. Por otro lado el ángulo Cherenkov de 41° en agua permite que un arreglo espaciado de una longitud de aproximadamente la mitad de su profundidad sea sensible en 100 % de su área, lo que contrasta con otros arreglos que sólo son sensibles en un pequeño porcentaje del área que cubren.

Una vez que se ha hecho una reseña de los detectores de cascadas extensas, haciendo una mención especial de aquellos que usan el efecto Cherenkov en agua como Milagro, se hablará ahora del proyecto HAWC, que es la base fundamental que motiva este trabajo.

## 1.4. Observatorio Cherenkov de agua a gran altura: HAWC

El observatorio HAWC (por sus siglas en inglés High Altitude Water Cherenkov que en español significa Observatorio Cherenkov de agua a gran altura) se trata de la siguiente generación de arreglos de detectores Cherenkov de cascadas extensas [10]. HAWC retoma la tecnología de detectores de agua Cherenkov previamente probada en Milagro. Para alcanzar una mayor sensibilidad se hizo énfasis en tres características: la altitud, el área de detección y el diseño del detector. Desde su concepción HAWC debía situarse a una altura mayor a los 4000 m, poseer un área de detección de 24 000 m<sup>2</sup> y tener 5 metros de profundidad para la detección de los chubascos. El aspecto de la altura y el área de detección permiten que un mayor número de partículas del chubasco lleguen al detector. La especificación de la profundidad hace factible la captación de electrones, positrones y pares e<sup>+</sup> (producidos por fotones secundarios) y el rechazo de muones. Todos estos factores contribuyen a aumentar en un factor de 15 veces la sensibilidad de HAWC comparada con la de su predecesor.

El proyecto está formado por una colaboración de científicos procedentes de Estados Unidos y México. Trabajan conjuntamente alrededor de 22 instituciones de ambos países. Por los requerimientos de altura se escogió montar el observatorio en una planicie ubicada a un costado del volcán Sierra Negra (Puebla, México) a una altitud de 4100 m (figura 1.8).



Fig.1.8. En esta figura se muestra la posible ubicación de observatorio HAWC. Al fondo se observa el volcán Sierra Negra con el GTM (Gran telescopio Milimétrico) en la punta.

HAWC trabajará en un ciclo del 100%, tendrá un amplio campo de visión (2 sr), podrá ver fuentes transitorias y extendidas, y logrará ver los rayos gamma más energéticos en el rango de VHE.

### 1.4.1. Diseño de HAWC

El diseño de HAWC contempla la reutilización de los 900 fotomultiplicadores Hamamatsu de 8” del proyecto Milagro. Cada PMT se colocará en un tanque para que estén aislados ópticamente. Las dimensiones propuestas para los tanques son de 4.6 metros de profundidad por 5 metros de diámetro. Los tanques serán desplegados en un patrón denso dentro de un área de 24000 m<sup>2</sup> (160 m x 150 m) como ilustra la figura 1.9.

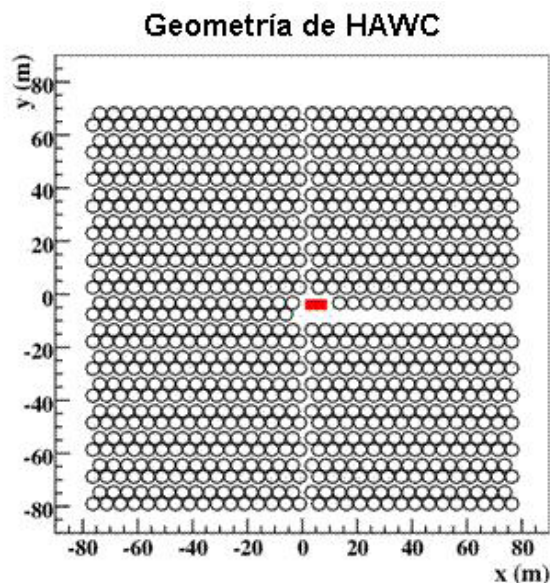


Fig.1.9. Patrón propuesto para la distribución de los tanques. Existe una ligera separación entre hileras para poder colocar el cableado de la electrónica y los tubos para la distribución de agua.

Cada fotomultiplicador es colocado en el fondo del tanque con el fotocátodo mirando hacia el volumen de agua por encima de él. Comparado con su antecesor HAWC hizo mejoras en el diseño de la distribución de los fotomultiplicadores. En Milagro, como se mencionó, había dos capas: la primera reconstruía el frente de onda y la segunda separaba las gammas del ruido de fondo causado principalmente por la cascada hadrónica. En HAWC una sola capa a 5 metros de profundidad cumple las dos funciones: capa la componente electromagnética y permite la detección de los muones. Esta altura optimiza el rechazo de fondo, pues si bien es cierto que a mayor profundidad las señales de los muones mejoran, también es cierto que la señal de electrones y positrones se atenúa con la altura [11]. La segunda mejora tiene que ver con el aislamiento óptico de los PMT's. Este tiene por objeto reducir el ruido de los fotomultiplicadores pues en Milagro se observó que la luz que viajaba de forma casi horizontal a través de la piscina generaba señales en los PMT's lejanos a su origen obteniéndose señales no deseadas.



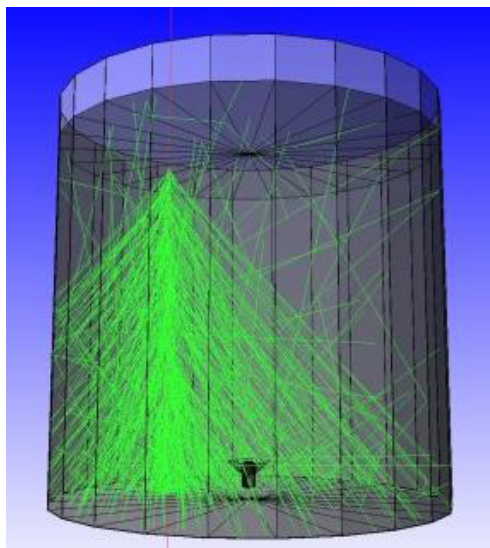


Fig.1.10. Prototipo de un tanque para el proyecto HAWC.

En la figura anterior se ilustra un tanque de 5 metros de diámetro por 4.5 metros de altura con un fotomultiplicador en su interior. Esta imagen es una simulación de la producción de fotones Cherenkov por el cruce de un muon vertical. Se ve como algunos fotones chocan con las paredes del tanque lográndose el aislamiento óptico deseado.

### 1.4.2. La ciencia de HAWC

HAWC va a poder abordar los siguientes problemas [12]:

#### **Fuentes galácticas de rayos cósmicos**

HAWC va a mapear el cielo en el rango de energías de gammas que va de 100 GeV a 100 TeV para comprobar si objetos como remanentes de supernovas, pulsares o microcuasares emiten fotones que mediante procesos hadrónicos.

#### **Fuentes extragalácticas de rayos cósmicos**

Como ya se había mencionado el origen de los rayos cósmicos es incierto pues pocas fuentes son capaces de acelerar hasta energías de  $10^{20}$  eV. A pesar de eso se tiene dos candidatos primordiales para sustentar todo el flujo de rayos cósmicos ultra-energéticos: los núcleos activos de galaxias y los destellos de rayos gamma.

HAWC va a poder analizar los blazares<sup>I</sup> observando la emisión  $\gamma$  originada por las partículas relativistas dentro de los jets. Tratará de resolver preguntas relacionadas a la ubicación de la zona

---

I Son núcleos de galaxias activas cuyo jet apunta en la dirección terrestre.

de producción de los rayos cósmicos y de los rayos gamma. Con su muestreo de gran apertura y temporalmente homogéneo podrá aportar una historia más detallada del comportamiento de estos objetos. HAWC va a poder analizar varios destellos de rayos gamma<sup>1</sup>, del orden de 20 por año [10], en el intervalo de TeV.

### **Emisión difusa de la galaxia**

HAWC va a mapear la emisión difusa de la galaxia en un rango de múltiples energías y será capaz de distinguir si los rayos gamma son emitidos por procesos leptónicos (efecto Compton inverso) o por procesos hadrónicos (decaimiento de  $\pi^0$ ).

Los resultados de Milagro sugieren un aumento en la emisión difusa galáctica por encima de los 10 TeV. Pero las restricciones impuestas por las observaciones de EGRET a la densidad de hadrones hacen difícil la interpretación de los resultados de Milagro. HAWC va a poder estudiar el fondo difuso en energías de 10 TeV y tratar de resolver esta incógnita.

### **Alto potencial para descubrir nuevas fuentes**

Siempre que una nueva región del espectro electromagnético es explorada se descubren nuevas fuentes. Este hecho se puede constatar en las observaciones hechas por EGRET, HESS y Milagro. HAWC va a poder monitorear homogéneamente la bóveda celeste en un 66%; esto va a constituir un potencial importante para el descubrimiento de nuevas fuentes. Este tipo de descubrimientos, que no son predichos a priori, son de suma importancia en el desarrollo científico.

Además HAWC va a trabajar de forma sinérgica con otros detectores. Por ejemplo va a proveer de forma natural una extensión a energías a TeV y de esta forma proporcionar al proyecto Fermi una contraparte de mayor energía.

Sin bien la astronomía de rayos gamma ha mejorado sustancialmente desde sus inicios, este crecimiento ha sido lento y todavía falta mucho por recorrer. De las técnicas y los conocimientos adquiridos por el estudio del cosmos en otras regiones de espectro se colige que falta mejorar la detección, sensibilidad y resolución angular de los detectores y telescopios de rayos gamma. Sin embargo la astronomía de rayos  $\gamma$  ha podido identificar más de 300 fuentes, y con las mejoras tecnológicas de los nuevos detectores seguro este número se incrementará significativamente.

---

<sup>1</sup> Estos objetos son explosiones cataclísmicas de objetos colapsados que emiten radiación gamma. En el capítulo 2 se proporciona más información de estos fenómenos.

# Capítulo 2

## Interacciones físicas fundamentales para la producción y detección de los rayos gamma

Este capítulo está dedicado a introducir las interacciones físicas fundamentales que hacen posible la generación y detección de los rayos gamma. Conocer estas reacciones ayuda a entender cómo se genera la radiación, cómo viaja en el cosmos, cómo se generan los chubascos de partículas, cómo es detectada por los telescopios y observatorios, entre otras cosas. En la primera parte se introducen conceptos iniciales y subsecuentemente se detallan las interacciones de acuerdo al blanco de reacción. Ya en la segunda sección se habla sobre la producción y origen de los rayos gamma en el cosmos. Finalmente en la tercera y última parte se estudian los chubascos de partículas que generan tanto los rayos gamma como los rayos cósmicos mencionando sus características principales y algunos modelos teóricos explicativos.

### 2.1. Interacciones físicas fundamentales

Las interacciones físicas fundamentales que se explican en esta sección son importantes para entender cómo se producen los rayos gamma en el universo y cómo son detectados por el hombre.

#### 2.1.1. Conceptos preliminares

##### Sección eficaz

Un parámetro importante que da información sobre la interacción de dos partículas es la sección eficaz. Es una cantidad que da una medida de la probabilidad de que la reacción ocurra y se obtiene conociendo la interacción básica entre las partículas. Formalmente puede definirse de la siguiente manera. Se tiene un haz de partículas que inciden sobre una partícula considerando al haz uniformemente distribuido en espacio y tiempo de tal forma que se puede considerar un flujo  $F$  de partículas incidentes (inciso a) de la figura 2.1). Tomando el promedio de número de partículas dispersadas por elemento diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$  se obtiene la cantidad  $dN_s/d\Omega$  ( $N_s$  es el número total de partículas dispersadas). La sección eficaz diferencial se define como:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \Omega) = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega} \quad (2.1)$$

Es decir, es la fracción promedio de partículas dispersadas en un ángulo sólido  $d\Omega$  por unidad de tiempo por unidad de flujo. Es una función de la energía y del ángulo de dispersión;  $d\sigma$  tiene unidades de área.

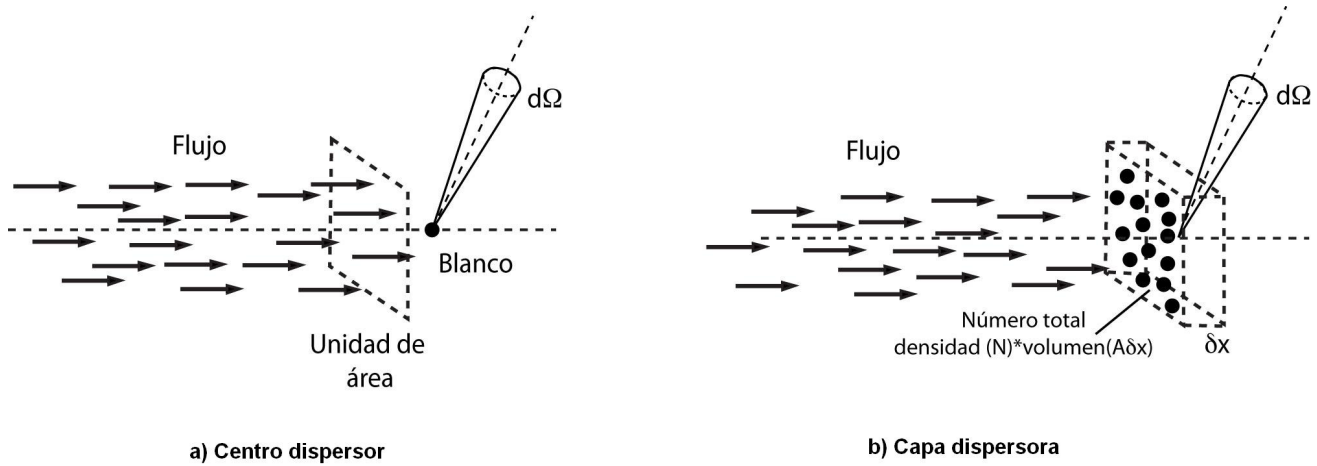


Fig.2.1. Elementos que definen la sección eficaz para un centro dispersor y para una capa dispersora.

Integrando sobre todos los ángulos sólidos se puede obtener la sección eficaz total:

$$\sigma(E) = \int d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.2)$$

### Partículas dispersadas en promedio en un material

En general no se tiene una sola partícula como blanco si no una capa de material que contiene varios centros dispersores. De esta forma la ecuación (2.1) se ve modificada por el número de centros dispersores que interactúan con el flujo. Considerando que la capa es delgada (para evitar traslapes de centros dispersores en la dirección del haz), el número de centros está dado por el producto del grosor, el área y la densidad:  $NA\delta x$  (inciso b), figura 2.1). Utilizando esto se obtiene el número de partículas dispersadas en promedio en un material por unidad de ángulo sólido y por unidad de tiempo:

$$\frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega} = NA\delta x \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.3)$$

Integrando sobre todos los ángulos sólidos se obtiene al número total de partículas dispersadas por unidad de tiempo:

$$N_T = FAN\delta x\sigma \quad (2.4)$$

### Probabilidades de interacción

Al dividir el número total de partículas dispersadas  $N_T$  por la cantidad de partículas que llegan al material FA, se obtiene la probabilidad ( $w$ ) de que una partícula sea dispersada en un grosor  $\delta x$ :

$$w\delta x = N\sigma\delta x \quad (2.5)$$

A partir de aquí [13], se puede encontrar la probabilidad de que una partícula no interaccione al recorrer una distancia  $x$ :

$$P(x) = \exp(-wx) \quad (2.6)$$

### Camino libre medio

La distancia media que recorren las partículas sin sufrir interacción se conoce como camino libre medio. Físicamente es el trayecto promedio de la colisión de una partícula con otra. Se determina a partir de:

$$\lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx} = \frac{1}{w} \quad (2.7)$$

Pero utilizando la relación (2.5) se obtiene:

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} \quad (2.8)$$

## 2.1.2. Interacción de partículas

La interacción se divide en dos tipos: neutra y de partículas cargadas. La interacción neutra tiene dos orígenes: aquella producida por partículas neutras como son los neutrones, neutrinos y aquella conformada por fotones. La radiación de partículas cargadas es originada por elementos como electrones, protones, iones con masa atómicas mayores a la unidad (como por ejemplo partículas alfa), entre otros.

Una forma de clasificar los procesos de radiación es utilizando el blanco de interacción que puede ser materia, campos de radiación electromagnética o campos magnéticos.

### 2.1.2.1. Interacción con materia

Dentro de la *interacción neutra*, los fotones interaccionan a través de tres procesos:

#### Efecto fotoeléctrico

Es el proceso en el cual un fotón transfiere toda su energía a un electrón de un átomo y lo desprende. Parte de la energía sirve para liberarlo y el resto es cedido como energía cinética. Este proceso es

importante únicamente a energías comparables a las energías de amarre de los electrones atómicos. La sección eficaz para este rango de energías esta dada por la aproximación no-relativista de Born [14]:

$$\sigma_p = \left(\frac{32}{\epsilon^7}\right)^{\frac{1}{2}} \alpha^4 Z^5 \sigma_{Th}^e \quad (2.9)$$

donde  $\alpha$  es la constante de estructura fina,  $Z$  es el número atómico. Aquí  $\epsilon$  es la energía reducida del fotón incidente  $E_\gamma/m_e c^2$  donde  $E_\gamma$  es la energía del fotón,  $m_e$  la masa del electrón y  $c$  la velocidad de la luz.  $\sigma_{Th}$  es la sección eficaz de Thompson para la dispersión elástica de fotones por electrones:

$$\sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi r_e^2 \quad (2.10)$$

El valor numérico de la ecuación (2.10) es  $6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ . A energías mayores ( $\epsilon \gg 1$ ) la sección eficaz del proceso de reacción es pequeña comparada con otros procesos:

$$\sigma_p = 4\pi r_e^2 \alpha^4 Z^5 \frac{1}{\epsilon} \quad (2.11)$$

### Efecto Compton

Es el proceso en el que un fotón interactúa con un electrón libre transfiriendo parte de su energía y momento. Esta interacción es importante desde que el fotón posee una energía comparable a la energía de la masa del electrón en reposo (0.51 MeV) hasta energías de decenas de MeV. La sección eficaz en este intervalo de energías está dada por la fórmula de Klein-Nishina [14]:

$$\sigma_c = 2\pi r_e^2 \left[ \left( \frac{1+\epsilon}{\epsilon^2} \right) \left( \frac{2(1+\epsilon)}{1+2\epsilon} - \frac{1}{\epsilon} \ln(1+2\epsilon) \right) + \frac{1}{2\epsilon} \ln(1+2\epsilon) - \frac{1+3\epsilon}{(1+2\epsilon)^2} \right] \text{ cm}^2/e^- \quad (2.12)$$

donde  $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$ . Al aumentar la energía la probabilidad de que ocurra la interacción disminuye. La siguiente relación de proporcionalidad es una aproximación de la sección eficaz para altas energías:

$$\sigma_c \propto \alpha \frac{\ln \epsilon}{\epsilon} \quad (2.14)$$

### Producción de pares fotón-núcleo

Es el proceso en el cual un fotón interactúa con el campo colombiano de un núcleo desapareciendo y creando un par electrón-positrón. Esta reacción sólo se logra para energías mayores a las energías de las masas del electrón y positrón en reposo (1.02 MeV). A partir de este valor la sección eficaz  $\sigma_{pp}$  crece rápidamente hasta volverse dominante sobre otros procesos sobre energías de 30 MeV; después de este valor la sección eficaz crece lentamente hasta llegar a un valor asintótico dado por [5]:

$$\sigma_{pp} = \sigma_0 Z^2 \left[ \frac{28}{9} \ln \left( \frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{2}{27} \right] \quad (2.15)$$

donde Z es el número atómico y  $\sigma_0$  está determinado por:

$$\sigma_0 = \frac{4}{137} \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 Z \quad (2.15)$$

El valor numérico de (2.15) es de 0.58 millibarns<sup>1</sup>/núcleo.

La interacción de partículas neutras como *neutrones* y *neutrinos* ocurre cuando colisionan directamente con los núcleos del material absorbente. La interacción de neutrones es vía la fuerza fuerte y la de los neutrinos es mediante la fuerza débil.

Las *partículas cargadas* al interactuar con la materia producen los siguientes efectos:

### Ionización

Cuando partículas cargadas cruzan la materia pueden ionizar el material, es decir, arrancar electrones. Esto se debe a las colisiones inelásticas de las partículas cargadas con los electrones atómicos del material. La cantidad de energía promedio que una partícula pierde debido a estas colisiones inelásticas está dada por la fórmula de Bethe-Bloch [13]:

$$\frac{dE}{dx} = -2\pi N_A r_e m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left( \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right) \quad (2.16)$$

La ecuación anterior esta compuesta por muchos elementos.  $N_A$  es el número de Avogadro;  $r_e$  es el radio clásico del electrón y  $m_e$  es su masa; Z es el número atómico del material absorbente, A su masa atómica y  $\rho$  su densidad; z es la carga de la partícula incidente;  $\beta$  es el cociente de la velocidad

<sup>1</sup> Un milibarn es igual a  $10^{-31}$  m<sup>2</sup>.

de la partícula incidente y la velocidad de la luz y  $\gamma$  es el factor de Lorentz;  $W$  es la energía máxima transferida por colisión; por último  $I$  es la ionización promedio. La dependencia de la fórmula de Bethe-Bloch con la energía se muestra en la siguiente figura 2.2.

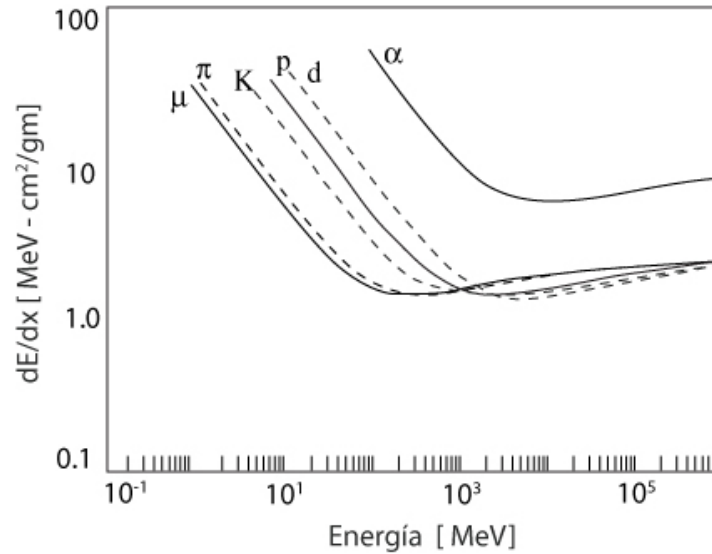
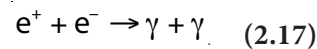


Fig.2.2. Desarrollo de la curva de Bethe-Bloch como función de la energía para diferentes partículas.

Para energías no relativistas  $dE/dx$  está dominado por el factor  $1/\beta^2$ , el cual decrece al aumentar la velocidad alcanzando un mínimo en  $v = 0.96c$ . A energías mayores el término  $1/\beta^2$  se vuelve casi constante, haciendo que la pérdida promedio de energía tienda a un valor cuasi-constante. Las partículas que alcanzan estas energías se les denomina de mínima ionización.

### Aniquilación electrón-positrón

Es el proceso en el cual un electrón interactúa con un positrón aniquilándose y produciendo dos rayos gamma. La energía mínima de interacción es del orden de la masa en reposo del electrón 0.511 MeV. La reacción tiene la siguiente forma:



### Bremsstrahlung

Cuando una partícula cargada es desacelerada por el campo eléctrico de un núcleo atómico, una fracción de la energía cinética perdida será emitida en forma de fotones. A este proceso se le conoce como Bremsstrahlung. De esta forma las partículas cargadas también pierden energía en forma de radiación cuando atraviesan materia. Debido a que la probabilidad de emisión de fotones es inversamente proporcional al cuadrado de la masa, la pérdida de energía es solamente



considerable para las partículas cargadas menos masivas: electrones y positrones. La pérdida de energía para electrones y positrones está dada por la siguiente expresión [14]:

$$\frac{dE}{dx} = -4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \quad (2.18)$$

donde  $Z$  y  $A$  son el número atómico y la masa atómica del medio;  $E$  es la energía de la partícula incidente,  $r_e$  es el radio clásico del electrón y  $\alpha$  es la constante de estructura fina.

La relación para la sección eficaz posee diversas expresiones dependiendo la energía cinética del electrón [5]:

$$\text{Caso no relativista } (T < m_e c^2) \quad \sigma_b = \frac{16}{3} \sigma_0 Z^2 \quad \text{cm}^2/\text{núcleo} \quad (2.19a)$$

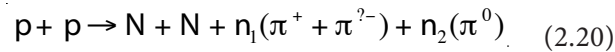
$$\text{Caso relativista } (T > m_e c^2) \quad \sigma_b = 4 \left[ \ln\left(\frac{2(T + m_e c^2)}{m_e c^2}\right) - \frac{1}{3} \right] \sigma_0 Z^2 \quad \text{cm}^2/\text{núcleo} \quad (2.19b)$$

$$\text{Caso Ultra-relativista } (T \gg m_e c^2) \quad \sigma_b = 4 \left[ \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \right] \sigma_0 Z^2 \quad \text{cm}^2/\text{núcleo} \quad (2.19c)$$

Aquí  $Z$  es el número atómico del núcleo,  $m_e$  es la masa del electrón y  $T$  su correspondiente energía cinética. El valor de  $\sigma_0$  es el mismo que arroja la ecuación (2.15).

### Producción de piones

Un protón al interactuar con otro protón (por ejemplo un rayo cósmico compuesto de protones que choca con el gas de hidrógeno estacionario en la atmósfera) produce estados excitados que se traducen en la emisión de piones  $\pi$ . La energía umbral que debe tener el protón es de 290 MeV. La interacción más común tiene la forma siguiente:



donde  $N$  es un protón o un neutrón y  $n_1$  y  $n_2$  son enteros. Debajo de 1 GeV  $n_1 = n_2 = 1$ . También la interacción de protones puede producir Kaones pero estos procesos son poco frecuentes.

### **Emisión de rayos gamma nucleares**

Aunque debajo de una energía de 300 MeV los protones no pueden producir piones, continúan jugando un papel importante en la producción de rayos gamma. Un protón al interactuar con un núcleo lo excita, y la desexcitación del núcleo produce rayos gamma de energías que van desde cientos de KeV hasta MeV.

### **Radiación Cherenkov**

Este fenómeno ocurre en el momento es que una partícula cargada atraviesa un medio dieléctrico con una velocidad que excede a la velocidad de la luz en ese medio. Por lo tanto esta radiación es relevante sólo para partículas relativistas.<sup>1</sup>

### **2.1.2.2. Interacción con campos de radiación electromagnética**

La radiación de *partículas cargadas* interactúa con los campos electromagnéticos:

#### **Efecto Compton inverso**

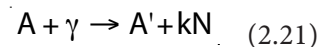
Es la colisión de un electrón con un fotón transfiriéndole su energía y momento. Es físicamente equivalente al efecto Compton y puede ser descrita usando una transformada de coordenadas en el sistema de referencia del electrón. Los protones también transfieren su momento y energía a los fotones vía esta dispersión Compton inversa.

#### **Producción de pares protón-fotón**

Es el mismo concepto ya descrito sólo que ahora los protones son los que llegan a interactuar con el campo de radiación produciendo un par electrón-positrón.

#### **Foto-desintegración de un núcleo**

Cuando un núcleo interactúa con un campo de radiación se puede desintegrar en un núcleo más pequeño liberando nucleones. La reacción se representa por:



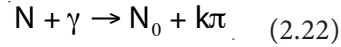
Donde  $k$  es un entero,  $N$  un protón o un neutrón,  $A$  y  $A'$  los núcleos y  $\gamma$  el fotón. Este proceso tiene un fuerte impacto en la composición química de los rayos cósmicos muy energéticos para objetos astrofísicos compactos. La energía para la realización de esta reacción es del orden de 10 MeV.

---

<sup>1</sup> En la sección 3.4 del siguiente capítulo se explica más a detalle este fenómeno.

### Producción de foto-mesones

Es el proceso en el cual un protón o un neutrón interactúan con el campo de fotones produciendo piones. La forma de la reacción es la siguiente:

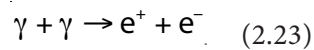


Donde N es un protón o neutrón y  $N_0$  es el correspondiente protón o neutrón dependiendo de la carga del pion. El umbral para esta interacción es del orden de 140 MeV.

Dentro de la *interacción neutra*, los fotones interactúan con la radiación electromagnética mediante el siguiente proceso:

### Producción de pares fotón-fotón

Esta reacción es básicamente el efecto inverso de aniquilación electrón-positrón. Este proceso requiere la combinación de fotones muy energéticos y una gran densidad de fotones con poca energía por lo que casi en su totalidad son procesos astrofísicos. La interacción posee la siguiente forma:



La reacción se lleva a cabo si la energía del centro de masa del sistema fotón-fotón excede en dos veces a la energía del electrón en reposo al cuadrado, esto es:

$$E_{\gamma_1} E_{\gamma_2} (1 - \cos\theta) \geq 2(m_e c^2)^2 \quad (2.24)$$

donde  $E_{\gamma_1}$  es la energía del fotón energético,  $E_{\gamma_2}$  es la energía del fotón con poca energía y  $\theta$  es el ángulo de colisión.

### 2.1.2.3. Interacción con campos magnéticos

Las partículas cargadas interactúan con campos magnéticos de acuerdo a los siguientes procesos:

#### Radiación sincrotrón

El movimiento de una partícula cargada dentro de un campo magnético homogéneo sigue un movimiento helicoidal alrededor de las líneas de fuerza. Como la partícula está rotando en el plano perpendicular al campo magnético está sometida entonces a una fuerza que la acelera. Debido

a esta aceleración la partícula cargada emite radiación. En el caso de partículas no relativistas la frecuencia de radiación está dada por la frecuencia de Larmor:

$$\omega_L = eH/mc \quad (2.25)$$

Para partículas relativistas la radiación no se da en todas direcciones sino en un cono de radiación con ángulo  $\theta$  cuyo valor es aproximadamente  $m_e c^2$ . Además la radiación no sólo es a una frecuencia  $\omega_L$  sino que hay un espectro continuo. La frecuencia crítica donde se encuentra el máximo de la radiación esta determinada por:

$$\omega_c \approx 100HE^2 \sin^2 \phi \text{ MHz} \quad (2.26)$$

donde H es la intensidad del campo en miligauss, E es la energía de la partícula cargada en GeV y  $\phi$  es el ángulo entre la dirección del campo magnético y la del campo eléctrico.

La *interacción neutra* compuesta por fotones interactúa mediante el siguiente proceso:

#### **Producción de pares fotón-campo magnético**

Es un proceso cuántico en el cual un rayo gamma de alta energía (30 MeV- 30 GeV) interactúa con un campo magnético produciendo un par electrón-positrón. La intensidad del campo magnético debe ser tal que se supere el umbral cuántico determinado por EB, que es de aproximadamente  $10^7$  TeV Gauss donde E es la energía en TeV del rayo gamma y B es la intensidad del campo en Gauss.

Una vez descritos los procesos físicos más importantes se procede a ver cuales son las características más destacadas de los fenómenos de producción de rayos gamma en el universo.

## **2.2. Los rayos gamma en el cosmos**

La radiación gamma producida en el *plano galáctico* fue la primera fuente detectada de rayos gamma. Esta emisión difusa ha sido muy importante para el estudio de la galaxia pues no sufre atenuación por el polvo cósmico como la emisión óptica. Los procesos físicos que producen la radiación gamma galáctica son tres. Rayos gamma a energías bajas son emitidos por electrones cósmicos que interactúan con gas interestelar (Bremsstrahlung); A energías intermedias los rayos gamma se originan por el decaimiento de los  $\pi^0$  que se producen en las colisiones de los rayos cósmicos hadrónicos con el medio interestelar. A energías altas el efecto Compton inverso de los electrones cósmicos relativistas domina la escena.

A la explosión catastrófica de una estrella se le conoce como *supernova*. Son eventos cosmológicos muy energéticos donde se llegan a emitir hasta  $10^{51}$  erg de energía. Las supernovas juegan un papel

muy importante en astrofísica pues son las causantes de la producción de elementos pesados y nuevas estrellas. Los *remanentes de supernovas* SNR (Supernova Remnant) son estructuras resultantes de estas explosiones. Consisten en el material estelar expulsado y en el material interestelar barrido por la onda de choque expansiva de la supernova. Se cree que la mayoría de las emisiones de rayos gamma de alta y muy alta energía (desde MeV hasta TeV) en los remanentes de supernovas se debe al decaimiento del  $\pi^0$ , el cual sería producido por las colisiones nucleares de los rayos cósmicos con los gases del remanente y con el material del medio interestelar cercano a la explosión de la supernova. Otra parte que compone el flujo de rayos gamma en remanentes de supernova se debe a los mecanismos de Bremsstrahlung y efecto Compton inverso producido por electrones relativistas. Estos electrones son emitidos en los remanentes de supernovas por los pulsares. En algunas supernovas, el centro de la estrella se colapsa dejando una estrella de neutrones. Cuando ésta rota se forma un campo magnético muy grande el cual acelera partículas cargadas a muy alta energía en la dirección del campo. A este objeto astrofísico se conoce como *pulsar*. Además de contribuir al flujo de rayos gamma a través de los electrones relativistas, los pulsares emiten radiación gamma en MeV y GeV a través de la radiación sincrotrón que producen las partículas cargadas cuando atraviesan el campo magnético del pulsar.

Una *galaxia activa* es aquella en la cual el centro tiene una luminosidad mayor a la normal en algunas o todas las longitudes de onda. Este centro es compacto y recibe el nombre de *núcleo de galaxia activa*, conocido como AGN por sus siglas en inglés (Active Galactic Nuclei). Estos núcleos poseen un hoyo negro supermasivo el cual rota y libera parte de la energía potencial acumulada en jets relativistas. En el plano perpendicular al eje de rotación se agrupa material alrededor del agujero negro formando un disco compacto que se conoce como disco de acreción. La siguiente figura 2.3 muestra un esquema de un núcleo de galaxia activa.

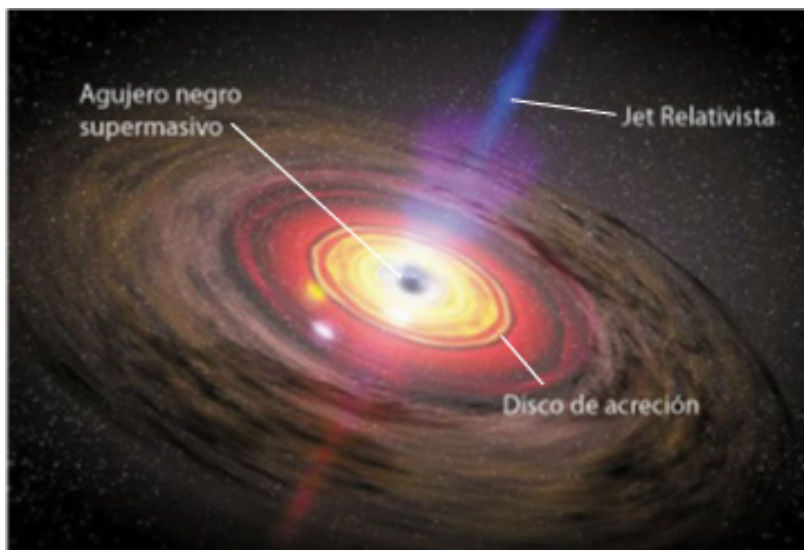


Fig.2.3. Se muestran los componentes básicos de un núcleo de galaxia activa.

La emisión de rayos gamma en los AGN se trata de explicar a través de dos modelos: uno leptónico y otro hadrónico. En el modelo leptónico los electrones relativistas expulsados en los jets son los que emiten la radiación  $\gamma$  a través de dos procesos. Pueden interactuar con campos magnéticos dentro del jet (radiación sincrotrón); o pueden colisionar campos de fotones transmitiéndoles parte de su energía (efecto Compton inverso). En el modelo hadrónico los protones acelerados en los jets son los encargados de la emisión de los rayos gamma. Estos protones interactúan con los campos de fotones produciendo mesones (ecuación (2.22)). Los mesones  $\pi^0$  contribuyen al flujo de rayos gamma a través de su decaimiento. Los protones también pueden interactuar con los campos magnéticos produciendo rayos gamma (radiación sincrotrón). El modelo leptónico explicaría el flujo de rayos gamma para altas energías (MeV-GeV) mientras que el modelo hadrónico lo haría para el rango de muy altas energías (GeV-TeV).

Un *microquasar* es un sistema binario compuesto por una estrella normal y un objeto compacto: una estrella de neutrones o un agujero negro. Material de la estrella cae al objeto compacto por fuerza de gravedad formándose un disco de acreción similar a los de los núcleos de galaxias activas. La emisión de rayos gamma es similar a la de los pulsares si el acompañante es una estrella de neutrones y a los núcleos de galaxias activas si el objeto compacto es un agujero negro.<sup>1</sup>

Las *explosiones de rayos gamma* GRB (Gamma Ray Bursts) son los eventos más energéticos del universo ( $10^{52}$  erg). Consisten en la emisión espontánea de rayos gamma de energías de KeV hasta TeV cuya duración va desde unos cuantos milisegundos hasta miles de segundos. Usualmente estas explosiones van acompañadas por emisiones posteriores en longitudes de onda mayores (rayos X, ultravioleta, óptico, infrarrojo, radio) que pueden durar desde unos cuantos días hasta varios meses. El paradigma más aceptado actualmente es que estas emisiones de rayos gamma se deben a “bolas de fuego” relativistas que se originan de eventos catastróficos relacionados con la formación de agujeros negros como por ejemplo el colapso de una estrella supermasiva o la colisión de estrellas de neutrones en un sistema binario [5]. Estas bolas de fuego de material relativista son emitidas al medio interestelar por explosiones sucesivas. A medida que interactúan se producen ondas de choque. Se cree que estas ondas de choque son las causantes de acelerar fotones a energías muy elevadas a través del efecto Compton inverso. Las emisiones secundarias posteriores en otras longitudes de onda son originadas por la radiación sincrotrón de electrones relativistas.

Toda esta radiación gamma que se produce en el universo puede llegar al planeta. Si tiene una energía (mayor a cientos de GeV) puede ser detectada en la Tierra. La detección es indirecta, pues se hace a través de las partículas secundarias que se generaron por la interacción del rayo  $\gamma$  con la atmósfera.

---

I Lo referente a los núcleos de galaxias activas se explica en los siguientes párrafos.

## 2.3. Los rayos gamma que llegan a la Tierra

### 2.3.1. Cascadas de partículas

Cuando un rayo cósmico primario entra en la atmósfera terrestre puede interactuar fuertemente con los núcleos de aire (Nitrógeno, Oxígeno, entre los principales). En tales reacciones se producen partículas secundarias que al interactuar con los núcleos de aire o al decaer producen más partículas que de nueva cuenta interactúan o decaen. Este proceso produce un chubasco o cascada de partículas compuesto por miles de millones de partículas. Entre las principales partículas que conforman el chubasco se tienen: mesones (piones  $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$  y kaones  $K^\pm$ ); leptones (muones  $\mu^\pm$ , electrones  $e^\pm$  y neutrinos  $\nu_\mu$ ) y rayos gamma.

Fue Bruno Rossi quien en 1934 descubrió los chubascos de partículas. En un arreglo de detectores-contadores dispuestos en un plano horizontal notó que tenía un exceso de coincidencias<sup>I</sup>. Hizo mención sobre esto en una de sus publicaciones: “Al parecer ocasionalmente grupos extensos de partículas llegan al arreglo experimental”. Investigaciones sistemáticas de estas cascadas fueron llevadas a cabo por Pierre Auger y sus colaboradores. A mediados de los años 40's el estudio de los chubascos de partículas se incrementó porque se descubrió que los rayos cósmicos primarios poseían energías mucho mayores que las que se podían conseguir en aceleradores hechos por el hombre. Arreglos de contadores comenzaron a operar y con el tiempo fueron sustituidos por centelladores líquidos y plásticos. Bassi, Clark y Rossi descubrieron que la mayoría de las partículas originadas por un primario descendían en un grupo bastante compacto (que le se denomina disco) que cruzaba el arreglo de detectores en unos cuantos nanosegundos [15]. De esta forma, midiendo el tiempo de llegada de las partículas, fue posible conocer la dirección del chubasco con una exactitud de 5°. Otros aspectos como el tamaño del chubasco y la ubicación de su centro se determinaron al medir la densidad de partículas. Todos estos parámetros permitieron determinar aspectos importantes del rayo primario como su composición y su espectro. De esta manera el estudio de las cascadas se convirtió en una herramienta fundamental para conocer más a fondo los rayos cósmicos primarios de muy alta energía (mayor a  $10^{14}$  eV).

### 2.3.2. Proceso de creación de la cascada

#### Cascada hadrónica

La mayoría de las partículas producidas en la primera interacción son piones ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ). Kaones ( $K^\pm$ ) son también producidos pero en menor número. Mientras estas partículas viajan hacia la tierra pueden interactuar con el aire o decaer. Esto va depender si el camino libre medio de interacción es mayor o menor que el camino libre medio de decaimiento (considerando el efecto relativista de la dilatación del tiempo).

---

I Una coincidencia se produce cuando se detecta la misma señal por dos o más detectores.

Si existe interacción, se producen partículas de la misma índole que en la primera reacción, sólo que menos energéticas. De igual forma pueden interaccionar o decaer. Y de nueva cuenta la interacción con el aire crea más mesones. El proceso se detiene cuando las partículas alcanzan energías de GeV. Esta componente de la cascada recibe el nombre de *componente hadrónica*.

Si los mesones cargados ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ) decaen pueden producir muones, neutrinos o piones como se observa en las siguientes reacciones:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu \quad (2.27a)$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu \quad (2.27b)$$

$$K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^0 \quad (2.27c)$$

La vida media del decaimiento del pion es de  $2.55 \times 10^{-8}$  s mientras que la del Kaón es de  $1.24 \times 10^{-8}$  s. El decaimiento del Kaón en un muón domina en un 63.5% respecto al otro decaimiento 21.2%. Los piones que se generan por el decaimiento del Kaón incrementan la componente hadrónica. Los muones en cambio forman lo que se conoce como la *componente muónica*.

Los piones neutros que se producen generalmente decaen pues su vida media es tan corta ( $10^{-16}$  s) que inmediatamente lo hacen sin importar el efecto relativista de la dilatación del tiempo. En esta reacción los piones producen dos rayos gamma como lo muestra la siguiente relación:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (2.28)$$

Cuando un fotón muy energético (originado por el decaimiento del  $\pi^0$ ) interactúa con los núcleos de aire puede crear un par electrón-positrón (producción de pares). Los electrones emitidos poseen mucha energía por lo que interaccionan vía Bremsstrahlung con los núcleos de aire generando rayos gamma energéticos. Los nuevos fotones generan electrones y los electrones emiten fotones creando una cascada que va aumentando mientras las partículas continúan su viaje hacia abajo. Estos son los elementos que conforman la *componente electromagnética* del chubasco. La cascada deja de aumentar cuando se alcanzan energías del orden de MeV. A altas energías ( $E_\gamma, E_e > \text{MeV}$ ) los procesos dominantes son producción de pares para fotones y Bremsstrahlung para electrones. Las interacciones como efecto Compton por parte de los gammas o ionización por los  $e^-$  también ocurren pero en menor medida pudiendo ser despreciables. La figura 2.4 muestra el desarrollo de un chubasco de partículas y sus tres componentes básicas.



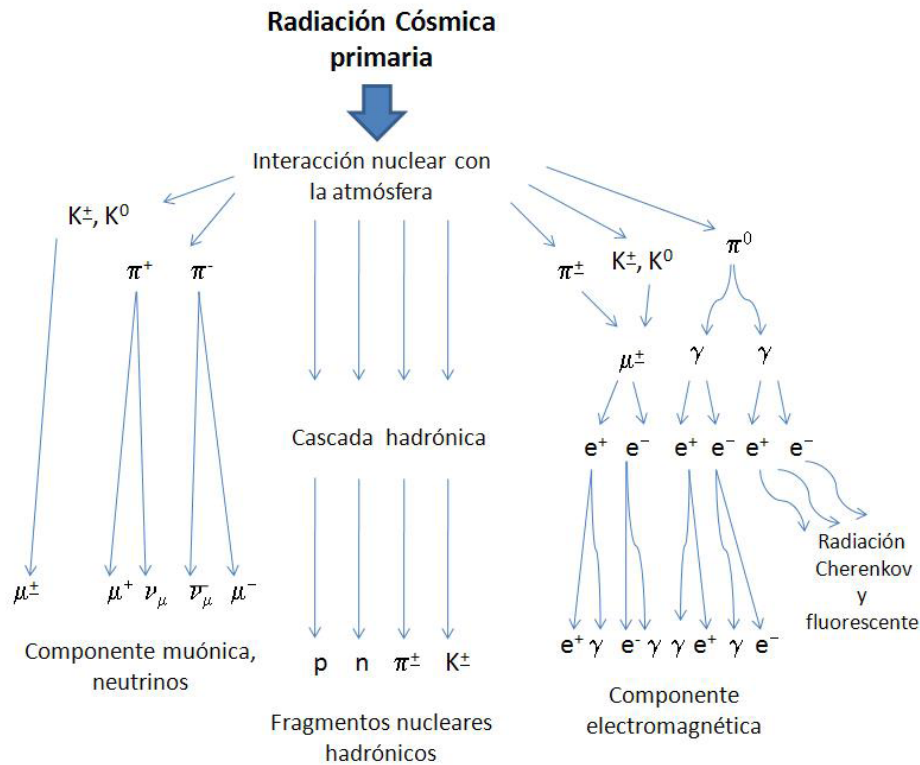


Fig.2.4. Desarrollo de una cascada de partículas. El esquema presenta las tres componentes: muónica, hadrónica y electromagnética.

Al propagarse el chubasco de partículas las componentes hadrónica y electromagnética crecen, alcanzan un máximo y después se atenúan mientras que la componente muónica no se atenúa después de alcanzar al máximo. Esta diferencia se debe a que las componentes hadrónica y electromagnética comienza a perder partículas por las diversas interacciones y decaimientos mientras que los muones sólo pierden energía vía ionización y sus decaimientos son pocos.

### Cascada electromagnética

La cascada descrita anteriormente es producida por la interacción nuclear de un rayo cósmico primario con la atmósfera. De esta reacción se van generando las diversas componentes: hadrónica, muónica y electromagnética.

Puede ocurrir que un rayo gamma muy energético, que provenga directamente del cosmos, interaccione con los núcleos de aire produciendo un par electrón-positrón. Estos a su vez reaccionan con la atmósfera radiando rayos gamma por el efecto Bremsstrahlung. Este proceso se repite

generando una cascada que posee las mismas características que la componente electromagnética descrita en la sección anterior. Este chubasco se le conoce como cascada electromagnética.

### 2.3.3. Parámetros de una cascada extensa

Existen algunos parámetros que caracterizan a las cascadas extensas. La *multiplicidad* es el número total de partículas secundarias que fueron creadas desde la interacción primaria. Estas partículas secundarias toman parte de la energía del rayo cósmico primario y su movimiento es en general en la misma dirección aunque algunas pueden adquirir un *momento trasversal*  $p_t$  que siempre es más pequeño que el *momento lateral*  $p_l$ . Este movimiento perpendicular es adquirido generalmente por diversas colisiones.

El momento lateral hace que la cascada se extienda y presente una *desviación lateral*. Las partículas secundarias se desvían un ángulo  $\theta$  definido por:

$$\theta = \frac{p_t}{p_l} \quad (2.29)$$

El chubasco posee una distribución característica: en el centro hay una gran densidad de partículas que va decreciendo radialmente debido a que las partículas de menor energía tienden a desviarse más que las que poseen mayor energía. La *distribución del momento trasversal* describe esta situación. Tiene la forma:

$$f(p_t)dp_t \approx \frac{p_t}{p_0^2} \exp\left(-\frac{p_t}{p_0}\right) dp_t \quad (2.30)$$

Donde  $p_0$  es el valor promedio de  $p_t$ ;  $p_0$  depende del tipo de partícula, de  $p_l$  y de la energía de la partícula primaria  $E_0$ .

### 2.3.4. Solución numérica y simulación

Es importante conocer como se desarrolla el chubasco de partículas a medida que va descendiendo hacia la tierra. Por eso es trascendental conocer como varía el número de partículas en las diversas etapas de la cascada así como su correspondiente distribución lateral. Para resolver este problema se pueden utilizar diversas aproximaciones y métodos.

Una forma de estudiar el desarrollo longitudinal y lateral de las cascadas es resolviendo una serie de *ecuaciones de difusión* acopladas donde el modelo de interacción dominante es el hadrónico. Las ecuaciones integro-diferenciales son tan complejas que una solución analítica es prácticamente imposible por lo que tienen que ser resueltas numéricamente. La solución arroja sólo el promedio de las propiedades de los chubascos.

La simulación de *Monte Carlo* es otro método para estudiar las cascadas extensas de partículas. Además de proporcionar valores promedio, arroja información de las fluctuaciones de las componentes del chubasco. Este método implica la generación de coordenadas espaciales y de momento de las partículas producidas en las interacciones. El algoritmo de este tipo de simulaciones consiste en dos partes: la primera es la generación de las interacciones y de los atributos de las partículas producidas como por ejemplo el tipo, la energía, el momento, entre otros; la segunda tiene que ver con la propagación de estas partículas considerando las interacciones y los decaimientos. Por todas sus características éste método ofrece un excelente panorama fenomenológico de las cascadas de partículas. A continuación se resumirán algunos resultados de las diversas componentes de las cascadas obtenidas mediante el método de Monte Carlo.

### Componente electromagnética

Basado en un simulación Monte Carlo usando el modelo de escalamiento para interacciones nucleares [15], Gaisser y Hillas encuentran que el número promedio de partículas  $N_e(E_o, t)$  a una profundidad  $X$  en un lluvia iniciada por protones de energía  $E_o$  puede ser representado adecuadamente por:

$$N_e(E_o, t) = S_o \frac{E_o}{\varepsilon} \exp(t_m) \left( \frac{t}{t_m} \right)^{t_m} \exp(-t) \quad (2.31)$$

Donde  $S_o = 0.045$ ,  $\varepsilon = 0.074$ . La variable  $t$  está determinada por  $X/\lambda$ , donde  $X$  es la profundidad atmosférica de la cascada en  $\text{g cm}^{-2}$  y  $\lambda = 70 \text{ g cm}^{-2}$ . El número de partículas se va incrementando con la profundidad, alcanza un máximo en  $t = t_m$ , y luego decrece. Esta profundidad se incrementa logarítmicamente con la energía del protón primario. La siguiente relación proporciona información de este máximo como función de la energía:

$$t_m(E_o) = \frac{X_m(E_o)}{\lambda} = \frac{X'_o}{\lambda} \text{Ln} \left( \frac{E_o}{\varepsilon} \right) - 1 \quad (2.32)$$

donde  $X'_o = 36 \text{ g cm}^{-2}$ . De esta forma el número de partículas en el máximo está dado por:

$$N_m(E_o, t_m) = S_o \frac{E_o}{\varepsilon} \quad (2.33)$$

Los resultados anteriores se pueden extender para el caso en que la cascada sea producida por un núcleo con número de masa  $A$  y energía  $E_0$ :

$$t_m(A, E_0) = \frac{X_m(A, E_0)}{\lambda} = \frac{X_0}{\lambda} \text{Ln} \left( \frac{E_0}{A\varepsilon} \right) - 1 \quad (2.34a)$$

$$N_e(A, E_0, t) = S_0 \frac{E_0}{\varepsilon} \exp(t_m) \left( \frac{t}{t_m} \right)^{t_m} \exp(-t) \quad (2.34b)$$

$$N_m(A, E_0, t_m) = S_0 \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (2.34c)$$

En la figura 2.5 se muestra el desarrollo de la cascada con respecto a la profundidad [15]. Se tienen las curvas para protones con energía  $E_0 = 10^5 \text{ GeV}$  y  $E_0 = 10^7 \text{ GeV}$ . De igual forma se ilustran las curvas para núcleos de hierro con las mismas energías.

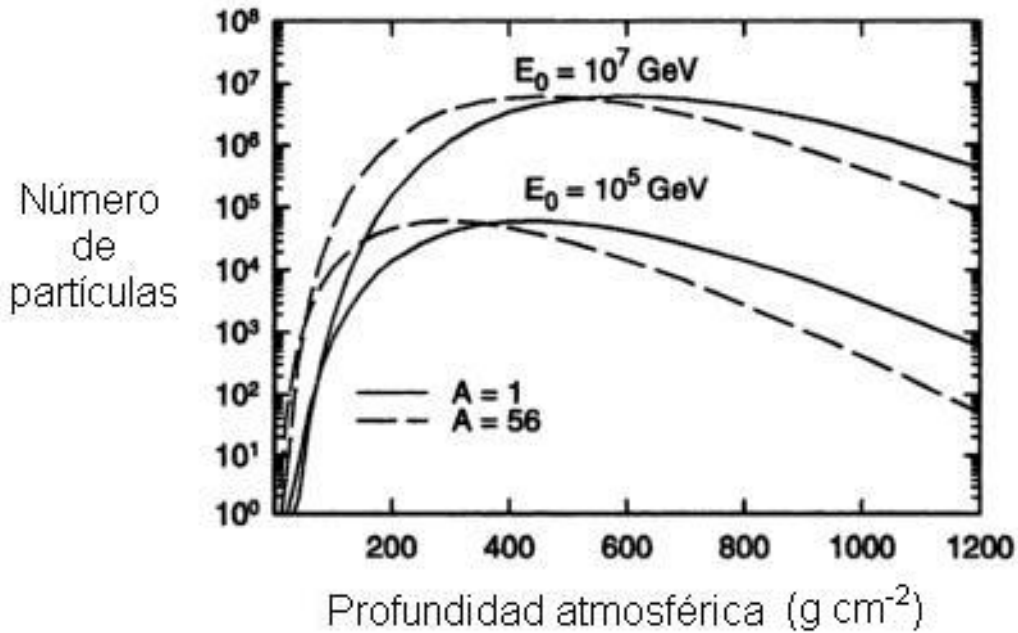


Fig.2.5. Distribuciones para cascadas iniciadas por un protón o un núcleo de hierro de acuerdo al modelo de Gaisser y Hillas.

Esta componente se desvía lateralmente por la dispersión coulombiana. Kamata, Nishimura y Greiner [15] resolvieron este problema numéricamente proponiendo la siguiente relación para la densidad superficial  $\rho_e$ :

$$\rho_e(N_e, r) = \frac{N_e}{2\pi r_0^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-4.5} \quad (2.35)$$

De la relación anterior tenemos que  $\Gamma$  es la función gamma;  $s$  es el llamado parámetro de la edad dado por:

$$s = \frac{3t}{t + 2 \ln\left(\frac{E_0}{\epsilon_0}\right)} \quad (2.36)$$

El parámetro  $\epsilon_0$  es un factor constante relacionado con la energía que pierden los electrones vía ionización. Por último el parámetro  $r_0$  de la ecuación (2.35) conocido como límite de Molier esta representado por:

$$r_0 = \frac{21.2 \text{ MeV}}{\epsilon_0} \frac{X_0}{\rho(\text{aire})} \quad (2.37)$$

Posteriormente Uchaikin y sus colaboradores a través de nuevas aproximaciones numéricas encontraron que la distribución es más estrecha que la propuesta por la ecuación (2.35):

$$\rho_e(N_e, r)_{\text{Uchaikin}} = \rho_e(N_e, r) m^{-2} \quad (2.38)$$

donde  $m = 0.78-0.21s$  para  $s$  entre 0.8 y 1.6. Esta función concuerda muy bien con los resultados de simulaciones de Monte Carlo.

### Componente muónica

La componente muónica constituye aproximadamente el 10% del número total de partículas en la cascada. En cascadas iniciadas por un nucleón el número de muones con energía mayor a un valor  $E_\mu$  a una profundidad dada es proporcional al número de electrones a esa profundidad  $N_e$  elevado por un factor:

$$N_\mu(> E_\mu) \propto N_e^{\alpha_\mu(E_\mu)} \quad (2.39)$$

El exponente  $\alpha_\mu(E_\mu)$  decrece con la energía debido a que la probabilidad de decaimiento de los piones decrece al aumentar la energía. El valor de alfa está entre 0.8-0.9 a energías de GeV y decrece

a 0.7 para energías de cientos de GeV. Si la cascada fue iniciada por un núcleo de masa A la relación anterior cambia de la siguiente forma:

$$N_{\mu}(> E_{\mu}) \propto A \left( \frac{N_e}{A} \right)^{\alpha(E_{\mu})} \quad (2.40)$$

De esta forma vemos que entre mayor sea la masa A mayor es el número de muones con energías mayores al valor  $E_{\mu}$ .

Los muones también poseen una desviación lateral debida al momento transversal heredado por los piones y kaones pero es mayor ya que los muones viajan más distancia que los hadrones. Greiner sugiere que la siguiente relación describe la desviación lateral de muones a nivel del mar para energías mayores a 1 GeV [15]:

$$\rho_{\mu}(N_e, r) = 18 \left( \frac{N_e}{10^6} \right)^{3/4} r^{-3/4} \left( 1 + \frac{r}{320} \right)^{-2.5} \text{ m}^{-2} \quad (2.41)$$

donde  $\rho_{\mu}$  es la densidad superficial de muones a una distancia r del centro de la cascada  $N_e$ .

### Componente hadrónica

Esta componente representa el 1% del total de las partículas del chubasco. En el instante de su producción gracias a su momento transversal poseen una desviación lateral dada por:

$$r_h = l \frac{p_0}{p} \quad (2.42)$$

donde l es el camino medio de interacción y  $p_0$  es el momento transversal promedio, que típicamente es 0.4 GeV/c.

Debido a que los hadrones son más masivos que las demás partículas del chubasco, se retrasan llegando un tiempo  $\delta t$  después del frente electrónico que viaja casi a la velocidad de la luz. El tiempo de retraso para hadrones de energía  $E_h$  y masa m es proporcional a:

$$\delta t = \gamma^{-2} = \left( \frac{E_h}{m} \right)^{-2} \quad (2.43)$$

donde  $\gamma$  es el factor de Lorentz  $\gamma = E_h/m$ .

### 2.3.5. Muones atmosféricos

Como ya se mencionó la componente muónica es la más penetrante en la atmósfera; puede alcanzar la superficie terrestre y atravesar fácilmente edificios, por lo que su detección es accesible en laboratorios terrestres. Su flujo al nivel del mar es de 1 muón por  $\text{cm}^2$  por minuto a una energía promedio de 1 GeV [16]. La alta penetrabilidad en la atmósfera se debe a que no interacciona por la fuerza fuerte sino sólo mediante las fuerza electromagnéticas y débiles. Como la densidad de materia es baja en la atmósfera las interacciones electromagnéticas (ionización, Bremsstrahlung, y nucleares) son muy pocas y las interacciones débiles (decaimientos) sólo las sufren las que poseen poca energía.

Para energías mayores a 10 GeV, prácticamente todos los muones llegan a la superficie terrestre antes de decaer. Sin embargo para energías menores los decaimientos del muón y anti-muón se vuelven importantes con una vida media de  $2.19 \times 10^{-6}$  s [17]:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2.44a)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.44b)$$

Sin embargo hay evidencia experimental de otros procesos de decaimiento radiativo observados principalmente en muones negativos a energías del orden de 10 MeV que liberan también un fotón [16]:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma \quad (2.45)$$

Existen otros procesos de decaimiento considerados exóticos por su muy baja probabilidad de ocurrir donde se pueden liberar (además de las partículas de la ecuación (2.44)) un par electrón-positrón.

# Capítulo 3

## Detectores de centelleo y detectores Cherenkov

El capítulo 3 está destinado a brindar los conceptos fundamentales de los detectores de centello y detectores Cherenkov. Primero se introducen las propiedades básicas y generales de los detectores. Después se estudia el elemento principal que compone a ambos dispositivos: el fotomultiplicador. Se detallan sus aspectos principales, elementos que lo componen, parámetros de operación y los factores intrínsecos y ambientales que lo afectan. Posteriormente se habla sobre los detectores de centello dándose una breve explicación de su funcionamiento, su clasificación y la manera de armarlos. Al final se presentan los detectores Cherenkov. Se explica cómo es posible la detección a través de la radiación Cherenkov, se introducen algunos tipos de estos dispositivos y al final se profundiza solamente en uno de ellos: los detectores Cherenkov de agua.

### 3.1. Detectores de partículas

#### 3.1.1. Características generales de los detectores

Cada detector posee propiedades particulares que lo definen de acuerdo al tipo de partícula que se desea analizar. Pero existen algunas características generales que son comunes en la mayoría [5].

##### **Eficiencia**

La eficiencia es la capacidad que tiene un detector para identificar las partículas o la radiación que son emitidas por una fuente. De manera general se puede decir que existen dos tipos. La eficiencia absoluta o total es la fracción de los eventos emitidos por la fuente que son registrados por el detector:

$$\epsilon_{\text{tot}} = \frac{N_{\text{registrados}}}{N_{\text{emitidos}}} \quad (3.1)$$

$\epsilon_{\text{tot}}$  es una función que depende de la geometría del detector y de la probabilidad de que exista una interacción. Por otro lado se tiene la eficiencia intrínseca, que se define como el número de eventos registrados entre el número de eventos incidentes al detector:

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{N_{\text{registrados}}}{N_{\text{incidentes}}} \quad (3.2)$$

Esta eficiencia depende de la sección transversal de interacción en el medio del detector. Debido a esto  $\epsilon_{\text{int}}$  es una función del tipo de partículas o radiación, de la energía y del material de detector.



Lo anterior es válido cuando el detector observa directamente las partículas que emite la fuente. Pero a veces se presentan interacciones con el medio que hacen que las partículas o la radiación no lleguen al detector. En estos casos el detector debe analizar las partículas o radiación secundaria que se produjo en dicha reacción. Tal es el caso de la astronomía de muy alta energía VHE (sección 1.1). En estas situaciones la eficiencia se define como la capacidad que tiene el detector para identificar que las partículas o la radiación que le llegó fueron producidas por las partículas primarias de interés. Como la observación es indirecta, se deben definir parámetros que permitan reproducir o identificar a la partícula primaria, los cuales varían dependiendo del detector.

### **Respuesta**

La respuesta es la capacidad que tiene un detector para reproducir las características de interés de la partícula primaria en función de los parámetros de detección. Estas características pueden abarcar desde su simple detección hasta conocer otros aspectos como la dirección, energía, momento, entre otros. Si la partícula de interés interactúa con el medio y no puede llegar de forma directa al detector, la respuesta estará en función de los parámetros de detección de las partículas secundarias.

### **Resolución de la energía**

La respuesta a la energía sería entonces la capacidad que tiene el detector de reproducir la energía de la partícula primaria a partir de los parámetros que detecta u observa. La resolución en la energía es una medida que indica la exactitud del valor predicho de energía respecto al valor real. Por ejemplo si el detector tiene una resolución en energía del 10%, quiere decir que la energía predicha puede distar de su valor real en 10%.

### **Sensibilidad**

Decir que un detector observa o detecta solamente las partículas primarias o secundarias de interés es un modelo bastante simple. Esto se debe a que casi siempre existirán partículas o radiación que también es detectada por el aparato pero que no representa al objeto de estudio. Esta contaminación recibe el nombre de radiación o ruido de fondo. En algunos casos es posible eliminarla, pero cuando no se puede se debe de determinar su magnitud para tenerla presente en las detecciones.

La sensibilidad de un detector se define como el flujo mínimo de partículas de interés que puede detectar y está en función del ruido de fondo. El flujo mínimo se determina a partir de la significancia  $\sigma$ , que se define como el número de partículas que llegan al detector  $N$  divididas entre la raíz del ruido de fondo  $B$ :

$$\sigma = \frac{N}{\sqrt{B}} \quad (3.3)$$

El flujo mínimo de partículas de interés se da cuando el valor es de  $5\sigma$  o más. Para valores de  $5\sigma$  o mayores es muy probable que la cantidad de partículas que llegaron al detector correspondan a un evento de interés y no sean parte del ruido. Entonces el flujo mínimo se da cuando el valor

del cociente de la ecuación 3.3 es igual a  $5\sigma$ . A partir de  $N$ , y conociendo el área  $A$  y el tiempo de detección  $t$  se puede conocer el flujo mínimo:

$$F_{\min} = \frac{N}{At} \quad (3.4)$$

### Tiempo de respuesta

El tiempo que tarda la señal en formarse desde el momento en que las partículas o radiación llegan al detector se conoce como tiempo de respuesta. Este parámetro es crucial para detectores que deben responder rápidamente, tal es el caso de aquellos que son utilizados como disparo<sup>I</sup>.

Por ejemplo el detector V0 del experimento ALICE<sup>II</sup> tiene tiempos de respuesta del orden de picosegundos [18]. Para lograr un buen cronometraje, es necesario que la señal se forme rápidamente, es decir, que el pulso tenga un costado creciente tan cercano a la vertical como sea posible.

### Tiempo muerto

El tiempo requerido para que un detector procese un evento se le conoce como tiempo muerto. Este parámetro está relacionado con la duración de la señal así como del procesamiento y almacenamiento de la información. Un detector puede ser insensible a eventos que ocurran en este periodo; o puede ser sensible traslapando los eventos y distorsionando la señal. En ambos casos existe una distorsión en la señal y en la distribución del tiempo de llegada de los pulsos, traduciéndose en una pérdida de la información. Para eliminar estos contratiempos se puede hacer que las tasas de conteo sean lo suficientemente bajas (para que la probabilidad de que ocurra un evento dentro del tiempo muerto sea mucho menor) o asignar un tiempo fijo en el que no se acepten eventos.

Estas propiedades básicas están en la mayoría de los detectores. Antes de abordar el estudio particular de los detectores de centello y Cherenkov es necesario introducir otra característica en común, un elemento de suma importancia para su funcionamiento: el fotomultiplicador.

## 3.2. Fotomultiplicadores

Los fotomultiplicadores son detectores que convierten la luz que reciben en una corriente eléctrica medible. Estos dispositivos son extremadamente sensibles, pudiendo captar hasta un solo fotón.

---

I Los detectores que funcionan como disparo son aquellos que emiten una señal para que otros detectores o/y sistemas entren en funcionamiento. En el idioma inglés se utiliza el término trigger.

II ALICE (A Large Ion Collider Experiment) es uno de los seis experimentos que se van a llevar a cabo en el gran colisionador de hadrones (LHC por sus siglas en inglés). En ALICE se pretende estudiar el plasma de quarks y gluones que resulta de las colisiones de iones pesados con el objetivo de resolver los misterios del origen del universo.

Son comúnmente utilizados en física nuclear y de altas energías, aunque pueden ser también aprovechados en otras áreas.

Los elementos esenciales de un fotomultiplicador son el fotocátodo, el sistema de colección de electrones, la sección de multiplicación (o cadena de dinodos como usualmente se le llama) y el ánodo. Todos los elementos están protegidos por una cubierta al vacío que generalmente tiene forma de tubo. La figura 3.1 muestra un diagrama de este dispositivo.

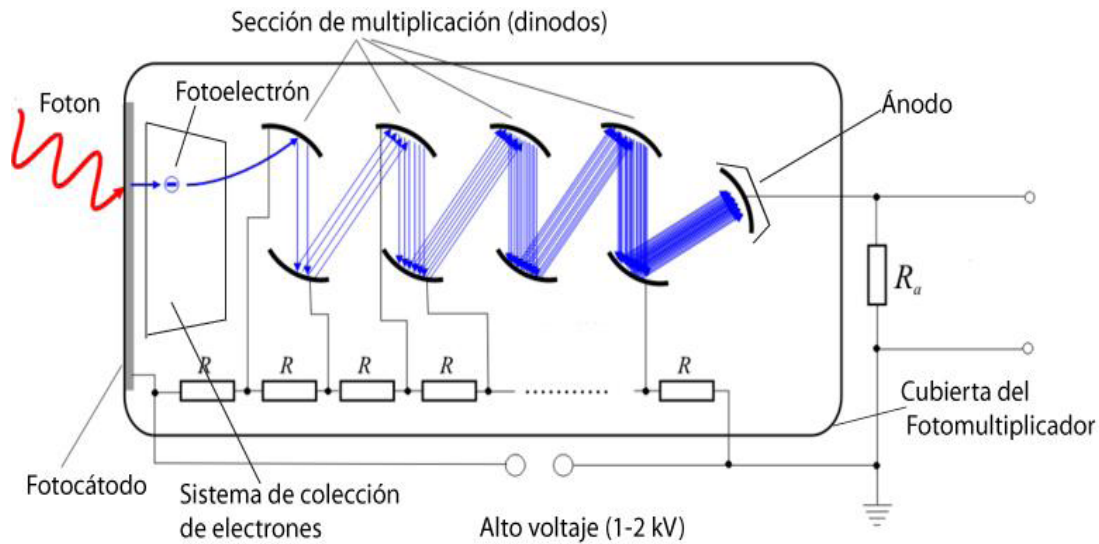


Fig.3.1. Esquema de un fotomultiplicador.

Los fotomultiplicadores operan de la siguiente manera. Un fotón incidente en el fotocátodo libera un electrón debido al efecto fotoeléctrico. Una diferencia de potencial eléctrica acelera y dirige a este electrón al primer dinodo. Al golpearlo, el electrón transfiere parte de su energía desprendiendo algunos electrones. Éstos son acelerados de nuevo por la diferencia de potencial hacia el siguiente dinodo y al colisionarlo logran liberar una mayor cantidad de estas partículas. De esta manera se crea una cascada que va aumentando en cada dinodo. Al llegar al ánodo se ha amplificado la señal original en un factor de  $10^5$ - $10^7$  creándose una corriente que es analizada por la electrónica. Para que los fotomultiplicadores operen es necesario establecer un alto voltaje en forma de escalera que vaya acelerando y guiando los electrones en cada fase de multiplicación.

### 3.2.1. Elementos de los fotomultiplicadores

Es importante hacer énfasis en los diversos componentes de los fotomultiplicadores [13].

### Fotocátodo

El efecto fotoeléctrico está regido por la siguiente ecuación (conocida como ecuación de Einstein):

$$E = h\nu - \phi \quad (3.5)$$

$E$  es la energía cinética del fotón incidente,  $\nu$  es su frecuencia y  $\phi$  es la función de trabajo. Como se observa en la ecuación de Einstein existe una frecuencia mínima para que el proceso se lleve a cabo. Sin embargo, arriba de este umbral, la probabilidad de que ocurra está lejos de la unidad. De hecho, la probabilidad de que ocurra varía con la frecuencia de la luz incidente así como de la estructura del material. Debido a esto cada material posee un parámetro que se denomina eficiencia cuántica  $\eta(\lambda)$  que varía con la longitud de onda:

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Número de fotoelectrones}}{\text{Número de fotones incidentes}(\lambda)} \quad (3.6)$$

En general la respuesta de los materiales es tal que la eficiencia cuántica presenta un máximo solamente en una región del espectro. Por eso es importante seleccionar el fotomultiplicador adecuado para la región del espectro que se quiere observar. Hoy en día la mayoría de los fotocátodos son confeccionados con materiales semiconductores elaborados de antimonio más uno o varios metales alcalinos. Esto se debe a que las eficiencias cuánticas varían entre 10-30 % lo que equivale a dos órdenes de magnitud mayor con respecto a las eficiencias de los metales.

### Sistema de enfoque electrónico

Para que los fotoelectrones emitidos por el fotocátodo lleguen hasta el primer dinodo es necesario un sistema que los colecte y los enfoque en esta dirección. En la mayoría de los fotomultiplicadores se utiliza un campo eléctrico dispuesto en una configuración apropiada, aunque rara vez es complementado con un campo magnético. Estos sistemas de enfoque deben de lograr que la mayoría de los electrones emitidos por el fotocátodo lleguen a la sección de multiplicación y que el tiempo que les toma en viajar sea el mismo sin importar el punto de emisión.

### Sección de multiplicación

Para aumentar la pequeña corriente que se crea en el fotocátodo, se emplea un sistema secundario de electrodos (dinodos) los cuales multiplican considerablemente la corriente que llega al ánodo. El principio que rige las emisiones secundarias en los dinodos es similar al efecto fotoeléctrico, la diferencia estriba en que ahora los electrones son los que transfieren su energía. Al igual que ocurre con el fotocátodo, la emisión es mayor en semiconductores o aislantes que en metales. Estos materiales deben ser depositados en un conductor para poder establecer la diferencia de potencial necesaria para la aceleración. Los fotomultiplicadores comunes tienen de 8 a 10 etapas de multiplicación. En cada paso se multiplican los electrones por un factor de 4 o 5 por lo que al final se obtiene una ganancia de alrededor de  $10^6$  electrones.

### Dinodos

Existen varios tipos de dinodos, cada uno con diferentes parámetros de operación<sup>1</sup>. Dependiendo de la aplicación del fotomultiplicador se selecciona el arreglo de dinodos que se desea utilizar. Destacan las siguientes configuraciones: persiana, malla, enfoque lineal, enfoque circular, lámina de microcanales.

### Ánodo

El ánodo es el electrodo que colecta la cascada de electrones producida en la sección de multiplicación. Proporciona el pulso de corriente que es amplificado por un circuito externo. Son fabricados en forma de barra, de plato o de malla. El factor más importante para el diseño es que la diferencia de potencial entre el último dinodo y el ánodo sea la adecuada para obtener una corriente de salida óptima [19].

### Cubierta del fotomultiplicador

La cubierta brinda soporte y protección a los elementos que componen el fotomultiplicador. Pero también tiene otras funciones. Cubre al PMT de luz no deseada que aumentaría el ruido en la señal; anclada a la tierra de potencial bloquea eficientemente los campos eléctricos; y envuelta con un material metálico de alta permeabilidad reduce los efectos debidos al magnetismo.

## 3.2.2. Parámetros de operación de los fotomultiplicadores

### Ganancia

La ganancia o incremento total de amplificación depende del número de dinodos y de la ganancia en cada electrodo conocida como factor de emisión secundario  $\delta$ . Este factor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre dinodos  $V_d$  (donde  $K$  es una constante de proporcionalidad):

$$\delta = KV_d \quad (3.7)$$

Asumiendo que el voltaje aplicado se divide por igual en cada etapa de multiplicación, la ganancia  $G$  del PMT es:

$$G = \delta^n = (KV_d)^n \quad (3.8)$$

Es importante conocer como varia la ganancia al cambiar el voltaje de aplicación  $V_b$ . De la ecuación anterior se obtiene que:

$$\frac{dG}{G} = n \frac{dV_d}{V_d} = n \frac{dV_b}{V_b} \quad (3.9)$$

---

<sup>1</sup> Los diversos parámetros de operación se describen en la sección 3.2.2

De la ecuación anterior se concluye que cuando  $n = 10$  una variación en 1% del voltaje de aplicación  $V_b$  modifica en 10% la ganancia.

### **Divisores de voltaje**

Es crucial que el voltaje entre dinodos sea estable y este bien regulado. Para lograrlo se utiliza un divisor de voltaje. Este sistema consiste en una cadena de resistencias las cuales proveen el voltaje deseado en cada sección de multiplicación. En ocasiones se utilizan resistencias variables entre el fotocátodo y el primer dinodo para permitir un ajuste fino del voltaje entre estos elementos.

La variación en la corriente del fotomultiplicador afecta al voltaje entre los dinodos. Para prevenir este efecto es importante que la corriente en el divisor del voltaje sea grande comparada con la corriente del PMT. Sin embargo en algunas ocasiones la corriente en las últimas etapas puede ser grande, por lo que se utilizan capacitores o diodos Zener para corregir estos efectos.

Los fotomultiplicadores pueden operar en voltaje positivo o negativo. En voltaje positivo el fotocátodo está conectado a tierra. Esto tiene la ventaja de minimizar las descargas espurias que podrían originarse en el fotocátodo. La desventaja de este modo de operación es que hay que acoplar un sistema de capacitores para lograr que la señal este a 0 volts. Esto va en detrimento del tiempo de respuesta del fotomultiplicador. En voltaje negativo es el ánodo el que está conectado a tierra. La ventaja de este modo es que la señal puede ser extraída directamente del PMT, sin sufrir retraso. Pero ahora el fotocátodo está a un alto voltaje negativo lo que puede provocar descargas; para evitarlas se aísla perfectamente la ventana del fotomultiplicador.

### **Linealidad**

Para que exista una completa proporcionalidad (linealidad) con la corriente inicial del fotocátodo se requiere que la corriente en cada etapa sea completamente colectada por la siguiente. La colección de corriente es una función creciente del voltaje aplicado hasta que se alcanza el nivel de saturación en el cual todos los electrones son colectados. Como regla general, el voltaje de amplificación debe estar siempre en esta región de saturación. Sin embargo hay que procurar no superar esta región, pues después la colección de corriente sufre un aumento al incrementarse el voltaje.

### **Forma del pulso**

Debido a que la señal de salida del ánodo es una corriente o un pulso, un fotomultiplicador puede ser visto como un generador de corriente. Entonces el circuito equivalente para el fotomultiplicador puede ser visto como un generador de corriente ideal conectado en paralelo a una resistencia y un capacitor que representan las resistencias  $R$  y capacitancias  $C$  del ánodo y los elementos del circuito externo.

Para determinar la forma del voltaje equivalente  $V(t)$  es necesario saber como es la corriente  $I(t)$  para introducirla en la ecuación del circuito equivalente:

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt} \quad (3.10)$$

Para el caso de materiales centelladores la luz presenta un decaimiento exponencial<sup>1</sup> por lo que la corriente en el ánodo está dada por:

$$I(t) = \frac{GNe}{\tau_{ws}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (3.11)$$

Donde  $G$  es la ganancia del PMT,  $N$  el número de electrones emitidos por el fotocátodo,  $e$  la carga del electrón y  $\tau_s$  la constante de decaimiento del centellador. Con esta corriente se obtiene la siguiente solución (con  $\tau = RC$ ):

$$V(t) = -\frac{GNeR}{\tau - \tau_s} \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad \text{para } \tau \text{ distinto de } \tau_s \quad (3.12a)$$

$$V(t) = \frac{GNeR}{\tau_s^2} t \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad \text{para } \tau \text{ igual a } \tau_s \quad (3.12b)$$

### 3.2.3. Resolución y respuesta temporal

Los principales factores que afectan la resolución y respuesta temporal de los fotomultiplicadores son las variaciones en el *tiempo de transito* de los electrones dentro de los PMT's y las fluctuaciones debidas a *ruido*.

#### 3.2.3.1. Tiempo de tránsito

El tiempo de tránsito se define como el lapso que tardan los fotoelectrones en moverse desde el fotocátodo hasta la última sección de multiplicación (ánodo). Existe varios factores que afectan el tiempo de tránsito; el aspecto geométrico es uno de ellos. Electrones emitidos en el eje del PMT recorren menos distancia que los que son liberados en los extremos. Además asimetrías en la geometría del primer dinodo acentúan más estas diferencias. Se puede resolver el problema utilizando un fotocátodo que iguale las distancias (por ejemplo un esférico) o graduando el campo eléctrico para acelerar más aquellos electrones que recorren más distancia. Las variaciones en la energía y la

<sup>1</sup> El comportamiento de los materiales centelladores se describe en la sección 3.3.

dirección en que son emitidos los electrones también influyen en el tiempo de tránsito. Electrones más energéticos alcanzan más rápido el sistema de multiplicación que los menos energéticos. El uso de campos eléctricos variables reduce este tiempo de tránsito.

Estas variaciones o dispersiones que pueden existir en el tiempo de tránsito son un factor crucial para determinar la resolución temporal del detector.

### 3.2.3.2. Ruido

#### Corriente oscura

A pesar de que el PMT no esté iluminado puede surgir en el ánodo una pequeña corriente llamada corriente oscura. Las causas de esta corriente pueden ser [13]:

- Emisiones térmicas del cátodo y del ánodo; están descritas por la ecuación de Richardson (donde A es una constante,  $\phi$  es la función de trabajo, k es la constante de Boltzmann y T la temperatura):

$$I = AT^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right) \quad (3.13)$$

- Fugas de corriente que se dan en los soportes de los electrodos.
- Efectos radiactivos de algunos materiales que componen el PMT pueden causar emisiones en el fotocátodo y en los dinodos.
- Fenómenos de ionización provocados por gases que están dentro del fotomultiplicador.

#### Afterpulses

Los afterpulses son pulsos que se emiten un cierto tiempo después del pulso real. Pueden ser provocados por gas residual que al ser ionizado por los electrones puede acelerarse en la dirección de fotocátodo liberando electrones. Estos pulsos pueden ocurrir en un tiempo posterior que puede variar desde cientos de nanosegundos hasta microsegundos.

#### Ruido estadístico

Éste se debe principalmente a la naturaleza estadística del efecto fotoeléctrico y de las emisiones secundarias. Para una fuente de luz con intensidad constante el número de foto-electrones y electrones secundarios fluctúa en tiempo. Esto se traduce en una corriente fluctuante en el ánodo.



### 3.2.4. Factores ambientales que afectan el desempeño de los fotomultiplicadores

#### Exposición a luz natural

Es conveniente no exponer al fotomultiplicador a la luz natural cuando está operando con alto voltaje. Como el PMT es muy sensible, la luz ambiental crea corrientes muy grandes que pueden fatigar el fotocátodo aumentando la corriente oscura a niveles no deseados o incluso dañar seriamente el funcionamiento del fotomultiplicador. Aun cuando el fotomultiplicador no este operando con un voltaje específico no es recomendable exponerlo a una iluminación excesiva pues tarda cierto tiempo es recuperarse de las corrientes oscuras que se generan.

#### Campos magnéticos

El efecto de los campos magnéticos es otro factor que influye en el funcionamiento de los fotomultiplicadores. Esto se debe a que los campos desvían las cascadas de electrones de sus trayectorias óptimas. La parte mas sensible del fotomultiplicador es el sistema de enfoque electrónico. Para reducir la influencia del campo magnético se blindan los fotomultiplicadores con metales de alta permeabilidad como el metal-mu u otras aleaciones con diferentes proporciones de níquel y acero como el permalloy [18].

#### Efectos de la temperatura

La temperatura también tiene influencias en el desempeño de los fotomultiplicadores. Puede incrementar la corriente oscura como lo dicta la ecuación de Richardson (3.13). En principio el factor de emisión secundario no depende de la temperatura, pero puede variar al cambiar las propiedades superficiales de los dinodos con la temperatura. El problema radica en que estas variaciones son impredecibles, se presentan de forma diferente para distintos fotomultiplicadores y hasta para el mismo PMT.

Conocer el funcionamiento de los fotomultiplicadores hace más asequible la comprensión de algunos detectores que usan este elemento básico. Acoplar un material centellador a un fotomultiplicador puede servir para detectar cierto tipo de partículas como se verá a continuación.

## 3.3. Detectores de centello

El uso de la luz que emiten algunos materiales cuando interaccionan con partículas es una de las técnicas más antiguas de detección en el campo de la física nuclear y de la física de altas energías. Probablemente este método fue utilizado por primera vez por William Crookes en 1903. Su instrumento (llamado espintaroscopio<sup>1</sup>) era una pantalla de sulfuro de Zinc (contaminado con plata o cobre) que producía pequeños centelleos cuando partículas alfa golpeaban la pantalla. Rutherford y sus colaboradores utilizaron esta técnica en sus famosos experimentos de dispersión de partículas

---

<sup>1</sup> El nombre proviene de la palabra griega sphintaris que significa chispa.

alfa. Durante varios años la técnica quedó en desuso porque era difícil y tedioso analizar la luz emitida por estos materiales. Sin embargo el método resurgió cuando Curran y Baker en 1944 reemplazaron el ojo humano por fotomultiplicadores. Fue en ese momento cuando nacieron los detectores de centelleo modernos. Actualmente los detectores de centelleo son ampliamente utilizados para la detección de partículas y radiación en varias ramas de la física.

Un detector de centelleo consiste en un material (conocido como material centellador) que emite destellos acoplado a un fotomultiplicador. Las partículas al pasar por el material excitan sus átomos y moléculas haciendo que el material emita luz cuando éstas regresan a su estado base. La luz es colectada por el PMT, donde es convertida en una corriente eléctrica medible. Los elementos básicos de estos detectores se muestran en la figura 3.2.

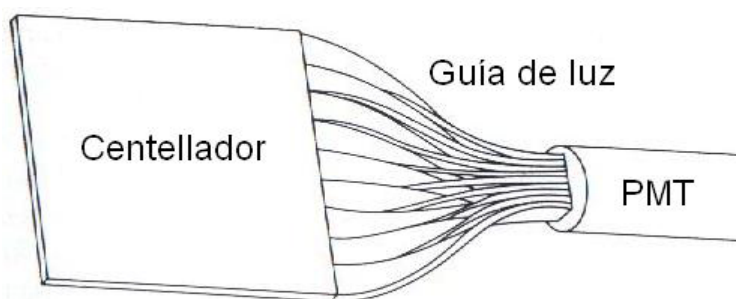


Fig.3.2. Esquema de un detector de centelleo.

Los detectores de centello poseen las siguientes características [13]:

- *Sensibles a la energía depositada.* La luz que emiten la mayoría de los centelladores es proporcional a la energía depositada. Como los fotomultiplicadores son también lineales, entonces la amplitud de la señal eléctrica es proporcional a esta energía.
- *Tiempos de respuesta cortos.* Los tiempos de respuesta y de recuperación de los detectores de centello son muy cortos comparados con otros detectores.
- *Discriminación de partículas.* En algunos detectores de centelleo es posible distinguir entre diferentes tipos de partículas analizando la forma del pulso de la señal de salida.

En una primera aproximación, la evolución del proceso de emisión de luz en los centelladores se puede describir por un decaimiento exponencial:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (3.14)$$

donde  $N$  es el número de fotones emitidos al tiempo  $t$ ,  $N_0$  es el número total de fotones emitidos y  $\tau_d$  es la constante de decaimiento. Como el tiempo de ascenso en la mayoría de los centelladores es muy corto comparado con la constante de decaimiento, en esta aproximación se ha igualado a cero.

En general el comportamiento es más complejo. Una descripción mas adecuada posee dos componentes exponenciales:

$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_l}\right) \quad (3.15)$$

donde  $\tau_r$  y  $\tau_l$  son los tiempos de decaimiento. En la mayoría de los centelladores una componente es mucho más rápida que la otra. Los subíndices indican esta situación,  $r$  para representa la componente rápida y  $l$  la exponencial lenta. Los coeficientes A y B varían según el material.

Existen varios tipos de materiales que son utilizados para fabricar detectores de centelleo: cristales orgánicos, líquidos orgánicos, plásticos, cristales inorgánicos, gases. El principal interés de este trabajo se centra en los centelladores plásticos.

### 3.3.1. Centelladores plásticos

Los centelladores plásticos son soluciones de centelladores orgánicos<sup>I</sup> en un solvente plástico. Los solutos comúnmente utilizados son p-Terfenil, PBD<sup>II</sup>, PBO<sup>III</sup> y POPOP<sup>IV</sup> en concentraciones típicas de 10 gramos/litro. Los solventes más utilizados son poliviniltolueno, polifenilbenceno y poliestireno. Los centelladores plásticos poseen constantes de decaimiento cortas (del orden de 2 a 3 ns). Debido a esto el tiempo de ascenso no puede ser ignorado como se hizo en la ecuación (3.14). Bengston y Moszynski proponen la siguiente descripción para el proceso de emisión de luz en los centelladores plásticos [13]:

$$N = N_o f(\sigma, t) \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (3.16)$$

donde  $f(\sigma, t)$  es una Gaussiana con desviación estándar  $\sigma$ .

Una de las propiedades de los plásticos centelladores es que son fácilmente maquillados por medios convencionales y pueden adaptarse fácilmente a la forma geométrica requerida. Son resistentes al agua pura, a la grasa de silicón y a los alcoholes, pero no a los solventes orgánicos como la acetona.

#### Mecanismo de emisión de luz

La energía que las partículas o la radiación ceden al centellador es absorbida primero por el solvente plástico y después es cedida al soluto. La emisión de luz por parte de moléculas orgánicas fluorescentes puede ser entendida en términos de la energía potencial de sus estados electrónicos

I Los centelladores orgánicos son hidrocarburos aromáticos que contienen estructuras de benceno ligadas o compactas.

II  $C_{20}H_{14}N_2O$

III  $C_{15}H_{11}NO$

IV  $C_{24}H_{16}N_2O_2$

[20]. Los electrones al absorber energía saltan del estado base al estado excitado ubicándose en uno de sus correspondientes niveles vibracionales (del punto A al punto B en la figura 3.3). Dentro del estado excitado, los electrones pierden energía en forma de calor hasta llegar a los estados vibracionales de menor energía (transición del punto B al punto C en la figura 3.3). Desde aquí, es altamente probable que el electrón regrese al estado base emitiendo radiación visible en un tiempo que dura en promedio  $10^{-8}$  segundos (línea CD en la figura 3.3). El siguiente diagrama (energía potencial contra la distancia interatómica) muestra el proceso.

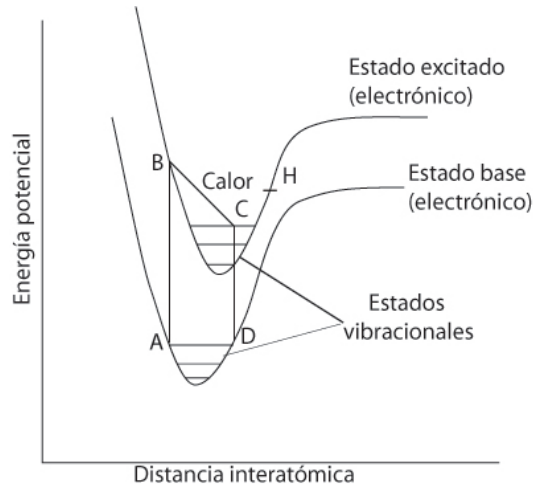


Fig.3.3. Diagrama de energía potencial contra distancia interatómica.

### 3.3.2. Montaje de un detector de centelleo

#### Colección de luz

La luz que emite el material centellador puede escapar por las diferentes caras o ser absorbida por el centellador. La absorción juega un papel importante cuando los fotones recorren distancias que son comparables a la longitud de atenuación lo cual sólo se cumple para detectores grandes ( $>1\text{m}$ ). Entonces la pérdida en los límites del material se vuelve el factor más importante.

Parte de la luz que llega a la frontera se transmite hasta que ocurre el fenómeno de reflexión interna total, determinado por el ángulo de Brewster  $\theta_B$ :

$$\theta_B = \text{sen}^{-1} \left( \frac{n_{\text{ext}}}{n_{\text{cen}}} \right) \quad (3.17)$$

donde  $n_{\text{ext}}$  y  $n_{\text{cen}}$  son los índices de refracción del medio y del centellador respectivamente.

La luz que escapa puede ser redirigida utilizando un material reflector especular como el aluminio, o difuso como MgO, TiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En la reflexión especular el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión mientras que en la difusa la reflexión es independiente del ángulo de incidencia obedeciendo la ley del coseno de Lambert (I es la intensidad de la luz reflejada y  $\theta$  es el ángulo con la normal):

$$\frac{dI}{d\theta} \propto \cos\theta \quad (3.18)$$

Para mejorar la eficiencia de la colección de luz, se busca además maximizar la reflexión interna. El medio que rodea al material debe tener un índice de refracción lo más pequeño posible para minimizar el ángulo de Brewster. El mejor medio para lograrlo es el aire por lo que se debe dejar una pequeña capa de este medio entre el centellador y el material reflector.

#### **Acoplamiento del fotomultiplicador**

En contraste con las fronteras donde se tiene que coleccionar la luz, la región donde se acopla el fotomultiplicador debe maximizar su transmisión. El efecto contrario sería entonces maximizar  $\theta_B$  colocando un contacto óptico cuyo índice de refracción sea lo más próximo al índice del centellador y al índice de la ventana del PMT. El contacto más usado es la grasa de silicón.

En algunas ocasiones es imposible acoplar directamente el fotomultiplicador al centellador. En estos casos la luz emitida por el material centellador puede ser dirigida al PMT a través de una guía de luz mediante el uso de la reflexión interna total. Los materiales más comunes para su fabricación son plexiglass o lucita. Pueden tener distintas formas, dependiendo la aplicación.

Finalmente se brinda una pequeña explicación de los detectores Cherenkov, haciendo un pequeño énfasis en aquellos en el que el radiador es agua.

### **3.4. Detectores Cherenkov**

#### **Radiación Cherenkov**

Una partícula cargada que atraviesa un medio con índice de refracción  $n$  a una velocidad  $v$  que excede a la velocidad de la luz en ese medio  $c/n$  emite una radiación característica llamada radiación Cherenkov. Las partículas cargadas polarizan el medio creando dipolos eléctricos en su camino. La radiación se produce cuando el campo eléctrico de los dipolos varía en el tiempo. Si la velocidad es menor que  $c/n$  los dipolos forman un arreglo simétrico alrededor de la trayectoria de la partícula, por lo que el campo eléctrico se cancela y no hay emisión de radiación (inciso a en la figura 3.4). Sin embargo si la partícula se mueve a una velocidad mayor a  $c/n$ , la simetría se rompe y existe un campo dipolar eléctrico distinto de cero que es el culpable de la radiación Cherenkov (inciso b en la figura 3.4).

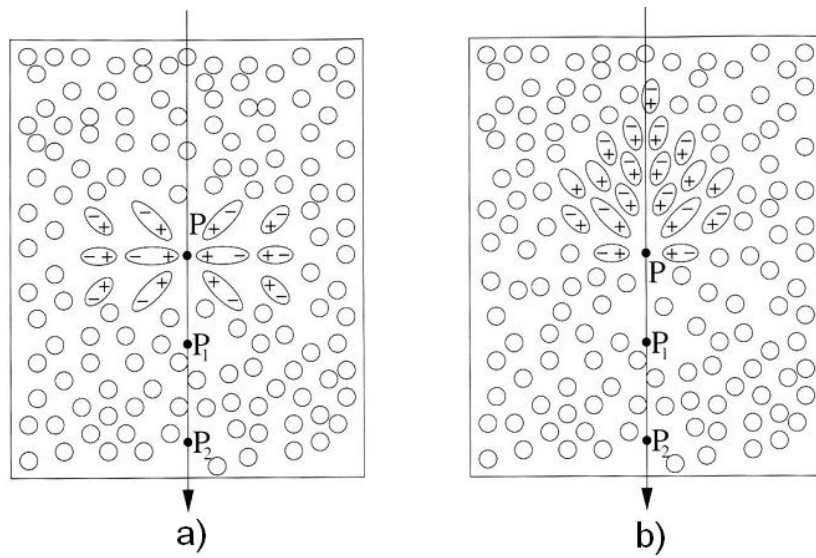


Fig.3.4. Polarización del medio por una partícula cargada.

Los pulsos emitidos por los dipolos interfieren constructivamente en la dirección del movimiento de la partícula cargada como se observa en la figura 3.5. Este fenómeno es muy similar a la generación de una onda supersónica por un objeto que supera la barrera del sonido.

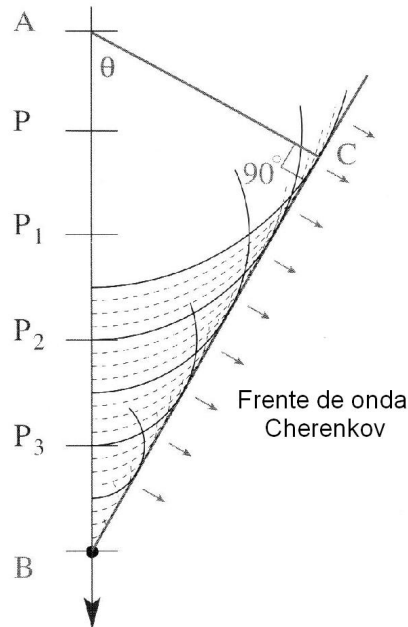


Fig.3.5. La superposición de pulsos genera un cono de radiación en la dirección de movimiento de la partícula.  $\theta_c$  es el ángulo de Cherenkov.

De la figura anterior se puede colegir que el valor del ángulo  $\theta_c$ , conocido como ángulo de Cherenkov, está determinado por el cociente de las distancias AC y AB:

$$\cos\theta_c = \frac{t\left(\frac{c}{n}\right)}{tv} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta} \quad (3.19)$$

donde  $\beta$  es el cociente de la velocidad de la partícula y la velocidad de la luz.

La radiación Cherenkov se emite siempre que la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de la luz en el medio ( $v$  es mayor que  $c/n$ ). En el límite en que estas velocidades son iguales la radiación se dirige en la dirección de la partícula cargada pues  $\theta_c$  es cero. Esta condición es conocida como el *umbral* del efecto Cherenkov. A partir de esta condición se determina la energía umbral:

$$E_{\text{Umbral}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} \quad (3.20)$$

El ángulo Cherenkov alcanza un máximo cuando la velocidad de la partícula es igual a la velocidad de la luz en el vacío ( $v$  igual a  $c$ ):

$$\theta_{c(\text{max})} = \arccos \frac{1}{n} \quad (3.21)$$

El número de fotones Cherenkov emitidos por unidad de longitud con longitudes de onda entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  esta determinado por la siguiente relación [14]:

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{n(\lambda)^2 \beta^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad (3.22)$$

Donde  $\alpha$  es la constante de estructura fina,  $z$  es la carga de la partícula,  $\beta$  es igual a  $v/c$ . En el caso en que se desprecien las dispersiones del medio, es decir que el índice de refracción no depende de  $\lambda$ , y tomando el rango óptico de  $\lambda_1 = 400$  nm a  $\lambda_2 = 700$  nm se obtiene:

$$\frac{dN}{dx} = 490 \text{ sen}^2\theta_c [\text{cm}^{-1}] \quad (3.23)$$

### Tipos de detectores Cherenkov

Un detector Cherenkov consiste en un material radiador y un dispositivo que detecte la radiación. La mayoría de los materiales transparentes son candidatos para ser radiadores en un detector

Cherenkov. Un gran rango de índices de refracción puede ser cubierto por radiadores sólidos, líquidos o gaseosos. Parte del intervalo entre el menor índice de los líquidos 1.33 y el mayor de los gases 1.002 puede ser cubierto por los aerogeles de silicio. En general se utilizan fotomultiplicadores para detectar los fotones Cherenkov, pero algunos detectores utilizan cámaras de gas multialámbricas con vapores fotosensibles para detectar la radiación.

Existen algunos detectores Cherenkov que se utilizan para identificar partículas. Los *contadores Cherenkov de Umbral* son utilizados con esta finalidad. Distinguen entre dos partículas que poseen el mismo momento bajo el principio de que atravesando el radiador una partícula radie y la otra no (al estar por debajo del umbral).

Otros detectores proporcionan información sobre la velocidad. Los *contadores diferenciales Cherenkov* aceptan partículas que poseen un cierto intervalo de rapidez. La cota inferior es impuesta por el umbral, y la superior por el ángulo de reflexión interna total del radiador.

El *contador Cherenkov de anillo* es un tipo detector que puede ser utilizado para identificar partículas u obtener información de su velocidad. Poseen un espejo esférico de radio  $R_s$ , una superficie detectora de radio  $R_D$  ubicada en el punto focal del espejo y un radiador entre las superficies (figura 3.6). La luz Cherenkov es reflejada por el espejo emitiendo una señal en el detector. Al medir la distancia  $r$  desde el punto donde paso la partícula sobre la superficie detectora y la señal reflejada se obtiene información de la velocidad. Si se conoce el momento, se puede utilizar  $r$  para identificar partículas.

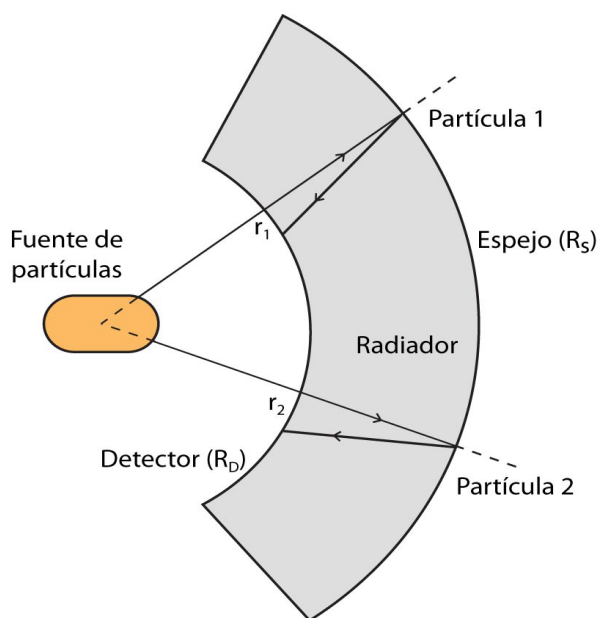


Fig.3.6. Elementos principales de un contador Cherenkov de anillo.



### 3.4.1. Detectores Cherenkov de agua

Los *detectores Cherenkov de agua* son utilizados en astrofísica para detectar las cascadas producidas por rayos cósmicos y rayos gamma. Como su nombre lo indica, el medio radiador es el agua, que está contenida en recipientes que varían según la aplicación. Existen contenedores de varios miles de litros de agua, como en el observatorio Pierre Auger [21] hasta grandes reservorios de decenas de toneladas de agua como en Milagro. Los fotones generados en el radiador son detectados por fotomultiplicadores. La cantidad de PMT's empleados también es distinta. En Auger se utilizan tres por cada detector, en Milagro se utilizaron 723 en un sólo arreglo, y en HAWC se pretende usar uno por tanque. En algunos detectores la superficie interna de los contenedores está recubierta de algún material reflector que mejora la captación de fotones. La ubicación del PMT también varía. En algunos casos se coloca en la parte superior, por lo que un reflector difuso es necesario. En otros los fotomultiplicadores se disponen abajo, recibiendo directamente la radiación Cherenkov. Midiendo la cantidad de luz detectada en cada fotomultiplicador se puede hacer una estimación de la energía depositada por las partículas que radián en el contenedor. En algunos arreglos es posible determinar el tipo de cascada de acuerdo a la distribución de la señal producida. La siguiente figura muestra dos tipos de detectores Cherenkov de agua.

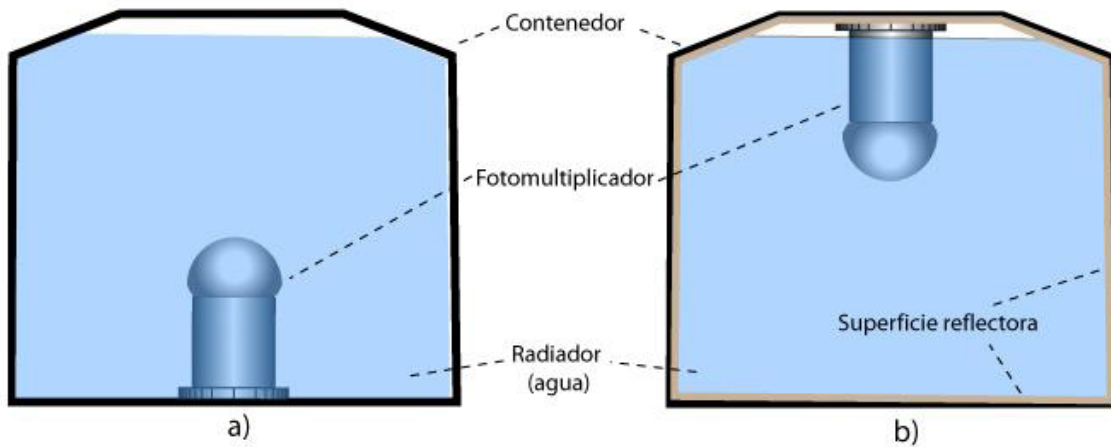


Fig.3.7. a) Fotomultiplicador ubicado en la parte inferior, b) Fotomultiplicador colocado en la parte superior.

# Capítulo 4

## Construcción del arreglo experimental

Este capítulo está dedicado a presentar todos los pasos que se realizaron para armar el arreglo experimental. Al inicio se introducen conceptos básicos de las señales. Subsecuentemente se da una breve explicación de la electrónica y los sistemas de adquisición de datos que se emplearon. Después se explica paso a paso el diseño y construcción del arreglo experimental. Se van detallando cada elemento del dispositivo: tanque, agua, fotomultiplicadores, centelladores, electrónica, cables, circuitos, estructuras mecánicas y otros componentes. Al final se habla sobre la caracterización del detector contemplando el primer análisis de las señales y un estudio de la oscuridad de los contenedores.

### 4.1. Características de las señales

En física de altas energías la información es extraída generalmente en forma de pulsos. Esto es porque la mayoría de los detectores operan de esta manera. Debido a esto es importante conocer las principales características de estas señales:

- La *línea base* es el nivel de voltaje o corriente en ausencia de pulso.
- La *altura del pulso* o *amplitud* es la distancia del valor máximo del pulso a la línea de base.
- El *ancho* de la señal se mide a la mitad del máximo del pulso.
- El *flanco de ascenso* es el costado del pulso que se forma primero.
- El *flanco de descenso* es el costado o cola que aparece al final.
- El *tiempo de ascenso* es el lapso que le toma al pulso crecer del 10% al 90% de su amplitud.
- El *tiempo de descenso* es el tiempo que invierte el pulso en decrecer del 90% al 10% de su amplitud.
- Los pulsos son *unipolares* cuando están presentes en su totalidad sobre un lado de la línea base y *bipolares* si están contenidas en ambas polaridades.

#### 4.1.1. Señales analógicas y señales digitales

Una señal analógica codifica en valores continuos la información variando una o más de sus características siguiendo una relación fija con la información. Considerando a cada pulso como un estado, se tiene que una señal analógica puede tomar una infinidad de estados. En contraste, una

señal digital o lógica sólo puede tomar un número discreto de estados. La información presentada de esta forma tiene una naturaleza cuantizada. Una señal analógica carga más información, pero una digital es más fácil de manejar y las distorsiones la afectan menos.

Las señales no se podrían observar si no existiera una electrónica que las generara. Por eso es importante conocer las características principales de los sistemas electrónicos y de adquisición de datos.

## 4.2. Electrónica para el procesamiento de las señales

Para analizar la información existen diversos sistemas electrónicos. Los circuitos para procesar las funciones básicas están contruidos en formas de módulos con estándares mecánicos, eléctricos y electrónicos específicos. De esta manera un arreglo en particular puede ser creado, simplemente colectando los módulos necesarios.

### 4.2.1. Sistemas electrónicos

El primer sistema estándar establecido fue el *NIM* (Nuclear Instrument Module) a principios de los años 60's. Los aparatos electrónicos básicos de este sistema tienen dimensiones convencionales de 3.34 cm de ancho por 22.23 cm de altura de tal forma que pueden embonar en alguna de las 12 entradas de una estructura llamada NIM bin. El voltaje específico proporcionado por el bin a cada elemento puede tomar 6 valores estándar +24 V,+12 V, +6 V, -6 V, -12 V o -24 V.

El sistema *CAMAC* fue diseñado como complemento para digitalizar la información analógica obtenida en el sistema NIM. Fue introducido en 1969 por ESONE (European Standards on Nuclear Electronics). Posee un controlador (chip) que modula la transferencia de información entre los módulos del CAMAC y la computadora. Los módulos poseen un tamaño estándar de 221.5 mm de altura por 17 mm de ancho que entran en una estructura llamada crate. El sistema CAMAC posee un módulo maestro que controla a los demás módulos y proporciona la interface con la computadora. Debido a la complejidad y el volumen de los datos generados en la física de altas energías, se requirió generar nuevos sistemas. Gracias a la explosión de la tecnología micro-computacional que se dio a finales de los 70's se crearon sistemas como el *VME* que poseían microcontroladores más veloces y con mayor control de información. El número de módulos que posee esta estructura puede tener varios valores así como el tamaño de las tarjetas [22]. La siguiente figura 4.1 muestra los tres sistemas electrónicos descritos anteriormente.

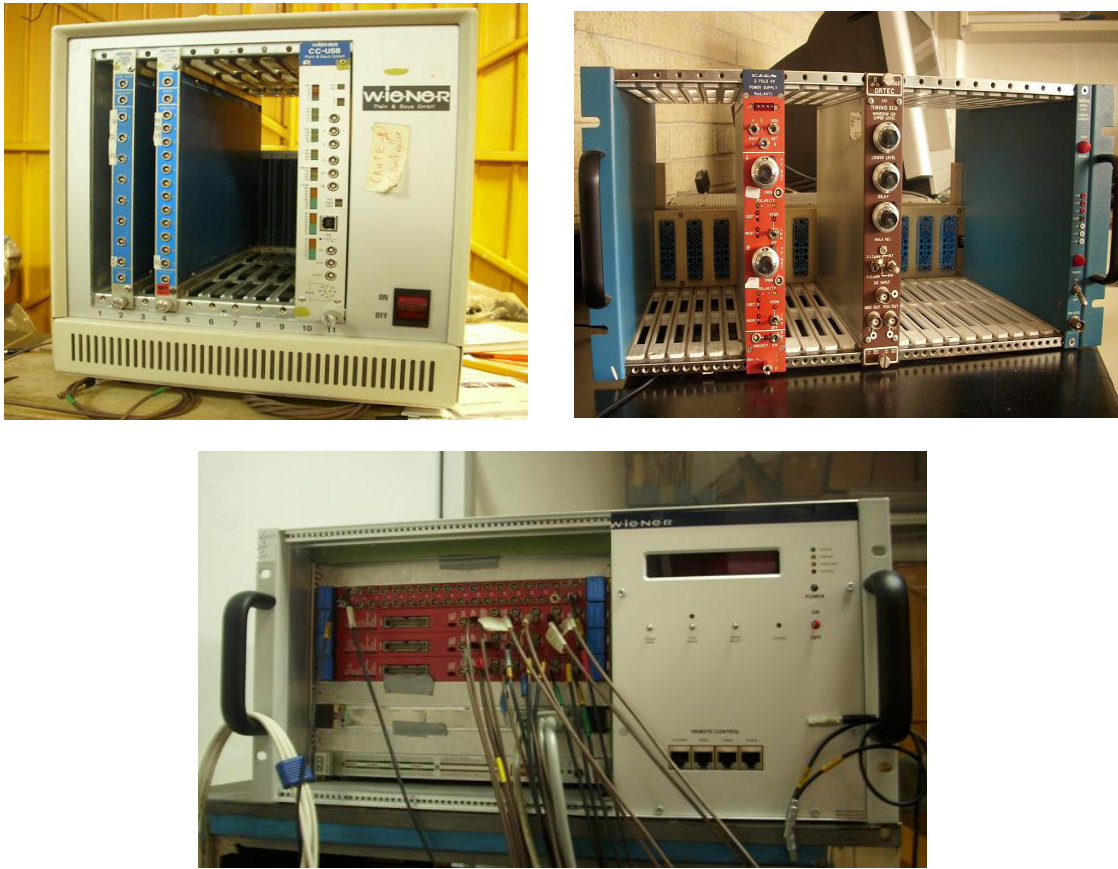


Fig.4.1. Se muestran fotografías de los sistemas con algunos módulos de electrónica. A la izquierda NIM, a la derecha CAMAC y abajo VME.

#### 4.2.2. Módulos de electrónica

##### Fan-out / Fan-in

Los Fan-out son circuitos que reproducen la señal de entrada en varias señales idénticas, tanto en altura como en forma. Los Fan-in, en cambio, aceptan varias señales de entrada sumándolas en la salida. Si los circuitos son lineales pueden trabajar con señales analógicas y digitales. Y al operar solo con las segundas, se les conocen como lógicos.

##### Caja de retrasos

Un generador de retrasos recibe una señal analógica o digital y la retrasa un tiempo determinado que es ajustable. De esta forma se logra acortar o alargar los caminos eléctricos de los pulsos. Los módulos de retrasos están compuestos de cables de varias longitudes lo que genera retrasos desde 0 ns hasta 64 ns.

### **Discriminador**

El discriminador es un módulo que responde solamente si la amplitud del pulso de la señal de entrada sobrepasa un nivel conocido como umbral. Al cumplirse la condición, la respuesta es una señal lógica. En este sentido, el discriminador es un simple convertidor de señales analógicas a digitales. El valor del umbral y el ancho de la señal de salida pueden ser ajustados en el panel del módulo. La función más importante del discriminador es generar una señal lógica a la llegada de un pulso bloqueando el ruido de baja amplitud que proviene del detector.

### **Fuente de alto voltaje**

La mayoría de los detectores de radiación requieren de voltajes elevados (kilo volts) para su operación. Este requerimiento es proporcionado por los módulos de alto voltaje. Generalmente el rango de operación va desde 0 hasta miles de volts. En la mayoría de los módulos la polaridad puede ser ajustada. La máxima corriente disponible varía según el módulo, por lo que se debe seleccionar de acuerdo a la aplicación requerida.

### **Contador**

El contador es un módulo que cuantifica pulsos lógicos durante cierto periodo de tiempo, el cual es controlado por un temporizador interno. El contenido registrado es mostrado continuamente en un indicador numérico ubicado en el panel frontal del módulo.

### **Unidad de coincidencia**

Las unidades de coincidencia determinan si dos o más señales lógicas coinciden en tiempo. Cuando esto ocurre generan una señal lógica de salida, de lo contrario no hay señal. La determinación electrónica de la coincidencia de dos señales puede llevarse a cabo de varias maneras. Un método consiste en utilizar una ventana de transmisión. En otro, se suman las señales y hacerlas pasar por un discriminador colocado a un voltaje umbral que deja pasar la señal sólo si los pulsos se superponen.

### **Convertidores analógicos-digitales (ADC)**

Los convertidores analógicos digitales ADC (Analog to Digital Converter) son módulos que convierten la información analógica en su equivalente forma digital. Existen diversos tipos de ADC. Algunos digitalizan la amplitud máxima, asignando un valor numérico a la altura del pulso. Otros digitalizan la carga total, que es la integral del pulso. Los primeros se conocen como sensibles a los picos y los segundos QDC (Charge to Digital Converter). El tiempo requerido para la digitalización de estos ADC es del orden de microsegundos. Existen otros convertidores llamados FLASH ADC que mapean el pulso, asociando una señal digital a cada altura seleccionada. La frecuencia de conteo está fija, y en otros puede llegar hasta los 2 GHz, es decir, tomar una muestra cada 0.5 ns.

### **Convertidor de tiempo a señal digital (TDC)**

Los convertidores de tiempo a señal digital TDC (Time to Digital Converter) son módulos electrónicos que asocian un pulso lógico a un intervalo de tiempo. El principio básico es utilizar una señal de inicio en una compuerta de entrada que pone en funcionamiento un contador a frecuencia constante hasta que otra señal llega a la compuerta y detiene el conteo. De esta forma se obtiene una cantidad que es proporcional al tiempo entre los pulsos inicial y final.

Las señales, la electrónica y los sistemas de adquisición de datos complementan la información recabada hasta el momento en capítulos anteriores. De esta forma se ha proporcionado una base para entender la construcción y el funcionamiento del dispositivo experimental.

### **4.3. Diseño y construcción experimental**

Para demostrar la hipótesis de que los pulsos que generan los muones en un detector Cherenkov de agua poseen parámetros distintos a las señales depositadas por algunas partículas que dominan la componente electromagnética era necesario construir un detector que tuviera las mismas características que tendrán de los detectores de HAWC (sección 1.4).

No significó un gran problema conseguir el fotomultiplicador, pues el grupo de altas energías del IF-UNAM<sup>I</sup> contaba con dos PMT's hemisféricos de 8 pulgadas que se emplearon en Milagro. Tampoco fue difícil conseguir el elemento radiador, pues el agua se obtuvo directamente de los grifos del IF-UNAM empleando un filtro para limpiarla de sedimentos y sales. La electrónica y los sistemas de adquisición de datos tampoco presentaron un gran dilema ya que se encontraban en los laboratorios del edificio Colisur del IF-UNAM.

Realmente el único factor que significó una incógnita y que al final modificó gran parte del diseño experimental fue el tanque. En el momento en que se inició este trabajo de tesis (agosto 2008), el grupo de altas energías del IF-UNAM que colabora en el proyecto HAWC estaba gestionando para ver si la empresa Rotoplas<sup>II</sup> podía construir los tanques con los requerimientos necesarios (5m de alto por 4 m de diámetro, aislamiento óptico y material inerte al agua). El material y el aislamiento óptico lo garantizaba la empresa empleando tanques de polietileno negro. El problema surgió en que tenían que determinar si podían construir tanques del tamaño requerido, pues el tamaño máximo que manejaban era de 4 m de alto por 3 m de diámetro. Mientras se resolvía el problema del tamaño, la empresa cedió un tanque de menores dimensiones a petición de la colaboración de HAWC para hacer pruebas preliminares de su opacidad. Entonces se contaba con un tanque que si bien era de

---

I Instituto de Física de la Universidad Autónoma de México.

II Empresa mexicana que fabrica tinacos y cisternas comerciales.

mucho menor tamaño, se podían hacer algunas pruebas en él. Aún así se buscó conseguir el tanque más grande que la empresa podía construir, pero esto iba a tardar algunos meses debido al tiempo de fabricación, a los costos, al traslado y a que no se contaba con un lugar óptimo para colocar el tanque. Por lo tanto se decidió hacer las pruebas en el tanque pequeño. Si bien el tamaño no era el óptimo para hacer las pruebas, se optó por emplearlo pues podía significar una gran ventaja para el proyecto HAWC. El uso de tanques tan grandes se debe a que se optimiza el rechazo de fondo y la detección de gammas. Como se mencionó en la sección 1.4, a mayor profundidad las señales de los muones son más claras, pero esto tiene un costo pues las señales de los electrones y positrones se atenúan. En tanques pequeños los pulsos generados por la componente electromagnética se observan mejor pero las señales de los muones se debilitan. De esta forma el método propuesto para discriminar eventos empleando tanques pequeños no sería eficiente. Pero, en dado caso de que la hipótesis fuera cierta y se pudiera establecer un método eficiente para discriminar eventos en tanques de menores dimensiones, se podría evitar el requerimiento de hacer tanques tan grandes lo que reduciría significativamente costos y tiempos. Esto significó un plus que justificó el uso de un tanque pequeño en el diseño experimental.

No bastaba contar con un detector Cherenkov de agua (Fotomultiplicador, radiador, electrónica, sistemas de adquisición de datos y contendor) al estilo de HAWC- pero a una escala pequeña- para probar el objetivo. Para probar la hipótesis era necesario poder identificar muones, por lo cual se optó por agregar al diseño experimental dos paletas centelladoras. Se necesitaban colocar arriba y abajo del tanque, por lo que se tuvo que construir una estructura que las soportara. Además para el diseño, se decidió conectar las paletas al mismo sistema de adquisición de datos para digitalizar sus pulsos y hacer una comparación con las señales de los fotomultiplicadores.

Dada la pequeña escala del tanque se decidió montar todo el arreglo experimental en los laboratorios del edificio Colisur del IF-UNAM, aprovechando que la electrónica y el sistema de adquisición de datos se hallaban también en ese lugar.

En los siguientes apartados se explica la construcción del arreglo experimental brindado una descripción detallada de cada elemento del detector.

### **4.3.1. Tanque**

Como ya se mencionó, para representar una celda del experimento HAWC se trabajó con el tanque de polietileno negro proporcionado por la empresa Rotoplas. Su capacidad es de 500 litros y sus dimensiones son de 84 cm de diámetro por 80 cm de altura.

En un tanque completamente opaco, se obtienen señales limpias, son contaminación por luz natural. Los tinacos comerciales negros (que se emplean en la mayoría de los recintos habitacionales) deben

impedir el paso de la luz para evitar que la fotosíntesis pueda crear microorganismos en el agua. Son fabricados con 1% de polvo de grafito en relación con la masa de resina plástica utilizada. Aún así pueden existir filtraciones de luz que en el caso de HAWC deben ser tomadas en consideración pues generarían ruido en las señales. Para lograr una opacidad total del tanque, Rotoplas utilizó 1.5% de polvo de grafito con un tamaño de grano que es cien veces más pequeño que el empleado en los tanques comerciales, para lograr una red más fina que obstaculice el paso de fotones.



Fig.4.2. Fotografía que muestra el tanque utilizado en el experimento.

### 4.3.2. Agua

El detector Cherenkov requiere agua como elemento radiador fundamental. Ésta debía estar libre de sedimentos los cuales podrían obstaculizar la ventana del fotomultiplicador. Además no tenía que contener radicales libres pues las propiedades ópticas se podrían ver afectadas. Se hizo énfasis especial en eliminar el cloro ya que este elemento puede absorber parte de la radiación que se emite en el intervalo donde el fotocátodo es más eficiente. Para eliminar los sedimentos se empleó un filtro, el cual poseía carbono activado por lo que también retiraba los radicales libres.

Para llenar el tanque se emplearon 15 metros de manguera y un acoplador. Se suministraron aproximadamente 400 litros de agua al tanque en 3 horas. Antes del llenado, fue necesario limpiarlo para remover toda suciedad y polvo para evitar que las señales fueran alteradas por estos agentes extraños.

### 4.3.3. Fotomultiplicadores

Los fotomultiplicadores son elementos esenciales en un detector Cherenkov de agua. Como HAWC va a emplear todos los PMT's del proyecto Milagro, se trabajó precisamente con dos de



estos dispositivos. Son del tipo hemisféricos de 8 pulgadas, marca Hamamatsu modelo R5912. En la siguiente figura se muestra una fotografía de uno de los fotomultiplicadores.



Fig.4.3. Fotomultiplicador hemisférico de 8 pulgadas (Hamamatsu R5912).

De acuerdo a sus especificaciones los PMT's tienen un fotocátodo bi-alcalino, su ventana es borosilicato, su cadena de dinodos es de tipo malla. Resisten un voltaje máximo de 2000 V, una corriente máxima de 0.1 mA y operan adecuadamente entre -30 y 50 °C. El tiempo promedio de tránsito de los electrones es de 55 ns.

El intervalo de longitud de onda que abarca la eficiencia cuántica para estos fotomultiplicadores va de 300 a 650 nm con un máximo de sensibilidad en 420 nm. En cuanto a la ganancia el valor típico de  $10^7$  electrones se alcanza cuando el fotomultiplicador opera a un valor de 1500 V. La figura 4.4 muestra la curva de la eficiencia así como la gráfica de la ganancia como función del voltaje.

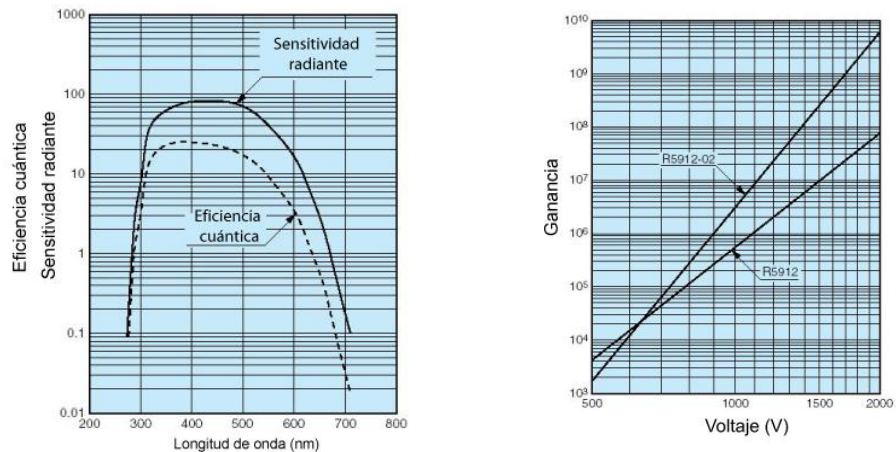


Fig.4.4. Gráficas de la eficiencia cuántica y la ganancia de los fotomultiplicadores R9512.

Dentro del tanque se colocaron los dos fotomultiplicadores. Uno de ellos debía permanecer en el fondo del contenedor. El peso del dispositivo es de  $3.6 \pm 0.1$  kg y se estimó que tenía un volumen total de  $9.495 \times 10^{-3} \pm 0.138 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>. Entonces dentro del agua el fotomultiplicador tiene una fuerza ascendente de  $5.90 + 0.24$  kg-fuerza. Por lo tanto se necesita un objeto cuya fuerza neta dentro del agua sea descendente de 6 kg-fuerza o más. Primero se utilizaron botellas de plástico llenas de arena y barras de fierro con un peso aparente de 8 kg-fuerza. A pesar de que este arreglo si sumergió al PMT, resultó estorbo y muy rudimentario. Se optó entonces por utilizar un disco de fierro con un peso aparente de 7 kg-fuerza. Para evitar que el metal se oxidara se cubrió con un esmalte alquidálico anticorrosivo llamado “primer” marca (Comex).

También se trató de evitar la corrosión en los tornillos del PMT cubriéndolos de silicón transparente (marca Sista). Para sujetar el disco metálico al fotomultiplicador se utilizaron dos cinchos de plástico. De esta forma el PMT quedó listo para sumergirse. La ubicación en el centro del tanque fue relativamente sencilla debido a que el peso aparente de todo el arreglo dentro del agua fue de 1 kg-fuerza.

El otro fotomultiplicador se colocó en la tapa, con el fotocátodo viendo hacia el fondo del tanque. Se barrenaron cuatro orificios en la tapa por donde se hizo pasar cuatro tornillos de fierro para sujetar el fotomultiplicador. A pesar de que el agua no llegaba hasta los tornillos, se cubrieron de silicón transparente para evitar la corrosión.

#### **4.3.4. Atravesadores**

Los cables que llevan la señal y el alto voltaje de los PMT's salen por dos orificios barrenados en la tapa. Para evitar la filtración de luz se utilizaron dos atravesadores contruidos y diseñados en el taller del edificio Colisur del IF-UNAM. Estos, son prismas rectangulares hechos de nylamid que tienen un conducto que dobla el cable 90 grados haciendo que salga paralelo a la tapa; permitiendo que la luz tenga que recorrer más distancia y se deba reflejar dentro del atravesador antes de poder entrar al tanque; esto reduce significativamente la posibilidad de que existan filtraciones. Si el cable se extrajera de forma perpendicular, la luz podría atravesar fácilmente y provocar mucho ruido en las señales. La figura 4.5 muestra fotografías de los atravesadores.

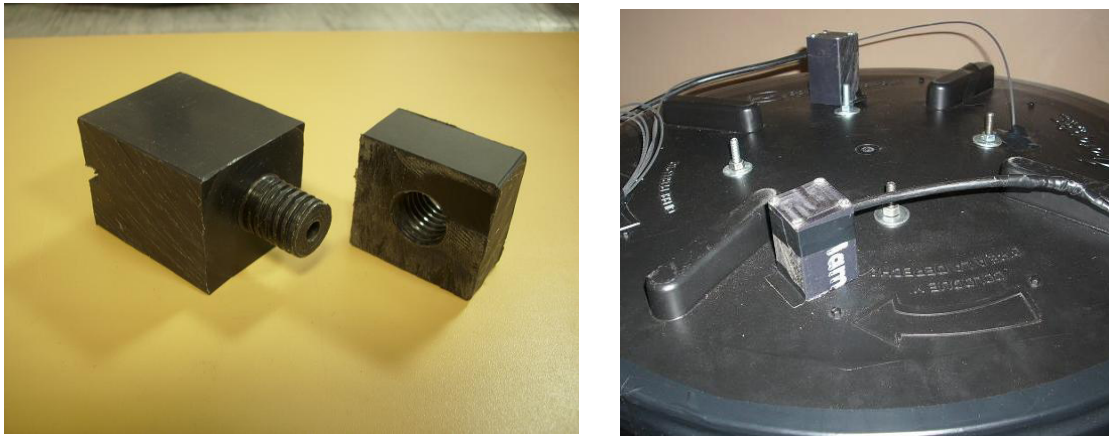


Fig.4.5. A la izquierda se observa una fotografía del travesador. A la derecha se muestra el acoplamiento a la tapa y el cable.

A pesar de que los travesadores estaban bien elaborados y se acoplaban muy bien a la tapa del tanque, se llegó a observar que la tasa de conteo aumentaba si con un espejo se hacía incidir luz natural sobre los travesadores. Debido a esto se tuvo que colocar cinta negra entre los travesadores y la tapa, y entre los travesadores y la salida de los cables. Por último, para mejorar el blindaje ante la luz se pusieron mantas negras sobre la tapa del tanque.

#### 4.3.5. Circuito desacoplador

Como ya se mencionó, la señal de los fotomultiplicadores viene en el mismo cable donde se suministra el alto voltaje. Debido a esto es necesario desacoplarlos para poder analizar los pulsos. Esto se logra con el circuito que se muestra en la siguiente figura:

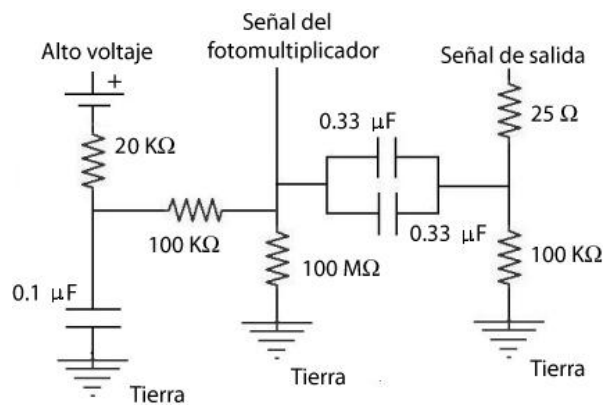


Fig.4.6. Esquema del circuito desacoplador.

El diseño de este circuito fue hecho por el grupo de investigación del proyecto Milagro [23]. Se contaba ya con un circuito desacoplador realizado dos años antes por el grupo de altas energías del IFUNAM (caja plateada, figura 4.7); entonces fue necesario construir otro circuito para poder analizar las señales de los dos fotomultiplicadores al mismo tiempo (caja negra, figura 4.7).

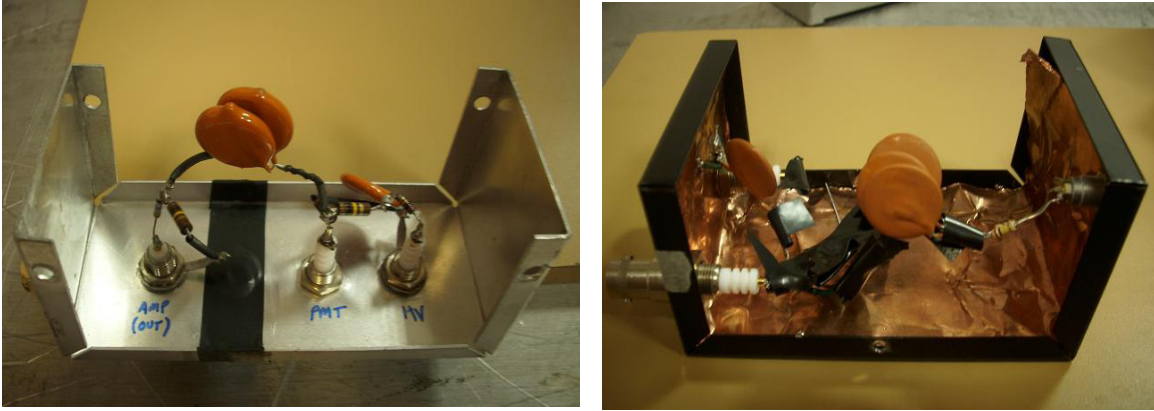


Fig.4.7. Fotografías que muestran los elementos de los circuitos desacopladores.

#### 4.3.6. Detectores de centelleo

Se utilizaron dos detectores de centelleo para poder hacer una discriminación de las partículas que detectaban los fotomultiplicadores dentro del tanque (figura 4.8).

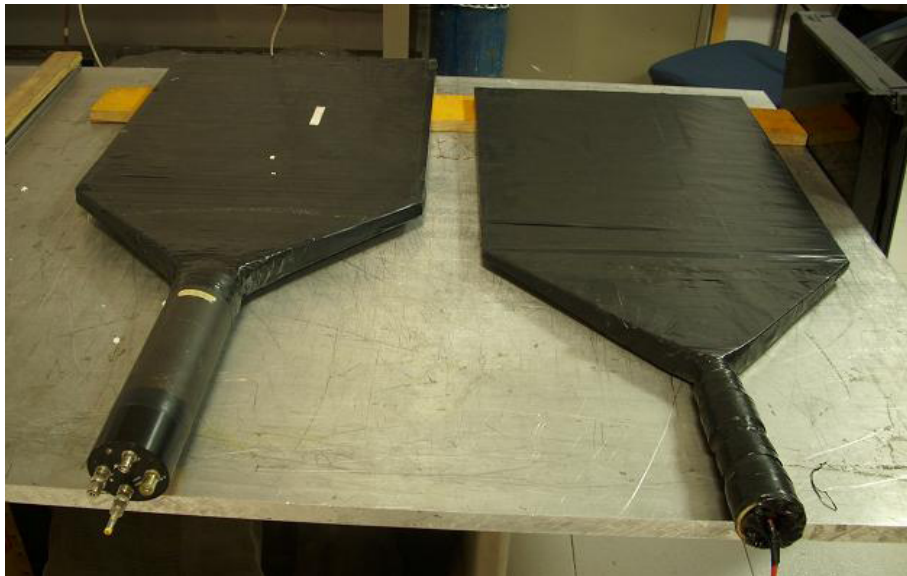


Fig.4.8. Detectores de centelleo.

Los detectores emplean centelladores plásticos de la marca Bycron, con las mismas dimensiones: 60 cm x 50 cm x 2 cm. En contraste, los fotomultiplicadores son distintos: Photonis modelo XP2020 y Hamamatsu modelo R6231. Para acoplar los centelladores a los PMT's se utilizaron dos guías de lucita de forma trapezoidal<sup>1</sup>. La que esta acoplada con el XP2020 tiene bases de 50 cm y 10 cm y una altura de 22 cm; la otra posee bases de 50 cm y 5 cm por 23 cm de altura. Tanto los centelladores como las guías de luz están forrados con aluminio para mejorar la captación de luz a través de la reflexión especular. Encima de la capa de aluminio se colocó una capa de cinta negra para evitar que haya filtraciones de luz natural que contaminen las señales de los PMT's.

Estos detectores de centelleo fueron construidos en el CERN y traídos a México por el grupo de altas energías del IF-UNAM hace algunos años. La paleta con el fotomultiplicador XP2020 se operó tal cual como se encontró. Sin embargo se tuvieron que hacer reparaciones y modificaciones al otro detector. De entrada el centellador y la guía de luz estaban separados, por lo que se procedió a unirlos. Se separaron con mucho cuidado las capas de cinta negra y aluminio para poder lijar y limpiar las superficies de contacto; después se unieron con pegamento epóxico transparente (marca Polytec) y se regeneraron las capas de aluminio y cinta negra. Otro aspecto que se debía modificar era el acoplamiento entre la guía de luz y el fotomultiplicador. El plástico de PVC que los unía limitaba la superficie de captación de luz del PMT. Se diseñó y construyó otro acoplamiento de metal en el Taller del edificio Colisur. Con esta pieza, se unió de nuevo el PMT y la lucita utilizando cinta negra. Con esas modificaciones, el detector quedó listo para usarse en el experimento.

#### 4.3.7. Montaje del tanque

Era necesario poder colocar las paletas tanto por debajo como por encima del tanque. Se tuvo que construir una estructura de madera que permitiera cumplir este requerimiento. Para poder colocar los detectores de centello por debajo se colocó el tanque sobre una base hecha con dos polines de madera y dos tablas. Y para poder situar las paletas por arriba se hizo una montura de madera en forma de prisma rectangular con una tabla en la parte superior. La figura 4.9 muestra un esquema de estos arreglos.

---

<sup>1</sup> Burdamente se conoce a esta forma como cola de pescado [13].

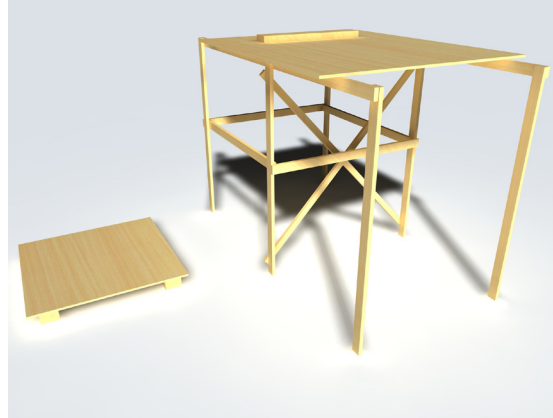


Fig.4.9. En el lado izquierdo de la imagen se observa la tarima que permite colocar el tanque y una de las paletas centelladoras. En el lado derecho se tiene la estructura que soporta la otra paleta centelladora. La tabla superior se puede mover lo que permite modificar la posición de la paleta centelladora.

#### 4.3.8. Arreglo experimental

Sin considerar la electrónica y el sistema de adquisición de datos la parte experimental que corresponde a lo que se llama coloquialmente como “hardware” está prácticamente cubierta con todo lo descrito anteriormente. Pero como en todo experimento, fue necesario ir modificando algunos elementos del dispositivo (en cada caso los cambios se mencionan en la sección correspondiente). La esencia del arreglo experimental se ilustra en la siguiente figura.

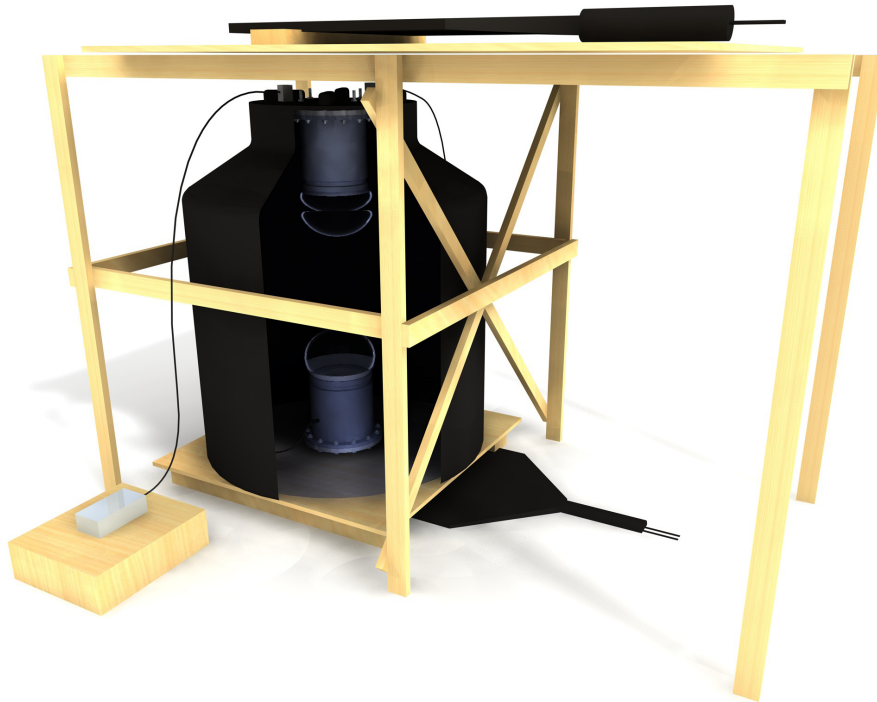


Fig.4.10. Esquema del arreglo experimental.

Los sistemas electrónicos se describirán en las siguientes dos secciones. No se incluyeron en la figura 4.10 porque cambian mucho de acuerdo a la configuración que se requiere utilizar. Cuando sea pertinente, se mencionará la instalación de los respectivos sistemas de electrónica.

#### 4.3.9. Especificaciones técnicas de los cables

Se recurrió al uso de dos tipos de cables para hacer las conexiones eléctricas y electrónicas. Se emplearon *cables coaxiales RG58* para proporcionar el alto voltaje a los fotomultiplicadores. Esto es comúnmente utilizado en la instrumentación de física nuclear. Tienen un diámetro de 0.50 cm, una impedancia característica de  $54 \Omega$ , una capacitancia lineal de  $93.5 \text{ pF/m}$  y una velocidad de propagación de  $0.66c$ . Para conectar estos cables se emplean *conectores SHV*, que soportan altos voltajes. Para hacer las conexiones entre los módulos de electrónica y para extraer la señal de los fotomultiplicadores de los circuitos desacopladores se utilizaron cables coaxiales miniatura de 3 mm de diámetro con conectores tipo push-pull conocidos como *LEMO* de  $50 \Omega$  de impedancia<sup>I</sup>. Estos cables son un estándar que puede operar en los sistemas NIM, CAMAC y VME. Para conectarlos entre los diversos módulos de electrónica son requeridos *conectores BNC* (Bayonet Nelly-Concelman), diseñados para radiofrecuencias de GHz. En la figura 4.11 se muestran los cables mencionados con anterioridad así como sus conectores.

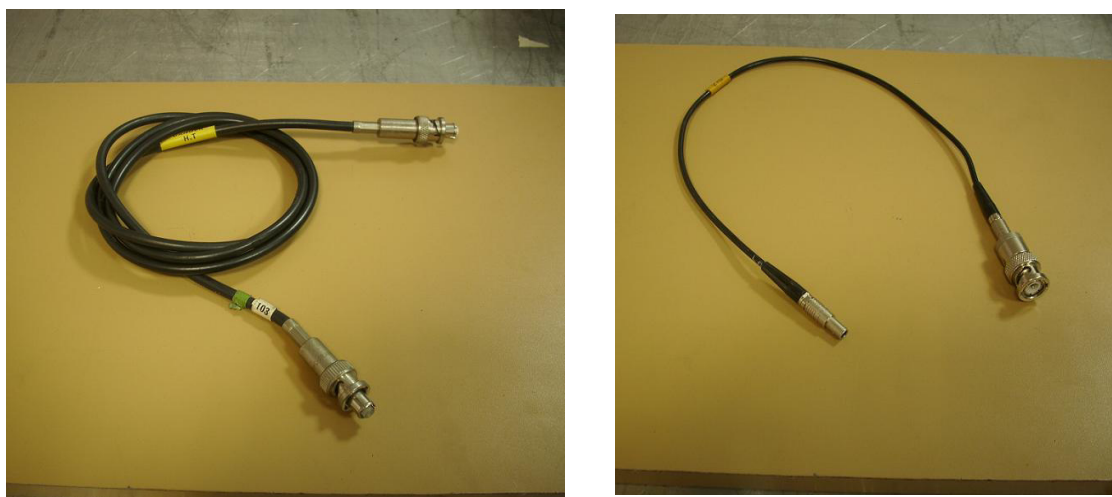


Fig.4.11. A la izquierda se muestra el cable coaxial RG58 con el conector SHV. A la derecha se tiene el cable coaxial miniatura y sus conectores (el pequeño es el push-pull).

---

I En secciones subsecuentes se les denominará a estos cables como LEMO.

#### 4.3.10. Especificaciones técnicas de la electrónica

La electrónica utilizada para el procesamiento de las señales fue instalada en un crate del sistema NIM marca Mech-Tronics Nuclear, un sistema CAMAC marca WieNeR Plein & Baus GmbH y un sistema VME marca WieNeR Plein & Baus GmbH.

Los módulos utilizados en el sistema NIM fueron los siguientes:

- *Discriminador* marca CAEN modelo N844. Posee 8 canales independientes con niveles de umbral ajustables desde 1 mV hasta 255 mV.
- *Fan in/out* marca Phillips Scientific modelo 740. 4 canales con 6 entradas o salidas. Nivel ajustable de offset desde 0 a  $\pm 500$  mV.
- *Unidad de coincidencia* marca LeCroy modelo 365 AL. Tiene 2 canales con 4 entradas lógicas. Maneja hasta 4 niveles de coincidencias.
- *Contador* marca ORTEC modelo 871. Display digital de 8 canales. Incluye un contador de tiempo.
- *Caja de retrasos* marca ORTEC modelo DB463. Posee 4 secciones independientes. Los retrasos van desde 0 hasta 63.5 ns.
- *Fuente de poder* marca Canberra modelo 3002 D. El rango de voltajes va desde 0 hasta 3 kV en las dos polaridades. Soporta corrientes de hasta 10 mA.
- *Fuente de poder* marca Canberra modelo 3125. Es una fuente dual que alcanza voltajes hasta de 5kV en ambas polaridades y corrientes de hasta 300 $\mu$ A.

En el sistema CAMAC se hizo uso de los módulos:

- *Tarjeta controladora* marca WieNeR Plein & Baus GMBH modelo CC-USB.
- *TDC* marca LeCroy modelo 2228A. Posee 8 canales de entrada.
- *QDC* marca LeCroy modelo 2249A. Tiene 12 canales independientes.

Los módulos empleados en el sistema VEM:

- *Tarjeta controladora* marca CES (Creative Electronic Systems) modelo VMDIS 8004.
- *Flash ADC* marca CAEN modelo V1729. Posee 4 canales independientes y una frecuencia de muestreo de 2 GHz.

Además de estos sistemas de electrónica se empleó un *osciloscopio* marca Tektronik modelo TDS 2024B con cuatro canales que permitió ir analizando las señales en tiempo real y verificar si los detectores estaban funcionando correctamente antes de realizar la toma de datos en cada experimento.

Antes de armar el arreglo experimental descrito con anterioridad (sección 4.3), ver figura 4.10, fue necesario verificar que los elementos más importantes del dispositivo experimental -los



fotomultiplicadores- funcionaran correctamente. Además se verificó que el contenedor tuviera la opacidad requerida en el diseño del experimento HAWC.

## 4.4. Caracterización de algunos elementos del detector Cherenkov de agua

### 4.4.1. Primer análisis de las señales

Antes de montar los fotomultiplicadores en el arreglo experimental se verificó que estuvieran funcionando adecuadamente. Siendo necesario que se analizaran las señales de los pulsos cuando los PMT's estaban completamente tapados y no había fotones que llegaran a los fotocátodos. Para satisfacer esta condición se taparon las ventanas de los fotomultiplicadores con mantas negras y una cubierta de plástico negro. La potencia fue suministrada por una de las fuentes de alto voltaje<sup>I</sup> conectada al circuito desacoplador. La señal se extrajo para ser analizada en un osciloscopio. Los pulsos que se observaron poseen características correspondientes a la corriente oscura (sección 3.2.3.2). Para un voltaje de operación de 1700 V poseen anchos que varían entre 5 y 10 ns, amplitudes desde 200 mV hasta 600 mV, tiempos de ascenso de 5 a 10 ns y tiempos de descenso entre 5 y 10 ns. Se registró en la computadora<sup>II</sup> (figura 4.12) un pulso característico para uno de los fotomultiplicadores hemisféricos.



Fig. 4.12. Se muestra el pulso de la corriente oscura de uno de los fotomultiplicadores. Tiene un ancho de 7 ns, una amplitud de 450 mV, un tiempo de ascenso de 5 ns y un tiempo de descenso de 5 ns.

También se corroboró que los detectores de centelleo estuvieran listos para usarse. Para hacer esto se analizaron las señales que las paletas arrojaban cuando los rayos cósmicos secundarios las atravesaban. No se estableció ninguna técnica para discriminar los rayos cósmicos, así que cualquier

I Se utilizó una fuente de voltaje que no necesitaba ser conectada a un nim BIN (Camberra modelo 3002D).

II Para conectar el osciloscopio a la computadora y poder grabar las señales se utilizó un cable USB y el programa Open Choise Desktop (Tektronik). A menos se que indique, todas las figuras que muestran pulsos son obtenidas con este método.

partícula cargada proveniente de los chubascos atmosféricos dejaba señal en los dispositivos. Como en este caso si había fotones que llegaban a los PMT's ya no se pretendía observar la corriente oscura, si no pulsos que tuvieran la forma descrita por la ecuación 3.12 (véase sección 3.2.2.4). La electrónica fue la misma que se empleó en el análisis anterior: una fuente de alto voltaje y un osciloscopio. Al conectar ambos dispositivos se observaron pulsos con la forma esperada, por lo que se concluye que las paletas estaban trabajando correctamente, ver (figura 4.13).

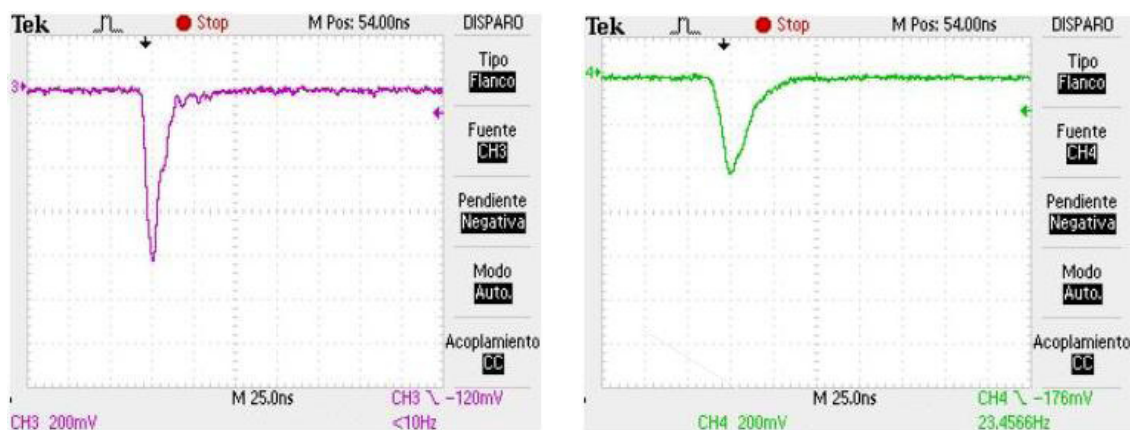


Fig.4.13. Del lado izquierdo se muestra el pulso de la paleta que tiene el fotomultiplicador XP2020. En el otro extremo el pulso de la otra paleta.

#### 4.4.2. Opacidad del tanque

La propuesta experimental para medir la opacidad el tanque fue colocar uno de los fotomultiplicador hemisféricos de 8 pulgadas (Hamamatsu modelo R5912) dentro del tanque (solamente el PMT, sin agua de por medio) y comparar las tasas de conteo cuando la luz llegaba directamente al tanque y cuando no lo hacia.

Rotoplas garantizaba que el tanque cedido impedía el paso de los fotones a su interior debido a la cantidad y calidad del polvo de grafito usado para su fabricación (véase sección 4.3). Saber si esto era cierto o no, era un objetivo primordial para verificar que la empresa pudiera crear tanques con el aislamiento óptico necesario para HAWC.

Las pruebas comenzaron. Uno de los fotomultiplicadores hemisféricos de 8 pulgadas estaba colocado en la tapa de un tanque de 200 litros, ya que se había utilizado hace año y medio en un experimento que medía el ruido de fondo producido por las cascadas hadrónicas [23]. Empleando este arreglo, se puso el PMT dentro del tanque sellando la tapa con cinta negra. Además se cubrió con unas mantas negras para garantizar que por ahí no pasaran los fotones. El tanque se montó

sobre una pequeña plataforma con ruedas y se colocó afuera del edificio Colisur del IF-UNAM como se muestra en la figura 4.14.



Fig.4.14 Prueba de luz del tanque pequeño.

Para medir las tasas de conteo se requirió conectar la electrónica correspondiente. La energía eléctrica se suministró al fotomultiplicador a través de un módulo de alto voltaje conectado al circuito desacoplador (véase sección 4.3.6). Empleando un cable LEMO (con su respectivo conector BNC) se extrajo la señal del circuito y se conectó a un discriminador estableciendo un umbral de disparo de 15 mV. El pulso lógico de salida del discriminador se pasó a un contador que desplegaba en el display la cantidad de eventos producidos en un intervalo de 10 segundos. Todos los módulos de electrónica utilizados se conectaron a un bin NIM que les suministraba el voltaje necesario. Un esquema de las conexiones y una fotografía de los sistemas electrónicos se muestran en la figura 4.15.

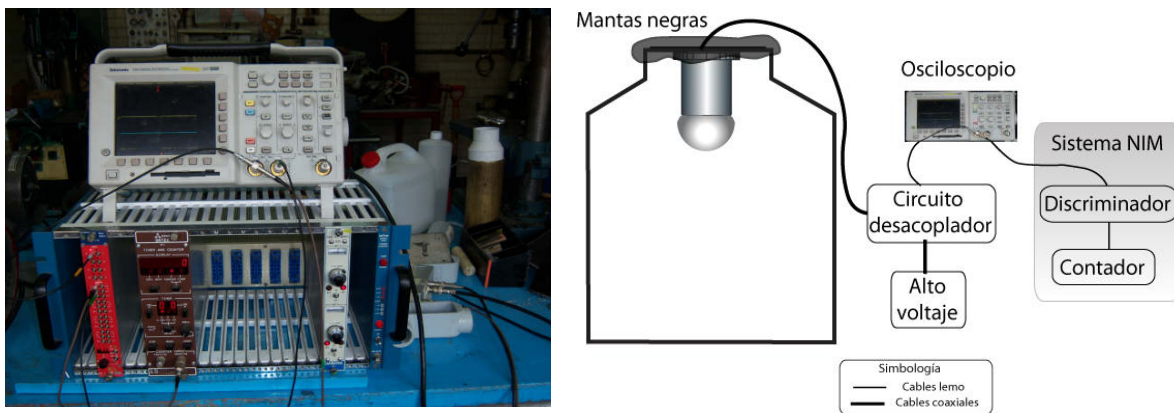


Fig.4.15. Diagrama en bloques y fotografía de los sistemas electrónicos.

Como se mencionó anteriormente se requería hacer mediciones en dos situaciones. Primero se registraron los eventos cuando la luz solar golpeaba directamente el tanque. Las tasas de conteo se midieron variando el alto voltaje de cien en cien desde 1300 V hasta 2000 V. Después, para evitar que la luz llegara al contenedor, se cubrió con una lona negra y se tomaron datos en las mismas condiciones de voltaje. En la siguiente figura se muestra la gráfica que compara las mediciones realizadas en las dos situaciones.

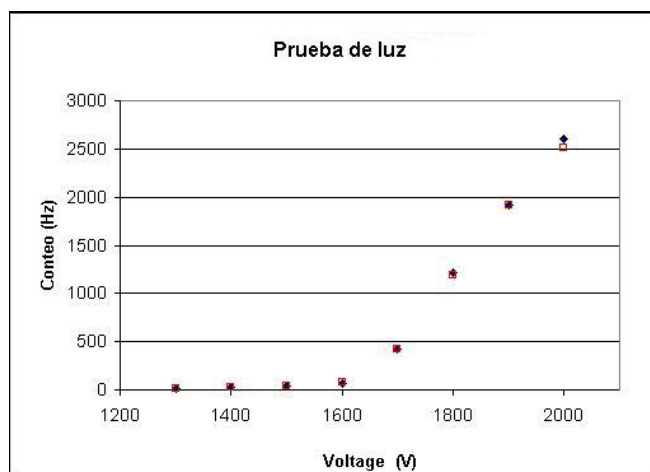


Fig.4.16. Gráfica comparativa. Los cuadros rojos representan los datos cuando el tanque estaba destapado y los rombos negros cuando estaba cubierto.

En la gráfica anterior se puede apreciar que las tasas de conteo presentadas en ambas condiciones se sobreponen, de lo que se concluye que efectivamente el tanque impide el paso de la luz. Esta característica era importante, pues de esta manera el contenedor pequeño representaba (a una escala menor) uno de los tanques que se planean utilizar el proyecto HAWC. Aunque esto aumentó la confianza de que la empresa Rotoplas podía construir tanques completamente opacos, era necesario hacer pruebas en otros contenedores. Cuando el grupo de altas energías del IF-UNAM adquirió el tanque comercial más grande que Rotoplas podía construir (3 m de diámetro por 4 metros de altura) se realizaron las pruebas para ver si el contenedor tenía el aislamiento óptico requerido (figura 4.17).

Se dispuso entonces un arreglo experimental parecido al anterior. Los módulos, la electrónica y las conexiones fueron las mismas y de nueva cuenta se colocó el fotomultiplicador dentro del tanque sellándose la tapa con cinta y mantas negras para evitar que la luz entrara. De igual forma se tomaron datos cuando la luz llegaba directamente; pero la otra condición se modificó. Como el tanque era muy grande, no fue práctico cubrirlo con una lona negra. En cambio se tapó directamente el fotomultiplicador dentro del contenedor con una caja y unas mantas negras. El rango de voltajes para la toma de datos fue el mismo: de 1300 V hasta 2000 V con variaciones de centena en centena.



Fig.4.17. Pruebas para verificar la completa opacidad del tanque grande.

De igual forma se esperaba que los datos se superpusieran en las gráficas, lo cual indicaría que no entraba luz al tanque. Sin embargo se observa (figura 4.18) que la tasa de conteo aumentó cuando el PMT se destapó. Es importante destacar que el aumento no fue muy significativo, lo que indica que es poca la luz que entra al tanque. Cuando existe una filtración considerable el conteo puede aumentar en 4 o 5 órdenes de magnitud. Por ejemplo cuando se vio que entraba luz a través de los atravesadores (sección 4.3.5) las tasas de conteo se dispararon de decenas de miles hasta decenas de millón para un voltaje de operación de 1800 volts. En este caso, para el mismo voltaje de operación se tiene un aumento de menos del doble en el número de cuentas. Se colige entonces que la luz que entra al tanque es mínima y el contenedor sirve para los fines propuestos.

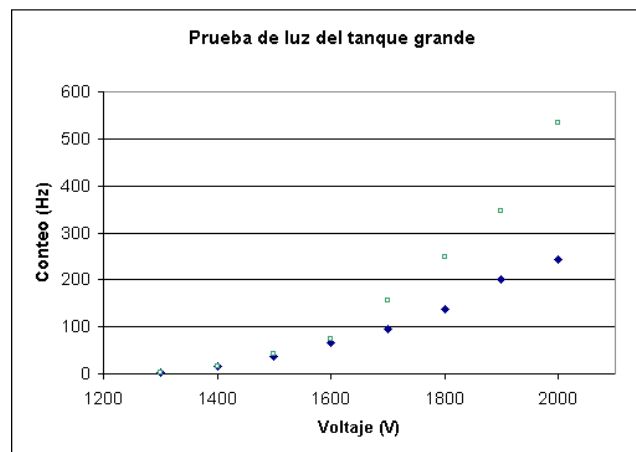


Fig.4.18. Gráfica comparativa. Los puntos en azul representan las tasas de conteo cuando el fotomultiplicador estaba tapado y los puntos verdes cuando estaba sin cubierta.

Si bien es un hecho que existe luz que se filtra, no es concluyente que se deba a que el tanque no sea completamente opaco. Lo anterior se debe a que se observaron en la superficie exterior del contenedor ralladuras que se formaron cuando se trasladó y colocó en su posición final. Los fotones podrían bien atravesar por la superficie o por algún orificio en las partes maltratadas. Una prueba para verificar o descartar la hipótesis sería taponarlo de alguna forma y comparar las mediciones. Si las tasas de conteo se reducen, entonces la superficie dañada fue responsable de la filtración de luz. Esto traería como consecuencia que se debe controlar mejor las condiciones de traslado y movimiento del tanque para evitar que se dañe (golpes o raspones). Si bajo esta condición los conteos no cambiaran, entonces el tanque no sería completamente opaco y la empresa Rotoplas tendría que mejorar este aspecto tan importante en su fabricación.

# Capítulo 5

## Caracterización del detector Cherenkov de agua

Este capítulo está destinado a presentar los resultados de las mediciones realizadas en el arreglo experimental. Los resultados están divididos en tres bloques. En el primero se muestran las primeras mediciones hechas para verificar que el dispositivo operaba adecuadamente (detección de muones verticales). En el segundo bloque se discute sobre un estudio realizado en el tanque para ver cuanto mejoraban las señales del fotomultiplicador colocado en la tapa si se ponía un material reflector en el fondo. Esto con el objetivo de observar que tan viable era la idea de aprovechar un fotomultiplicador en la parte superior para ganar un poco de altura en los tanques de HAWC. En el tercero se muestran los resultados de la caracterización. Se describen los pasos experimentales que se siguieron para identificar cada una de las señales: muones verticales, muones que se detienen en el tanque y de los electrones del decaimiento. Al final se muestran los resultados de la caracterización de los parámetros y se hacen las respectivas comparaciones entre las señales para ver si existe alguna diferencia.

### 5.1. Verificación de la detección de muones verticales

Una vez que se terminó de construir todo el arreglo experimental (descrito en la sección 4.3, e ilustrado en la fig. 4.10) se procedió a verificar que operara adecuadamente. Si bien ya se había probado que algunos elementos individuales funcionaban correctamente, como los fotomultiplicadores y los detectores de centelleo (sección 4.4.1), y que el tanque cumpliera con una total oscuridad, ahora era necesario checar todo el dispositivo experimental en conjunto.

El plan era corroborar que el arreglo era capaz de detectar rayos cósmicos secundarios, en específico muones atmosféricos. Aquí es donde toman importancia las paletas centelladoras. De las partículas producidas en los chubascos de rayos cósmicos (véase sección 2.3) los muones son los únicos que pueden atravesar los dos centelladores y el tanque, dejando señal en todos los detectores. Esto permite establecer una condición que se conoce como disparo. Todas las partículas cargadas relativistas que entran en el tanque emiten fotones Cherenkov que producen señal en los fotomultiplicadores hemisféricos. Como sólo se quiere analizar las señales que dejan los muones, se condicionan a que los PMT's hemisféricos emitan señal, siempre y cuando haya una señal al mismo tiempo en los detectores de centello, pues esto indica que pasaron muones. La disposición paralela de las paletas, una exactamente debajo de la otra, garantiza la observación de los llamados muones verticales, cuya trayectoria es perpendicular o casi perpendicular a los detectores de centello.

Los elementos más importantes del dispositivo experimental, los sistemas electrónicos y de adquisición de datos se muestran en la siguiente figura.

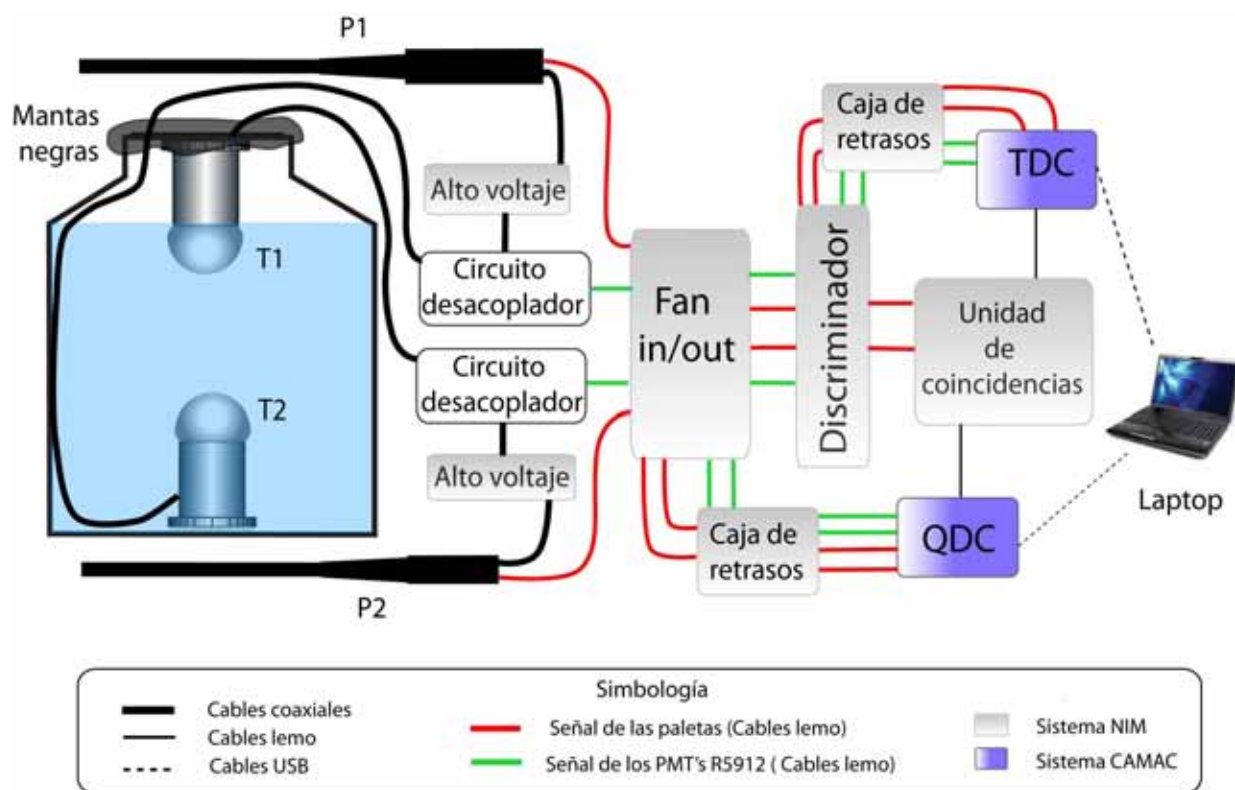


Fig.5.1. Arreglo experimental, electrónica y sistemas de adquisición de datos.

La lógica del dispositivo experimental y electrónico es la siguiente. Las señales de los centelleadores (P1 para el que está arriba y P2 para el de abajo<sup>I</sup>) se conectan al Fan in/out. De aquí las señales se dividen, una parte se manda al QDC (para integrar la carga de los pulsos) y la otra parte al discriminador que filtra las señales con un voltaje umbral de 30 mV para P1 y 20 mV para P2. De la salida del discriminador unas señales se conectan al TDC para analizar la resolución temporal de las paletas centelleadoras y otras al módulo de coincidencias. Cuando se tiene una coincidencia en el módulo lógico se emite un pulso digital que abre la ventana de integración en el QDC y emite la señal de inicio del TDC. Respecto a las señales de los fotomultiplicadores hemisféricos (T1 para el que está colocado en la tapa y T2 para el que está en el fondo) de primera instancia también son conectadas en el Fan in/out. De aquí una copia se manda al QDC para integrar los pulsos (dentro de la ventana de integración que manda el módulo de coincidencias) y la otra copia al discriminador con un umbral de 15 mV para ambas señales. Del discriminador los pulsos lógicos se conectan al

<sup>I</sup> Resultó conveniente etiquetar los detectores de acuerdo a su ubicación. Los detectores de centelleo se bautizaron con la letra P de paleta. Los fotomultiplicadores R5912 con T de tanque. El número 1 indica que está colocado a una altura mayor que el etiquetado con el número 2.



TDC para medir la resolución temporal de los PMT's hemisféricos. Los pulsos que van tanto al QDC como al TDC de todos los fotomultiplicadores se tuvieron que retrasar para que cayeran en la ventana de integración o llegaran después de la señal de inicio generada por la coincidencia.

Se conectó el sistema CAMAC a una computadora portátil empleando un cable USB. La adquisición de datos se realizó en una plataforma Linux (Scientific Linux) usando un programa en lenguaje C. Se empleó el software PAW como interface gráfica para visualizar y analizar los datos. Los voltajes seleccionados para que operaran los fotomultiplicadores fueron 1610 V para T1, 1450 V para T2, 2100 V para P1 y 1600 V para P2. Estos voltajes se seleccionaron al ver que las señales se comportaban adecuadamente. Cabe destacar que estos voltajes caen dentro de los correspondientes plateaus<sup>I</sup> de cada PMT [23]. Las curvas de distribución de carga y tiempo para 20000 eventos se muestran en las figura 5.2 y 5.3.

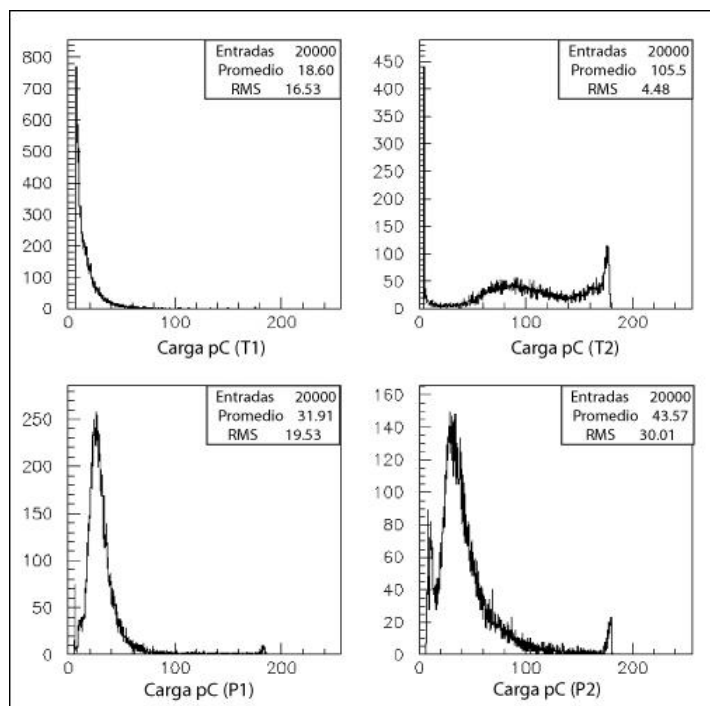


Fig.5.2. Gráficas de las distribuciones de carga. En la parte superior se encuentran las curvas para los fotomultiplicadores hemisféricos (T1 y T2 respectivamente) y en la parte inferior la de las paletas.

I Las tasas de conteo en un detector de agua Cherenkov o en un detector de centello están en función del voltaje aplicado. Al principio la curva crece muy rápido, llega a una zona con pendiente muy pequeña (casi nula) y al final se satura. La región plana se llama Plateau. Siempre se pretende operar en esta zona, pues asegura que el conteo no va a variar con pequeñas fluctuaciones del voltaje.

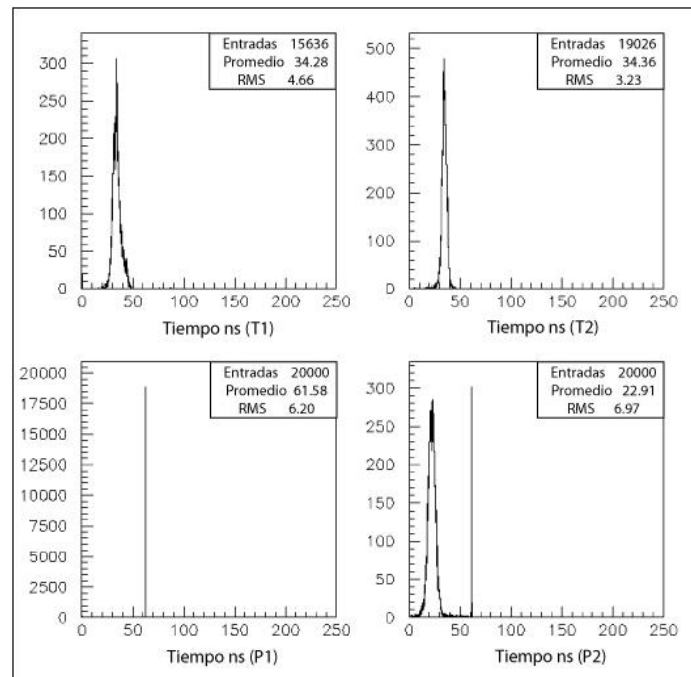


Fig.5.3. Gráficas de las distribuciones temporales. La ubicación de las gráficas es la misma que en la figura 5.2.

Las curvas de distribución de carga se comportan de la forma esperada. Al principio las 4 gráficas presentan un pico con una distribución de carga muy angosta. Este máximo relativo corresponde a lo que se conoce como pedestal, el cual es básicamente una señal ruidosa producida por fluctuaciones térmicas -corriente oscura- o fluctuaciones estadísticas (sección 3.2.3.2). Si se obtuvieran las distribuciones de carga de los fotomultiplicadores en condiciones de total oscuridad se obtendrían gráficas que tendrían solamente estos picos. Continuando con el análisis, tres de las distribuciones poseen otro máximo. En los detectores de centelleo es claro que estas señales son debidas a los muones verticales, pues son los únicos que podrían atravesar las dos paletas. Sin embargo, la señal que se observa en el fotomultiplicador hemisférico T2 podría no ser solamente de muones verticales, pues en el tanque pueden pasar también muones en otras direcciones y otras partículas cargadas provenientes de chubasco. Pero al comparar las señales con las obtenidas en otros estudios [17], [21] se correlacionan estos picos con los muones verticales debido a su forma y ubicación en la distribución. El fotomultiplicador que está en la tapa (T1) no ve el pico de muones, pero si le llega algo de luz que forma esa cola debido a reflexiones en la ventana de T2 o en las paredes. Existe una pequeña señal junto al pedestal de T1 (que va de los 20 pC hasta los 40 pC) que se cree es producida por los rayos delta<sup>I</sup> pues éstos pueden viajar de forma aleatoria dentro del tanque, y por lo tanto

I Los rayos delta son electrones muy energéticos que se liberan durante el proceso de ionización. Poseen tanta energía que a su paso pueden también arrancar otros electrones, transfiriéndoles parte de su energía.

producir fotones Cherenkov que podrían llegar al PMT<sup>I</sup>. Por último hay que mencionar que se presenta un señal de saturación al final de la curva del T2; se cree que ésta, se debe a la interacción de los muones con la ventana del fotomultiplicador hemisférico<sup>II</sup>.

Es importante que la resolución temporal de los fotomultiplicadores R5912 sea menor o del orden de un nanosegundo. Esto se debe a que la dirección de los frentes de onda de los chubascos de partículas se determina midiendo las diferencias relativas de tiempo de los diversos PMT's que componen el arreglo experimental. Por ejemplo, si todos los fotomultiplicadores emiten una señal al mismo tiempo, la dirección del chubasco es perpendicular a la superficie terrestre, pero si la señal se va emitiendo poco a poco en los diversos fotomultiplicadores el chubasco posee cierta inclinación. Entonces se necesita que los detectores posean una resolución temporal muy pequeña, para poder determinar con mayor precisión la procedencia de la cascada. En los espectros resultantes del TDC el valor del RMS es una medida que nos da una noción cercana de la resolución temporal. En las esquinas superiores derechas de las gráficas que corresponden a los fotomultiplicadores hemisféricos (ver figura 5.3) se observa que los valores de la resolución temporal son 4.6 ns para T1 y 3.2 ns para T2.

En general estas pruebas arrojan resultados positivos. Se pudo identificar la presencia de los muones verticales. A pesar de que la resolución temporal de los fotomultiplicadores hemisféricos no fue la esperada, se decidió proseguir con el experimento pues la respuesta temporal no era primordial en el estudio. Se concluye que el detector esta listo para usarse con el propósito por el cual fue construido ya que se corroboró que opera adecuadamente.

## 5.2. Reflector de aluminio

Una vez que se verificó que los fotomultiplicadores estaban trabajando correctamente al analizar los pulsos producidos por los muones verticales, se buscó ver que tanto mejoraba la señal del PMT que estaba en la tapa al colocar una superficie especular en el fondo que reflejara hacia arriba la radiación Cherenkov. Si llegara a existir un incremento sustancial, esto se podría tomar en cuenta para modificar la posición de los fotomultiplicadores dentro de los contenedores. Si bien esto no era una parte directa del proyecto, se convirtió en un plus que podría arrojar resultados positivos en la construcción del observatorio de gammas.

Los tanques que se planean utilizar en el observatorio HAWC deben cumplir ciertos requerimientos de altura (4.5 m), y como dicho estándar no es comercial, es difícil para las empresas hacer tanques de plástico de estas dimensiones. Hasta el momento la mejor propuesta es la de la empresa Rotoplas con tanques de una altura de 3.6 metros. Se tiene entonces, que la medida es menor a la requerida y al

---

I En la sección 5.3.3 se realiza un análisis más a fondo para ver si estas señales corresponden a los rayos delta.

II En la sección 5.3.1 se hace un estudio más afondo sobre las señales de los muones que interaccionan directamente con el fotocatodo.

colocar los fotomultiplicadores en el fondo de los tanques se pierden aproximadamente otros 30 cm. Si bien no se puede hacer nada con la altura intrínseca del contenedor, queda abierta la posibilidad de poder recuperar esos 30 centímetros al colocar el PMT invertido (viendo hacia abajo) y un reflector en el fondo. Esta hipótesis es razonable pero tiene un elemento adverso, y es en relación al hecho de que no todos los fotones Cherenkov que se reflejan en el fondo llegan hasta el fotomultiplicador pues algunos se pierden en las paredes del contenedor. A pesar de esto se quiere ver si la señal es útil para poder recuperar centímetros de agua con el fotomultiplicador en la parte superior.

La propuesta experimental es colocar una superficie reflectora de aluminio en el fondo del contenedor pequeño y comparar las señales que dejan los muones verticales con las señales que se obtuvieron en la sección anterior (en la cuales no se tiene el reflector). Casi todo el arreglo experimental permaneció igual; solamente se retiró el fotomultiplicador que estaba en el fondo y se colocó en su lugar una lámina circular de aluminio de 83 cm de diámetro y un milímetro de grosor (figura 5.4). Antes de sumergir la superficie reflectora se limpió con alcohol para evitar que agentes extraños modificaran las propiedades ópticas del agua.



Fig.5.4. Instalación de la superficie reflectora en el fondo del tanque.

La mayor parte de los sistemas electrónicos y de adquisición de datos no se modificaron; solamente se retiraron las conexiones que correspondían al fotomultiplicador que estaba en el fondo. Utilizando de nueva cuenta la configuración de coincidencias (con una paleta arriba y otra abajo para garantizar que las señales son producidas por muones verticales) se obtuvieron las gráficas de las distribuciones de carga y tiempo para 20 mil eventos de los detectores (ver siguiente figura).

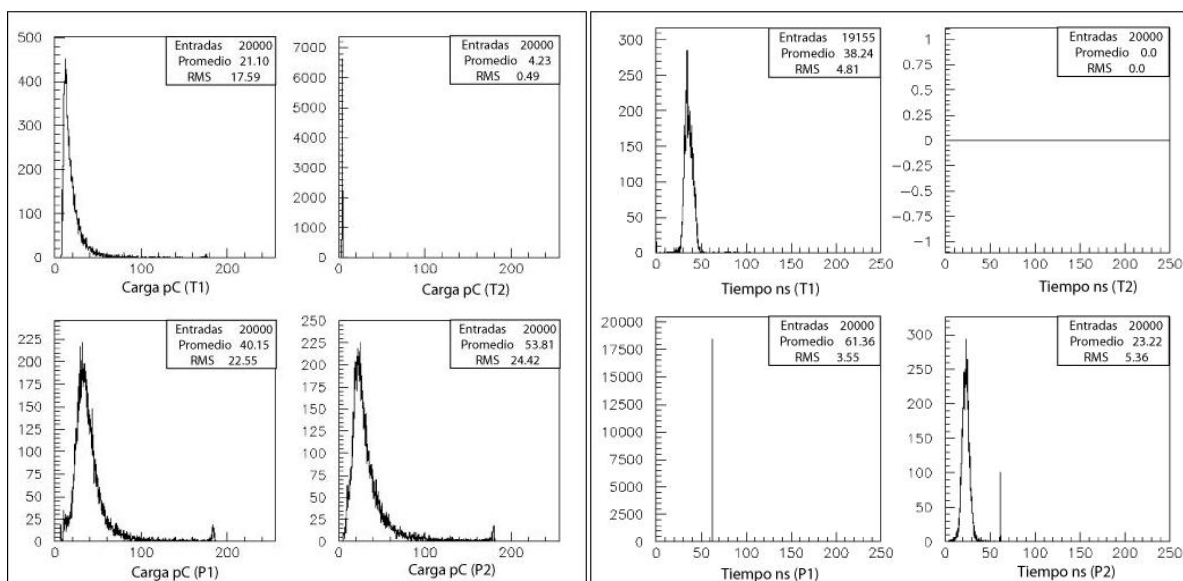


Fig.5.5. A la izquierda se muestran las distribuciones de carga y a la derecha las del tiempo para la configuración del tanque con reflector.

De entrada se observa que la curva de la distribución de carga para T1 (el PMT que está en la tapa) es muy parecida a la que se encontró cuando no estaba el reflector de aluminio (figura 5.2). Para hacer un mejor análisis se muestra la siguiente gráfica (figura 5.6) donde se presentan las curvas en ambas condiciones.

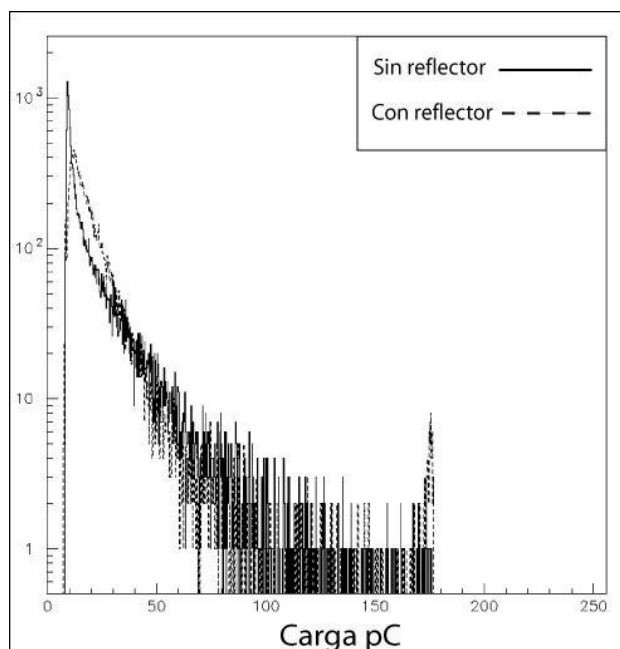


Fig.5.6. Gráfica comparativa. La curva con línea punteada representa la señal con reflector.

Se observa que la distribución de carga con reflector está recorrida un poco a la derecha respecto de la otra curva. Aunque existe un cambio, en esencia las curvas son casi iguales con pedestales y señales producidas por los rayos delta. Se esperaba un trazo que representara los muones verticales o algún indicio, pero no se obtuvo nada de esto. Ya se sabía que la señal no iba a ser tan grande como la del fotomultiplicador que estaba colocado en el fondo del contenedor, pero se esperaba ver un aumento mucho mayor con respecto a la curva sin reflector.

Para encontrar la explicación de este resultado se hizo un análisis de las trayectorias de reflexión de los fotones Cherenkov. Como los muones deben ser muy energéticos para poder atravesar los dos centelladores, el ángulo Cherenkov producido es casi de  $41^\circ$ . Esto aunado al hecho de establecer la condición de verticalidad se traduce en que las reflexiones especulares se den en un ángulo de aproximadamente  $49^\circ$ . En el esquema del tanque con las trayectorias de reflexión (figura 5.7) se ve que por sus dimensiones, los fotones no alcanzan a llegar al fotomultiplicador. Esta es la razón por la cual casi no se percibe señal de los muones verticales. Si bien al aumentar el diámetro del tanque llegarían más fotones, sólo una parte de ellos podrían llegar al PMT, por lo que los pulsos no aumentarían significativamente.

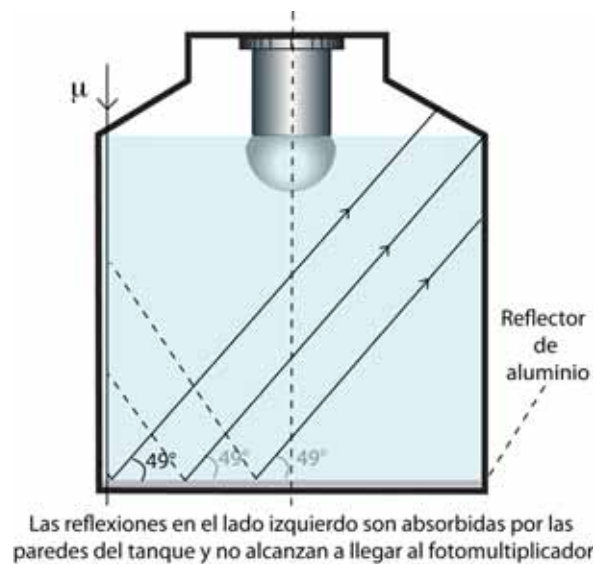


Fig.5.7. El esquema muestra algunas reflexiones que ocurren en el lado izquierdo del tanque. La radiación Cherenkov es producida por muones verticales<sup>1</sup>.

Aunque este análisis es para muones verticales, también se podría hacer para muones que atraviesan el tanque con otras direcciones. Si bien estos pueden reflejar fotones que podrían llegar al PMT, su

<sup>1</sup> Por claridad las reflexiones en el lado derecho no se muestran en el esquema pero su comportamiento es análogo.

señal siempre es menor que los verticales porque su trayectoria dentro del tanque es menor. Debido a esto, con ellos tampoco aumentaría mucho la señal en un fotomultiplicador colocado arriba.

De esta forma se concluye que la idea de colocar un reflector no es viable para poder aprovechar los 30 cm que se pierden si se pone el fotomultiplicador en el fondo.

### 5.3. Caracterización de las señales

Una vez que se verificó que el conjunto de detectores funcionaba correctamente (tanto las paletas centelladoras como el detector Cherenkov de agua) se procedió a realizar la parte más importante del experimento, que era caracterizar las señales que se producen en el tanque. Como ya se mencionó, el objetivo principal era observar si existen diferencias significativas entre las señales producidas por partículas que se generan en los chubascos de rayos cósmicos y aquellas que se originan en las cascadas de rayos gammas. Para lograrlo, el módulo Flash-ADC del sistema electrónico VME de adquisición de datos juega un papel trascendental. Como se vio en el capítulo anterior (sección 4.2) este módulo digitaliza las señales reproduciendo los pulsos que se producen en los detectores. Al poseer esta información se pueden estudiar los parámetros más importantes que caracterizan a los pulsos (sección 4.1) como la altura, tiempo de ascenso, tiempo de descenso, ancho y carga, entre otros. Se busca comparar estos parámetros para identificar las diferencias entre los pulsos. Éstas podrían usarse en HAWC como herramienta complementaria para lograr una mejor discriminación de los chubascos, logrando que el observatorio fuera más sensible y eficiente. Aun no se ha definido que tipo de electrónica se va emplear en HAWC. Una de las propuestas es digitalizar las señales utilizando el Flash-ADC. Si este trabajo arroja resultados positivos, esto podría convertirse en un plus que incline la balanza a favor de este sistema de adquisición de datos.

En el caso específico de este trabajo se decidió comparar las señales de los muones y de los electrones. Dentro del grupo de partículas que componen los rayos cósmicos secundarios, la componente muónica es la más representativa, pues es la que logra recorrer más distancia en la atmósfera sin verse disminuida (sección 2.3.2). Esto convierte a los muones en el principal medio para identificar los chubascos producidos por rayos cósmicos hadrónicos. Al emplear las paletas centelladoras se puede seleccionar los muones como elemento de estudio (como se vio en la sección 5.1 de este capítulo). Para la parte electromagnética, era difícil emplear los centelladores para identificar las partículas pues tanto positrones como electrones son absorbidos rápidamente en las paletas y en el tanque de agua. En algún momento surgió la idea de usar un elemento radiactivo que produjera betas. De esta forma se podría saber que la señal depositada en el tanque era producida por electrones. Pero esta idea no se concretó porque no se pudo conseguir este material. Se puede decir, que no se encontró la manera de establecer un veto de muones o forma de disparo que indicara únicamente la presencia de electrones o positrones atmosféricos dentro del tanque. Lo que se hizo entonces fue emplear a los electrones que se producen en el decaimiento del muón. La mayoría de los elementos que conforman

a la componente muónica pueden atravesar el tanque pues por su alto grado energético son partículas de mínima ionización. Sin embargo, existen muones (generalmente aquellos que poseen energías menores a 300 MeV [21] que son frenados en el agua y decaen a cierta distancia dentro del tanque. Como se vio en la sección 2.3.4, en este proceso se emite un electrón y dos neutrinos. Debido al bajo nivel energético del electrón (energía promedio de 37 MeV, alcanzando hasta energías de 53 MeV [17]), éste es absorbido rápidamente en el tanque, emitiendo luz Cherenkov durante su tiempo de vida. Este proceso también ocurre con los electrones y positrones atmosféricos: al llegar al tanque interactúan con el agua, y aunque su energía es mayor (del orden de 100 a 500 MeV a la altitud a la cual estará HAWC [24]) son totalmente absorbidos por el agua (pues la cantidad de agua que contendrán los tanques de HAWC será mucho mayor). Esto hace que estos fenómenos en cierta medida sean equiparables: tanto los electrones del decaimiento como los atmosféricos interactúan con el agua lo que hace que pierden energía y reduzcan su velocidad hasta detenerse y ser absorbidos. Al inicio de este proceso emiten un cono de luz Cherenkov con cierto ángulo, el cual va cambiando debido a la pérdida de velocidad de la partícula (como se vio en la sección 3.4, ecuación 3.19). De esta forma la generación de luz en ambos procesos es muy similar. Por ello, se seleccionó a los electrones del decaimiento del muon como objeto de comparación.

La característica anterior fue un factor importante, para pensar que las señales producidas por los muones y los electrones podían ser diferentes. La generación de luz discrepa en ambos procesos. Para los muones que logran atravesar el tanque, el cono de Cherenkov posee casi siempre el mismo ángulo, mientras que en los electrones, existe una variación. Esto hace pensar que los fotones emitidos por cada partícula llegan al fotocátodo de formas distintas: la frecuencia de llegada de los fotones del muón es prácticamente la misma mientras que para los fotones del electrón va disminuyendo. Si bien la forma general de la señal de salida depende en gran medida del circuito equivalente del fotomultiplicador, se cree que este factor puede contribuir a generar pulsos con parámetros distintos.

Este no fue el único factor que motivó el presente estudio de las señales. Se contaba con el antecedente de un trabajo realizado por H. Salazar y L. Villaseñor donde se empleó un detector Cherenkov de agua muy parecido al que se ha implementado en este trabajo [1]. Aunque el arreglo es muy similar hay diferencias fundamentales. Ellos cubrieron el interior del tanque con Tyvek, pues querían un detector al estilo de los de Pierre Auger<sup>1</sup>, donde los fotones que se generan en el tanque llegan al fotomultiplicador mediante reflexiones difusas. Analizaron las señales que dejan los muones verticales y los electrones del decaimiento, encontrando que los primeros poseen tiempos de ascenso de 20 hasta 40 ns mientras que el tiempo de ascenso de los electrones oscila entre los 8 y 15 ns. Sus resultados muestran una separación significativa de estos componentes, lo que hace pensar que estas relaciones se podrían encontrar con el arreglo experimental que se tiene, aunque no tan marcadas pues en los tanques tipo HAWC no hay material reflector, haciendo que las señales sean más rápidas.

---

I En estos detectores de Cherenkov de agua el fotomultiplicador está colocado en la parte superior.



Aun cuando en esta investigación no se analizaron otros parámetros, la diferencia en los tiempos de ascenso hace pensar que las demás variables presentaran estas discrepancias entre señales muónicas y señales electromagnéticas.

Con toda esta base se procedió a hacer el estudio y la caracterización de las señales dentro del detector Cherenkov de agua. Dándose preferencia y énfasis al análisis del fotomultiplicador que estaba colocado en la base (T2), que es la posición establecida para los detectores dentro de los tanques de HAWC.

### 5.3.1. El estudio de los muones verticales

Era esencial obtener las señales que representaran a los muones verticales para poder realizar su caracterización. En principio era menos complicado que obtener las señales de los electrones, pues la coincidencia en las paletas centelladoras era un método eficiente de hacerlo. Sin embargo fue necesario establecer una coincidencia que eliminara las señales que se producían cuando los muones golpeaban el fotocátodo. En la sección 5.1 se mencionó que en el espectro de carga de T2 se observa un pico de saturación el cual se atribuía a la interacción de los muones con la ventana del detector. Esto fue una hipótesis en su momento y era necesario determinar su validez. En el mismo trabajo realizado por H. Salazar y L. Villaseñor se hizo un estudio de este fenómeno [1]. Encontraron que efectivamente los eventos de interacción con la ventana del fotomultiplicador producen señales de mayor amplitud. Utilizaron dos configuraciones de coincidencias: una en la que las paletas están encima de los fotomultiplicadores y la otra donde se ubican fuera del eje de los detectores. Retomado estas ideas, se emplearon en este proyecto dos configuraciones similares (figura 5.8).

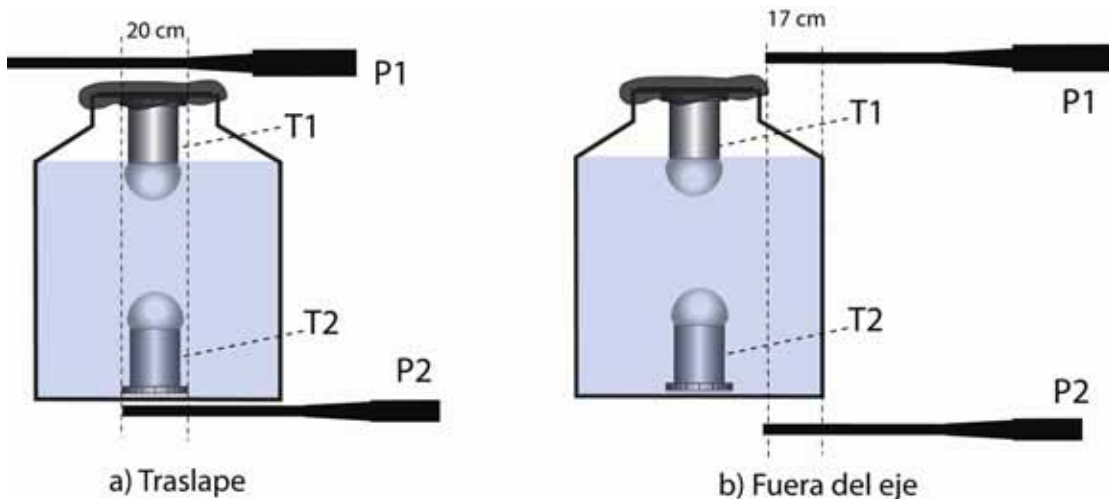


Fig.5.8. Configuraciones para limpiar las señales de los muones de aquellos eventos donde existe interacción en el fotocátodo.

Al colocar las paletas por encima de los PMT's las señales arrojadas debían involucrar eventos de muones que atraviesan el tanque, y debido a la disposición de "traslape" de las paletas muchos sucesos debían poseer trayectorias directas sobre las ventanas de los fotomultiplicadores. Al mover las paletas fuera del eje, se eliminan estas trayectorias dejando sólo señales de muones verticales que no interaccionan con el fotocátodo. De esta manera analizando los espectros de amplitud de ambos arreglos se podrá determinar si hay o no reacción con la ventana del PMT.

Para estas configuraciones, y en general para los siguientes arreglos experimentales, se va a utilizar la electrónica del VME con el módulo Flash ADC para la adquisición de datos. Así, la configuración electrónica cambia, respecto a lo que se tenía en la sección 5.1 donde se utilizó el sistema CAMAC (figura 5.1). En el siguiente esquema experimental se muestran como están conectados los sistemas electrónicos para la configuración de traslape de las paletas. En lo sucesivo sólo se modificaran las posiciones de las paletas, quedando el sistema electrónico conectado de la misma manera.

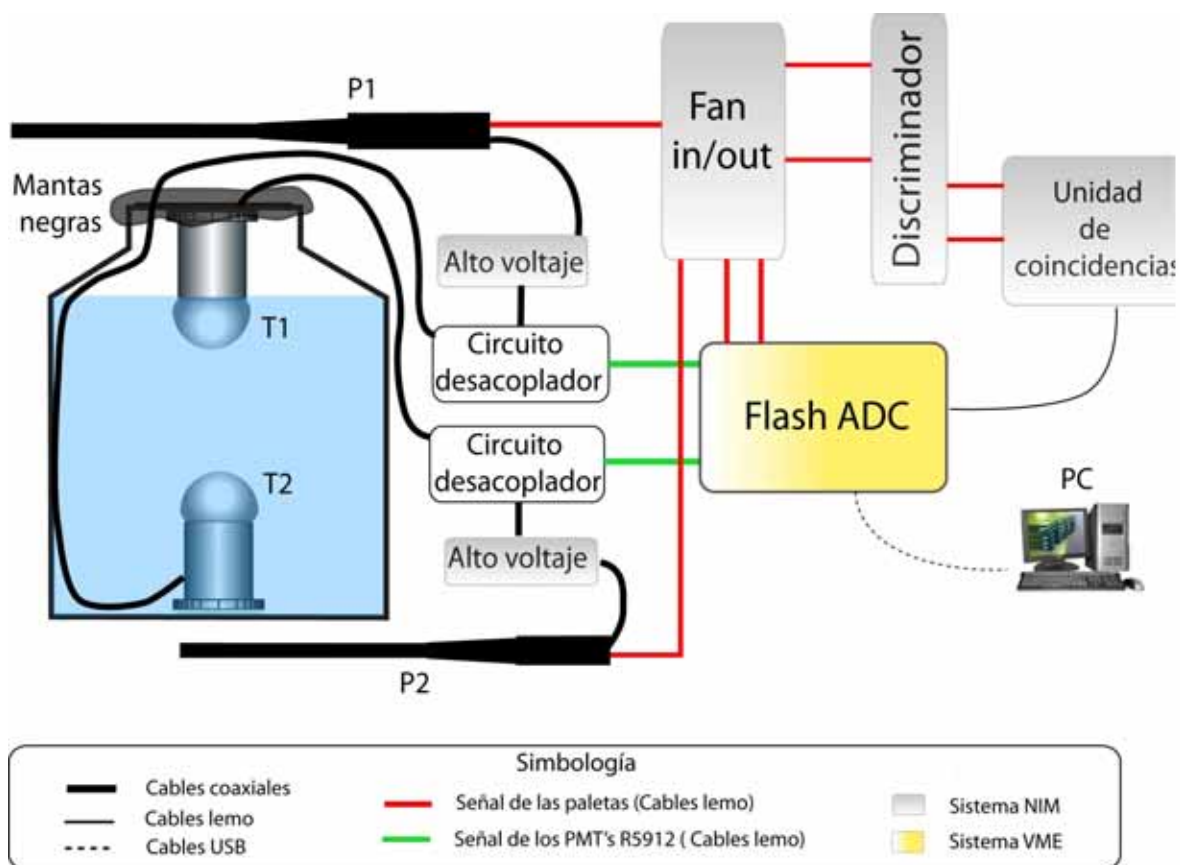


Fig.5.9. Electrónica y sistema de adquisición de datos utilizando el Flash ADC. Se ilustra la configuración de traslape.

En este caso las señales de los PMT's (que salen de los circuitos desacopladores) van conectadas directamente al Flash ADC para que sean digitalizadas. Las que provienen de las paletas pasan por

el Fan in/out de donde se obtiene una copia que se captura en el Flash ADC; la otra copia es la que sirve para establecer la coincidencia que dispara el ADC. El sistema va conectado a una PC donde se corren los programas de adquisición y se almacena la información en disco.

Los valores seleccionados para operar los fotomultiplicadores fueron de 1600 V para T1, 1200 V para T2, 2200 V para P1 y 1700 V para P2. Se disminuyeron algunos valores respecto a los usados en la sección 5.1 pues se debía cuidar que el voltaje en los pulsos no fuera mayor de 1 V para que el Flash ADC no se saturara. Los umbrales en el discriminador para P1 y P2 fueron 60 mV y 30 mV respectivamente. Tanto los voltajes como los umbrales se conservaron para todas las configuraciones de paletas.

El análisis de los datos (tanto para esta sección, como para las subsecuentes) se realizó utilizando el programa ROOT, que es un software diseñado para el análisis de datos basado en el lenguaje C++. El sistema operativo empleado para correr el programa fue Linux (Linux Scientific Works, versión elaborada por el CERN). Los programas de análisis se diseñaron para que leyeran los datos del archivo donde se guarda la información, generan gráficas e histogramas de los pulsos, y con estructuras de control del lenguaje C++ seleccionaran él o los parámetro correspondientes (amplitud, tiempo de ascenso, tiempo de descenso, entre otros). Una vez seleccionado estos valores, los programas grafican las variables importantes para buscar las diversas correlaciones.

Antes de proseguir con el análisis se muestra en la siguiente figura como quedan los pulsos después de que ROOT interpreta la digitalización del Flash ADC. En este caso se tiene un evento que dejó señal en los cuatro detectores para la configuración de traslape.

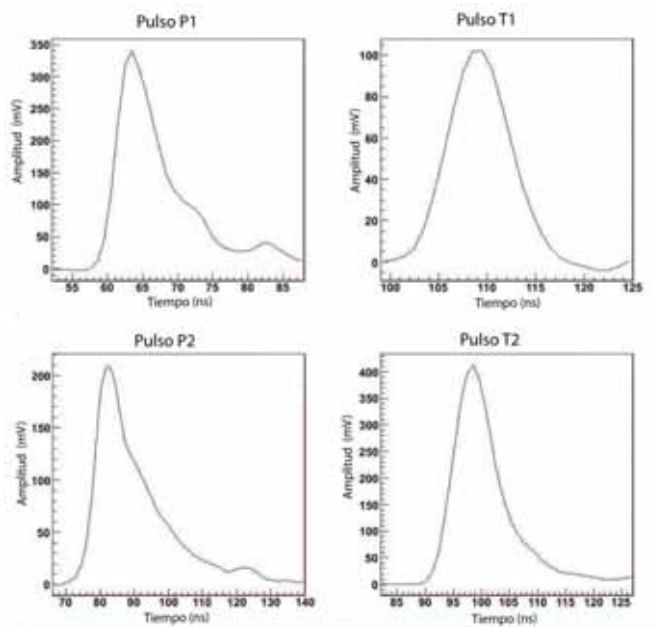


Fig.5.10. Digitalización de las señales por el Flash ADC.

Retomando el análisis de la componente muónica se guardaron 400 000 eventos para la configuración de muones verticales y 600 000 para el arreglo de paletas fuera del eje. Los espectros de amplitud (lineales y logarítmicos) se muestran en las figuras 5.11 y 5.12.

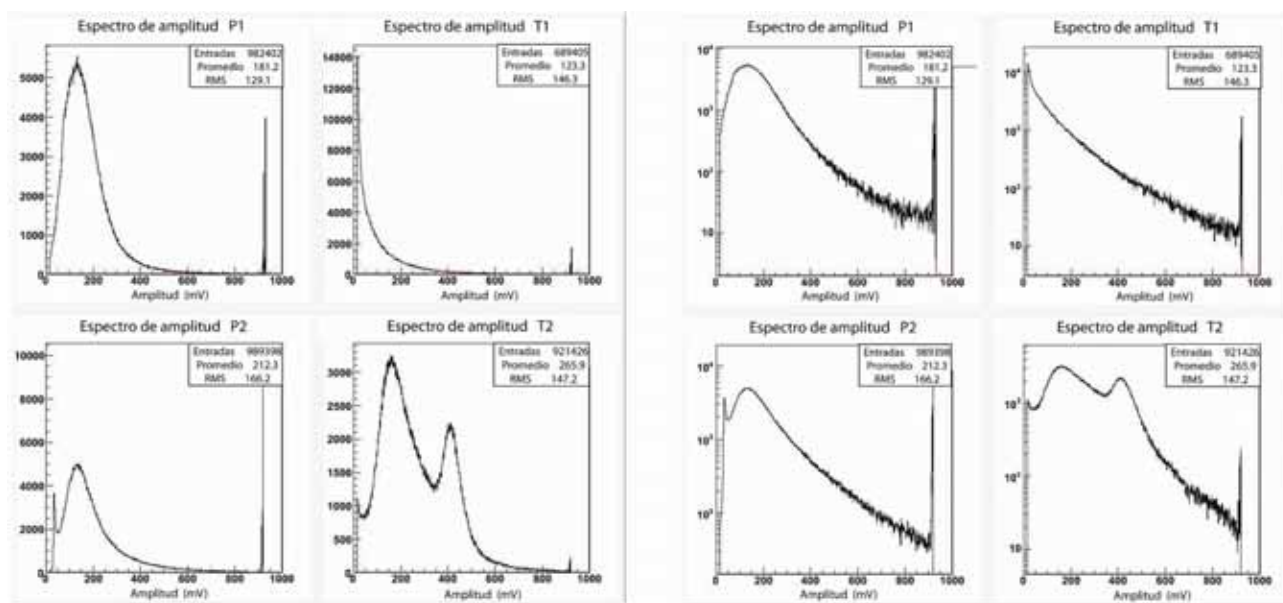


Fig.5.11. Espectros de amplitud para el arreglo de muones verticales. En el lado izquierdo se muestran los histogramas lineales y en el derecho los logarítmicos.

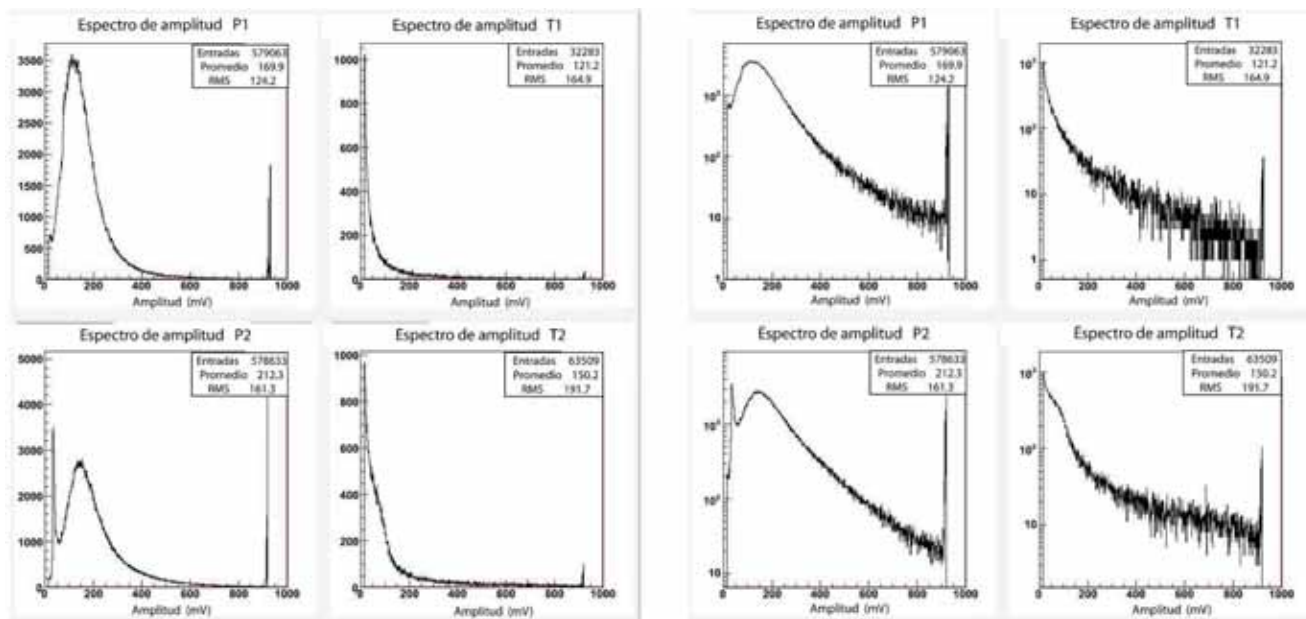


Fig.5.12. Espectros de amplitud para la configuración de paletas fuera del eje. De nueva cuenta los histogramas lineales están sobre el costado izquierdo y los logarítmicos sobre el derecho.

Las gráficas de los detectores de centello y de T1 tienen comportamientos similares a las que se obtuvieron en la sección 5.1. Fue factible comparar las distribuciones de carga y de amplitud pues la integral del pulso es proporcional a su altura. En los detectores de centello los máximos corresponden a los muones verticales; en T1 se observa el pedestal y la cola de los pocos fotones que son reflejados hacia arriba (por la ventana de T2 y por las paredes). Centrando el análisis en las gráficas de T2 (que son las más importantes en este caso) se observa que poseen comportamientos cualitativos distintos para cada arreglo. El espectro de amplitud para T2 de la figura 5.11 exhibe dos picos. El primero es el que muestra el cruce de los muones verticales, mientras que el segundo el de los muones que golpean el fotocátodo. Esto se infiere del hecho de que al observar las distribuciones de amplitud para T2 de la figura 5.12 se encuentra que existe un sólo pico (el pequeño codo que se puede ver a 100 mV) que como era de esperarse corresponde a los muones verticales. Este máximo posee menor amplitud y se está recorrido (respecto a la ubicación que tenía en los espectros de la figura 5.11) debido a que al mover las paletas fuera del eje de los PMT's hay menos fotones que llegan a T2 pues los muones que cruzan el tanque están mas alejados.

Se verifica entonces que la reacción de los muones con la ventana de PMT produce señales más energéticas. Estos pulsos no deben ser considerados cuando se realice la comparación de los parámetros. Por lo tanto se emplearan los datos de la configuración de paletas fuera del eje para representar las señales de los muones atmosféricos.

### 5.3.2. Identificación de los electrones del decaimiento y de los muones que decaen

Para hallar las señales que los electrones del decaimiento depositan en el contenedor era necesario implementar otra disposición de los detectores de centelleo. Las configuraciones descritas anteriormente (figura 5.8) garantizaban el paso de muones de mínima ionización. Era imperioso conformar las paletas para poder detectar muones de menos de 300 MeV de energía dentro del tanque. Esto se logró colocando las dos paletas en la parte superior de la estructura de madera, como se observa en la figura 5.13. Esta distribución garantizaba el paso de muones con un rango mayor de energía, dando paso a que existieran eventos de decaimientos.

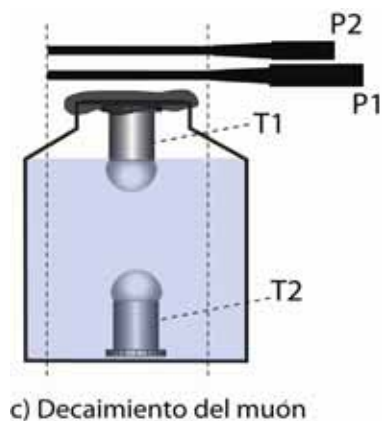


Fig.5.13. Configuración que permite estudiar el decaimiento del muón.

La mayoría de las partículas de la componente muónica poseen energías mayores a la necesaria para que sean frenadas dentro del tanque. Como consecuencia fue necesario obtener mucho más estadística para que la ocurrencia de estos eventos fuera significativa. Con los mismos voltajes, umbrales y arreglos electrónicos se tomaron aproximadamente 10 millones de eventos.

En cada disparo de la coincidencia de paletas, se buscó en las señales de T1 y T2 un pulso secundario que se generara después del pico del muón y que estuviera dentro de los primeros 2.5 micro-segundos. En varios artículos de investigación se dispone de esta ventana de tiempo para la búsqueda del decaimiento del  $\mu^-$  pues su vida media es de  $2.19 \mu\text{s}$  [17], [21].

No bastaba con usar simplemente cualquier pulso secundario que se veían en las señales de T1 y T2, pues no todos se debían al decaimiento. Algunos pulsos era “afterpulses” originados por un mal acoplamiento de las impedancias del circuito desacoplador; otros eran de nuevo muones verticales, y tal vez también había señales de rayos delta. Era primordial hacer un corte o selección que permitiera identificar a los electrones. Por esta razón se graficó la amplitud de estos pulsos con su tiempo de llegada (para cada PMT) y se hizo la correlación de estos tiempos. Los resultados se muestran en la figura 5.14.

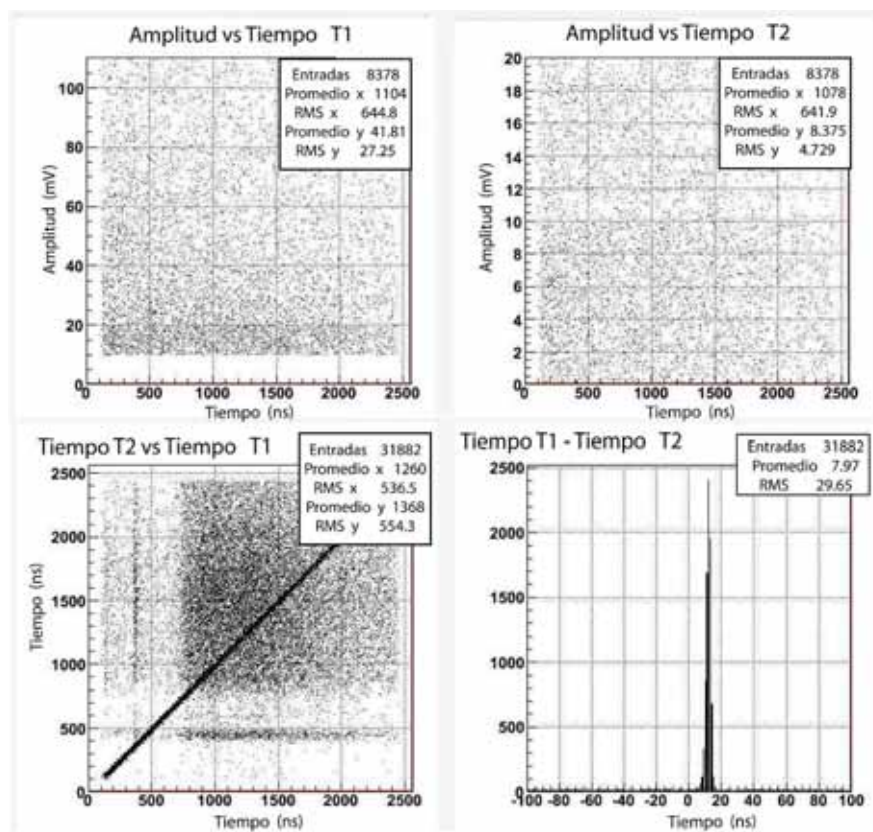


Fig.5.14. En la parte superior se muestran los histogramas de la amplitud vs tiempo de ocurrencia de cada pulso secundario. En la parte inferior se muestran los histogramas que correlacionan estos tiempos.

De las gráficas de amplitud se seleccionó que los pulsos secundarios debían poseer una altura mínima de 10 mV para T1 y 3 mV para T2<sup>I</sup>. Escoger un umbral más pequeño significaba entrar en contacto con el ruido de las señales. El corte más importante se hizo al revisar las correlaciones temporales. Se observa en la gráfica de  $t_1$  vs  $t_2$ <sup>II</sup> una línea diagonal a 45°. Esta referencia dice que los fotomultiplicadores detectaron un pulso casi al mismo tiempo. Cuando los electrones de decaimiento se generaran en el tanque su dirección inicial es aleatoria y al interactuar con los átomos de agua la van cambiando constantemente. De esta forma dejan señal tanto en T2 como en T1. Por lo tanto encontrar un pulso en T2 y otro casi mismo tiempo en T1 es una garantía del fenómeno del decaimiento. En la gráfica de  $t_1$  menos  $t_2$  se ve que esta ventana de tiempo debe menor a 20 ns.

Estos cortes (en amplitud y en tiempo) fueron fundamentales para poder identificar adecuadamente las señales que producen los electrones del decaimiento, por lo cual esta parte del trabajo fue una pieza clave.

Antes de proseguir el análisis hay que señalar una peculiaridad que se presenta en la gráfica de  $t_1$  vs  $t_2$ . Se observa una línea tenue a los 500 ns de  $t_2$ . Este comportamiento no debería de ocurrir. Lo que se esperaba era que la ocurrencia de los pulsos fuera mayor para tiempos menores y empezara a disminuir gradualmente conforme el tiempo aumenta. Se realizaron los histogramas de la ocurrencia de cualquier pulso posterior en los fotomultiplicadores obteniéndose las siguientes gráficas:

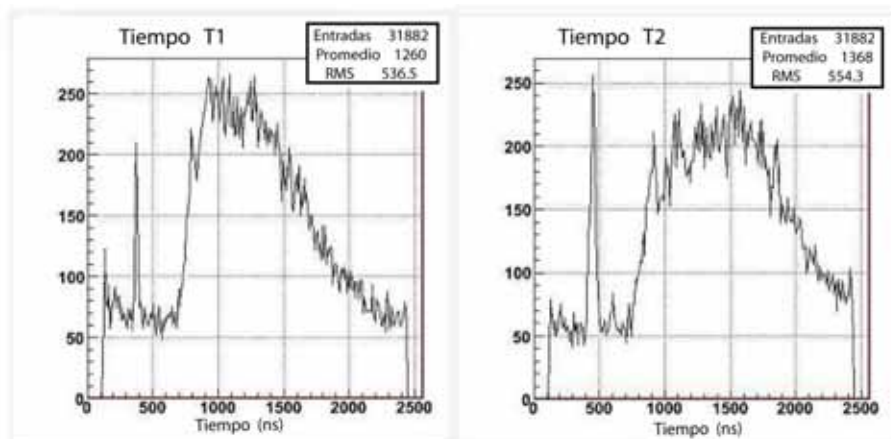


Fig.5.15. Histogramas del tiempo de ocurrencia de los pulsos secundarios para T1 y T2.

Para tiempos menores a 1000 ns, se nota en ambas gráficas una deficiencia de cuentas, lo cual no debería ocurrir. A ciencia cierta no se sabe cual es el origen de esto. Una posible explicación es que

I Estos umbrales era distintos pues los PMT's no tenían los mismos valores de ganancia. Como T1 operaba a mayor voltaje la selección de la altura debía ser mayor que la de T2.

II  $t_1$  es el tiempo de llegada del pulso a T1. Para  $t_2$  es análogo.

los valores de los condensadores del circuito desacoplador son muy altos, por lo que no se descargan a tiempo, haciendo que sea difícil la presencia de un pulso durante ese lapso de temporal.

Una vez que se reconocieron las señales de los electrones de Michel<sup>I</sup>, se procedió a hacer histogramas de su amplitud y tiempo (figuras 5.16 y 5.17). Las distribuciones de amplitud se comportan de manera esperada: para bajos niveles de amplitud hay muchos pulsos pero a medida que aumenta la altura disminuyen los eventos de forma abrupta [1]. Además se observa que las señales no son muy energéticas. En los espectros de tiempo se aprecia un comportamiento exponencial en las gráficas de la figura 5.16 o lineal en las gráficas de la figura 5.17. Esto va acorde con el decaimiento exponencial de la ocurrencia del decaimiento del muón. Al realizar un ajuste exponencial (o logarítmico, según el caso) se obtiene el parámetro que rige el comportamiento de la curva. El recíproco de este valor debería corresponder a la vida media del muón. Del ajuste se obtiene que este parámetro es de  $4.4207 \times 10^{-1} \pm 1.714 \times 10^{-2} \mu\text{s}^{-1}$  lo que arroja un valor de vida media de  $2.262 \pm 0.087 \mu\text{s}$ . Estos resultados refuerzan la idea de que la selección de los electrones de Michel fue la correcta. De esta manera las señales de los electrones estaban listas para ser analizadas, caracterizadas y comparadas con las señales de los muones atmosféricos.

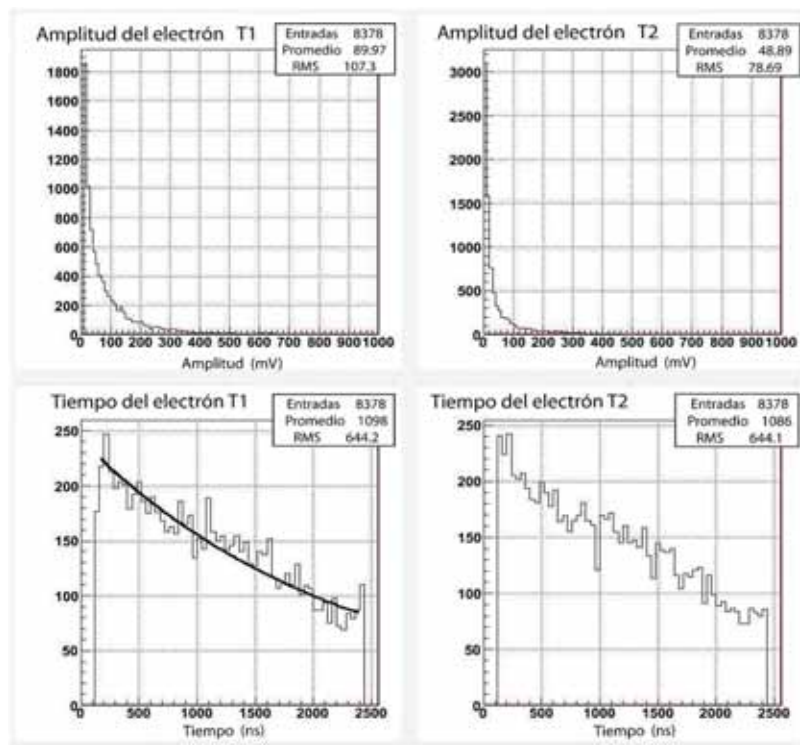


Fig.5.16. Espectros lineales de amplitud y tiempo para los electrones del decaimiento. En el costado izquierdo se ubican las graficas correspondientes a T1 y en el opuesto las concernientes a T2.

I En algunas referencias se les nombran así a los electrones del decaimiento [17].



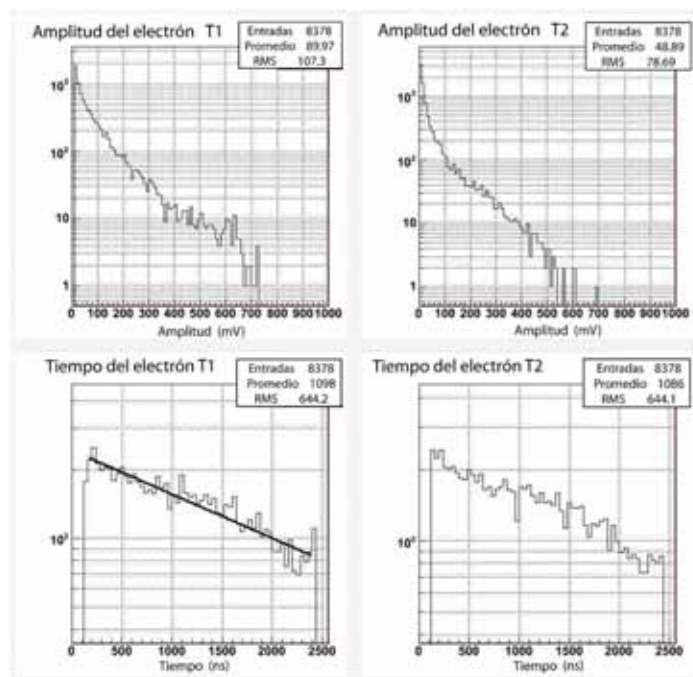


Fig.5.17. Espectros en escala logarítmica. La colocación espacial para T1 y T2 es la misma que en la figura 5.16.

Dentro del análisis y la comparación de las señales se decidió incluir también a los muones que decaen. Las características de producción de luz de estas partículas dentro del contenedor se podrían ver como un caso intermedio entre los electrones de Michael y los muones verticales. El ángulo del cono de Cherenkov disminuye pues al interactuar con el agua los muones pierden energía y por ende velocidad, pero debido a su masa (200 veces mayor que la del electrón) las partículas se dispersan menos y la mayoría de sus trayectorias son hacia abajo. Para encontrar las señales de los muones se seleccionaron los eventos que presentaron pulsos del electrón del decaimiento. En estos eventos el primer pico (el que genera el disparo) debe corresponder a los muones que se detienen dentro del tanque.

Al apreciar los espectros de amplitud de la figura 5.18, se observa que efectivamente se produce más señal en el fotomultiplicador ubicado en el fondo que el que está colocado en la tapa.

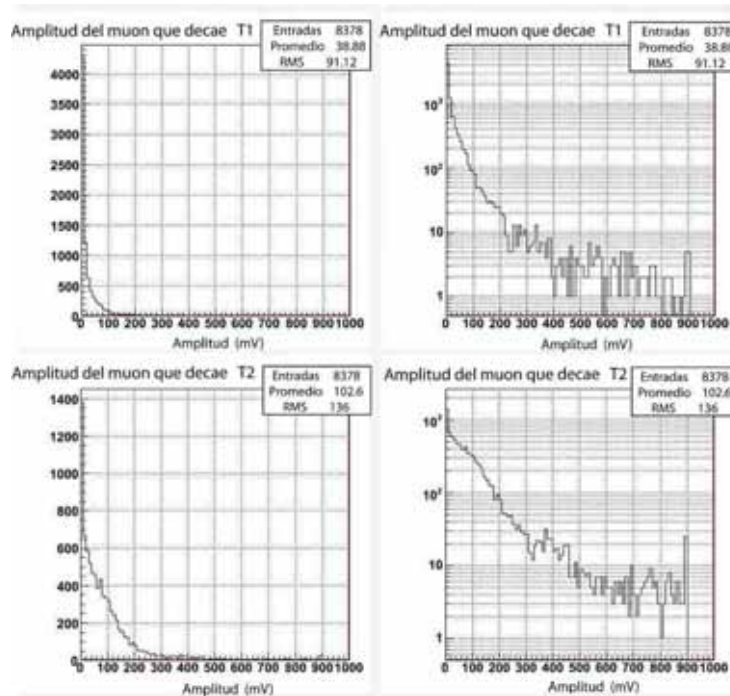


Fig.5.18. Espectros de amplitud de los muones que decaen. En el lado derecho se observan las distribuciones en escala lineal y en el opuesto las de escala logarítmica.

### 5.3.3. Búsqueda de electrones atmosféricos

Dada las características de la configuración de muones del decaimiento (figura 5.13) se pensó en la posibilidad de que algunos eventos que lograban establecer la coincidencia de paletas podrían ser originados por algunos electrones atmosféricos con energía suficiente como para atravesar los centelladores. Si esto fuera cierto, se podrían anexar al análisis global estas señales para tener un mayor repertorio de pulsos producidos por electrones.

Para determinar la validez de la hipótesis se propuso comparar los espectros de amplitud de T1 para dos configuraciones: muones verticales (figura 5.19) y muones del decaimiento (figura 5.13). Los electrones atmosféricos que lograran pasar el umbral de disparo podrían dejar señal tanto en T1 como en T2 (pues interactúan con el agua y son absorbidos emitiendo luz Cherenkov en varias direcciones). Pero en la configuración de muones verticales los pulsos que originan la coincidencia son muones muy energéticos que cruzaron el tanque sin dejar señal en T1. Esto permite hacer la comparación y buscar los electrones atmosféricos en las señales que se depositan en T1 para la configuración de muones del decaimiento.

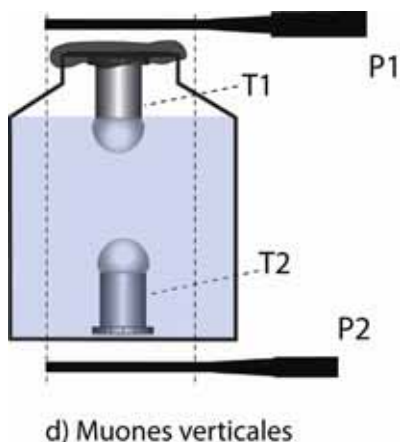


Fig.5.19. Configuración de muones verticales.

La comparación de ambas distribuciones se hizo restando los espectros de amplitud. Pero para poder hacer la resta se necesitó primero normalizarlos, pues tenían distintos número de eventos. La normalización se logró dividiendo cada entrada de los histogramas por el valor de la integral de la distribución, que viene siendo el número de eventos para cada espectro. En la figura 5.20 se muestran los espectros de las configuraciones y sus respectivas normalizaciones. La resta de los histogramas se muestra en la figura 5.21.

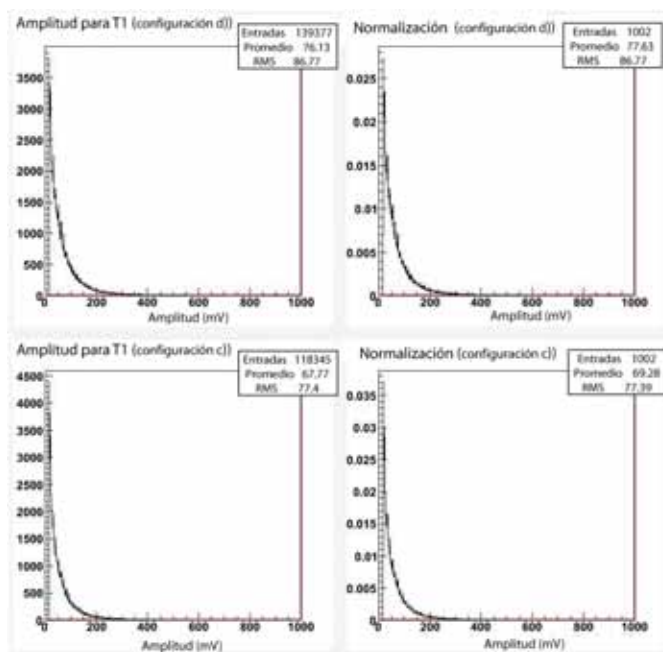


Fig.5.20. Espectros de amplitud. En la parte superior se muestran las distribuciones de los muones verticales, mientras que en la inferior las distribuciones de la configuración de decaimiento. Los histogramas del lado derecho son los normalizados.

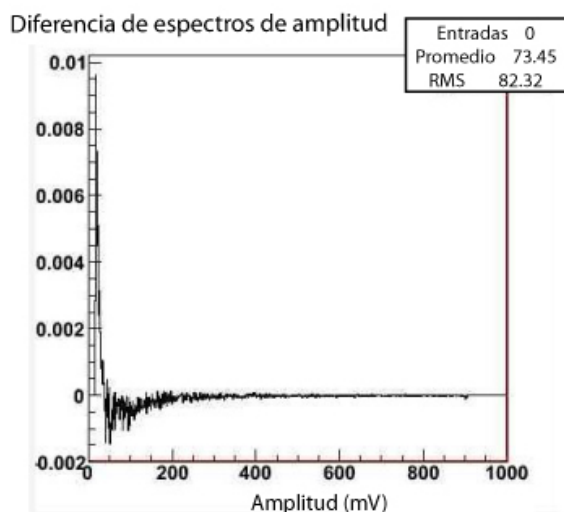


Fig.5.21. Resta de los espectros normalizados. Al espectro de la configuración de decaimiento se le resta el de muones verticales.

Se aprecia en la gráfica anterior que para amplitudes pequeñas hay más señal en la configuración donde ambas paletas están arriba. Estos fotones que llegan a T1 son originados por muones que cruzan el tanque de forma muy sesgada (más horizontal que vertical), pues tienen un alto nivel estadístico; y en menor medida por muones que decaen. Esto no descarta que en este pico haya una contribución de los electrones que se buscan. Sin embargo al analizar la zona de 50 a 150 mV no se observa algún pulso predominante orientado hacia arriba (que representaría a los electrones atmosféricos). Existen fluctuaciones pero no hay nada significativo. En esta región de amplitud los muones sesgados no deberían dejar señal, y si de por sí es baja la eventualidad de muones que decaen, al aumentar la amplitud se reduce mucho más. Esto no quiere decir que no halla eventos de electrones atmosféricos, si no que al parecer, debido a su bajo nivel estadístico, el detector no puede discriminarlos. Así, con los datos que se tienen, no se pueden hacer cortes para seleccionar a estos electrones lo cual resultaría ser una lástima pues no se podrán enriquecer las comparaciones con señales de electrones atmosféricos.

### 5.3.4. Los parámetros de los pulsos y su comparación

Ya se cuenta con todos los elementos necesarios para hacer la caracterización de las señales: los muones verticales, los electrones del decaimiento y los muones que decaen fueron identificados correctamente. Ahora se procede a comparar los parámetros más importantes de los pulsos. Para hacer lo anterior se seleccionaron 5 características principales: el tiempo de ascenso, el tiempo de descenso, el ancho del pulso, la anchura al 10% de la amplitud y la carga (figura 5.22). Si el tiempo de ascenso era distinto (como se halló en el trabajo de la referencia [1]) se creía también en la posibilidad de que los demás parámetros mostrarían discrepancias.

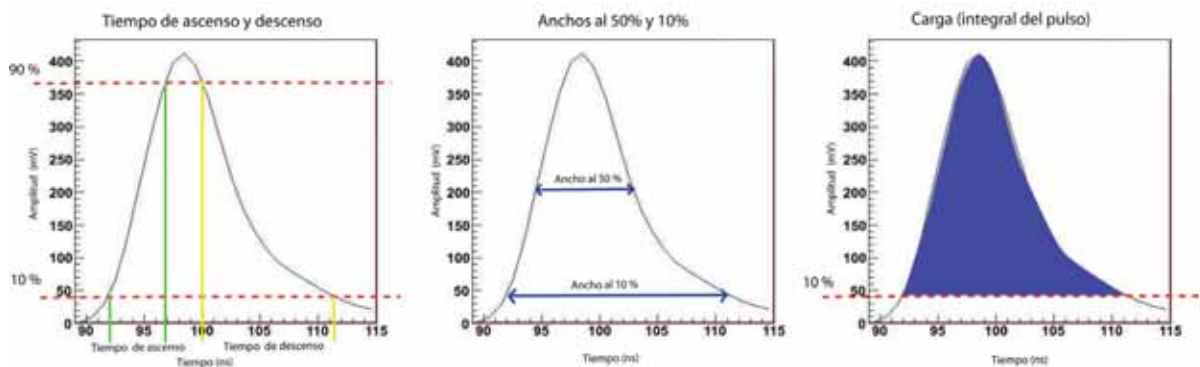


Fig.5.22. Parámetros que se seleccionaron para la caracterización. En el costado izquierdo se muestra el tiempo de ascenso y el tiempo de descenso. En la parte central se ilustran los anchos al 50% y 10%. En el lado izquierdo se observa la integral del pulso.

### Tiempo de ascenso

Se empezó el análisis con el tiempo de ascenso. En la figura 5.23 se muestran las gráficas donde se correlaciona esta ventana de tiempo con la amplitud del pulso.

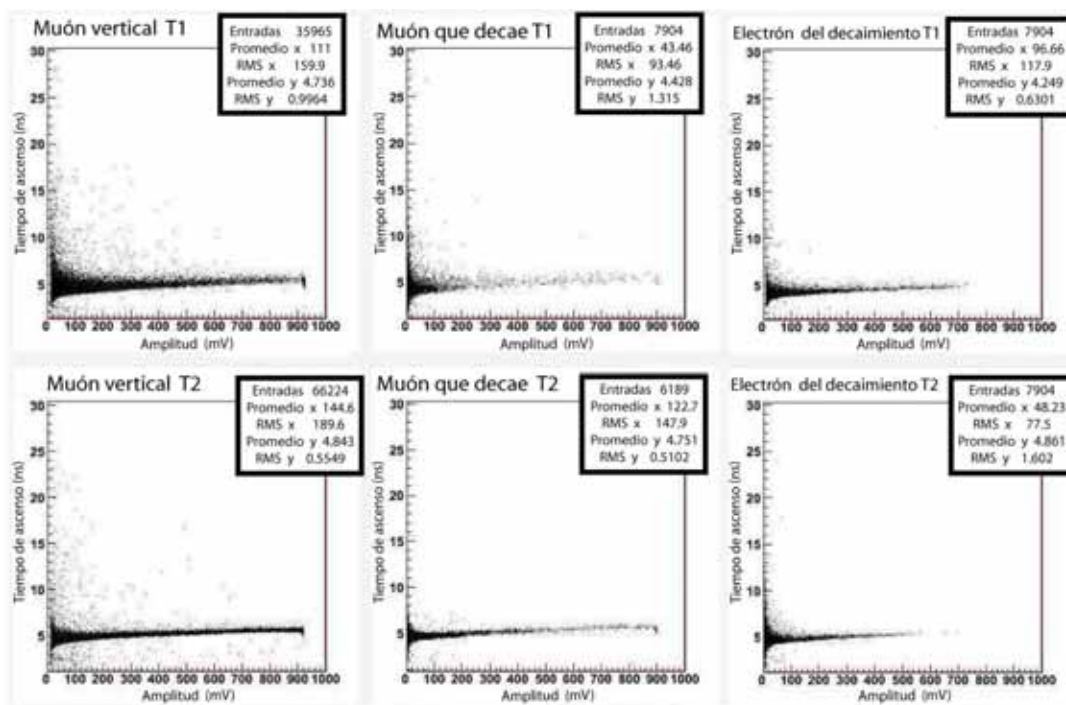


Fig.5.23. Histogramas de la correlación del tiempo de ascenso y la amplitud para muones verticales (izquierda), muones que decaen (centro) y electrones del decaimiento (derecha). Las gráficas superiores son de T1 y las inferiores de T2.

En primera instancia se aprecia que los pulsos se comportan de manera adecuada. Por ejemplo las distribuciones se compactan al aumentar la amplitud, efecto que se esperaba debido a la disminución de la estadística. El trazo de los puntos sube un poco pues al incrementarse la altura los pulsos tardan un poco más en formarse.

El parámetro más importante en cada histograma es el valor medio de la distribución proyectada en el eje y (tiempo de ascenso) y su respectivo ancho (RMS). En la siguiente tabla se comparan los valores de las tres señales para T1 y T2.

<b>Tiempo de ascenso</b>	<b>Muones verticales</b>	<b>Muones del decaimiento</b>	<b>Electrones de decaimiento</b>
<b>T1</b>	Valor medio <b>4.735</b> RMS <b>0.9964</b>	Valor medio <b>4.433</b> RMS <b>1.423</b>	Valor medio <b>4.243</b> RMS <b>0.6037</b>
<b>T2</b>	Valor medio <b>4.843</b> RMS <b>0.5548</b>	Valor medio <b>4.754</b> RMS <b>0.4568</b>	Valor medio <b>4.863</b> RMS <b>1.035</b>

Tabla 5.1. Valor medio y ancho de las distribuciones del tiempo de ascenso.

De las gráficas se observa que los tiempos de ascenso tienen un comportamiento cualitativo similar tanto para T1 como para T2. De la tabla se ve que el tiempo de ascenso es casi el mismo en las tres señales (en el respectivo fotomultiplicador hemisférico). No hay una diferencia significativa dentro de la resolución que puede manejar el ADC, ya que este digitaliza las señales cada nanosegundo y las diferencias son menores. De esta forma se puede decir que el tiempo que tarda en subir el pulso es prácticamente el mismo para muones verticales, muones del decaimiento y electrones de Michel.

### Tiempo de descenso

Las correlaciones del tiempo de descenso se muestran en la figura 5.24. Como era de esperarse el tiempo en que un pulso desciende (ir del 90% de la amplitud al 10%) debía ser mayor al tiempo de ascenso. Al igual que en las gráficas anteriores (figura 5.23) se creía que los trazos deberían subir al aumentar la amplitud. Sin embargo se observa que hay una región en la que los trazos se mantienen casi horizontales bajando un poco. Pero después de cierta amplitud (aproximadamente 600 mV) los trazos empiezan a ascender conforme se suponía.

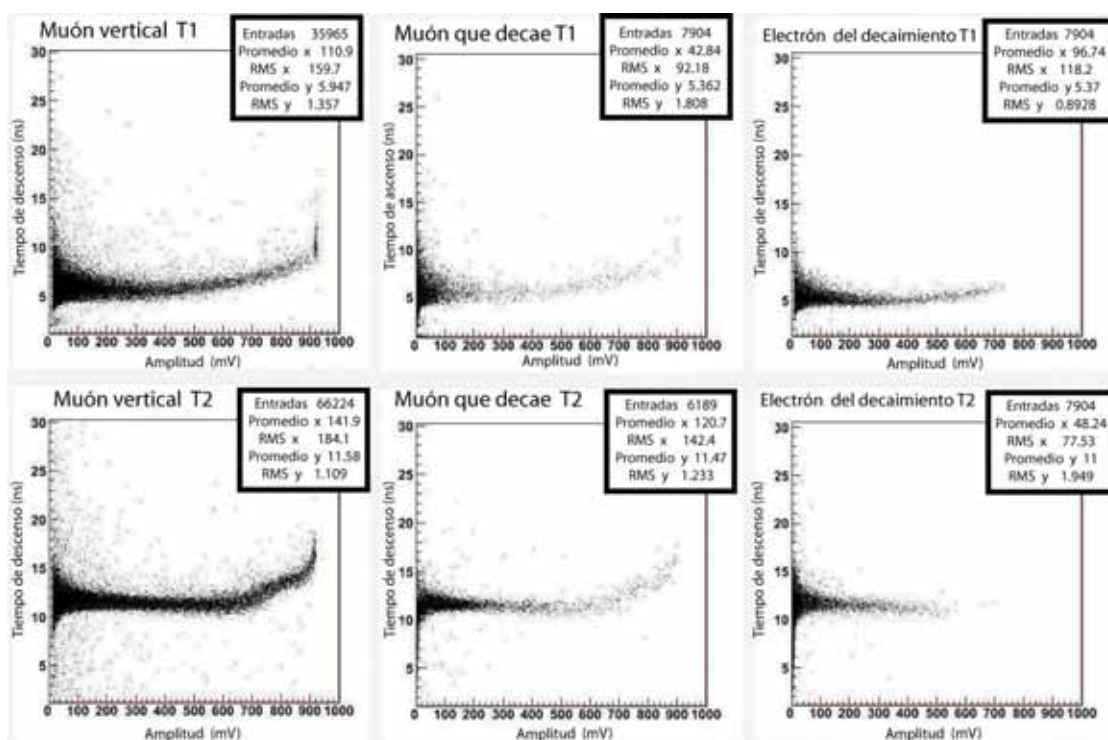


Fig.5.24. Histogramas de la correlación del tiempo de descenso y la altura del pulso. La ubicación de las gráficas en la misma que la mostrada en la figura 5.23.

En la siguiente tabla se muestran los valores de los parámetros para cada fotomultiplicador.

Tiempo de descenso	Muones verticales	Muones del decaimiento	Electrones de decaimiento
T1	Valor medio <b>5.947</b> RMS <b>1.354</b>	Valor medio <b>5.389</b> RMS <b>1.687</b>	Valor medio <b>5.367</b> RMS <b>0.8509</b>
T2	Valor medio <b>11.58</b> RMS <b>1.109</b>	Valor medio <b>11.44</b> RMS <b>1.309</b>	Valor medio <b>11.00</b> RMS <b>1.989</b>

Tabla 5.2. Tiempos de ascenso, valores medios y RMS.

Al igual que ocurre con el tiempo de ascenso, los tiempos de descenso son muy similares para las tres señales. Su comportamiento cualitativo es muy parecido y no hay distinción sustancial en los valores medios y anchos de las distribuciones.

### Ancho del pulso

Este parámetro se midió a una altura del 50% del tamaño de las señales. De nuevo, el comportamiento cualitativo es el supuesto (figura 5.25). Se ve de forma más clara que los trazos suben al aumentar la amplitud. En general el ancho del pulso tiene un valor que oscila entre el tiempo de ascenso y el tiempo de descenso.

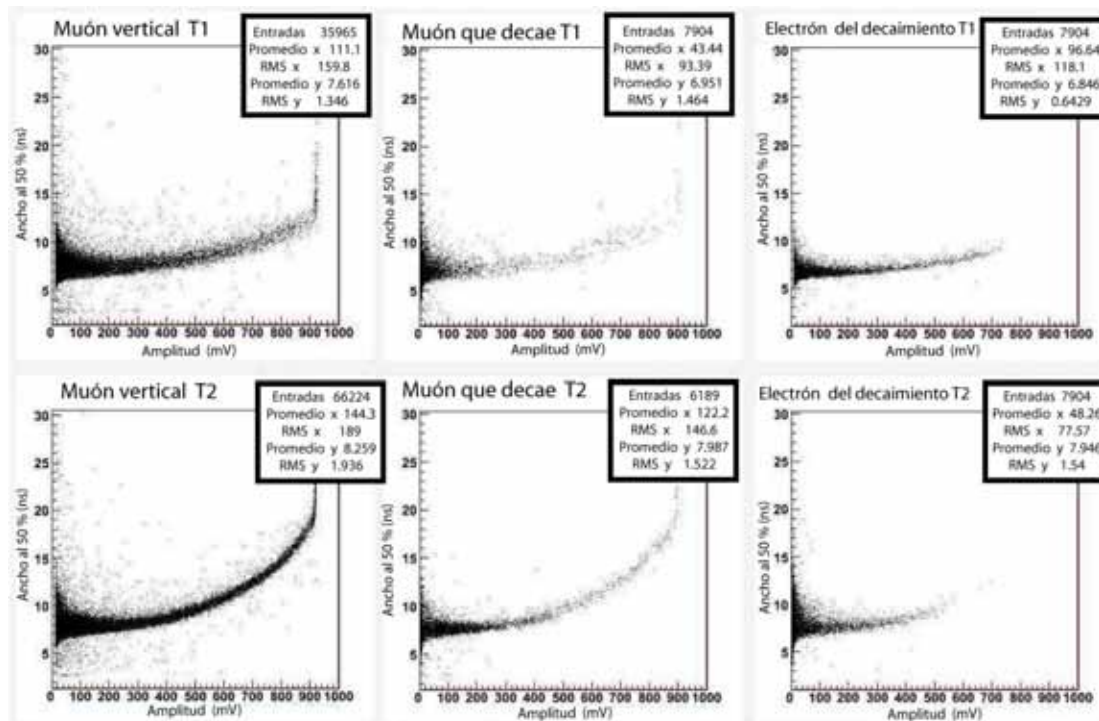


Fig.5.25. Histogramas de la correlación del ancho del pulso y la amplitud. La distribución de las gráficas es la misma que en las figuras 5.23 y 5.24.

Al extraer los valores del ancho de las señales (tabla 5.3), de nueva cuenta se obtiene el mismo comportamiento: no hay un cambio significativo. Los resultados para muones verticales, muones que decaen y electrones de Michel, no difieren en más de 1 ns.

Ancho del pulso	Muones verticales	Muones del decaimiento	Electrones de decaimiento
T1	Valor medio <b>7.616</b> RMS <b>1.346</b>	Valor medio <b>6.934</b> RMS <b>1.463</b>	Valor medio <b>6.841</b> RMS <b>0.6307</b>
T2	Valor medio <b>8.259</b> RMS <b>1.936</b>	Valor medio <b>7.962</b> RMS <b>1.634</b>	Valor medio <b>8.045</b> RMS <b>1.711</b>

Tabla 5.3. Valores del ancho del pulso al 50% para los tres tipos de señales.



### Ancho al 10%

Las distribuciones cumplen las expectativas. Poseen un comportamiento muy similar a las distribuciones anteriores (figura 5.25) pero como es de esperarse los puntos se ubican a un valor mayor en tiempo pues el ancho al 10 % debe ser mayor que al 50% (figura 5.26).

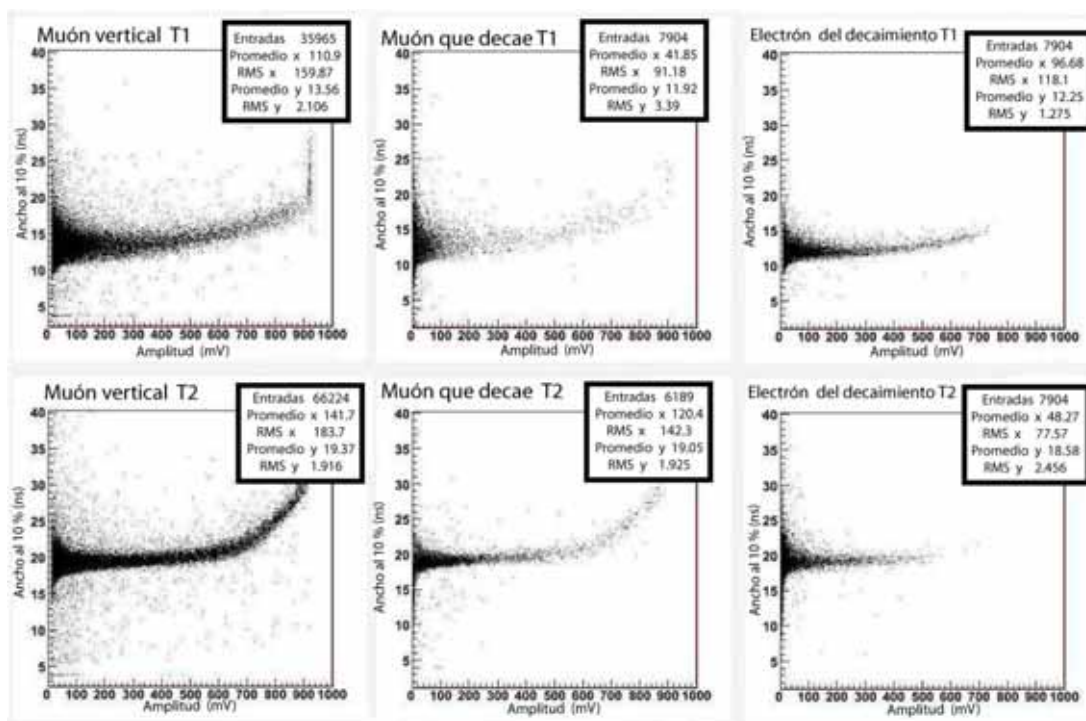


Fig.5.26. Histogramas de la correlación del ancho al 10% y la altura del pulso.

Después de lo que ocurrió con los tres parámetros anteriores, no es raro hallar que también para el ancho al 10% no hay cambios claros en las tres señales. En la siguiente tabla se ve que los tres valores son muy cercanos.

Ancho del pulso al 10%	Muones verticales	Muones del decaimiento	Electrones de decaimiento
T1	Valor medio 13.56 RMS 2.106	Valor medio 12.29 RMS 2.609	Valor medio 12.24 RMS 1.227
T2	Valor medio 19.37 RMS 1.916	Valor medio 18.99 RMS 1.897	Valor medio 18.57 RMS 2.503

Tabla 5.4. Ancho al 10 % del tamaño del pulso.

### Carga

Para hallar la carga se integraron los pulsos al 10 % de su amplitud. El hecho de que las señales presentaran diferencias en los demás parámetros, hacía suponer que su carga debía ser también distinta, es decir, para un mismo valor de la amplitud los pulsos tenían formas diferentes lo que hacía que la integral fuera también distinta. En la siguiente figura (5.27) se muestran las gráficas que correlacionan la carga con la amplitud para los tres tipos de señales.

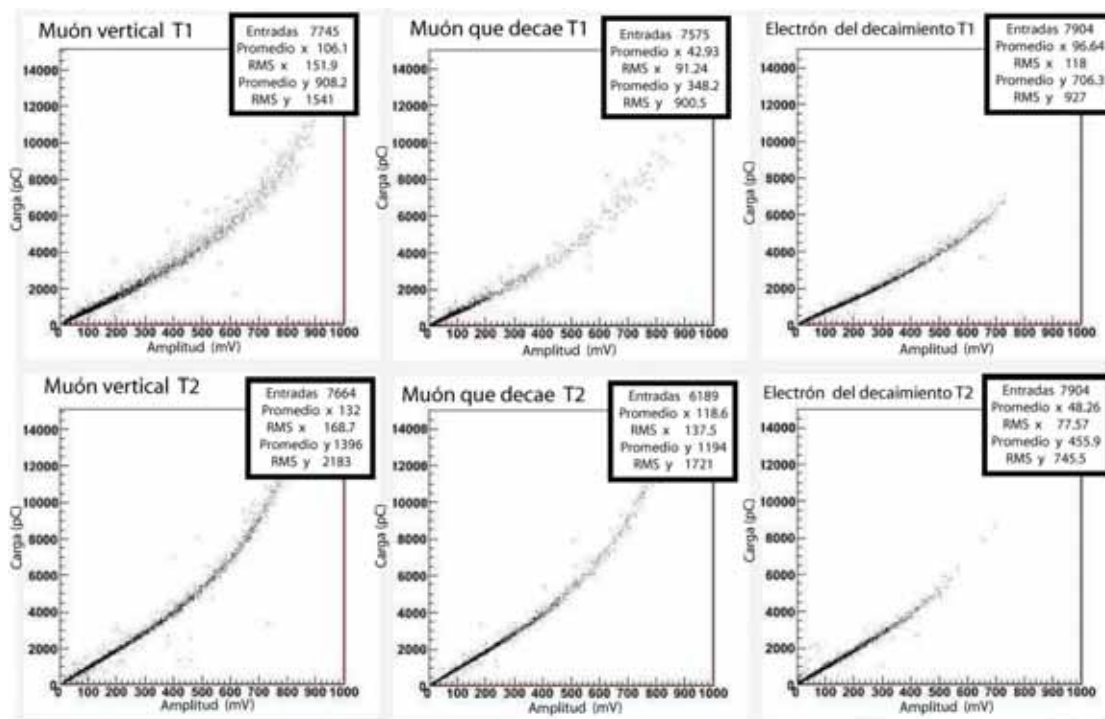


Fig.5.27. Histogramas de la carga contra la amplitud.

En todas las gráficas se observa un comportamiento similar: una línea recta durante los primeros 500 mV, y una curva posterior que al parecer tiene una dependencia cuadrática.

Aunque resulta un poco imperceptible a primera instancia, con una observación más detallada se aprecia que las pendientes de las señales para T1 son menores que las de T2, lo cual está en consonancia con los resultados anteriores, donde se halló que los tiempos de ascenso, tiempos de descenso y anchos eran menores para T1 que para T2. Al hacer la comparación entre los distintos tipos de señales (para cada fotomultiplicador) se percibe que las rectas poseen la misma pendiente, no hay un cambio significativo entre ellas. Si los pulsos tuvieran formas distintas, para un mismo valor de la amplitud, se tendrían distintos valores de la carga. Sin embargo, esto no es así, y las rectas tienen pendientes muy similares. Se suponía encontrar discrepancias relevantes, por ejemplo mayores a 5 °, lo que haría una discriminación significativa para cada tipo de señal.

En cierta forma todos estos resultados son inesperados pues se creía en la posibilidad de que los valores fueran diferentes para cada partícula. No se esperaban discrepancias tan grandes de 20 o 40 ns como las que encontraron los investigadores de la universidad de Puebla para el tiempo de ascenso [1]. Al emplear un material reflector dentro del tanque se modifica la forma en que la luz llega al fotomultiplicador ya que las diversas reflexiones hacen que los fotones lleguen desfasados al fotocátodo lo que altera la forma de los pulsos. Lo que se esperaba hallar eran valores de 10 o hasta 5 ns, rango mínimo factible para que el Flash ADC pudiera distinguir entre los tipos de señales.

# Conclusiones

Se puede concluir que se construyó satisfactoriamente un detector Cherenkov de agua con las características requeridas por los detectores que posiblemente se usaran en el proyecto HAWC pero a una escala más pequeña. Cada componente funcionó como se esperaba logrando que el detector tuviera el desempeño requerido.

Se verificó que el material que conformaba el tanque (polietileno negro con 1.5 % de polvo de grafito) fuera completamente oscuro, es decir, que impidiera en su totalidad el paso de la luz a su interior. Esto dio pauta a confiar en que la empresa Rotoplas podía construir tanques totalmente opacos. Aunque las pruebas en el tanque mayor arrojaron filtraciones de luz, estas fueron pequeñas y se considera que no afectarían las mediciones. Sin embargo queda el trabajo a futuro de observar si estas filtraciones se deben a fracturas ocasionadas por el traslado atropellado que tuvo el contenedor.

El elemento fundamental del arreglo experimental, los fotomultiplicadores hemisféricos, operaron de forma correcta, como se constata en el desarrollo del trabajo. El agua purificada fue un excelente radiador, pues efectivamente se detectaban fotones al paso de partículas relativistas con carga. La electrónica y el sistema de adquisición de datos no presentaron mayores problemas. Los detectores de centello cumplieron con su propósito: detectar el paso de partículas cargadas; su reparación fue fundamental para llevar a cabo del proyecto.

La prueba del reflector de luz fue un plus en el trabajo. Era una propuesta con sentido, dadas las dificultades de construir un tanque de mayor altura, ver si se podía aprovechar la altura del fotomultiplicador colocándolo en la parte superior. Si las señales del PMT colocado en la tapa hubieran mejorado sustancialmente con el reflector esto habría sido tomado en cuenta como propuesta del diseño. Los resultados, si bien fueron negativos, sirvieron para ver que la idea no era del todo buena y descartar esa posibilidad, centrado el esfuerzo en lograr la altura óptima que deberían tener los tanques de HAWC.

La caracterización de las señales arrojó resultados hasta cierto punto imprevistos. No se pensaba encontrar diferencias tan grandes (del orden de 40 ns) entre los parámetros pero si hallar alguna discrepancia significativa que pudiera servir para separar las señales de las partículas más representativas de los chubascos. La forma de generación de la luz Cherenkov así como el ritmo de su llegada al fotocátodo, si bien son distintos para muones y electrones, no reflejan cambios significativos para la precisión del sistema de adquisición de datos. Se cree que el material reflector empleado por los investigadores de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, fue un factor importante para lograr la separación de las señales, pues las diversas reflexiones en las paredes del contenedor podrían lograr ese efecto.

La primera justificación de este proyecto que era encontrar un método eficiente para la separación de los eventos en tanques con las características propuestas para HAWC, queda a la expectativa, pues si bien este experimento sirvió para vislumbrar el posible comportamiento de las señales en contenedores de mayores dimensiones, puede que se logren encontrar algunas diferencias debido que los pulsos de los muones serán más intensos. La justificación de emplear tanques pequeños que posean un método eficiente para rechazar el ruido de fondo, y así reemplazar los tanques grandes, no queda descartada por completo. Se propone como trabajo a futuro forrar el interior del tanque con Tyvek y verificar si realmente este es el factor que permite lograr la discriminación de las diversas partículas. Si esto fuera cierto, forrar tanques pequeños con este reflector podría resultar menos costoso que hacer contenedores más grandes.

Actualmente se está trabajando en montar un pequeño arreglo de 4 tanques, que simulará el observatorio HAWC pero a una escala pequeña. Tres tienen la misma forma y tamaño que el contenedor grande con el cual se trabajó en la sección 4.4.2. El otro tanque será de metal con un diámetro de 7 m por una altura de 5 m. Estos contenedores se están colocando en el volcán Sierra Negra, a una altura de 4500 m, a un costado del Gran Telescopio Milimétrico. Con este arreglo se pretende obtener información experimental que permita entrever el comportamiento del observatorio a una escala mayor.

Gracias a la colaboración de las diversas instituciones involucradas, el HAWC ha salido adelante de los diversos problemas (principalmente económicos y burocráticos) y se ha podido consolidar como una propuesta seria y con grandes expectativas de desarrollo. Sin embargo, el recorrido todavía es largo y se tienen que seguir trabajando imperiosamente para poder cristalizar este gran proyecto. Para finalizar, deseo externar de manera personal que de este proyecto aprendí muchas cosas. Adquirí nuevos conocimientos de diversas áreas de la física (astrofísica, astronomía y física de altas energías), lo que me sirvió para darme cuenta de la importancia de estos campos de estudio para el desarrollo científico. Por otro lado, constaté que no importan las suposiciones, modelos o teorías que hagamos para explicar el universo, si no checan con la realidad, no serán funcionales: la naturaleza siempre tiene la última palabra. También aprendí que el trabajo en equipo es de suma importancia en la labor científica. La colaboración con investigadores, técnicos y estudiantes hizo posible que este trabajo culminara.

Considero que el quehacer científico es un trabajo duro, difícil, y en algunos momentos tedioso, pero lleno de emociones y satisfacciones. Me quedo con el placer y regocijo de haber aportado mi granito de arena en un proyecto tan importante y trascendente para el desarrollo científico mexicano e internacional.

# Bibliografía

- [1] H. Salazar, L. Villaseñor, *Separation of cosmic-ray components in a single water Cherenkov detector*, Nucl. Instr. and Meth. A 553, pag. 295-298, 2005.
- [2] M. Amenomori, et al., *Observation of PeV gamma rays from the monogem ring with the Tibet air shower array*, ApJ. 635, L53-L56, 2005.
- [3] Aharonian F.A., *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation: A Crucial Window on the Extreme Universe*. World Scientific. Singapore, 2004.
- [4] Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [5] Weekes Trevor, *Very High Energy Gamma-Ray Astronomy*. IOP Publishing. United Kingdom, 2003.
- [6] Sitio oficial, experimento AGILE. <http://agile.rm.iasf.cnr.it/>
- [7] Sitio oficial, observatorio Tibet ASy. <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index.html>
- [8] Página oficial, proyecto ARGO-YBJ. <http://argo.na.infn.it/>
- [9] Sitio oficial, observatorio Milagro. <http://www.lanl.gov/milagro>
- [10] Página oficial, experimento HAWC. <http://umdgrb.umd.edu/hawc>
- [11] Vlasious Vasileiou, *A study on the Performance of Tanks for HAWC*. <http://umdgrb.umd.edu/hawc/documents/ResponseMemo.pdf>
- [12] Carramiñana Alonso Alberto, *Propuesta Proyecto Conacyt: Optimización del Diseño de HAWC*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. 2007.
- [13] Leo William R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments A How-to Approach*. Second Revised Edition, Springer-Verlag. Germany, 1994.
- [14] Grupen Claus, *Particle Detectors*. Cambridge University Press. Great Britain, 1996.
- [15] Rao M.V.S and Sreekantan, *Extensive Air Shower*. World Scientific. Singapore, 1998.
- [16] F.I.G. da Silva, et al., *Muon lifetime measurement from muon nuclear capture process*, Lat. Am. J. Phys. Educ., Vol.2, No. 2, 2008.

- [17] P. Allison, et al., *Observing muon decays in water Cherenkov detectors at the Pierre Auger Observatory*, Proc. 29<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf., Pune, pág. 101-106, 2005
- [18] Leon V. Hermes, *El detector V0A del Experimento ALICE-CERN*. Tesis de Maestría, Instituto de Física. UNAM, 2007.
- [19] Fotomultipliers tubes, Basics and Applications. Third Edition, Hamamatsu Photonics K.K., February 2006.
- [20] Price William J., *Nuclear Radiation Detection*. Second Edition, McGraw-Hill. USA, 1964.
- [21] M. Alarcón, et al., *Calibration and monitoring of water Cherenkov detectors with stopping and crossing muons*, Nucl. Instru. and Meth. A 420, pág. 39-47, 1999.
- [22] Página de la compañía Systems Integration Plus. Información sobre el sistema electrónico VME. <http://sip.vme.com>
- [23] Vargas Magaña Mariana, *Construcción y Caracterización de un detector de agua Cherenkov para estimar el ruido de fondo para el experimento HAWC*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM, 2007.
- [24] Vlasious Vasileiou, *Properties of the Extended Air Shower Particles at Milagro and HAWC Altitudes*. <http://umdgrb.umd.edu/hawc/documents/CorsikaMemo.pdf>
- [25] Knoll, Glen, *Radiation Detection and Measurement*, Third Edition, John Wiley and Sons. USA, 1999.
- [26] Kleinknecht, Konrad, *Detectors for Particle Radiation*. Second Edition, Cambridge University Press. United Kingdom, 1998.
- [27] González Trueba Laura Helena, *Construcción y Caracterización con Rayos Cósmicos del Detector V0A para el Experimento ALICE*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM, 2008.
- [28] Tsoufanidis Nicholas, *Measurement and Detection of Radiation*. Second Edition, Taylor & Francis. USA, 1995.
- [29] Klapdor-Kleingrothaus and Zuber K., *Particle Astrophysics*. Revised Edition, IOP Publishing. Great Britain, 2000.
- [30] Stanev Todor, *High Energy Cosmic Rays*. Springer. Germany, 2004.