



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Capacidad del observatorio de rayos gamma
HAWC para la detección en altas energías de las
radiogalaxias NGC 1275 e IC 310

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Computación

PRESENTA:

Edwin Antonio Galván Gámez

TUTOR

Dr. Nissim Illich Fraija Cabrera



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.
2017**



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.

1. Datos del alumno	1. Datos del alumno
Apellido paterno	Galván
Apellido materno	Gámez
Nombre(s)	Edwin Antonio
Teléfono	55 21 04 42 82
Universidad Nacional Autónoma de México	Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias	Facultad de Ciencias
Carrera	Ciencias de la Computación
Número de cuenta	308082379
2. Datos del tutor	2. Datos del tutor
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Nissim Illich
Apellido paterno	Fraija
Apellido materno	Cabrera
3. Datos del sinodal 1	3. Datos del sinodal 1
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Ernesto José María de la Salette
Apellido paterno	Belmont
Apellido materno	Moreno
4. Datos del sinodal 2	4. Datos del sinodal 2
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Hermes
Apellido paterno	León
Apellido materno	Vargas
5. Datos del sinodal 3	5. Datos del sinodal 3
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Rodrigo Alfonso
Apellido paterno	Martín
Apellido materno	Salas
6. Datos del sinodal 4	6. Datos del sinodal 4
Grado	Dr. en Ciencias.
Nombre(s)	Jaime Fabián
Apellido paterno	Vázquez
Apellido materno	De la Rosa
7. Datos del trabajo escrito.	7. Datos del trabajo escrito
Título	Capacidad del observatorio de rayos gamma HAWC para la detección en altas energías de las radiogalaxias NGC 1275 e IC 310
Subtítulo	
Número de páginas	67 p
Año	2017

A mi familia, este trabajo es más suyo que
mío, este trabajo es suyo.

Agradecimientos

Sin la intención de jerarquizar los agradecimientos ni de olvidar mencionar a nadie (que seguramente lo hago) quisiera agradecer de forma general a todos los compañeros, profesores y amigos que han estado conmigo todo este tiempo, algunos presentes aún en este trabajo de disertación.

De manera especial a David Leonardo, Julio Antonio y María Virginia, mi familia la cuál sin ellos muchas cosas no habrían podido si quiera planearse. A mis amigos Erick, Estefanía, Fernando y Óscar por tantas horas de discusión y café. A mi asesor Nissim Fraija por todas esas lecciones curriculares y extra curriculares.

A mi jurado Ernesto Belmont, Hermes León, Fabián Vázquez y Rodrigo Martín por su tiempo, comentarios, correcciones y observaciones a este trabajo.

Finalmente me gustaría agradecer el financiamiento de esta tesis por parte del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT a través de IA102917 y la colaboración HAWC por hacer posible este trabajo.

Resumen

El origen de los Rayos C3smicos es un problema abierto a poco m3s de un centenario de su descubrimiento por parte de Victor Hess. Si bien el esfuerzo de la comunidad cient3fica ha sido colosal, a3un es necesario, entre otros aspectos, entender que fuentes podr3an producirlos y en que regiones de las mismas, entender su comportamiento y sin olvidar la necesidad de tener observaciones precisas que puedan confirmar o desechar modelos te3ricos para el entendimiento de los mismos rayos c3smicos.

En el r3gimen de las altas energ3as (>300 GeV) muy pocas fuentes en el cielo han sido identificadas en este rango energ3tico, y en algunos casos, como el presentado en este escrito de disertaci3n, han sido detectadas por un observatorio sin encontrar contraparte que confirme su presencia por alguna otra colaboraci3n en el misma banda energ3tica.

As3 en este trabajo proponemos un estudio con el objetivo de poder confirmar la detecci3n de dos radiogalaxias, NGC 1275 e IC 310 localizadas en el c3mulo de Perseo, mediante el observatorio de rayos gamma HAWC situado en el parque nacional Pico de Orizaba, en M3xico. Est3s fuentes fueron descubiertas por la colaboraci3n MAGIC en el archipi3lago de las Canarias en Espa3a y recientemente una de ellas por la colaboraci3n de Veritas en Estados Unidos, muy cerca de la frontera con M3xico.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Primeros Vuelos	2
1.2. Rayos C3smicos de Muy Altas Energías	4
1.3. Radiaci3n gamma	7
1.4. Cascadas Atmosf3ricas Extensas	10
1.4.1. Cascadas Electromagn3ticas	10
1.4.2. Cascadas Hadr3nicas	13
1.5. Radiaci3n Cherenkov	14
1.6. Observatorios de Cherenkov Atmosf3ricos	17
2. El observatorio de rayos gamma HAWC	19
2.1. Detecci3n	20
2.2. Reconstrucci3n	24
2.2.1. Calibraci3n	24
2.3. Separaci3n entre rayos gamma y rayos c3smicos	25
2.3.1. Determinaci3n del n3cleo de la cascada	26
2.3.2. Compacidad	26
2.3.3. PINCness	27
2.3.4. Funci3n de Distribuci3n Lateral	28
2.4. Simulaci3n Monte Carlo	28
2.5. Reducci3n de datos	30
2.5.1. Integraci3n Directa	31
2.5.2. Funci3n de dispersi3n puntual	32
2.5.3. LiFF	33
3. N3cleos Activos Gal3cticos	35
3.1. Los NAG c3mo fuentes de rayos gamma	36
3.1.1. Radiogalaxias	37

3.2. Detección de IC 310 en TeV	40
3.3. Detección de NGC 1275 en TeV	41
4. Análisis del cúmulo de Perseo con HAWC	43
4.1. Transito de NGC 1275 e IC 310 sobre HAWC	43
4.2. Mapas de significancia obtenidos con HAWC de la region de Perseo . .	45
5. Conclusiones y trabajo a futuro	55
Índice de figuras	57
Índice de tablas	61
Bibliografía	63

Capítulo 1

Introducción

La Tierra constantemente se encuentra siendo bombardeada por partículas energéticas, las cuales tradicionalmente han sido llamadas rayos cósmicos. Esta radiación fue descubierta por el físico austriaco Victor Hess a principios del siglo XX como resultado de una serie de vuelos en globos aerostáticos, en la figura 1.2 se aprecia una fotografía de Victor Hess después de realizar un vuelo. Hess buscaba por medio de estos ascensos en globo poder explicar la radiación en la superficie terrestre. Con los resultados obtenidos en estos vuelos, Hess formuló la hipótesis de que el origen de ésta radiación no era terrestre, esta hipótesis fue muy cuestionada y controvertida en su época.

A pesar de que ha pasado más de un siglo de su detección, el origen de los rayos cósmicos aún es desconocido. Hoy en día se continúan realizando múltiples esfuerzos, para proponer, entender e identificar los posibles escenarios, mecanismos y regiones donde son acelerados. Se han logrado avances significativos tanto en modelos que buscan explicarlos así como en desarrollar técnicas para su detección. Ejemplos de estos avances sobran, por ejemplo, uno de ellos es el criterio de Hillas (del cuál hablaremos más adelante) que propone fuentes astrofísicas como sitios de origen de rayos cósmicos a distintas energías. Mientras que en el ámbito experimental se han desarrollado técnicas innovadoras, así como también en algunos casos, los detectores son de gran escala para la detección de estos fenómenos.

A altas energías, cuando la radiación que golpea a la Tierra es ionizante y ésta interactúa con partículas de la atmósfera, se genera una cascada atmosférica extensa (de ahora en adelante simplemente cascada). A la partícula que golpea la atmósfera se le denomina primaria (primario), mientras que las subsecuentes interacciones se denominan secundarias (secundarios). La interacción de las secundarias generan una

cascada las cuales son de especial interés, pues, es por medio de ellas que se logra la detección de rayos cósmicos y rayos gammas en la superficie terrestre.

HAWC ¹ (por sus siglas del inglés **H**igh **A**ltitude **W**ater **C**herenkov) se encuentra situado a una altura de 4,100 m s.n.m, ubicado entre el volcán Pico de Orizaba y Sierra Negra en el estado de Puebla en la república Mexicana. Es un observatorio de rayos gamma el cual trabaja en un rango energético que va desde los 50 GeV hasta los 100 TeV. Resultados preliminares han demostrado tener una eficiencia 99.9 % para discriminar rayos cósmicos con energías desde los 100 GeV hasta los 100 TeV [1].

Las radiogalaxias NGC 1275 e IC 310 forman parte de un cúmulo de galaxias localizado en la constelación de Perseo, a una distancia de 260,300,000 años luz. Estas dos radiogalaxias forman parte de los 4 núcleos activos galácticos más cercanos a la Tierra. Estos objetos son candidatos perfectos para ser observados en altas energías por HAWC.

1.1. Primeros Vuelos

Victor Hess se encontraba interesado por los trabajos de Wulf y Gockel [2] los cuales buscaban explicar el origen de la ionización en el aire. Desde ese entonces se sabe que si un electroscopio es expuesto a una fuente ionizante éste se descarga. Así que Hess colocó electroscopios de tipo Wulf [3] en las cestas de globos aerostáticos, aventurandose a realizar mediciones a una mayor altitud que las realizadas por Wulf en la cima de la torre Eiffel [3]. Esta campaña inicio el 28 de Agosto de 1911 y finalizó con un vuelo exitoso como todos los anteriores, realizado el 7 de Agosto de 1912 [2]. Resaltando el vuelo realizado el 17 de Abril de 1912, el cual tiene la relevancia de ser realizado en medio de un eclipse total de Sol. Este vuelo derivó en dos afirmaciones de Hess; En la primera afirmó que la radiación detectada no puede ser producto de la emanación de elementos atmosféricos, por lo que su origen tiene que ser extraterrestre. La segunda es que al no encontrar variación con respecto a las lecturas realizadas en los vuelos previos ésta radiación no puede ser producida en el Sol. Esta afirmación ahora se sabe es errada, pues el sol produce rayos cósmicos de manera isotrópica.

Los resultados de Hess están mostrados en la tabla 1.1. En ella se aprecia el comportamiento de la radiación a distintas alturas. Hess realizó ascensos tanto en el

¹<http://www.hawc-observatory.org/>



Figura 1.1 Victor Hess terminando un vuelo exitoso en 1912. Imagen tomada de *CERN timelines*.

día como en la noche, sin encontrar una diferencia en ellos. Finalmente Hess concluye [3]:

“Los resultados de las presentes observaciones se pueden explicar muy probablemente a través de una radiación de muy alta potencia de penetración, incidente sobre la atmósfera desde arriba y capaz de causar la ionización observada en recipientes cerrados incluso en las capas más bajas de la atmósfera. La intensidad de la radiación exhibe variaciones oportunas en las escalas horarias. Puesto que no encontré una reducción de la intensidad de la radiación durante la noche o durante un eclipse solar, el Sol puede ser excluido como el origen de esta radiación hipotética.”

Hess fué galardonado con el premio Nobel en 1936 [4] por su descubrimiento revolucionario realizado en el período de 1911 a 1913. Publicándolos en las memorias de la academia de ciencias de Viena, así que el congreso celebrado entre el 21 y 28 de Septiembre de 1913 fue testigo del nacimiento de los rayos cósmicos. La primera confirmación de los experimentos de Hess fue por conducto de Werner Heinrich Gustav Kohloerster [2] en una serie de ascensos realizados entre 1913 y 1914 los cuales contemplaron variables como la temperatura que Hess no tomó en consideración e hizo

Altura lograda desde la superficie (m)	Radiación medida (iones $cm^{-3}s^{-1}$)		
	Electroscopio 1	Electroscopio2	Electroscopio3
0	16.3	11.8	19.6
Hasta 200	15.4	11.1	19.1
300 - 500	15.5	10.4	18.8
500 - 1000	15.6	10.3	20.8
1000 - 2000	15.9	12.1	22.2
2000 - 3000	17.3	13.3	31.2
3000 - 4000	19.8	16.5	35.2
4000 - 5200	34.4	27.2	-

Tabla 1.1 Resultados obtenidos por Hess como producto de la serie de vuelos realizados entre 1911 y 1912. tabla obtenida de [2].

mediciones a una mayor altitud de los que el propio Hess realizó.

1.2. Rayos Cósmicos de Muy Altas Energías

Se cataloga a los rayos cósmicos de muy altas energías a aquellos cuya energía este por encima de 30 GeV ya que a menores energías, pueden ser producidos u opacados por el Sol o su viento.

Se observa en la figura 1.2 el espectro de rayos cósmicos detectados en la Tierra. Este espectro presenta dos quiebres significativos, los cuales nos permiten describir el espectro mediante una única ley de potencias $E^{-\alpha}$. El primer quiebre se presenta en $E \sim 10^{15}$ eV, la cual es conocida como la *rodilla*. El segundo quiebre, también conocido como el *tobillo* al rededor de $E \sim 10^{18}$ eV. El cambio entre la rodilla y el tobillo sugiere que los rayos cósmicos a esas energías tienen un lugar de origen distinto. Se observa en la figura 1.2 los datos obtenidos por distintos experimentos en varios rangos energéticos, en orden ascendente en la energía; LEAP (por sus siglas del inglés **L**ow-**E**nergy **A**nti**P**roton) [5], PROTON [6], Akeno [7] y finalmente HiRes (por sus siglas del inglés **H**igh **R**esolution **F**ly's **E**ye) [8] en función de la energía E . La línea punteada representa una ley de potencia $E^{-2.7}$.

Una posible explicación de los quiebres observados dentro del espectro, es debido al lugar de aceleración de los rayos cósmicos. Es aceptado que la mayor contribución

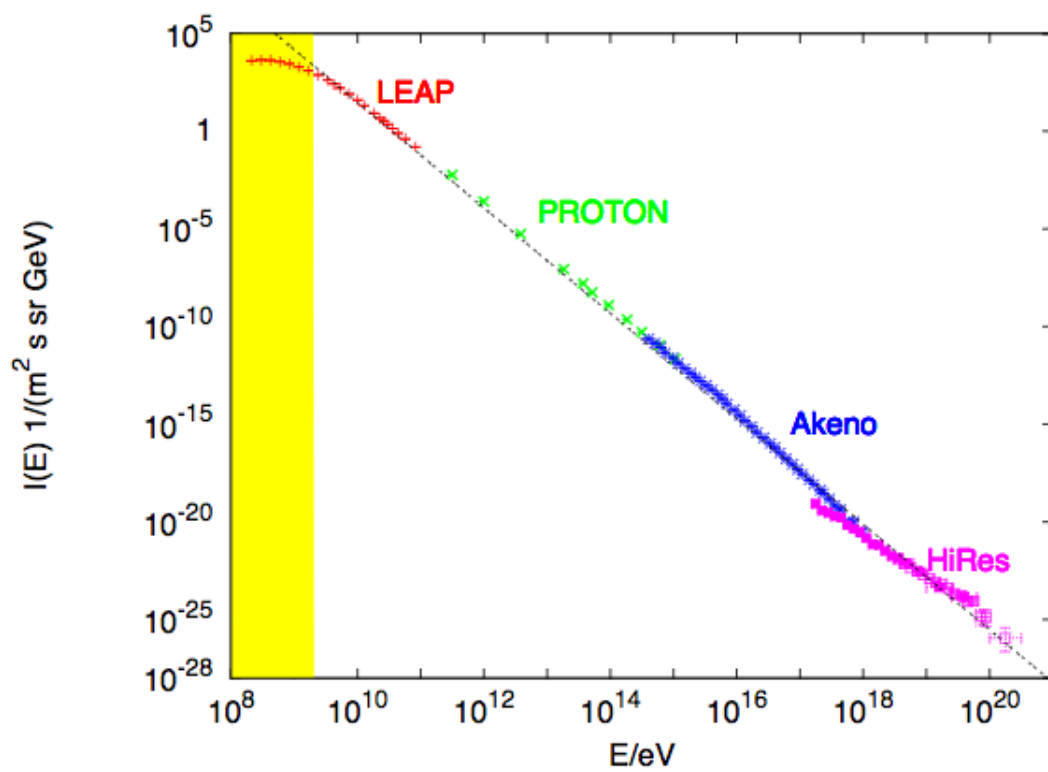


Figura 1.2 Espectro de rayos c3smicos en distintos rangos de energía. El área sombreada de amarillo representa la región de energía que es influenciada por el Sol. Imagen tomada de [9].

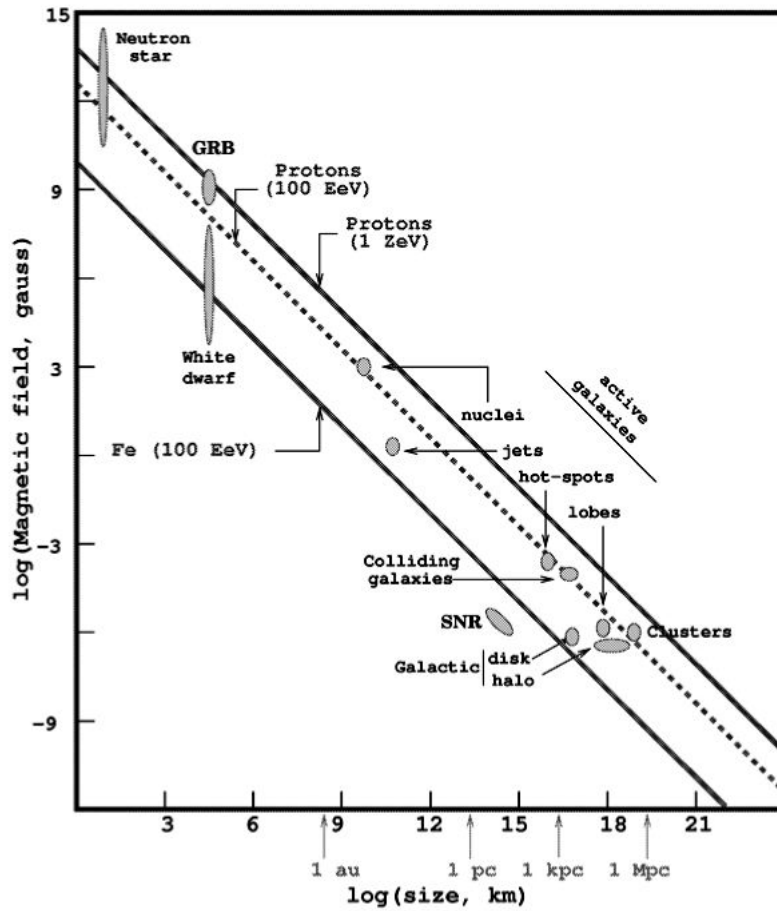


Figura 1.3 Versión actualizada del criterio de Hillas, las líneas representan la capacidad de acelerar rayos cósmicos en función del campo magnético y del tamaño de la fuente. La línea punteada representa protones con energía de 100 EeV, la línea negra inferior núcleos de Fe a energías de 100 EeV y la línea negra superior representa a protones de 1 ZeV. Imagen tomada de [12].

de rayos cósmicos entre la rodilla y el tobillo son de origen galáctico y son acelerados principalmente por remanentes de supernovas [10]. Para rayos cósmicos con energías por encima del tobillo los remanentes de supernovas no cuentan con mecanismos efectivos para acelerar rayos cósmicos a estas energías. Esto obliga a buscar regiones de aceleración más violenta de origen extragaláctico.

Hillas [11] estableció un criterio con fundamento en argumentos dimensionales básicos, los cuales son apreciables en la figura 1.3. En ella se muestran los requisitos para el campo magnético en función del tamaño del objeto astrofísico así como aquellos lugares con la capacidad de acelerar rayos cósmicos de altas energías.

A continuación presentamos una breve descripción de algunas fuentes que son capaces de acelerar rayos cósmicos a energías por encima de 10^{18} eV.

- Pulsares. Los pulsares son estrellas de neutrones las cuales poseen campos magnéticos $B \sim 10^{13}$ G. Esto sugiere que son capaces de acelerar núcleos de hierro a energías por encima de 10^{20} eV.
- **Nucleos Activos Galácticos (NAG)**. Los NAG son galaxias que presentan una luminosidad en el centro que no es atribuible a actividad estelar, comparable a la luminosidad de toda la galaxia misma. Se cree que en el centro contienen un disco de acreción al rededor de un agujero negro masivo, usualmente con una masa $M_{bh} \approx 10^{6-9} M_{\odot}$ (masas solares) y un campo magnético $B \approx 300$ G. En algunas ocasiones los núcleos tienen asociados jets que llegan a terminar en lóbulos como lo son las radiogalaxias. Estos objetos pueden acelerar partículas con una energía $E > 10^{20}$ eV. Uno de los primeros modelos de aceleración de rayos cósmicos ultra energéticos fue propuesto por Jörg P. Rachen y Peter L. Biermann en 1992 [13]. El modelo propone a los lóbulos de las *FR II*² como regiones de aceleración de rayos cósmicos, pues en estas regiones se llegan a alcanzar una luminosidad magnética $L_B \gtrsim 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ así siendo capaz de reunir la energía necesaria para acelerar rayos cósmicos a altas energías [15].

1.3. Radiación gamma

La astronomía de rayos gamma tuvo sus orígenes de la mano de William Lester Kraushaar, pionero en la detección de rayos gamma de origen extraterrestre. Sus primeros experimentos fueron realizados por medio de globos aerostáticos. Sin embargo, fue hasta que el satélite Explorer XI. Este satélite que operó los meses de Abril a Septiembre de 1961 reportó la detección de 22 rayos gamma [16] con evidencia de ser originados en el espacio, naciendo de este modo la astronomía de rayos gamma.

Esta nueva astronomía tiene como dominio energías que van desde 0.5×10^6 eV hasta energías mayores a 10^{20} eV. Debido a la gran cantidad de espectro electromagnético que abarca esta radiación (¡más de 14 ordenes de magnitud!). Es conveniente sub-clasificarlos en distintos rangos energéticos, de manera específica en 5 áreas;

²Clasificación propuesta por Fanaroff & Riley en 1974, véase [14].

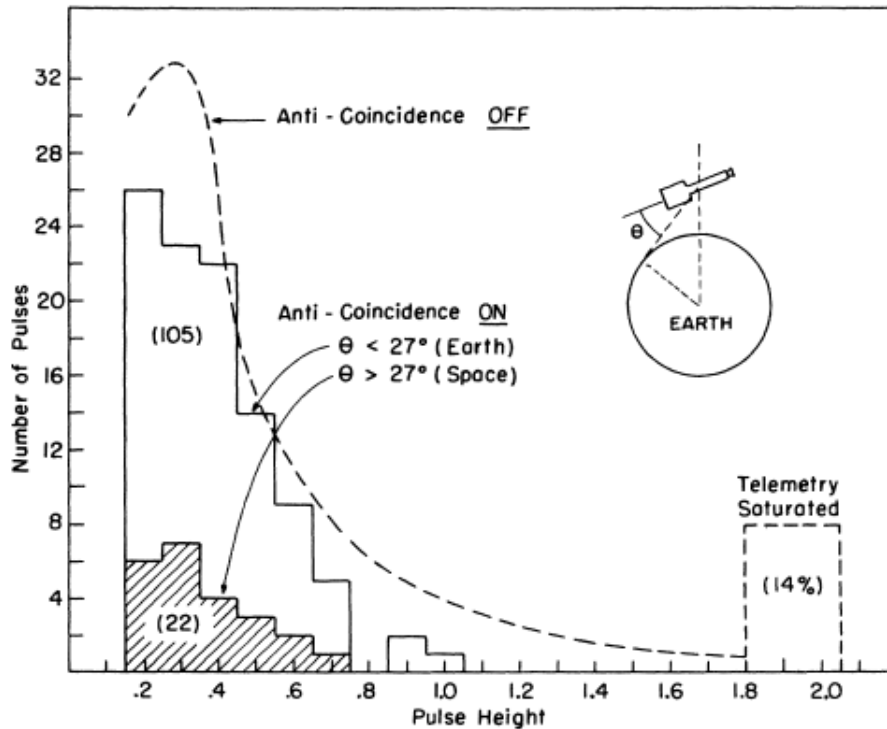


Figura 1.4 Distribución de rayos gamma detectados por Explorer XI. Imagen tomada de [16] .

- *De bajas energías.* Por debajo de 30 MeV.
- *De altas energías.* Son aquellos con energías entre 30 MeV - 30 GeV.
- *De muy altas energías.* Que van desde 30 GeV hasta 30 TeV.
- *De ultra alta energía.* Son aquellos que logran alcanzar energías en el rango de 30 TeV hasta 30 PeV.
- *Extremadamente de altas energías.* Son aquellos fotones con una energía mayor a 30 PeV.

En donde las dos primeras regiones necesariamente tiene que ser detectadas por globos aerostáticos o satélites, las otras dos regiones pueden ser detectadas por detectores en la superficie terrestre.

Desafortunadamente sólo una pequeña parte del Universo es visible en radiación gamma con energías por encima de 30 GeV, pues esta es atenuada por la luz de fondo extra galáctica (la cual es radiación acumulada entre ~ 0.1 y $100 \mu m$). En la figura 1.5

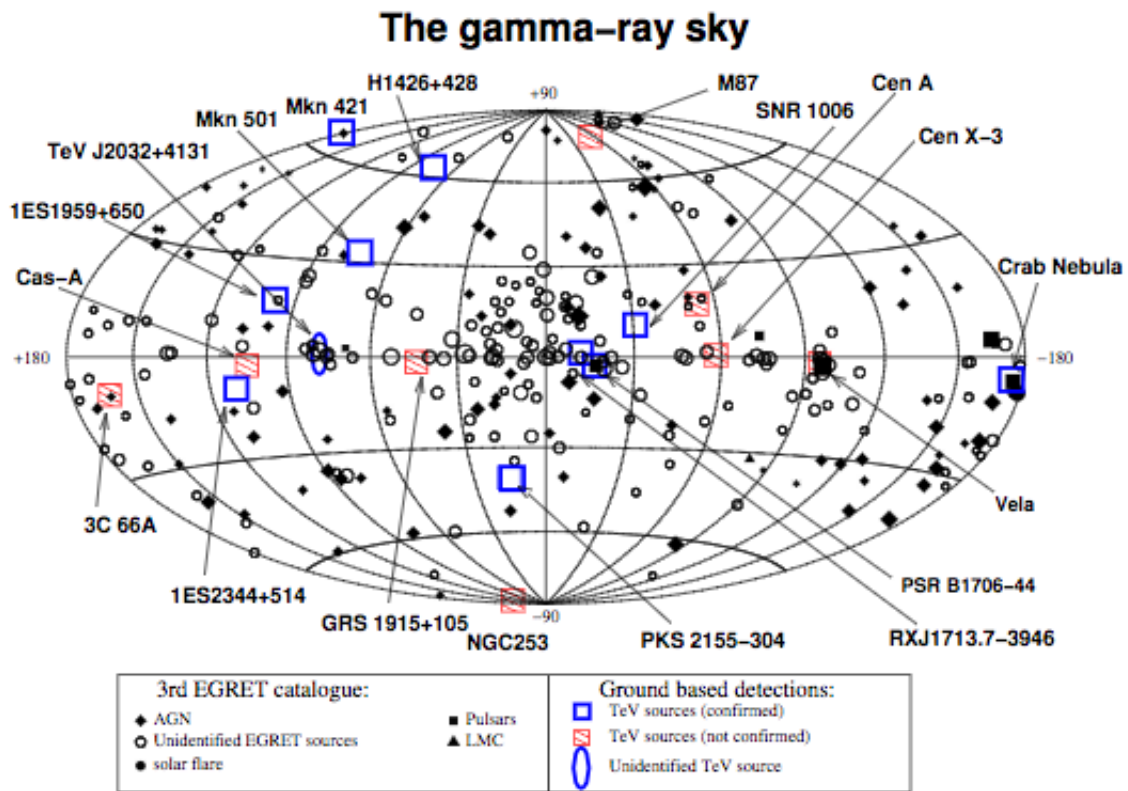


Figura 1.5 Universo observado en altas energías por el satélite EGRET superpuesto con las fuentes que habían sido detectadas rayos gamma de muy altas energías conocidas hasta ese momento. Imagen tomada de [17].

se aprecia un mapa de las fuentes que emiten rayos gamma de altas energías.

Es imperativo resaltar que la astronomía de rayos gamma tiene un papel fundamental, pues provee información sobre procesos relativistas no térmicos en un entorno astrofísico, debido a que su producción es copiosa en distintos objetos astrofísicos, y que no es afectado por campos magnéticos, siendo detectados por observatorios terrestres. Combinando estas cualidades que juegan un papel fundamental en el entendimiento de procesos de creación de rayos cósmicos, debido a que, una posible fuente que emite rayos gamma en altas energías lo hace mediante la producción de π^0 la cual es el resultado de colisiones entre rayos cósmicos y gas.

1.4. Cascadas Atmosféricas Extensas

A energías por encima de 10^{14} eV, las detecciones de los rayos cósmicos y los rayos gamma son realizadas de manera indirecta, esto es, por medio de la cascada que originan al momento de interactuar con la atmósfera. A ésta cascada se le conoce como cascada atmosférica extensa, las cuales fueron descubiertas por el físico francés Pierre Auger y sus colaboradores en 1939 [18]. En este proceso, en el cuál el número de partículas secundarias incrementa rápidamente se genera un proceso de multiplicidad. Este proceso consiste en que la energía de la partícula primaria es fraccionada en las partículas secundarias, así que el proceso de multiplicidad se detiene en el momento en que la energía de las secundarias es muy baja. Como consecuencia de la pérdida de energía de partículas por ionización la cascada muere eventualmente. De este modo, existe una primera característica de las cascadas atmosféricas, esta depende de la energía y de la naturaleza de la primaria la cascada podría detenerse a nivel de tierra o podría desvanecerse a una altura muy alta, es decir, el tiempo de vida de la cascada fue muy corto.

Debido a que las partículas dentro de la cascada son relativistas, éstas logran alcanzar velocidades que superan a la velocidad de la luz en el medio, produciendo ondas de choque que se traducen en un destello de luz azul, conocido como luz Cherenkov. Esta luz es radiada en un cono de luz con un ángulo de apertura de $\sim 40^\circ$ (atravesando un medio con un índice de refracción como el del agua) con respecto a la dirección de la partícula que la generó, de este modo, el ángulo con el cuál fue emitida la luz Cherenkov es muy cercano al ángulo con el cuál incidió la partícula primaria en la atmósfera.

Podemos entonces clasificar a las cascadas de acuerdo a la primaria que las originó. Las cascadas que son generadas por hadrones “cascadas hadrónicas” y las generadas por rayos gamma ó electrones generan “cascadas electromagnéticas”. Se puede observar entonces en la figura 1.6, que dependiendo de la energía de la partícula primaria y del tipo de partícula, la cascada tiene distintos tipos de evoluciones.

1.4.1. Cascadas Electromagnéticas

Este tipo de cascadas se presentan cuándo en la atmósfera se estrella un rayo gamma o un electrón (γ , e^\pm), de tal modo que la producción de pares es el proceso dominante.

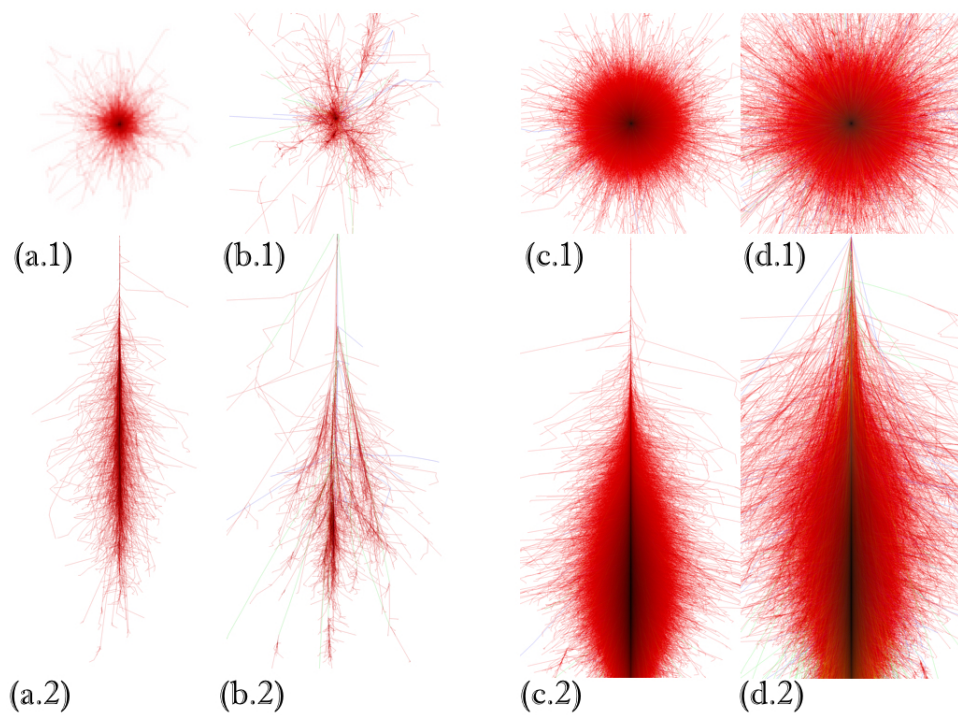


Figura 1.6 Simulaciones de cascadas atmosféricas electromagnéticas (**a** y **c**) y hadrónicas (**b** y **d**) a distintas energías de la primaria (100 GeV **a** y **b**, mientras a 100 TeV **c** y **d**). Se aprecia en los renglones **1** y **2** se muestran cortes transversales y horizontales respectivamente a la cascada las cuales exhiben la topología de ambas. Las simulaciones son realizadas con el software CORSIKA. Crédito Fabian Schmidt . Imagen tomada de [19].

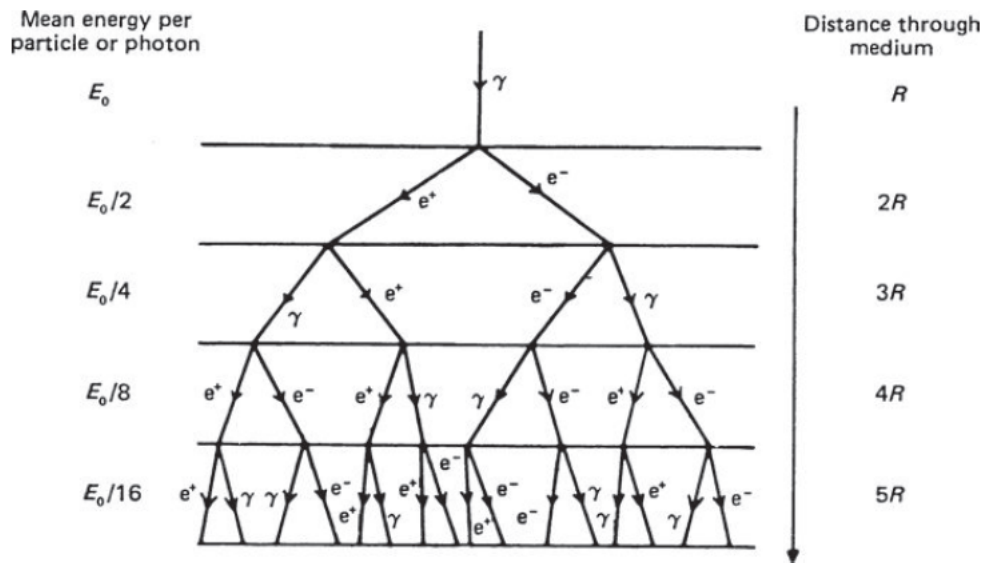


Figura 1.7 Interpretación geométrica en la cual se ilustra la evolución de una cascada inducida por un rayo gamma. Imagen tomada de [20].

Basados en esta consideración, entonces, sea E_0 la energía del rayo gamma primario el cual atraviesa una distancia R antes de crear un par positron-electron, en promedio, el positron y el electron tienen una energía $E = E_0/2$, de tal modo que en el próximo tramo de longitud R volverán a perder en promedio la mitad de su energía, produciendo así un fotón de energía $E_\gamma = E_0/4$, así que en el caso general de la n -ésima longitud recorrida, la energía se expresa como: $E_{\gamma,nR} = \frac{E_0}{2^{n-1}}$.

Este proceso se puede apreciar en la figura 1.7 así que, por radiación de Bremsstrahlung se generan rayos gamma secundarios, los cuales a su vez, si estos tienen la energía suficiente, podrán producir otro par de electron-positron los cuales podrán someterse nuevamente a Bremsstrahlung generando más fotones. De este proceso se obtiene como resultado una cascada que está compuesta de fotones, electrones y positrones, los cuales continúan viajando en la dirección original del rayo gamma primario y compartiendo su energía total E_0 , hasta alcanzar la energía E_c la cual es la energía crítica para poder seguir generando este proceso. El máximo de la cascada se alcanza cuando la suma de la energía de todas las partículas es igual a E_c , una vez pasado este máximo la cascada comienza a ser absorbida.

1.4.2. Cascadas Hadrónicas

A diferencia de las cascadas electromagnéticas, las cascadas hadrónicas son generadas a partir de rayos cósmicos (protones o núcleos) que inciden en la atmósfera. Estas cascadas son similares a las electromagnéticas, salvo, que ahora también se toman en cuenta toda una colección de interacciones hadrónicas.

Mientras que las secundarias tengan energías suficiente para ser capaces de reproducir el proceso de multiplicidad, este se llevará a cabo por medio de interacciones nucleares. La energía mínima requerida del nucleon para continuar con este proceso es de 1 GeV en el caso de los protones la pérdida de energía se da por ionización.

En el caso de los piones hay tres casos a considerar, el primero de ellos, el de un π^0 donde se presenta la cadena $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.

Cada uno de los fotones generados son capaces de iniciar una cascada electromagnética como las descritas anteriormente. Así, las cascadas hadrónicas también presentan una componente electromagnética.

Ahora bien, si consideramos los piones cargados, se presentan las siguientes cadenas; $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, y también $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

Los piones cargados decayeron en muones, neutrinos y antineutrinos, por lo que finalmente los muones decaen como: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ y $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$.

De ésta manera se producen electrones, positrones y neutrinos muónicos y electrónicos. Si el primario es ultra energético, entonces los muones son generados con altas energías, siendo así altamente penetrantes con un tiempo medio de vida de 2.2×10^{-6} s correspondiendo a una distancia de 660 m lo que hace que sean detectados en la superficie terrestre. Esto es debido a que casi no tienen interacciones nucleares y su pérdida por ionización es relativamente pequeña. El desarrollo de éste tipo de cascadas se puede observar en la figura 1.8.

La detección de estas cascadas es por medio de la radiación Cherenkov que se produce por las partículas cargadas a lo largo de la evolución de la cascada.

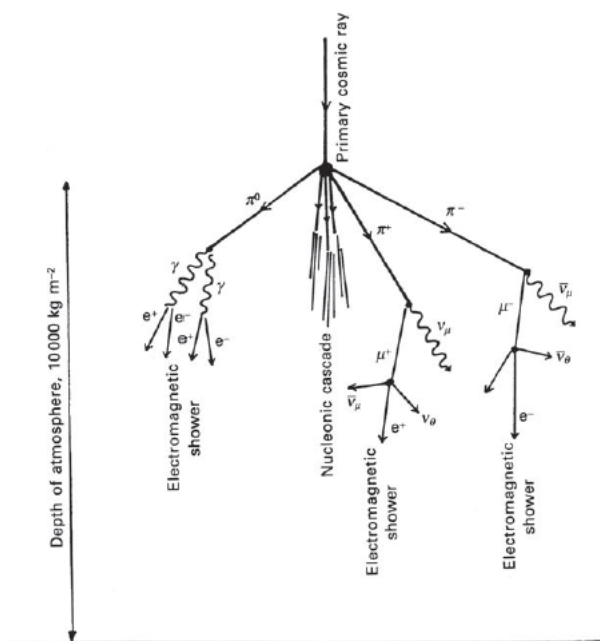


Figura 1.8 Modelo geométrico de una cascada inducida por un rayo cósmico. Imagen tomada de [20].

1.5. Radiación Cherenkov

Como hemos adelantado previamente. Considerando una partícula que alcanza una velocidad v superior a la de la luz en un medio transparente con un índice de refracción n ; sí se cumple que $v > c/n$ entonces, es posible de emitir radiación Cherenkov. Esta puede ser detectada como un pulso en óptico. Por ejemplo, consideremos el agua como medio. Tiene un índice de refracción $n \approx 1.333$ entonces aquellas partículas que que alcancen una velocidad $v > 0.75 c$ podrán emitir radiación Cherenkov. Esto tiene aplicaciones inmediatas, pues es gracias a esta radiación en la que están basados los observatorios Cherenkov, capaces de detectar rayos cósmicos y rayos gamma ultra energéticos.

Para ilustrar este fenómeno (representado en la figura 1.9) supongamos que un electrón atraviesa un medio transparente, cuya trayectoria esta representada por la traza AB que se observa en el panel izquierdo de la figura 1.9. Si consideramos su posición P en un instante de tiempo. Una pequeña vecindad de átomos que componen el medio sufrirán una deformación por el paso del electrón debido a su campo eléctrico, de tal forma que las cargas de los electrones son desplazadas en dirección de las cargas positivas más fuertes que los núcleos de esos átomos. Éstos sufrirán una pequeña

deformación por este fenómeno y éstos se comportarán como dipolos elementales, tal como se muestra en la figura 1.9. Consideremos entonces el paso del electrón durante un tiempo $\delta\tau$ por la traza AB (la cuál habrá recorrido $\beta c\Delta\tau$ y β esta relacionado con la energía cinética de la partícula como $E = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$ situado en un punto P' generando los siguientes dos escenarios:

1. Sí sucede que $v < c/n$ se logra polarizar una pequeña fracción del medio al rededor de P , sin embargo, en el momento en que el electrón se encuentra en P' , los átomos que habían sido polarizados y deformados en P regresarán a su estado inicial y únicamente se producirá un pequeño pulso electromagnético. Obteniendo simetría completamente del campo polarizado que envuelve al electrón, no resulta ser un campo a largas distancias y por lo tanto no habrá radiación.
2. En cambio, si el electrón alcanza una velocidad tal que $v > c/n$ en este caso, el campo no es simétrico por completo, salvo en el plano azimutal, pero al rededor del eje, se forma un dipolo, el cuál alcanza distancias más largas que el track del electrón en el caso anterior, de tal forma que se crea de manera momentánea un campo generado por la traza AB , como la que se exhibe en el panel izquierdo de la figura 1.9, permitiendo a cada átomo polarizado radiar un pequeño pulso electromagnético. Como consecuencia de esto la radiación se extenderá sobre una banda de frecuencias correspondientes a varios componentes de Fourier de éste pulso.

Gracias a la velocidad de la partícula, las ondículas de las porciones del track logran estar en fase, en un punto lejano de observación hay un campo resultante, en caso contrario, de que la velocidad de la partícula es menor a la velocidad de la fase de la luz en el medio, las ondículas generan interferencia destructiva, de tal modo que el campo de intensidad es nulo. La radiación se genera en dirección del ángulo θ , respecto a cada instante P en la traza del electrón AB tal como se muestra en la figura 1.10, se aprecia la coherencia que toma lugar cuándo la partícula atraviesa AB en el mismo tiempo que la luz viaja de A a C . Con la velocidad de la partícula βc la luz atraviesa una distancia $AC = \frac{c}{n}\Delta\tau$

El cono generado se describe por medio de la *Relación Cherenkov* la cuál está determinada como; $\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}$, de donde se pueden destacar las siguientes propiedades:

- La radiación únicamente toma lugar sí se supera el umbral $\beta_{min} = \frac{1}{n}$ por debajo de ese umbral no se genera radiación.

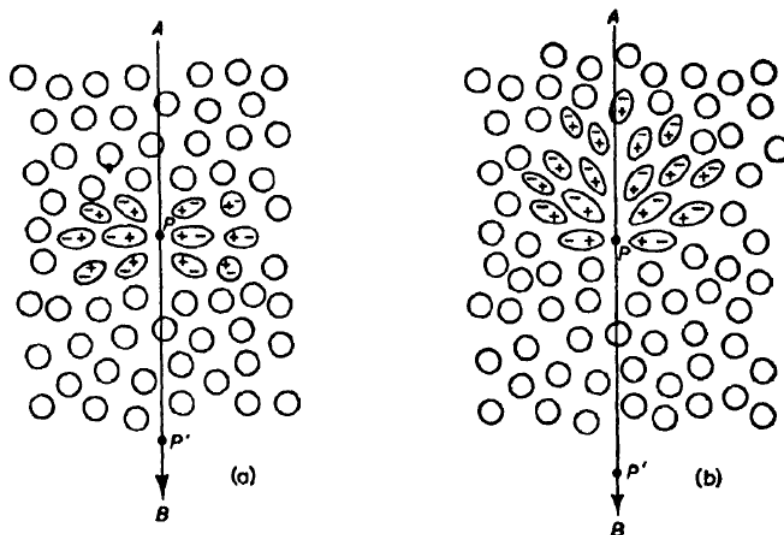


Figura 1.9 Representación de un electron atravesando un medio transparente, de (a) se aprecia como un electron con una velocidad $v_e < c/n$, mientras que en (b) el electron a alcanzar una velocidad $v_e > c/n$. Imagen tomada de [21].

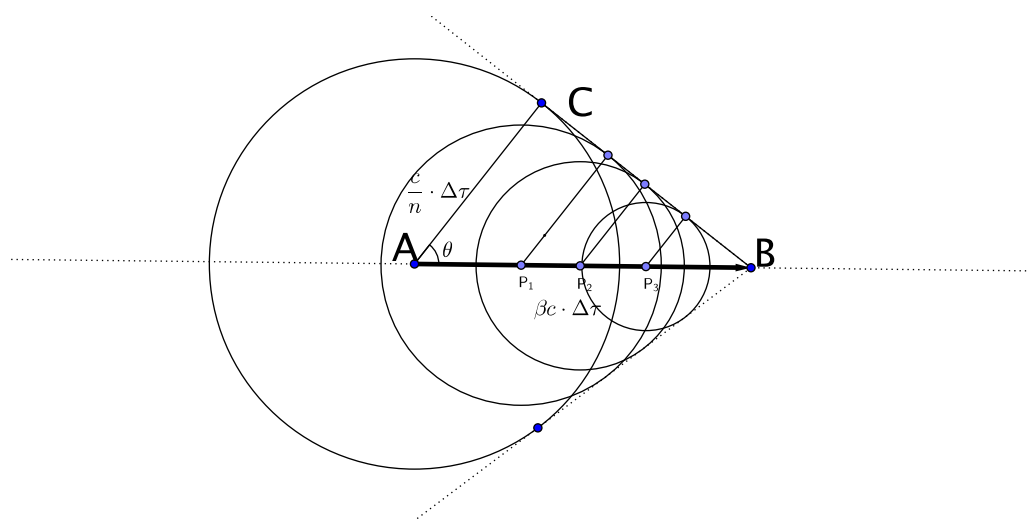


Figura 1.10 Diagrama de Huygens del efecto Cherenkov.

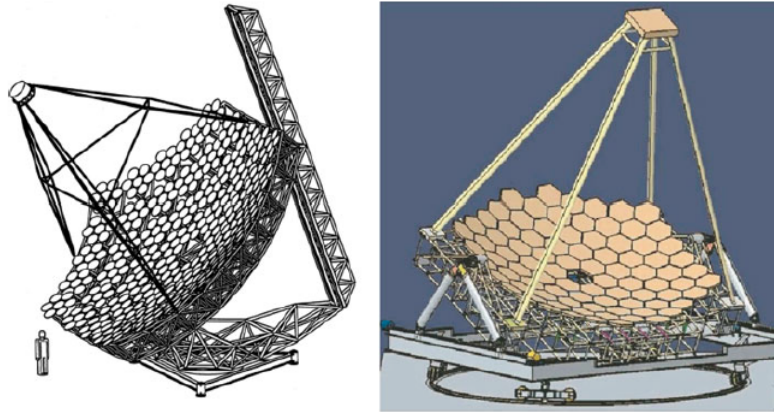


Figura 1.11 Esquema de dos telescopios atmosféricos, de lado izquierdo un telescopio del arreglo de HESS, de lado derecho, un prototipo para el arreglo CTA. Ambos a escala. Imagen tomada de [22].

- Sí la partícula es ultra relativista, entonces $\beta \sim 1$ y se alcanza un ángulo máximo de emisión $\theta_{max} = \arccos\left(\frac{1}{n}\right)$.
- Sí el índice de refracción cumple que $n > 1$ entonces la radiación ocurre principalmente en las región visible del espectro y en el cercano al visible.

1.6. Observatorios de Cherenkov Atmosféricos

Cómo previamente hemos mencionado, el efecto Cherenkov se produce cuándo partículas con velocidades más rápidas que la de la luz en un medio, transparente a fotones, puede producir radiación Cherenkov. En el caso particular de la atmósfera, los observatorios que hacen uso de este hecho son denominados Telescopios Cherenkov Atmosféricos (o también Telescopios de Imagen Cherenkov Atmosféricos, IACTs en inglés) los cuales consisten en pequeños arreglos de antenas compuestas de espejos en una superficie cóncava los cuales tienen una cámara en el foco geométrico de la antena, como se observa en la figura 1.11.

Estos observatorios detectan la radiación Cherenkov producida en la atmósfera, siendo necesario el hecho de que estén totalmente aislados de fuentes lumínicas que sean capaces de opacar la luz Cherenkov. Así su funcionamiento esta limitado a noches totalmente claras y condiciones atmosféricas muy limitadas.

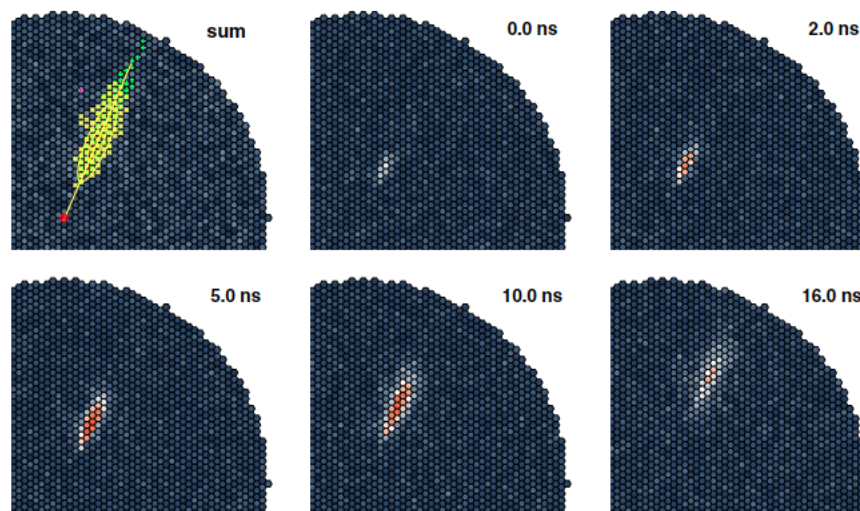


Figura 1.12 Simulación de una detección de un track originado por un rayo gamma detectado por CTA a distintos tiempos de observación. Imagen tomada de [22].

Su análisis está basado en la detección de las imágenes generadas por la luz Cherenkov producida por la cascada, el comportamiento de un evento se puede apreciar en la figura 1.12. Estos observatorios tienen una resolución angular bastante sensible. Desafortunadamente su construcción representa fuertes cantidades de dinero, mientras los arreglos de estos observatorios actualmente no superan los 5 detectores.

Los observatorios Cherenkov basados en agua representan una alternativa para estos observatorios, pues como la detección de cascadas atmosféricas no es mediante técnicas basadas en imágenes, pueden operar sin necesidad de condiciones atmosféricas tan restrictivas como los IACTs y son de producción más económica, pues comparativamente CTA (acrónimo de **C**herenkov **T**elescope **A**rray) tiene un presupuesto previsto de \$ 327 Millones USD [23], mientras que LHAASO (por sus siglas del inglés **L**arge **H**igh **A**ltitude **A**ir **S**hower **O**bservatory) un telescopio Cherenkov híbrido con detección de luz Cherenkov en agua y en aire localizado en la China cuenta con un presupuesto de \$ 174 Millones USD [24], mientras que HAWC tuvo un presupuesto inicial más modesto de \$ 14 Millones USD [25] por lo que es considerablemente más económico que los dos experimentos antes mencionados. El hecho de no depender de condiciones climáticas les permite operar las 24 horas del día a lo largo del año.

Capítulo 2

El observatorio de rayos gamma HAWC

El observatorio de rayos gamma HAWC (por las siglas en inglés **H**igh **A**ltitude **W**ater **C**herenkov) inició como un proyecto conjunto entre universidades de Estados Unidos de América y Estados Unidos Mexicanos. Actualmente se han sumado los esfuerzos de universidades europeas, para lograr una colaboración activa de 34 instituciones en total, de las cuáles 14 son universidades Mexicanas¹.

HAWC lidera una nueva generación de telescopios de rayos gamma. Actualmente mucha de la experiencia con la que experimento ha sido construido es consecuencia directa de lo aprendido por la colaboración MILAGRO ². El observatorio se encuentra situado en el parque nacional Pico de Orizaba, en el estado de Puebla, en la República Mexicana, a una altitud de 4100 *m* s.n.m. Debido a su funcionamiento, el cuál está basado en la técnica de detección de radiación Cherenkov en agua, le permite no tener limitantes en realizar observaciones por mal clima o de la incapacidad de realizar observaciones en el día, limitando sus funcionamiento únicamente en la noche. Así de este modo HAWC tiene la capacidad de realizar monitoreo de fuentes celestes y la detección de emisiones y fuentes difusas.

HAWC fue inaugurado el 19 de Marzo de 2015, dando así por concluida las etapas de operaciones de HAWC en construcción, las cuales fueron:

¹<http://hawc-observatory.org/collaboration/>

²<http://umdgrb.umd.edu/cosmic/milagro.html>

- *VAMOS* (por sus siglas en inglés **V**erification and **A**ssessment **M**easuring of **O**bservatory **S**ubsystem) fue un prototipo construido durante el 2011 cuyos objetivos fueron el finalizar el diseño, técnicas de construcción y el sistema de adquisición de datos (DAQ) para HAWC. El tiempo de operación de VAMOS comprendió de Octubre 2011 hasta Mayo 2012 [26]. VAMOS constó de un arreglo de 6 detectores de agua Cherenkov (tanques) cómo los que se ilustran en la figura 2.1 VAMOS actualmente no forma parte del arreglo principal.
- El arreglo principal, es decir HAWC, tuvo las siguientes etapas; *HAWC 30*, *HAWC 100* y *HAWC 300* [27]. *HAWC 30* abordó principalmente las tomas de decisiones en cuestiones de hardware, así cómo la sincronización de los TDCs (del inglés Time to Digital Converter) los cuáles son dispositivos encargados de medir el tiempo de un fenómeno dado, cuya salida es una codificación binaria para así poder realizar el análisis de los eventos registrados. Las dos etapas restantes de construcción, es decir, *HAWC 100* a *HAWC 300* fueron conformadas principalmente en extender el sistema de adquisición de datos y poder discriminar rayos cósmicos de rayos gamma.

HAWC es efectivo en un rango energético que va aproximadamente desde los 100 GeV hasta los 100 TeV. Cuenta con una superficie de $25,000 m^2$ conformada por 300 detectores Cherenkov. La estructura de cada detector está determinada por un tanque de acero con 7.3 m de diámetro y 4.5 m de altura, el cual contiene un bladder³ con capacidad de almacenar 200,000 l de agua purificada y 4 fotomultiplicadores, uno central, de 10 pulgadas, R7081 y tres fotomultiplicadores periféricos; marca Hamamatsu, modelo R5912 de 8'pulgadas cada uno [30]. Esta configuración, aunada a la altitud que se encuentra le permite obtener una mayor sensibilidad con respecto de MILAGRO [28] [30].

HAWC cubre la región del cielo entre los -20° y $+60^\circ$ de declinación, que gracias a la rotación de la Tierra cubre un área de $2\pi sr$ del cielo [31].

2.1. Detección

HAWC cuenta con dos sistemas DAQ; el principal está diseñado para llevar el registro de eventos generados por el arribo de una cascada atmosférica, el cuál re-

³Un bladder es un contenedor de plástico flexible.

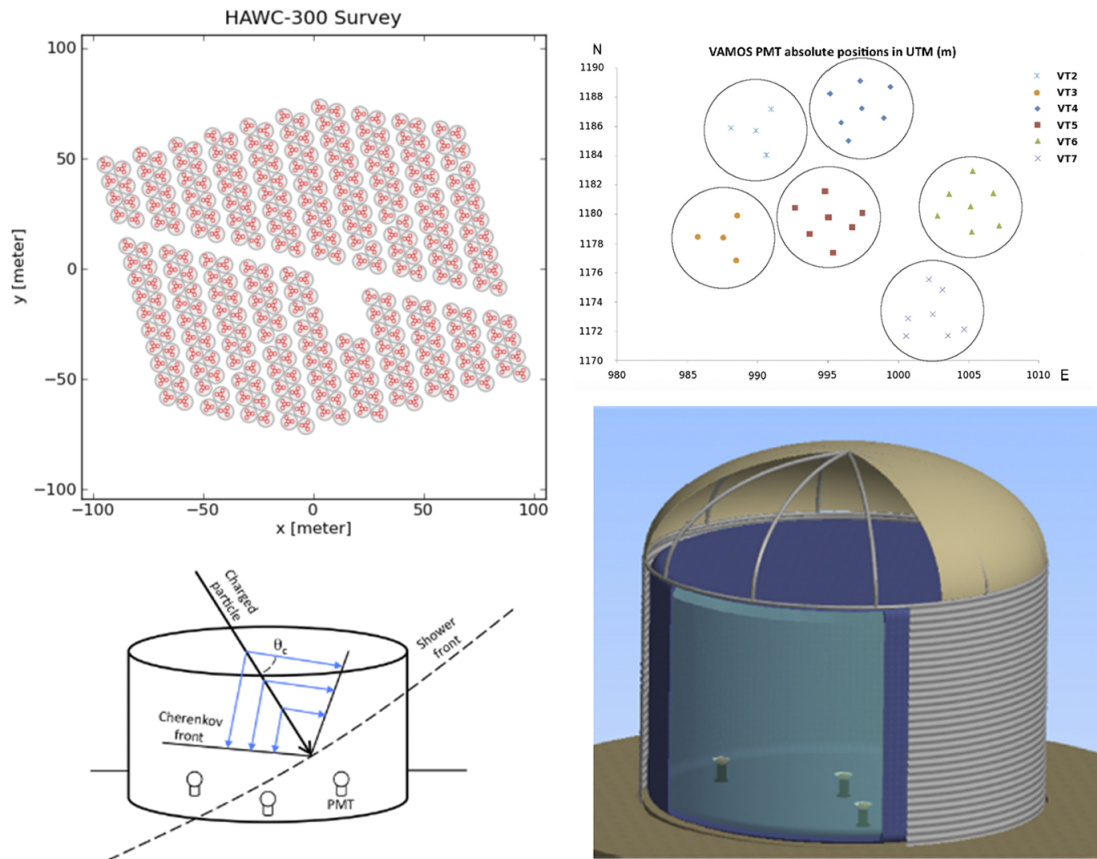


Figura 2.1 Superior Izquierda Diseño final de la posición los 300 detectores que conforman a HAWC, los círculos rojos representan la distribución final de los PMT dentro de los tanques los ejes representan la distancia de extremo a extremo del experimento, tomando el centro de éste como centro de referencia. Imagen tomada de [28]. **Superior Derecha** Diseño final de VAMOS conformado por 6 detectores, en cada tanque se realizaron pruebas con distintas configuraciones para elegir la distribución de los PMT. Los ejes muestra la posición geográfica del experimento. Imagen tomada de [26]. **Inferior Izquierda** Representación de la interacción de una partícula miembro de una cascada atmosférica que produce luz Cherenkov dentro de un tanque, las líneas azules representan el ángulo θ con el que es emitida la luz, la flecha negra indica la traza de la partícula y la línea punteada el frente de la cascada. Imagen tomada de [29]. **Inferior Derecha** Representación de un detector Cherenkov, se observa el bladder (superficie azul marino) contenido dentro del tanque, (superficie gris), el bladder a su vez contiene los 4 fotomultiplicadores (el que se aprecia en el centro es el de 10", el oculto es uno de los PMTs periféricos de 8"). Imagen tomada de [26].

gistra los eventos de manera individual. Este sistema tiene un umbral de energía sensible por encima de 300 GeV. El sistema DAQ secundario (*escalar*) tiene como propósito ser sensible a eventos transientes, como lo son los destellos de rayos gamma, siendo este sistema sensible a un aumento en la tasa de conteo de pulsos de los PMTs, de tal modo que este sistema representa una mejora en la sensibilidad para HAWC al momento de detectar este tipo de fenómenos. El umbral de energía es más bajo, a unos 50 GeV, sin embargo, este sistema no provee información direccional del evento registrado, pues su diseño no está enfocado en registrar cascadas individuales.

El sistema de adquisición de datos está conformado por un conjunto de TDCs CAEN VX1190A que están diseñados para registrar las mediciones del TOT⁴ de los pulsos de un PMT dentro de una ventana de tiempo al rededor de una señal de disparo. El control de los TDCs está dado por el uso de las siguientes tres señales[32]:

- **TRG**: Está es la señal de disparo, la cual es la señal de entrada del TDC, la cual es provista por el GTC⁵. La señal de disparo es una señal periódica de 40 kHz ($25 \mu s$) mientras que el TDC registra los eventos en una ventana de $25.2 \mu s$ al rededor del disparo. De este modo a la colección de datos guardados en una ventana de tiempo es denominado **evento**.
- **CRL**: Es el comando encargado de la limpieza de los datos del buffer de salida del TDC, además de reiniciar el contador de eventos y el bunch counter. Realiza un reinicio global del TDC.
- **CRST**: Es el comando de reinicio, está encargado de reiniciar el tiempo extendido de las etiquetas de disparo y el bunch counter.

Mientras que los datos son tomados y almacenados en el buffer, un computador de placa sencilla, modelo GE XVB602 Intel Core i7 lee cada uno de los TDC y envía los datos a una granja de reconstrucción en línea. En este proceso, se busca entre los eventos fragmentos del arribo de una cascada atmosférica. Una vez identificados los fragmentos el proceso de reconstrucción en línea combina los fragmentos en un único evento, esto es posible gracias a que los TDCs están sincronizados y mantienen un único identificador de evento para un disparo dado. Por lo que el objetivo principal del sistema de control es mantener los TDCs sincronizados.

⁴Time Over Threshold.

⁵GPS Timing and Control System.

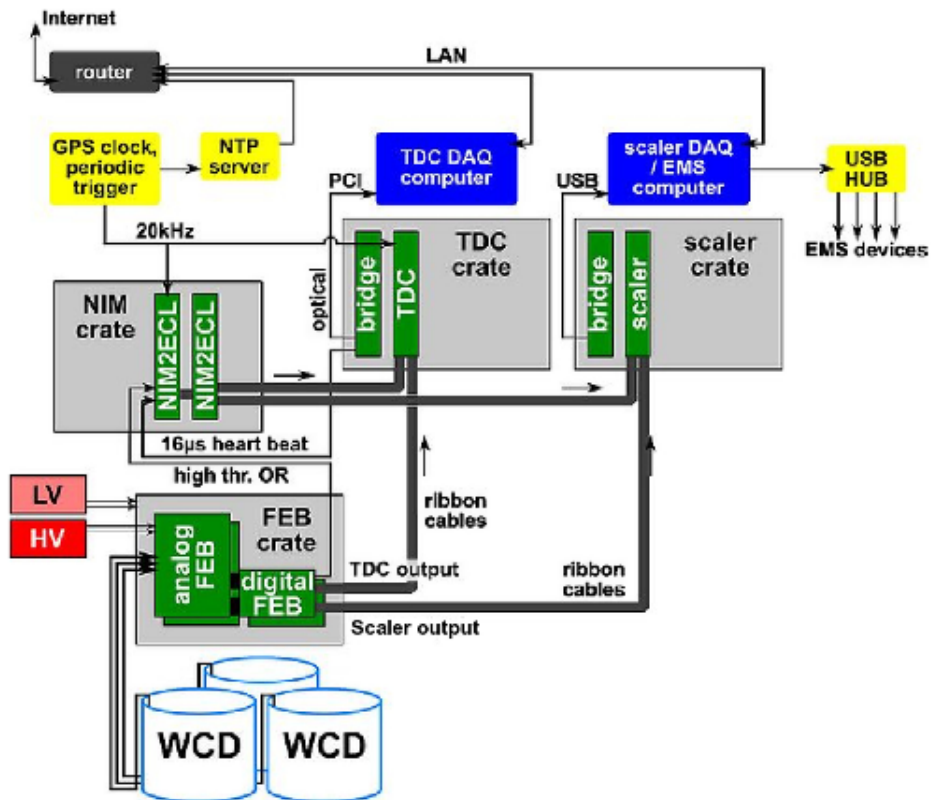


Figura 2.2 Diagrama representativo de los dos sistemas de adquisición de datos Implementados por HAWC. Imagen tomada de [26].

2.2. Reconstrucción

Los eventos obtenidos son sometidos a un proceso de reconstrucción, donde, en primera instancia se busca obtener la trayectoria de la partícula primaria, mediante una proyección sobre el arreglo, la cual denominaremos core (núcleo). Una vez logrado éste ajuste, se busca poder ajustar los tiempos en los cuales las partículas dentro de la cascada interactuaron con el experimento, en donde se busca el plano que mejor ajusta al frente de la cascada. Para esto es necesario contar con un sistema de calibración dentro del experimento al cuál sea ejecutado periódicamente, con la finalidad de asegurar esta sincronía entre cada tubo fotomultiplicador del arreglo.

2.2.1. Calibración

El primer paso para la reconstrucción de eventos recae en la calibración del mismo experimento. Tiene como objetivo el poder eliminar desfases de tiempos relativos entre los tubos fotomultiplicadores y la distribución de tiempos de llegada esperados de una cascada atmosférica. Este desfase es propicio de cada uno de los PMT con respecto al front-end de los instrumentos. El desfase es determinado mediante un sistema de calibración por láser en el sitio, el cuál consiste en enviar pulsos a distintas intensidades a cada uno de los tanques registrando el tiempo de respuesta de cada PMT.

El sistema de calibración de láser tiene como objetivo poder determinar la dependencia del tiempo de desfase con respecto al tamaño del pulso (el tiempo por encima del umbral de disparo). Al momento de que se produce una señal inducida por medio del láser se determina un tiempo de referencia para así determinar el tiempo de desfase para los umbrales bajos o altos, se calcula el tiempo transcurrido desde la señal inicial hasta el pulso que cruza el umbral bajo o alto en cada canal de los fotomultiplicadores.

Una vez que se ha calculado los desfases de tiempos entre todos los tubos fotomultiplicadores, se calcula el plano que mejor se ajusta al frente de la cascada, tal como se aprecia en la figura 2.3. Este plano es utilizado como referencia del tiempo de llegada esperado para la cascada, se resta el tiempo de desfase entre el tiempo de llegada de la cascada y el tiempo de golpeo en cada PMT, esto se lleva a cabo en el proceso iterativo de la reconstrucción de la cascada.

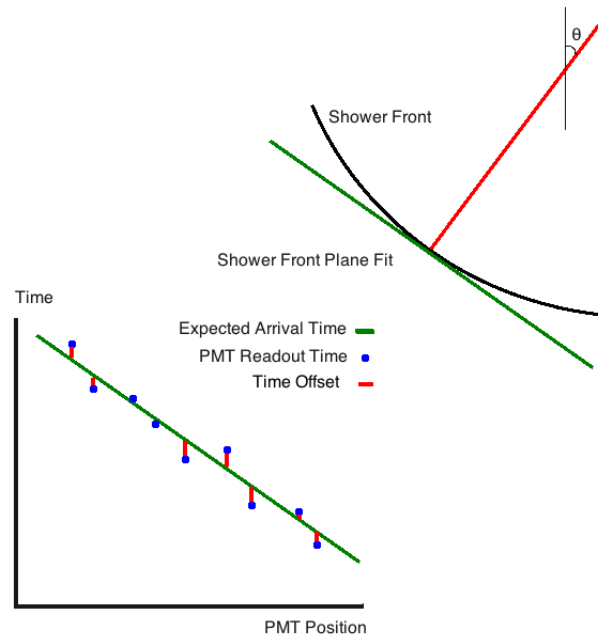


Figura 2.3 Representación del arribo de una cascada, la línea negra representa el verdadero frente de la cascada, mientras que la línea verde el ajuste del mejor plano al frente de la cascada. Por otro lado se observa el tiempo de desfase entre los distintos PMTs disponibles en ese momento. Imagen tomada de [28].

2.3. Separación entre rayos gamma y rayos cósmicos

Los telescopios que se encuentran en la superficie terrestre tienen que detectar fuentes de rayos gamma dentro de un fondo de rayos cósmicos, por lo que para la astronomía de rayos gamma es una tarea fundamental poder diferenciar cascadas que son inducidas por rayos gamma y aquellas que lo son por rayos cósmicos. En energías de TeV los rayos cósmicos son más abundantes que los rayos gamma por un factor de 1000, representando una tarea complicada para HAWC a diferencia de observatorios Cherenkov atmosféricos como lo son; VERITAS, MAGIC y H.E.S.S. ya que HAWC no posee un detector de imágenes, para realizar esta tarea, sin embargo, hace uso de propiedades topológicas de la cascada, tal y como se pueden apreciar en la figura 1.6 y también en la figura 2.4, por lo que en base en un análisis en el patrón bidimensional de los fotomultiplicadores disparados y de la carga [33] se realiza esta separación.

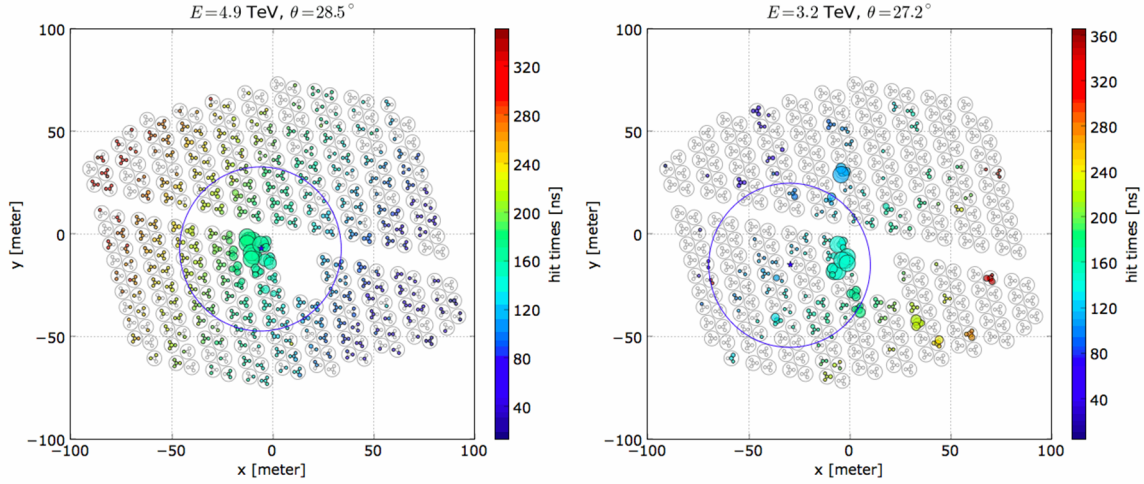


Figura 2.4 Simulaciones de cómo HAWC observa las cascadas atmosféricas que detecta. De lado izquierdo se aprecia la detección de una cascada electromagnética, inducida por un rayo gamma, mientras que a la derecha observamos una cascada hadrónica, inducida por un protón, se aprecian los diferentes perfiles de las cascadas atmosféricas, ambas partículas primarias incidieron con una energía similar y con un ángulo similar. El área de los círculos es proporcional a la carga que registro el PMT, mientras que la escala de color indica el tiempo transcurrido en que se dio la interacción desde que se disparo el evento.

2.3.1. Determinación del núcleo de la cascada

Un paso fundamental para la discriminación es poder encontrar el núcleo de la cascada (el centro de la cascada). Como hemos mencionado anteriormente, la interacción de la cascada con HAWC se traduce mediante los fotomultiplicadores como un pulso eléctrico. Debido a que estas pulsaciones son producto de la carga depositada en los tubos fotomultiplicadores que se produce por el paso de la cascada. De este modo encontrar el núcleo de la cascada es mediante un cálculo de centro de masas en base a la carga depositada en cada detector. En la figura 2.4 se exhibe el cálculo de centro de masa así como los pulsos generados por el paso de la cascada.

2.3.2. Compacidad

La compacidad un parámetro muy simple para poder discriminar cascadas de origen hadrónico de cascadas electromagnéticas. Hace uso del hecho de que las cascadas producidas por un rayo cósmico presentan una topología más errada por su paso por el detector. En primer lugar se define $CxPE_{40}$ como la carga efectiva más alta del fotomultiplicador registrada en un radio de 40 m del núcleo. Así de esta manera,

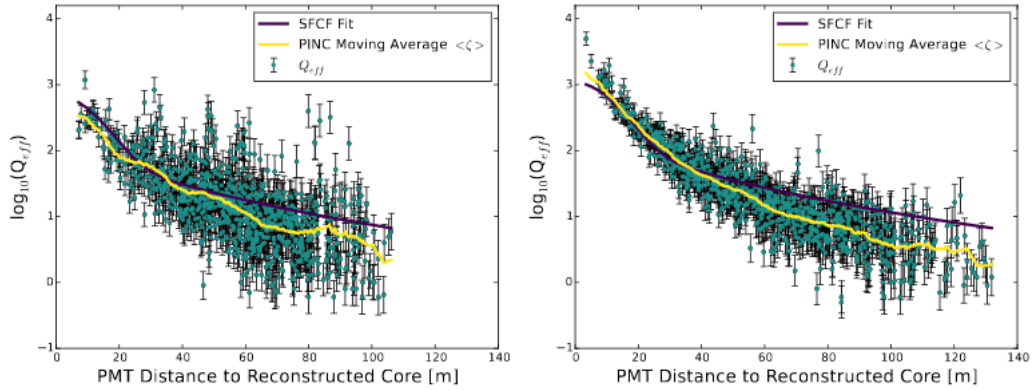


Figura 2.5 Representación de la distribución lateral de dos cascadas atmosféricas. En el panel Izquierdo se muestra la propia de una cascada de origen electromagnético mientras que del lado derecho una cascada inducida por un protón. Imagen obtenida de [34].

podemos definir la compacidad como $\mathcal{C} = \frac{N_{hit}}{CxPE_{40}}$ donde N_{hit} es el número de PMTs disparados durante el evento.

Una observación inmediata es que si el evento en cuestión es de origen hadrónico, entonces, \mathcal{C} es muy pequeño, esto es, observado el panel derecho de la figura 2.4 la cascada hadrónica presenta regiones “*grumosas*” que no están contenidas dentro de la región del core. Estas regiones son inducidas por la presencia de partículas altamente penetrantes dentro de la cascada, principalmente muones, los cuales no están presentes en cascadas electromagnéticas.

2.3.3. PINCness

Adicionalmente se considera un segundo parámetro, el cuál es el *PINCness* (acrónimo de **P**arameter for **I**dentifying **N**uclear **C**osmic-rays) con el cuál se mide que tan dispersa resulta ser la cascada, esto es por medio de la técnica χ^2 , donde la función chi cuadrada está definida como:

$$\chi^2 = \sum \frac{(MPE - EPE)^2}{\sigma^2},$$

donde MPE es la cantidad de foto-electrones medidos en el PMT, EPE es la expectativa de foto-electrones en el PMT la cual está definida por una función que describe la distribución de densidad de la carga en el arreglo, finalmente $\sigma = \sqrt{EPE}$.

2.3.4. Función de Distribución Lateral

La función de distribución lateral es de especial importancia pues es la que determina la densidad de las partículas cargadas en función de un radio r alejado del eje de la cascada.

Definimos el radio R_{Mol} cómo:

$$R_{Mol} = X_0 \frac{E_s}{E_c \rho},$$

donde; X_0 es la longitud de radiación en el aire, E_s es la energía radiada, E_c es la energía crítica y finalmente ρ es la densidad del aire, de tal modo que:

$$R_{Mol} = 37.15g \text{ cm}^{-2} \frac{21 \text{ MeV}}{84.4 \text{ MeV} \cdot 7.4 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}} = 124.21 \text{ m}$$

forma un cilindro con origen en el eje de la cascada de radio R_{Mol} contiene el 90% de la cascada atmosférica, así que la función que la determina es la siguiente [35]:

$$EPE = \frac{N_e}{2\pi R_{mol}^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)} \left(\frac{r}{R_{Mol}}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{R_{Mol}}\right)^{s-4.5}$$

cuyos parámetros N_e es la distribución de electrones en la cascada, s es la edad de la cascada, que es el parámetro que determina cuándo ha evolucionado la cascada desde la colisión de la partícula primaria, Γ es la función gamma y r es la distancia al eje de la cascada mencionado con anterioridad. Esta función es conocida cómo NKG (Nishimura - Kamata - Greisen) la cuál permite describir la función de distribución lateral de la cascada. La figura 2.5 muestra dos distribuciones de rayos cósmicos y gammas.

2.4. Simulación Monte Carlo

El proceso de reconstrucción de datos de HAWC también cuenta con un proceso de validación, este proceso se lleva a cabo mediante una cadena de simulaciones Monte Carlo. La cadena es conformada principalmente por cuatro módulos; CORSIKA, HAWCSim, AERIE y finalmente HMC-Analysis. La simulación abarca todas las interacciones a partir de que el rayo cósmico interactúa con la atmósfera terrestre hasta su detección en los detectores Cherenkov, donde cada módulo está enfocado a un momento en específico de la interacción del rayo cósmico, la cadena de simulaciones Monte Carlo tiene lugar en el siguiente orden:

1. **CORSIKA** (acrónimo de **CO**smic **R**ay **SI**mulations for **KA**scade) [36] es un paquete de simulaciones Monte Carlo el cual permite recrear la interacción de un rayo gamma o de un rayo cósmico en la atmósfera, de este modo se logra recrear una simulación de la evolución de la cascada atmosférica. Los eventos se simulan con un espectro generalizado $E^{-2.0}$ [30] con el objetivo de sobre estimar aquellos eventos que son más raros, es decir eventos mucho más energéticos. Más adelante, se genera una corrección aplicando un peso a la simulación.
2. **HAWCSim** es una implementación la cuál tiene cómo finalidad la simulación de la respuesta del detector basada en GEANT4 (del acrónimo en inglés **GE**ometry **ANd** **T**racking)[37]. Este eslabón de la simulación es alimentado por los resultados obtenidos de la simulación para la cascada atmosférica. Este paso toma relevancia en el proceso a unos 10 m por encima del detector y hasta que son producidos foto-electrones en los PMTs producidos por la interacción de la cascada con el detector. La salida de ésta simulación es un archivo ASCII en el cuál se obtienen la cantidad de los eventos producidos por los foto-electrones, es decir, la radiación Cherenkov detectada por los fotomultiplicadores.
3. **AERIE** (del inglés **A**nalysis and **E**vent **R**econstruction **I**ntegrated **E**nvironment) es el siguiente escenario dentro de la cadena de simulaciones Monte Carlo es realizada por medio del framework AERIE. En este momento, se inyecta el archivo obtenido de HAWCSim, que contiene toda la información de la radiación detectada por el experimento, ahora se toma en consideración para la simulación además de la geometría del detector, el sistema de adquisición de datos. Usando la carga y el tiempo sincronización de los PMTs disparados, se pueden reconstruir el núcleo y la dirección de llegada de los eventos generados por la simulación. Es de esta manera que se pueden imponer condiciones en las cuales un evento logra cumplir las condiciones de disparo del detector. Ésta información se guarda en archivos ROOT[38], los cuales son ya un pequeño registro de los eventos, dejando de lado toda la información en crudo anteriormente guardada, almacenando también, registro de cuántos eventos se consideraron para la simulación para cálculos de áreas efectivas. El proceso de esta fase de la simulación tiene cómo resultado un archivo ROOT para cada tipo de partícula primaria que interactuó en la atmósfera, los cuáles son γ , proton, carbon, helio, magnesio, hierro, neón, oxígeno y silicio.
4. **HMC-Analysis** es la etapa final de la cadena de simulaciones Monte Carlo. En este momento se consideran los nueve casos de partículas primarias y la simulación

\mathcal{B}	f_{hit} [%]	ψ_{68} [o]	ϵ_{γ}^{MC} [%]	ϵ_{CR}^{data} [%]	E_{γ}^{MC} [TeV]
1	6.7 - 10.5	1.03	70	15	0.7
2	10.5 - 16.2	0.69	75	10	1.1
3	16.2 - 24.7	0.50	74	5.3	1.8
4	24.7 - 35.6	0.39	51	1.3	3.5
5	35.6 - 48.5	0.30	50	0.55	5.6
6	48.5 - 61.8	0.28	35	0.21	12
7	61.8 - 74.0	0.22	63	0.24	15
8	74.0 - 84.0	0.20	63	0.13	21
9	84.0 - 100.0	0.17	70	0.20	51

Tabla 2.1 En la tabla se observa las propiedades de los 9 bins en los cuales son distribuidos los datos para su posterior análisis. \mathcal{B} Representa el número de bin, f_{hit} es el tamaño del evento, ψ_{68} representa la contención de al menos 68% de los eventos por la función de dispersión, ϵ_{γ}^{MC} y ϵ_{CR}^{data} representan la eficiencia de la selección de para rayos gamma y rayos cósmicos respectivamente y finalmente E_{γ}^{MC} la energía media para un objeto de referencia con índice espectral -2.63 a una declinación de 20° . Tabla obtenida de [39].

es pesada en estos momentos (con este peso asignado, se realiza la corrección de la sobre estimación de rayos cósmicos resultado de asumir un espectro E^{-2}). El peso es determinado por su especie, distancia del núcleo y de su energía, buscando así obtener una simulación Monte Carlo más realista.

2.5. Reducción de datos

Una vez que la reconstrucción de datos ha sido completada, los eventos son clasificados en un arreglo de 9 bins \mathcal{B} , los cuales están definidos en el tabla 2.1, donde los cortes para la discriminación de rayos cósmicos y rayos gamma están optimizados en observaciones de la nebulosa del Cangrejo [34]. A pesar de que los cortes para la separación gamma/hadrón son muy duros, los datos aún continúan siendo dominados por eventos producidos por rayos cósmicos tal como se aprecia en la figura 2.6. Debido a que los rayos cósmicos detectados en la Tierra provienen de direcciones aleatorias nos permite tener la ventaja que el fondo sea suave, en comparación a los rayos gamma, que aparecen como *bumps* o pequeños cúmulos en los datos. Para calcular los rayos gamma detectados, primero se debe de estimar la contaminación generada por el fondo de los rayos cósmicos. De este modo se generan los mapas de fondo, los cuales son histogramas 2D que contienen las direcciones del arribo de los eventos reconstruidos en coordenadas ecuatoriales.

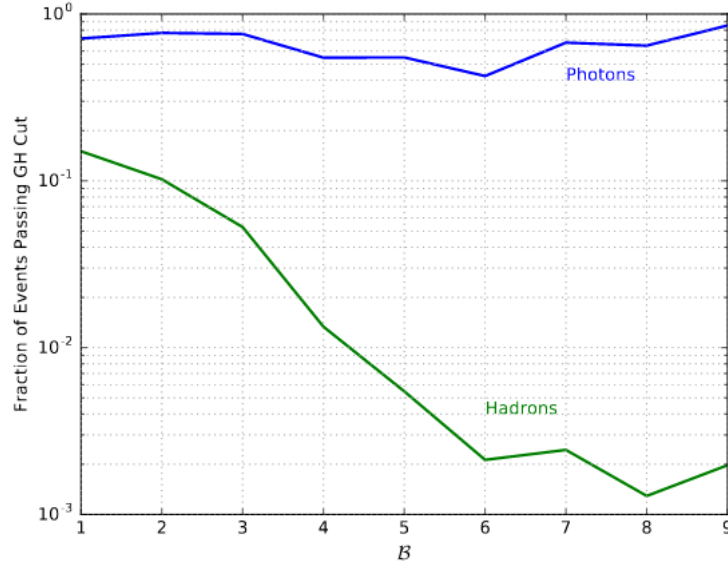


Figura 2.6 En la figura se muestra la distribución de eventos hadrónicos, la distribución de rayos gamma distribuida en los 9 bins \mathcal{B} . figura tomada de [34].

2.5.1. Integración Directa

El método para estimar y crear los mapas de fondo es conocido como integración directa, desarrollado para el experimento MILAGRO [40], donde la tasa de eventos está en función de las coordenadas locales (H.A., Dec), bajo el supuesto de que la aceptación del detector es independiente de la tasa de eventos disparados por encima de 2 hr y el flujo de los rayos cósmicos es isótropico, escribiéndose como:

$$N_{exp}[R.A., \delta] = \int \int E(ha, \delta) R(t) \epsilon(ha, R.A., t) dt d\Omega,$$

donde $E(ha, \delta)$ es la eficiencia del detector, que se traduce en la probabilidad de que un evento provenga del elemento diferencial angular $d\Omega = d(ha)d(\delta)$, $R(t)$ es la tasa de eventos en el detector, la cual está en función del tiempo. Finalmente, definimos a ϵ cómo:

$$\epsilon(ha, R.A., t) = \begin{cases} 1 & \text{si } ha = t - R.A. \\ 0 & \text{si } ha \neq t - R.A. \end{cases}$$

siendo ϵ un discriminante el cual permite asegurar que el bin local (ha, δ) contribuye únicamente al fondo de un bin ecuatorial $(R.A., \delta)$ en un tiempo t cuándo coinciden estos dos.

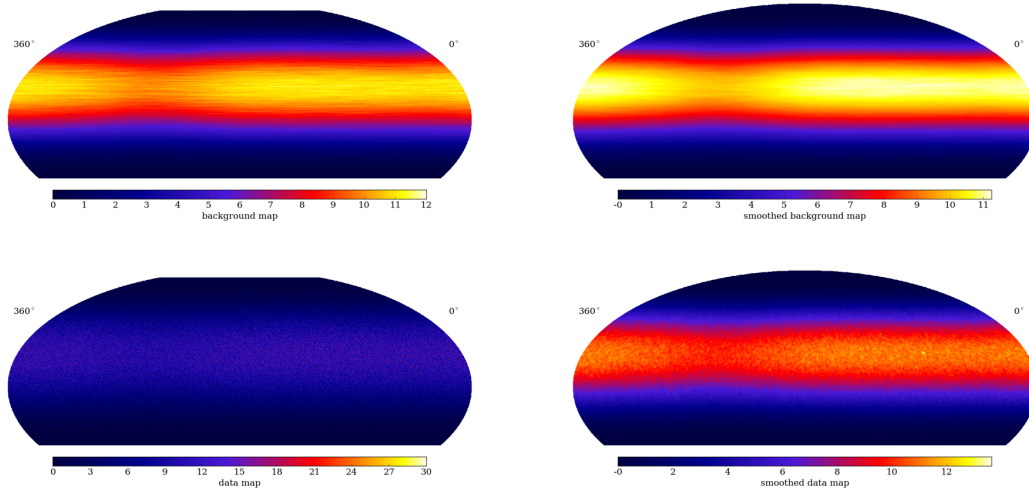


Figura 2.7 Izquierda En el panel superior encontramos el mapa de fondo observado por HAWC, mientras que en el panel inferior se observa una que los datos se encuentran acumulados en lugares muy específicos y de manera aislada. **Derecha** Observamos ahora en ambos paneles los mapas resultantes aplicando cortes óptimos en la discriminación entre rayos cósmicos y rayos gamma sobre los datos, lo cual genera mapas con la ventaja de que estos mapas presentan una mejora traducida en el acceso a características a distintas escalas angulares, traduciéndose en una mejora al obtener mapas de significancia de una fuente.

Se genera un mapa de fondo y otro de eventos por cada bin mediante el uso de HEALpix [41] se obtiene el pixeleado del mapa, donde la separación de cada pixel es menos de $\sim 0.06^\circ$, logrando así mapas de con una malla de 1024×1024 , tal cómo se aprecia en la figura 2.7.

2.5.2. Función de dispersión puntual

Si consideramos un objeto que emite luz de manera puntual y de manera isotrópica la imagen que obtenemos de está fuente lejos de ser un punto se aprecia una distribución que se dispersa con forme se aleja el radio de la fuente de emisión. La función de dispersión es la responsable de caracterizar al sistema de resolver a una fuente que emite de manera puntual, de tal manera que una fuente cuya imagen tenga un disco de dispersión más pequeño que la función de dispersión, este objeto puede ser considerado como una fuente puntual.

La función de dispersión de HAWC se deriva en base a simulaciones Monte Carlo considerando la diferencia del ángulo cenital reconstruido y el ángulo cenital de la fuente a estudiar. La función está descrita por medio de dos funciones gaussianas:

$$\rho(\psi) = \alpha G_1(\psi) + (1 - \alpha) G_2(\psi),$$

donde G_i es una distribución Gaussiana con amplitud σ_i , expresada cómo:

$$G_i(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{\psi^2}{2\sigma_i^2}},$$

así ψ es la diferencia entre el ángulo y el espacio entre la dirección de arribo del fotón reconstruido y el verdadero.

2.5.3. LiFF

HAWC cuenta con un framework el cuál busca simplificar de manera significativa el tiempo de cálculo para tareas afines al análisis de datos, LiFF (por sus siglas del inglés **L**ikelihood **F**itting **F**ramework) [42], proporciona herramientas para optimizar modelos físicos, así cómo modelos de repuesta de detector para un conjunto de datos dados. La ventana de tiempo mínima con la que fue diseñado para análisis de datos es de 1 tránsito (~ 1 día). Se hace una selección de datos de tal forma que son almacenados para reducir el tiempo de computo. El cálculo del análisis del likelihood logarítmico está dado por:

$$\ln(\mathcal{L}(\theta; N_{obs})) = \sum_{i=0}^{Bines} \ln(f((N_{obs})_i|\theta)),$$

donde θ es un conjunto de parámetros para el modelo, $(N_{obs})_i$ es el número de eventos en el i -ésimo bin, N_{obs} es el colección de todos los $(N_{obs})_i$ y finalmente f es la probabilidad de observar $(N_{obs})_i$ dado θ .

De tal forma que estimar θ_0 el conjunto de parámetros óptimos es necesario encontrar θ que maximice a $\ln(\mathcal{L})$ o bien, minimice a $-\ln(\mathcal{L})$.

Para poder lograr una comparación entre hipótesis, se recurre a la prueba de radio Likelihood, que cómo prueba estadística está definida cómo:

$$TS = 2\ln \left(\frac{\mathcal{L}(Hipotesis\ Alternativa; N_{obs})}{\mathcal{L}(Hipotesis\ Nula; N_{obs})} \right),$$

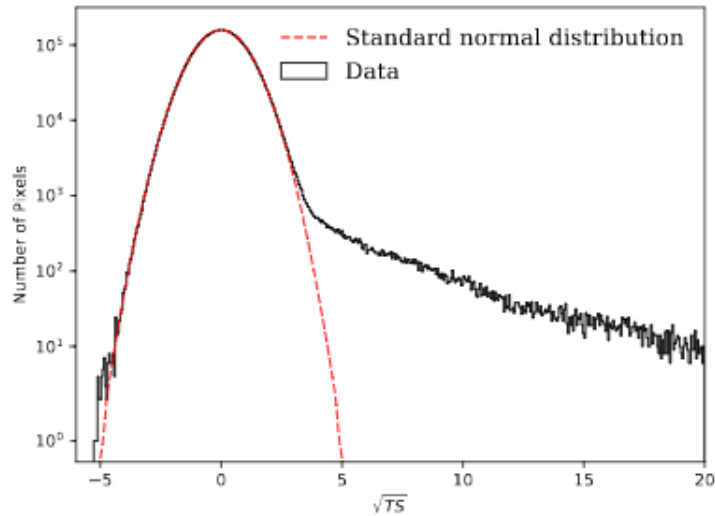


Figura 2.8 La prueba estadística (ajuste en rojo) muestra el exceso sobre el fondo (histograma), exhibiendo la negación de una hipótesis nula. Imagen tomada de [39].

de este modo, que si consideramos por ejemplo, una prueba de descubrimiento, cuya hipótesis es “*No hay una fuente ahí*”, como hipótesis alterna “*Hay una fuente con un flujo normalizado X* ”. De este modo el flujo X es la diferencia de los parámetros libres. Así de este modo, de contradecirse el supuesto falso, la TS se distribuye como una χ^2 y sucede que $\sigma = \sqrt{TS}$ donde σ es la desviación estándar, tal como se muestra en la figura 2.8, la cual se interpreta como la significancia de la sobre abundancia de eventos. Así que para la elaboración de los mapas de HAWC, las cuentas están dadas por los eventos del fondo derivados de los datos, mientras que el modelo de la fuente, es decir, la cuentas esperadas corresponden a un mismo fondo sumando la señal esperada de la fuente, inferida por simulaciones.

Se consideran los modelos de fuentes puntuales bajo las siguientes características:

- Una fuente puntual o un disco unitario o con un radio fijo.
- Un espectro con ley de potencia.

La contribución de la señal es inferido de la simulaciones previstas por las características de la fuente así como de la respuesta del detector.

Capítulo 3

Núcleos Activos Galácticos

Cómo Peterson definiría un Núcleo Galáctico Activo en [43];

“Generalmente, el término Núcleo Activo Galáctico o NGA hace referencia a un fenómeno energético en el núcleo o en regiones centrales de galaxias que no pueden ser atribuidas de manera directa y clara a las estrellas.”

Los núcleos activos galácticos son galaxias las cuales presentan características fundamentales. La mayoría de ellas se pueden explicar bajo un mismo modelo de unificación tal y cómo se muestra en la figura 3.1. A continuación mencionamos algunos ingredientes que dan origen a un núcleo activo galáctico:

Un agujero negro super masivo, usualmente $M_{BH} = 10^6-10 M_{\odot}$.

Un disco de acreción el cuál es el responsable de la emisión desde óptico hasta rayos X suaves.

Gas a altas/bajas velocidades por medio del cuál se puede describir las regiones anchas/estrechas de absorción.

Una región geométrica, usualmente descrita cómo un toro de gas y polvo las cuales pueden esconder a las regiones de absorción.

Jet relativista (no presente en todos los núcleos activos) que se extiende unas decenas de kpc, en algunos casos, de la orden de Mpc.

Excepto por el jet, el modelo de unificación propone que todos los núcleos activos galácticos son el mismo fenómeno sólo que son observados desde distintos ángulos.

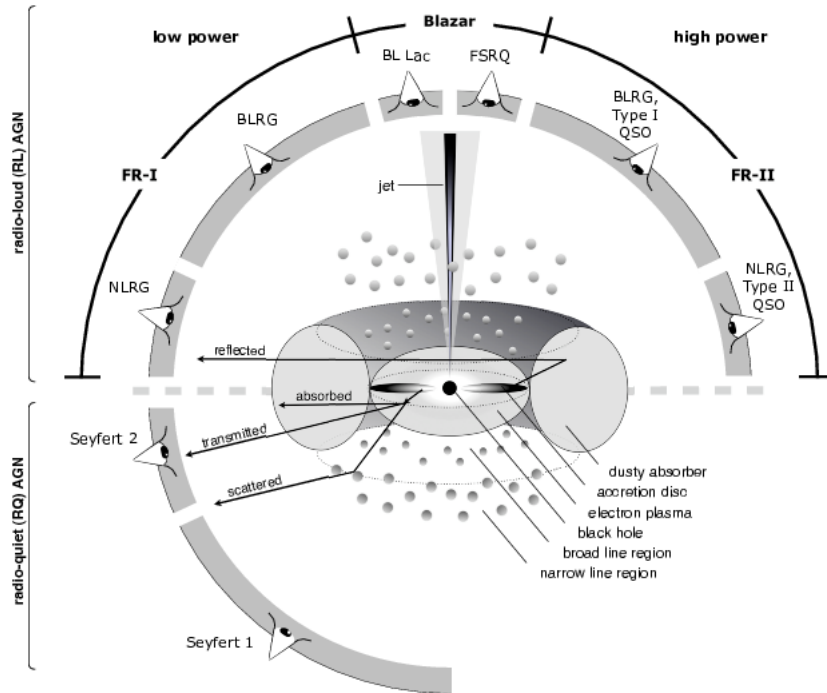


Figura 3.1 Representación del modelo de unificación de los NGAs en base al ángulo de visión del jet. Imagen tomada de [45].

3.1. Los NAG cómo fuentes de rayos gamma

Observaciones a energías mayores a 100 keV muestran que los núcleos galácticos activos son una población de fuentes astronómicas débiles para emitir a altas energías. Sin embargo, solo una pequeña población de apenas 10% de la población son fuertes fuentes de rayos gamma, tal como se muestra en [44], además de que presentan una fuerte emisión en radio. Estos objetos tienen una fuerte variabilidad en todas las longitudes de banda.

Desafortunadamente los instrumentos de rayos gamma actuales presentan una baja resolución espacial todas estas fuentes son detectadas como fuentes puntuales de rayos gamma.

Los núcleos activos han sido clasificados dentro de grupos y subgrupos de acuerdo al contexto histórico de su investigación. Los primeros objetos de este tipo fueron tratados en los años 40's del siglo pasado, de la mano de Carl Seyfert al momento que estudió un grupo local de galaxias activas, ahora conocidas como galaxias de tipo Seyfert, las cuales fueron subclasificadas en galaxias Seyfert de tipo I y tipo II en base

a las líneas de emisión de espectro de las galaxias. Años más tarde, en los años 60, estos objetos serían redescubiertos en el estudio de los cuásares.

Los principales subgrupos de núcleos activos galácticos son; tipo I *radio callados* (galaxias Seyfert I y objetos cuasi-estelares radio callados) tipo I *radio ruidosos* (radiogalaxias con emisión de líneas anchas y objetos cuasi-estelares radio ruidosos) tipo II *radio callados* (galaxias Seyfert II) y de tipo II *radio ruidosos* (radiogalaxias de líneas estrechas, regiones de emisión de líneas nucleares de baja ionización y blazares).

3.1.1. Radiogalaxias

Debido a que los NGAs están divididos en dos grupos debido al parámetro de ruido R descrito cómo:

$$R = \frac{L_\nu(5 \text{ GHz})}{L_\nu(4400 \text{ \AA})},$$

siendo L_ν la luminosidad monocromática ($\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$) con $L_\nu \propto \nu^{-\alpha}$. De este modo R describe la fuerza de emisión en radio, estableciendo un límite entre las fuentes ruidosas y calladas en radio, usualmente $R = 10$. En muestreos grandes cómo el SDSS (del en inglés Sloan Digital Sky Survey) exhiben que cerca del 10% de los núcleos activos son fuentes ruidosas en radio [46].

El esquema desarrollado por Fanaroff y Riley [14] que permite clasificar a las radiogalaxias de acuerdo a su emisión extendida en radio en dos subclases, conocidas cómo FRI y FRII. La principal discrepancia en estos objetos es si el borde de la estructura esta opacado (FRI) o tiene un borde luminoso (FRII). En radiogalaxias que están espacialmente resueltas, se aprecia que las regiones que emiten más intensamente en radio en las FRI están separados por menos de la mitad del tamaño total de la fuente, mientras que en las FRII estas regiones, que son más luminosas, están a una distancia mayor que el tamaño total de la fuente extendida. Finalmente las fuentes FRI son mucho menos luminosas pero son más abundantes que las FRII que son mucho más luminosas. Ambas fuentes deberían de ser lo suficientemente brillantes para emitir rayos gamma si el índice espectral α ajustado en la banda de rayos X continua su forma en la banda de los rayos gamma cómo el caso de Centaurus A tal cómo se muestra en [47] y en [48].

Las radiogalaxias que han sido detectadas en el regimen de los TeV han sido muy pocas. En el caso de NGC 1275 e IC 310 son dos fuentes de interés para ser observadas

por HAWC pues forman, junto con Centaurus A y M87 un conjunto de núcleos activos que no son blazares ¹ que están más cercanos a la Tierra [49]. En la figura 3.2 se muestra el cielo con fuentes que emiten rayos gamma en TeV. En ella se muestra la mayoría de las fuentes hasta ahora conocidas que logran producir rayos cósmicos ultra energéticos.

A continuación se da una pequeña descripción de estas dos radiogalaxias;

NGC 1275 se encuentra localizado en el centro del cúmulo de Perseo a una distancia de ~ 77.7 Mpc. NGC 1275 es actualmente el elemento con mayor luminosidad en este cúmulo. Fue descubierto a altas energías por el observatorio MAGIC con un índice espectral demasiado suave $\Gamma = -4.1 \pm 0.7_{stat} \pm 0.3_{syst}$ [50]. Su cercanía y un índice espectral tan suave es un prospecto interesante para ser observado con el Observatorio HAWC. En la figura 3.3 se muestra a NGC 1275 centrado en todos los paneles en distintas bandas de energía.

IC310 al igual que NGC 1275 se encuentra localizada en el cúmulo de Perseo, a pesar que cuenta con una menor luminosidad MAGIC reportó un incremento en el flujo, con un índice espectral de $\Gamma = -2$. IC 310 es un buen candidato para ser observada por HAWC. En la figura 3.3 se muestra a IC310 en la parte inferior derecha de cada tabla a distintas bandas de energía.

¹El jet del NAG no apunta directamente a la tierra.

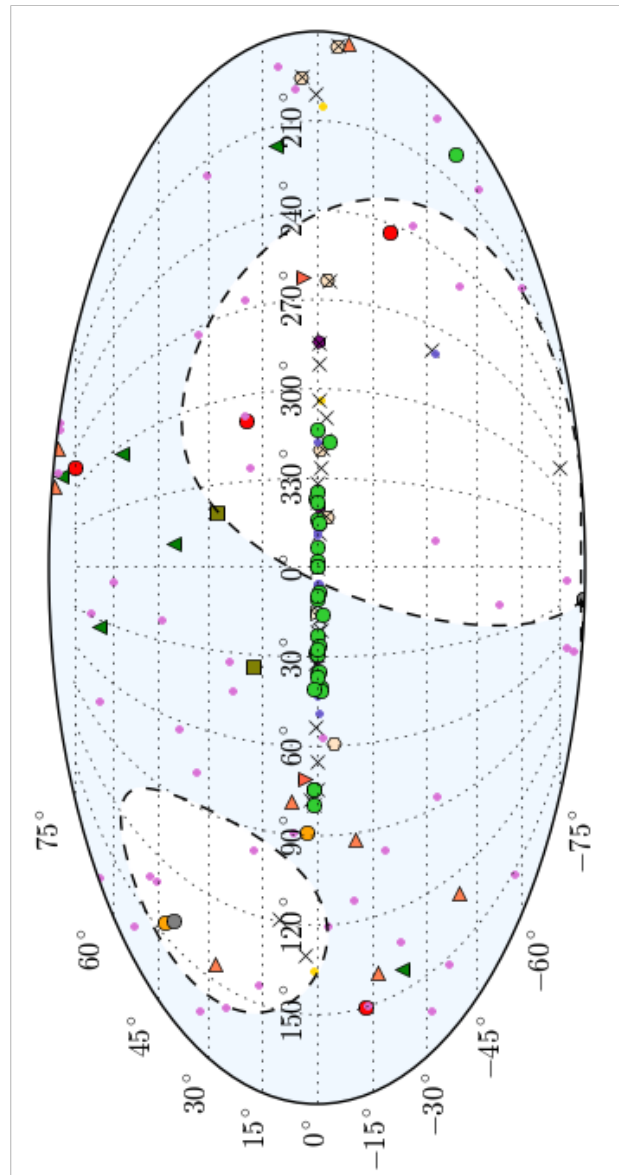


Figura 3.2 Fuentes en el universo que emiten en TeV. La región sombreada de azul claro es el campo de visión de HAWC. El mapa se encuentra en coordenadas galácticas.

3.2. Detección de IC 310 en TeV

IC 310 fue descubierta en el régimen de los TeV por la colaboración MAGIC como resultado de una campaña de observación durante Octubre de 2009 a Febrero de 2010 [51]. Esta detección se realizó obteniendo una significancia estadística $\sigma = 7.5$ y un índice espectral $\Gamma = -2 \pm 0.14$ [52]. Además, el satélite Fermi por medio de LAT también ha detectado a esta fuente en altas energías [53].

De acuerdo con [54] IC 310 presentó un flujo medio > 300 GeV que en este periodo fue de;

$$F_{\gamma} = 3.62 \pm 0.40 \times 10^{-12} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1},$$

los cuales fueron medidos individualmente por día, sin embargo, 3 días presentaron un flujo mayor. Del año 2009 fue Noviembre 16 únicamente, mientras que del año 2010 fueron Enero 8 y Febrero 9. El flujo promedio entre esos tres fue de:

$$F_{\gamma} = 1.60 \pm 0.17 \times 10^{-11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1},$$

lo cuál es ~ 6 veces mayor al flujo con respecto al resto de los días que conformaron la campaña, mostrando indicios de pequeños flares aislados presentes en el objeto. Así que se define cómo "*estado alto*" al estado de emisión de rayos gamma comprendido por los días Noviembre 16 de 2009, Enero 8 de 2010 y Febrero 9 de 2010, mientras que se denomina "*estado bajo*" al resto de la campaña. De ambos estados se puede describir el espectro de energía diferencial mediante una ley de potencia. Para estado alto se describe cómo:

$$\frac{dN}{dE} = (4.28 \pm 0.21_{stat} \pm 0.73_{syst}) \times 10^{-12} \left(\frac{E}{TeV} \right)^{-\Gamma} TeV^{-1} cm^{-2} s^{-1},$$

con $\Gamma = -1.96 \pm 0.21_{stat} \pm 0.73_{syst}$. Mientras que para el estado bajo:

$$\frac{dN}{dE} = (0.608 \pm 0.037_{stat} \pm 0.11_{syst}) \times 10^{-12} \left(\frac{E}{TeV} \right)^{-\Gamma} TeV^{-1} cm^{-2} s^{-1},$$

cuyo índice espectral es $\Gamma = -1.95 \pm 0.12_{stat} \pm 0.20_{syst}$.

3.3. Detección de NGC 1275 en TeV

NGC 1275 fue detectada a altas energías ($E_\gamma \geq 300$ GeV) por el observatorio MAGIC [55] en 2010. Reportando una significancia estadística $\sigma = 5.2$ a muy altas energías. También ha sido reportada por el satélite Fermi mediante el detector LAT [56] durante los primeros meses de operación del satélite y recientemente, fue detectado por la colaboración de VERITAS [57].

El observatorio MAGIC realizó dos campañas en dirección del cúmulo de Perseo, las cuales comprendieron de Octubre del 2009 a Febrero de 2010, acumulando un total de 45.3 hrs de observaciones [58]. La segunda campaña, comprendida entre Agosto del 2010 y Febrero del 2011 [57] acumuló un tiempo de observación de 45.7 hrs durante esta campaña en condiciones atmosféricas óptimas reportando una significancia estadística $\sigma = 6.6$. Esta campaña derivó con la estimación del espectro de energía diferencial entre 70 GeV y 500 GeV es descrito mediante una ley de potencia como:

$$\frac{dN}{dE} = (3.1 \pm 1.0_{stat} \pm 0.7_{syst}) \times 10^{-10} \left(\frac{E}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\Gamma} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1},$$

donde el índice espectral $\Gamma = -4.1 \pm 0.7_{stat} \pm 0.3_{syst}$. Calculando el flujo medio por encima de los 100 GeV es:

$$F_\gamma = (1.3 \pm 0.2_{stat} \pm 0.3_{syst}) \times 10^{-11} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}.$$

En el collage de la figura 3.3 que muestra al cúmulo de Perseo en distintas longitudes de onda. En el marco **I** se muestra al cúmulo en ondas de radio con datos del satélite Planck [59]. Se aprecia que la mayor emisión viene del centro del cúmulo, en dirección de NGC 1275 (centro de la imagen). En el marco **II** apreciamos la región en óptico. Es notoria la presencia de otros elementos del cúmulo y no únicamente la presencia de NGC 1275 e IC 310. Se aprecia a IC 310 de manera inmediata (encerrado en la circunferencia rosa) con datos de DDS2 [60]. El tabla **III** exhibe a Perseo en la banda de los rayos X con datos del satélite XMM Newton [61]. Apreciamos que la mayor emisión proviene de NGC 1275, también se nota una luminosidad considerable emitida por IC 310, se distingue como un punto aislado de la región de mayor contribución. Finalmente en el tabla **IV** muestra a la región observada por el satélite Fermi [62], se muestra que de NGC 1275 presenta una contribución significativa a rayos gamma. Todos los mapas fueron obtenidos por medio de la applet Aladin [63]. Los mapas se encuentra con un campo de visión de $30'$ y están representados en coordenadas galácticas y centrados (cruz morada) en NGC 1275.

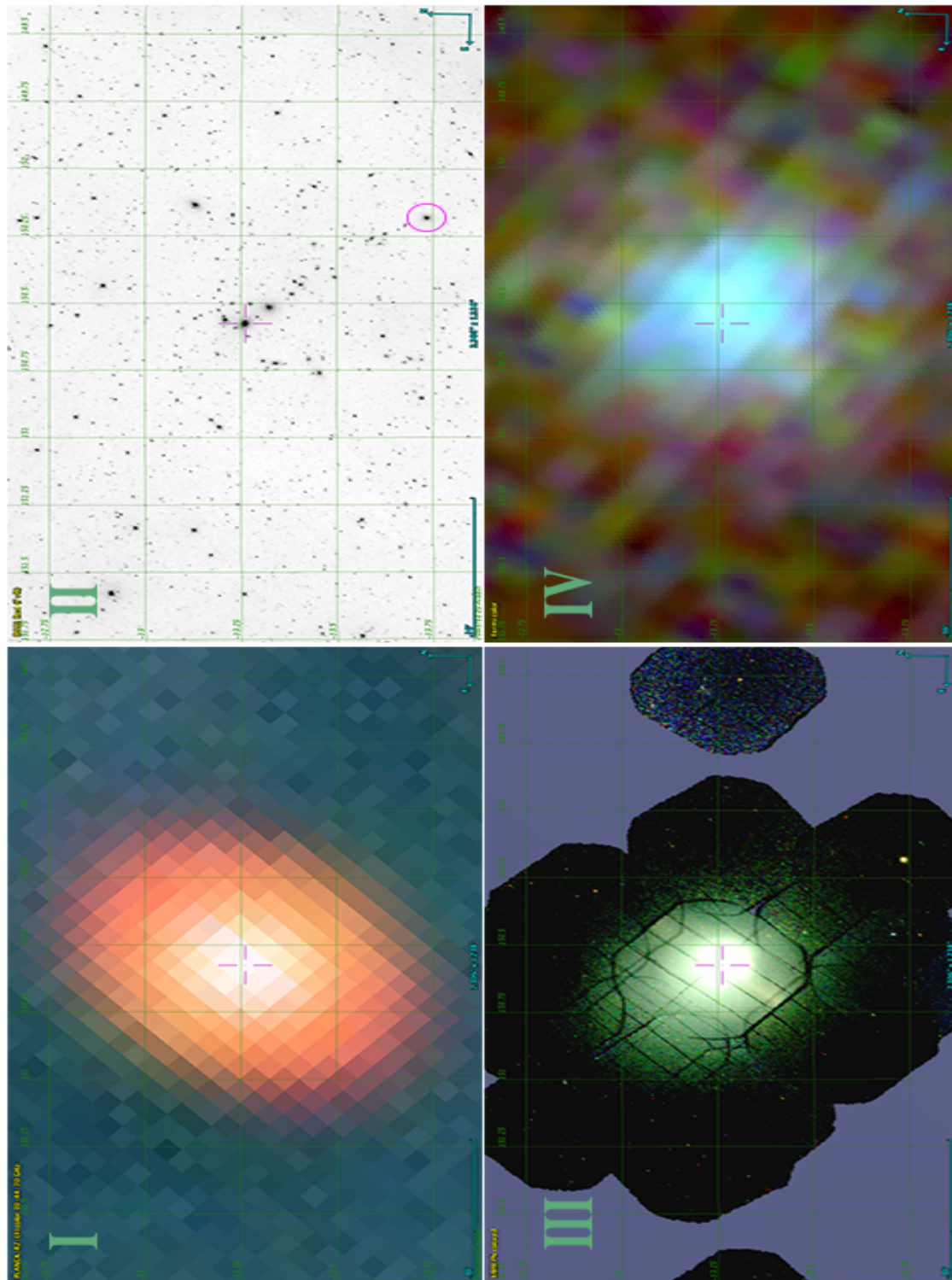


Figura 3.3 Cúmulo de Perseo en distintos anchos de banda.

Capítulo 4

Análisis del cúmulo de Perseo con HAWC

4.1. Transito de NGC 1275 e IC 310 sobre HAWC

Dispondremos a realizar una análisis de la región del cluster de Perseo con HAWC, con el objetivo de obtener un mapa de significancia de está región del cielo.

Considerando los valores reportados por MAGIC y presentados anteriormente, se pretende analizar la región con ~ 508 días de observación con HAWC, estos días son a partir del 26 de Noviembre de 2014 (MJD 56987) hasta 2 de Junio de 2016 (MJD 57541) acumulando ~ 17 meses de observaciones. Este periodo de tiempo contempla dos fases dentro de la construcción de HAWC. Antes del 19 de Marzo de 2015 HAWC se encontraba en la última fase de construcción *HAWC 250* en el cual se aseguraba el funcionamiento de 250 detectores, a partir de la fecha anteriormente mencionada, la etapa de *HAWC 300* entra en operación los 300 detectores Cherenkov.

Apreciamos en la figura 4.1 que NGC 1275 e IC 310 alcanzan un máxima altitud de 68° , comparado con un tránsito de la nebulosa del Cangrejo. Se puede apreciar que la nebulosa del Cangrejo, a diferencia de NGC 1275 e IC 310 tiene una mayor elevación con respecto al zenit de HAWC, mientras que en la figura 4.2 se observa el tiempo que pasa el cúmulo de Perseo por encima de HAWC a lo largo de los 508 días de observación. Así mismo en el tabla 4.1 la cantidad de tiempo efectivo en que HAWC observa a las radiogalaxias en su campo de visión, notemos que de 5,275 hrs, apenas 2,588 son por encima de 40° donde HAWC representa una óptima sensibilidad y de las

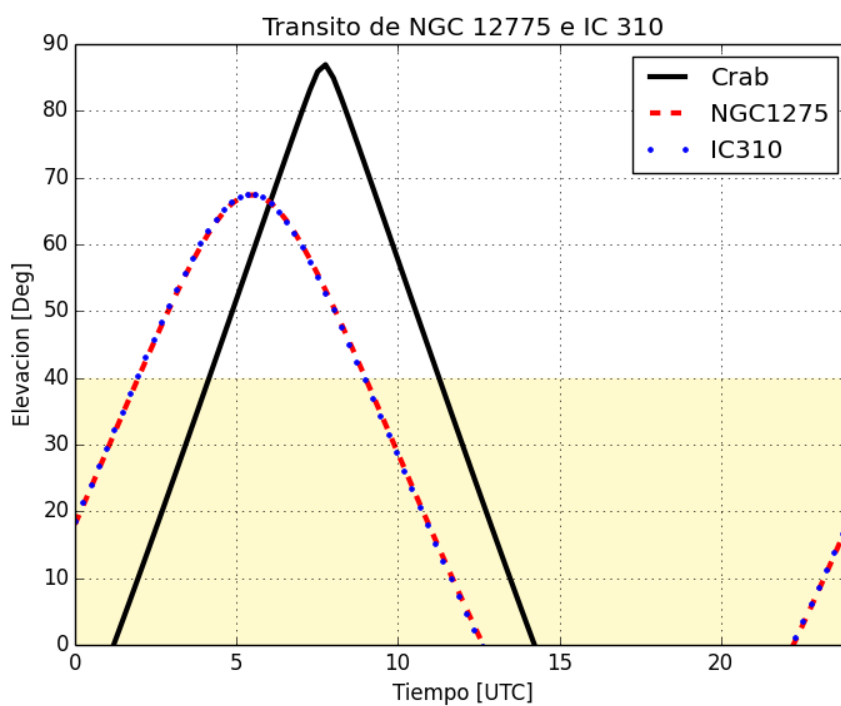


Figura 4.1 Transito de NGC 1275 e IC 310 sobre HAWC el día 26/11/2014 (MJD56987). El área sombreada muestra aquella región por encima del horizonte que representa una disminución en la sensibilidad de HAWC. La elección del día es lúdica.

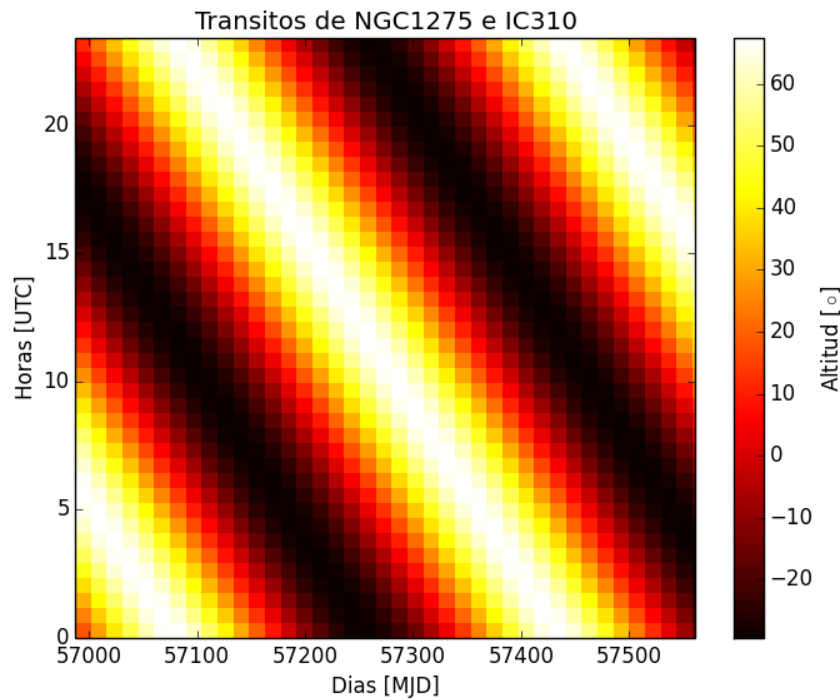


Figura 4.2 En la figura se aprecia la altitud en función del día y la hora durante el periodo de observación con HAWC

> Elevación [°]	Tiempo Transcurrido [hrs]
0	5,275
40	2,588
60	1,138

Tabla 4.1 Tiempo de observación en el cuál HAWC observó el cúmulo de Perseo.

cuales, apenas 1,138 son por encima de una altitud de 60° estando cerca de su máximo.

4.2. Mapas de significancia obtenidos con HAWC de la region de Perseo

Considerando 17 meses de observaciones de HAWC y una función de dispersión puntual considerando un flujo hipotético de las radiogalaxias NGC 1275 e IC 310 cómo el reportado por la colaboración del observatorio MAGIC se ha analizado la región del cúmulo de Perseo en busca de fuentes puntuales que tengan una significancia estadística

mayor a 5σ . Los flujos utilizados con su respectivo índice espectral y la energía de corte considerada se muestra en la tabla 4.2 donde DR1 responde al modelo de estudiar la región de Perseo considerando que hay una fuente puntual que emite cómo NGC 1275 en estado de actividad similar al reportado por MAGIC en 2010, mientras que DR2 y DR3 son hipótesis de fuentes puntuales que tienen una emisión de estado de actividad alta y baja respectivamente cómo la de IC 310 reportadas por MAGIC.

Las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 exhiben los cortes considerados para la función de dispersión para cada uno de los bins definidos en la tabla 2.1, para cada uno de los modelos considerados. En la figura 4.3 se muestra la región actual del cúmulo de Perseo observado por HAWC. En las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se exhiben los mapas de significancia de la región considerando los flujos antes mencionados. Los resultados concretos se muestran en la tabla 4.7, mientras que el ajuste de fondo se muestra en la tabla 4.6.

Apreciamos a priori que el modelo que considera un flujo en estado de actividad de la radiogalaxia NGC 1275 es el más óptimo de todos los escenarios, más sin embargo no es un resultado alentador el cual permita refutar una hipótesis nula. Escenarios menos afortunados lo son aquellos en los que se considero un flujo de una fuente activa como la radiogalaxia IC 310. El modelo DR1 predice una significancia de 0.77 para la radiogalaxia NGC 1275 mientras para la radiogalaxia IC 310 muestra una significancia de 0.54, ambos escenarios optimistas contra la prácticamente nula significancia obtenida con los actuales mapas de HAWC. Bajo las hipótesis asumidas en el DR2 en el cual consideramos un estado de actividad alto para una fuente cómo lo es la radiogalaxia IC 310 notamos un escenario menos optimista. Mientras que la significancia para la radiogalaxia NGC 1275 decrece la significancia. Finalmente un escenario considerando una fuente puntual con un flujo en estado bajo cómo las reportadas por MAGIC para IC 310 representado por el modelo DR3 resulta el peor escenario de los 3 flujos hipotéticos, en el cual la significancia de una fuente cómo lo es NGC 1275 no varía mientras que IC 310 presenta una disminución en su significancia.

Esto se traduce que el tiempo necesario para detectar con una significancia de 5σ a estas dos radiogalaxias en el mejor de los escenarios es para la galaxia NGC 1275 considerando un flujo en estado de actividad es de alrededor de 6 años y medio, mientras que para una fuente cómo IC 310 en estado de actividad alto es poco más de 18 años y medio. Considerando que el tiempo de vida efectivo de HAWC es de 10

Respuesta del Detector	Flujo [$10^{-11}TeV^{-1}cm^{-2}s^{-1}$]	Indice Espectral Γ	ϵ_{cut} [TeV]
DR1 (NGC 1275)	0.000246	-4.1	4
DR2 (IC 310 estado alto)	0.428	-2	4
DR3 (IC 310 estado bajo)	0.061	-2	4

Tabla 4.2 Parámetros considerados para la elaboración de la respuesta del detector.

DR1 (NGC 1275)				
\mathcal{B}	σ_1	σ_2	α	$1 - \alpha$
1	0.652002	1.83055	0.976132	0.023868
2	0.489276	1.56164	0.988658	0.011341
3	0.364899	1.27583	0.992712	0.007287
4	0.282581	0.884074	0.988323	0.011677
5	0.239809	0.741045	0.986078	0.013921
6	0.210406	0.621324	0.983937	0.016063
7	0.184903	0.513699	0.979308	0.020692
8	0.176711	0.476889	0.970749	0.029251
9	0.151224	0.3489	0.939575	0.060424

Tabla 4.3 Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de NGC 1275.

años de operaciones estas fuentes podrán ser hasta ese momento detectadas por el observatorio HAWC.

Los histogramas de significancia mostrados en la parte inferior de las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran que no hay evidencia de una posible refutación de una hipótesis nula y muestra únicamente fluctuaciones en la región de estudio.

Estos resultados parecen ser consistentes con predicciones teóricas como las presentadas en [64] y en [65] las cuales estiman que la emisión de rayos cósmicos de estas dos radiogalaxias no son significativos, complementadas con los periodos de aumento de flujo de NGC 1275 en Enero de 2017 reportado por la colaboraciones AGILE [66], MAGIC [67] y VERITAS [57] los cuales tienen una resolución bastante alta y una sensibilidad mucho mayor que la de HAWC.

DR2 (IC310 estado alto)				
\mathcal{B}	σ_1	σ_2	α	$1 - \alpha$
1	0.62136	1.87559	0.964151	0.035849
2	0.472315	1.68059	0.98131	0.01868
3	0.359266	1.51307	0.989606	0.010394
4	0.281568	1.20358	0.990723	0.009276
5	0.222019	1.01117	0.990692	0.009307
6	0.199876	0.877954	0.98934	0.01066
7	0.163273	0.743039	0.99147	0.00853
8	0.123906	0.517378	0.988209	0.011790
9	0.103017	0.372292	0.980155	0.019845

Tabla 4.4 Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de IC 310 en estado alto.

DR3 (IC310 estado bajo)				
\mathcal{B}	σ_1	σ_2	α	$1 - \alpha$
1	0.67265	1.85813	0.968689	0.031310
2	0.501371	1.5803	0.985485	0.014514
3	0.372161	1.3066	0.991644	0.008356
4	0.28783	0.879662	0.985673	0.014326
5	0.239809	0.741045	0.986078	0.013921
6	0.210406	0.621324	0.983937	0.016063
7	0.184903	0.513699	0.979308	0.020692
8	0.176711	0.476889	0.970749	0.029251
9	0.152679	0.354717	0.942341	0.057659

Tabla 4.5 Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de IC 310 en estado bajo.

Ajuste del Fondo			
Modelo	Constante	Media	Desviación Estándar [σ]
DR1 (NGC 1275)	$3.0 \times 10^1 \pm 5.9 \times 10^{-1}$	$-3.1 \times 10^{-2} \pm 1.2 \times 10^{-2}$	$7.9 \times 10^{-1} \pm 1.1 \times 10^{-2}$
DR2 (IC 310 estado bajo)	$3.4 \times 10^1 \pm 5.9 \times 10^{-1}$	$-1.7 \times 10^{-1} \pm 1.3 \times 10^{-2}$	$8.8 \times 10^{-1} \pm 1.1 \times 10^{-2}$
DR3 (IC 310 estado alto)	$3.5 \times 10^1 \pm 6.0 \times 10^{-1}$	$-1.2 \times 10^{-1} \pm 1.2 \times 10^{-2}$	$8.6 \times 10^{-1} \pm 1.0 \times 10^{-2}$

Tabla 4.6 Parámetros con los cuáles se ajusta el fondo por medio de una función gaussiana, tal cuál se muestra en la figuras 4.4, figura 4.5 y finalmente en la figura 4.6

Significancia Estadística			
Modelo	$\sigma_{NGC1275}$	σ_{IC310}	$IC310_{Est}$ [años]
Detección actual de HAWC	0	0	-
DR1 (NGC 1275)	0.77	0.54	6.49
DR2 (IC 310 estado alto)	0.07	0.27	7.42
DR3 (IC 310 estado bajo)	0.07	0.12	7.42

Tabla 4.7 Significancia estadística obtenida como resultado de considerar flujos e índices espectrales reportados por MAGIC.

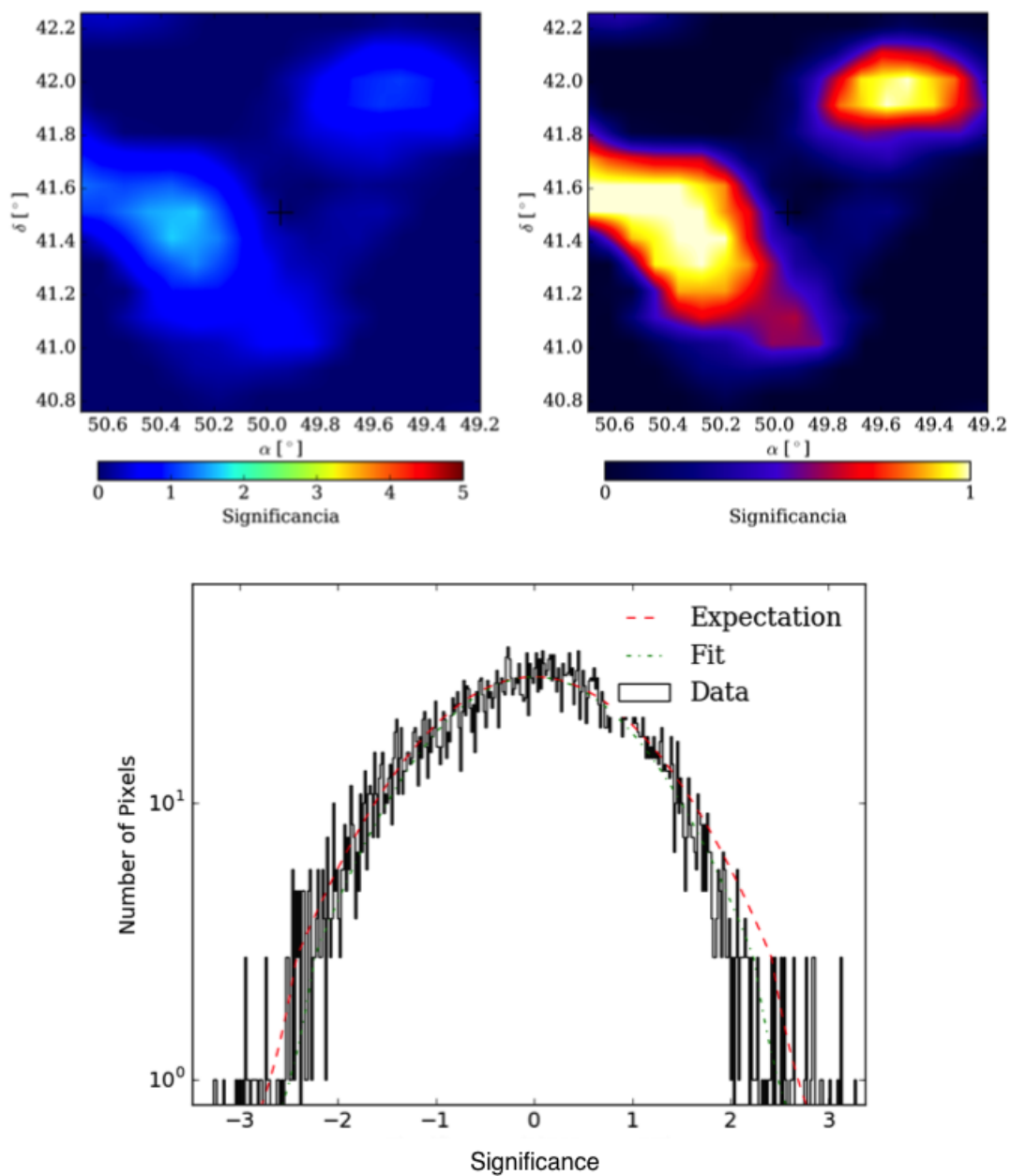


Figura 4.3 Mapa de significancia del cúmulo de Perseo centrado en NGC 1275 actualmente observado por HAWC.

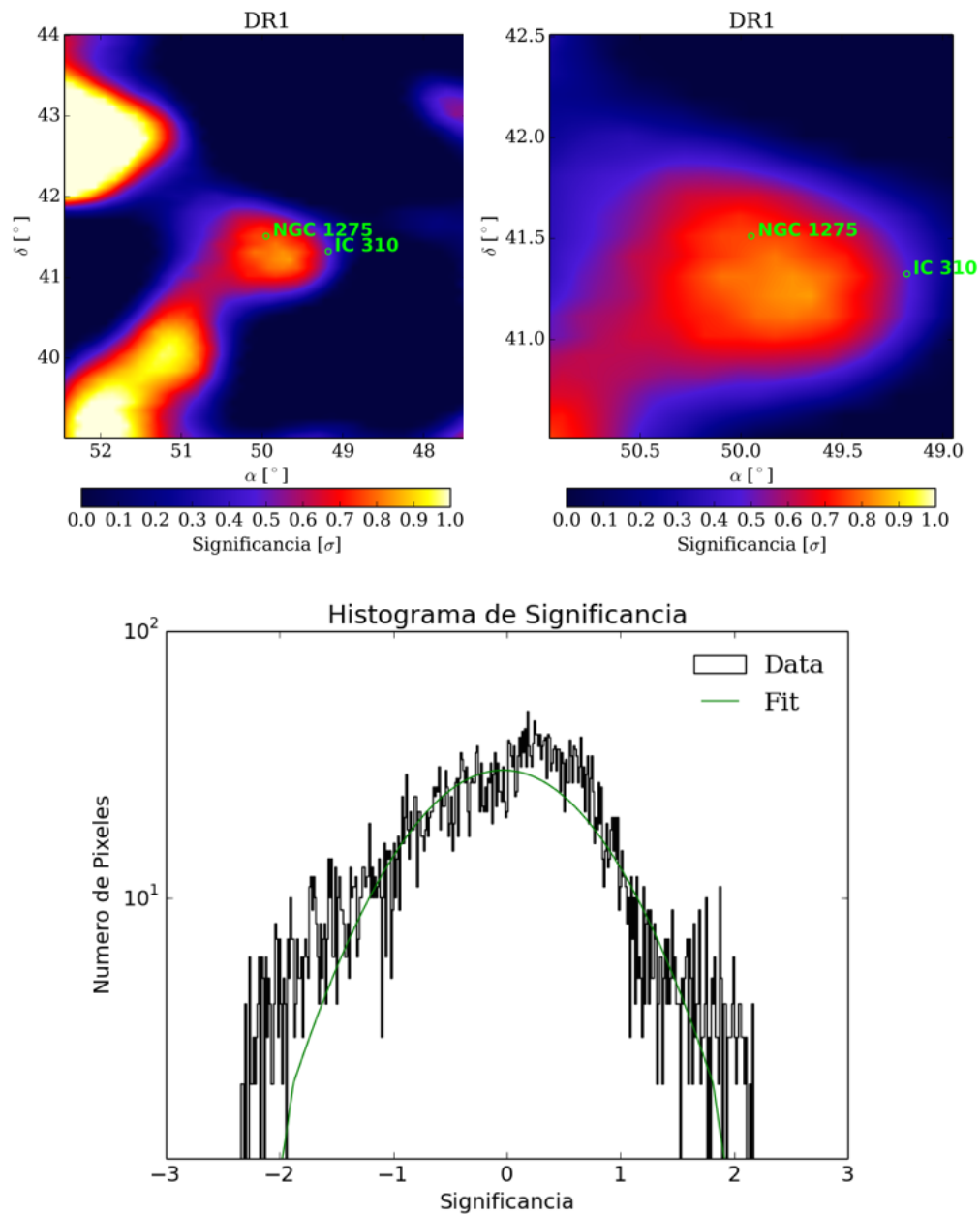


Figura 4.4 Mapa de significancia del cúmulo de Perseo con parámetros de DR1. Resulta ser el más prometedor para NGC 1275 e IC 310 como se esperaba, sin embargo la significancia es menor a 1. El histograma no muestra que realmente exista un exceso que corresponda a la detección de una fuente en el mapa.

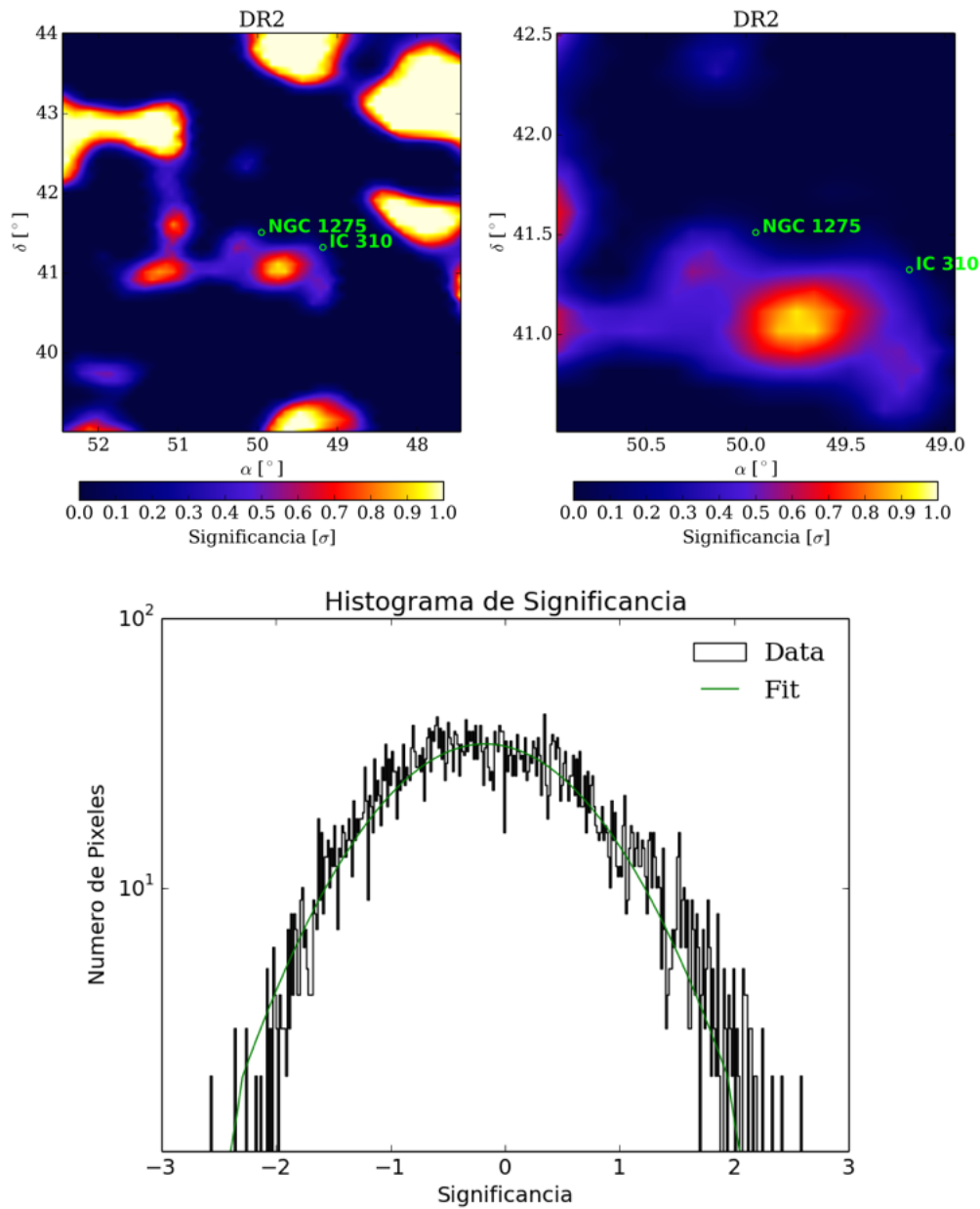


Figura 4.5 Mapa correspondiente a parámetros de DR2. Obteniendo la significancia más optimista para IC310 en este periodo de observaciones pero no da indicios de que sea observable por HAWC, mientras para NGC 1275 no hay modificaciones en cifras significativas. El histograma no muestra indicios de excesos por alguna fuente en el mapa.

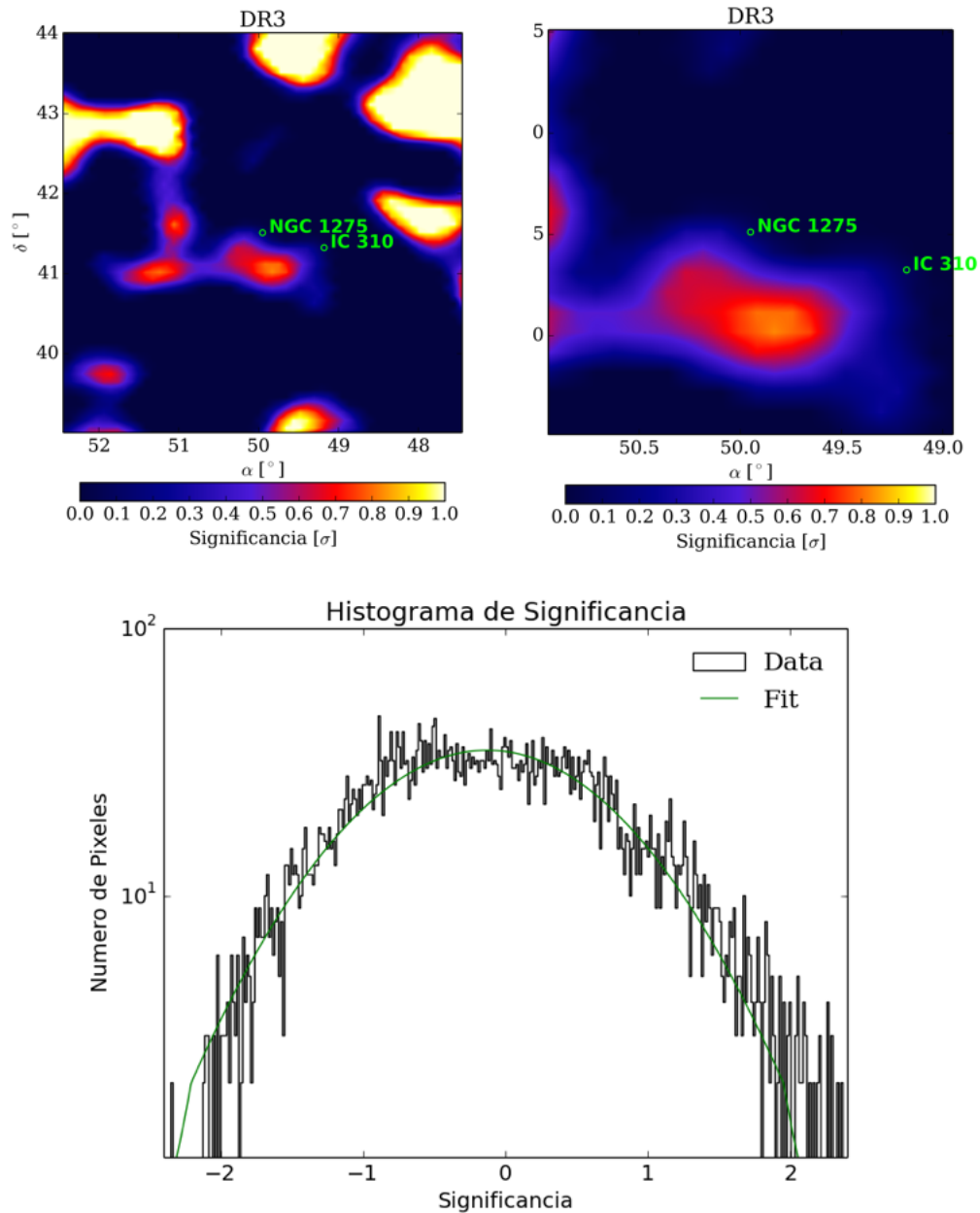


Figura 4.6 Mapa correspondiente a consideraciones para DR3. Observamos que no hay diferencia para NGC 1275 mientras que para IC310 representa el peor escenario, sin embargo no representa el hecho de que IC 310 sea observable por HAWC. Por otro lado, el histograma no muestra indicios de excesos en el mapa.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

HAWC es el resultado de un esfuerzo conjunto de universidades de México y Estados Unidos, principalmente con el objetivo de brindar un panorama del Universo ultra energético. Recientemente cumplió 2 años de operación con los 300 detectores funcionando. El observatorio de técnica Cherenkov en agua, cubre diariamente 2π sr del cielo, sin limitantes con respecto a la hora del día ni a condiciones climáticas específicas, garantizando una eficiencia absoluta en el rango energético que va desde los 100 GeV hasta los 100 TeV.

Considerando un radio de observación de 10° alrededor del cúmulo de Perseo y con 508 días de observación HAWC en completa operación. A pesar de que no puede asegurarse la contraparte en TeV de NGC 1275 ni de IC 310, incluso en estados de flare, debido a su baja significancia obtenida en este trabajo no es posible descartar posibles fluctuaciones. Se espera de manera optimista que con el paso del tiempo se logre coleccionar datos que aumenten la estadística para poder asegurar con 5σ de significancia una detección puntual. En el mejor de los casos que con 4 años de datos la detección de IC 310 y más de 10 años para la detección de NGC 1275 y en el peor de los casos esta radiogalaxia no será detectado por HAWC. Sin embargo, estos resultados podrían cambiar mejorando la estadística para eventos de bajas energías, traduciéndose en una mejora en la discriminación de rayos cósmicos y rayos gamma. Es importante considerar que del tiempo de observación, apenas una quinta parte del tiempo de observación fue cercano al cenit de HAWC ($> 60^\circ$) y poco menos de la mitad fue en el rango de sensibilidad ($> 40^\circ$) óptimo para HAWC.

Debido a que la separación de cascadas hadrónicas y electromagnéticas es un proceso fundamental en el análisis de datos de telescopios gamma terrestres, que presenta un

mayor reto para HAWC que para observatorios atmosféricos pues no emplea técnicas basadas en imágenes, es necesario el poder asegurar una discriminación correcta de eventos.

Índice de figuras

1.1. Victor Hess terminando un vuelo exitoso en 1912. Imagen tomada de <i>CERN timelines</i>	3
1.2. Espectro de rayos cósmicos en distintos rangos de energía. El área sombreada de amarillo representa la región de energía que es influenciada por el Sol. Imagen tomada de [9].	5
1.3. Versión actualizada del criterio de Hillas, las líneas representan la capacidad de acelerar rayos cósmicos en función del campo magnético y del tamaño de la fuente. La línea punteada representa protones con energía de 100 EeV, la línea negra inferior núcleos de Fe a energías de 100 EeV y la línea negra superior representa a protones de 1 ZeV. Imagen tomada de [12].	6
1.4. Distribución de rayos gamma detectados por Explorer XI. Imagen tomada de [16].	8
1.5. Universo observado en altas energías por el satélite EGRET superpuesto con las fuentes que habían sido detectadas rayos gamma de muy altas energías conocidas hasta ese momento. Imagen tomada de [17].	9
1.6. Simulaciones de cascadas atmosféricas electromagnéticas (a y c) y hadrónicas (b y d) a distintas energías de la primaria (100 GeV a y b , mientras a 100 TeV c y d). Se aprecia en los renglones 1 y 2 se muestran cortes transversales y horizontales respectivamente a la cascada las cuales exhiben la topología de ambas. Las simulaciones son realizadas con el software CORSIKA. Crédito Fabian Schmidt . Imagen tomada de [19].	11
1.7. Interpretación geométrica en la cual se ilustra la evolución de una cascada inducida por un rayo gamma. Imagen tomada de [20].	12
1.8. Modelo geométrico de una cascada inducida por un rayo cósmico. Imagen tomada de [20].	14

1.9.	Representación de un electron atravesando un medio transparente, de (a) se aprecia como un electron con una velocidad $v_e < c/n$, mientras que en (b) el electron a alcanzar una velocidad $v_e > c/n$. Imagen tomada de [21].	16
1.10.	Diagrama de Huygens del efecto Cherenkov.	16
1.11.	Esquema de dos telescopios atmosféricos, de lado izquierdo un telescopio del arreglo de HESS, de lado derecho, un prototipo para el arreglo CTA. Ambos a escala. Imagen tomada de [22]	17
1.12.	Simulación de una detección de un track originado por un rayo gamma detectado por CTA a distintos tiempos de observación. Imagen tomada de [22].	18
2.1.	Superior Izquierda Diseño final de la posición los 300 detectores que conforman a HAWC, los círculos rojos representan la distribución final de los PMT dentro de los tanques los ejes representan la distancia de extremo a extremo del experimento, tomando el centro de éste cómo centro de referencia. Imagen tomada de [28]. Superior Derecha Diseño final de VAMOS conformado por 6 detectores, en cada tanque se realizaron pruebas con distintas configuraciones para elegir la distribución de los PMT. Los ejes muestra la posición geográfica del experimento. Imagen tomada de [26]. Inferior Izquierda Representación de la interacción de una partícula miembro de una cascada atmosférica que produce luz Cherenkov dentro de un tanque, las líneas azules representan el ángulo θ con el que es emitida la luz, la flecha negra indica la traza de la partícula y la línea punteada el frente de la cascada. Imagen tomada de [29]. Inferior Derecha Representación de un detector Cherenkov, se observa el bladder (superficie azul marino) contenido dentro del tanque, (superficie gris), el bladder a su vez contiene los 4 fotomultiplicadores (el que se aprecia en el centro es el de 10", el oculto es uno de los PMTs periféricos de 8"). Imagen tomada de [26].	21
2.2.	Diagrama representativo de los dos sistemas de adquisición de datos Implementados por HAWC. Imagen tomada de [26].	23
2.3.	Representación del arribo de una cascada, la línea negra representa el verdadero frente de la cascada, mientras que la línea verde el ajuste del mejor plano al frente de la cascada. Por otro lado se observa el tiempo de desfaseamiento entre los distintos PMTs disponibles en ese momento. Imagen tomada de [28].	25

- 2.4. Simulaciones de cómo HAWC observa las cascadas atmosféricas que detecta. De lado izquierdo se aprecia la detección de una cascada electromagnética, inducida por un rayo gamma, mientras que a la derecha observamos una cascada hadrónica, inducida por un protón, se aprecian los diferentes perfiles de las casadas atmosféricas, ambas partículas primarias incidieron con una energía similar y con un ángulo similar. El área de los círculos es proporcional a la carga que registro el PMT, mientras que la escala de color indica el tiempo transcurrido en que se dio la interacción desde que se disparo el evento. 26
- 2.5. Representación de la distribución lateral de dos cascadas atmosféricas. En el panel Izquierdo se muestra la propia de una cascada de origen electromagnético mientras que del lado derecho una cascada inducida por un protón. Imagen obtenida de [34]. 27
- 2.6. En la figura se muestra la distribución de eventos hadrónicos, la distribución de rayos gamma distribuida en los 9 bins \mathcal{B} . figura tomada de [34]. 31
- 2.7. **Izquierda** En el panel superior encontramos el mapa de fondo observado por HAWC, mientras que en el panel inferior se observa una que los datos se encuentran acumulados en lugares muy específicos y de manera aislada. **Derecha** Observamos ahora en ambos paneles los mapas resultantes aplicando cortes óptimos en la discriminación entre rayos cósmicos y rayos gamma sobre los datos, lo cuál genera mapas con la ventaja de que estos mapas presentan una mejora traducida en el acceso a características a distintas escalas angulares, traduciéndose en una mejora al obtener mapas de significancia de una fuente. 32
- 2.8. La prueba estadística (ajuste en rojo) muestra el exceso sobre el fondo (histograma) , exhibiendo la negación de una hipótesis nula. Imagen tomada de [39] 34
- 3.1. Representación del modelo de unificación de los NGAs en base al ángulo de visión del jet. Imagen tomada de [45]. 36
- 3.2. Fuentes en el universo que emiten en TeV. La región sombreada de azul claro es el campo de visión de HAWC. El mapa se encuentra en coordenadas galácticas. 39
- 3.3. Cúmulo de Perseo en distintos anchos de banda. 42

4.1.	Transito de NGC 1275 e IC 310 sobre HAWC el día 26/11/2014 (MJD56987). El área sombreada muestra aquella región por encima del horizonte que representa una disminución en la sensibilidad de HAWC. La elección del día es lúdica.	44
4.2.	En la figura se aprecia la altitud en función del día y la hora durante el periodo de observación con HAWC	45
4.3.	Mapa de significancia del cúmulo de Perseo centrado en NGC 1275 actualmente observado por HAWC.	50
4.4.	Mapa de significancia del cúmulo de Perseo con parámetros de DR1. Resulta ser el más prometedor para NGC 1275 e IC 310 cómo se esperaría, sin embargo la significancia es menor a 1. El histograma no muestra que realmente exista un exceso que corresponda a la detección de una fuente en el mapa.	51
4.5.	Mapa correspondiente a parámetros de DR2. Obteniendo la significancia más optimista para IC310 en este periodo de observaciones pero no da indicios de que sea observable por HAWC, mientras para NGC 1275 no hay modificaciones en cifras significativas. El histograma no muestra indicios de excesos por alguna fuente en el mapa.	52
4.6.	Mapa correspondiente a consideraciones para DR3. Observamos que no hay diferencia para NGC 1275 mientras que para IC310 representa el peor escenario, sin embargo no representa el hecho de que IC 310 sea observable por HAWC. Por otro lado, el histograma no muestra indicios de excesos en el mapa.	53

Índice de tablas

1.1. Resultados obtenidos por Hess como producto de la serie de vuelos realizados entre 1911 y 1912. tabla obtenida de [2].	4
2.1. En la tabla se observa las propiedades de los 9 bins en los cuales son distribuidos los datos para su posterior análisis. \mathcal{B} Representa el número de bin, f_{hit} es el tamaño del evento, ψ_{68} representa la contención de al menos 68 % de los eventos por la función de dispersión, ϵ_{γ}^{MC} y ϵ_{CR}^{data} representan la eficiencia de la selección de para rayos gamma y rayos cósmicos respectivamente y finalmente E_{γ}^{MC} la energía media para un objeto de referencia con índice espectral -2.63 a una declinación de 20° . Tabla obtenida de [39].	30
4.1. Tiempo de observación en el cuál HAWC observó el cúmulo de Perseo.	45
4.2. Parámetros considerados para la elaboración de la respuesta del detector.	47
4.3. Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de NGC 1275.	47
4.4. Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de IC 310 en estado alto.	48
4.5. Parámetros utilizados para la función de dispersión suponiendo un flujo de IC 310 en estado bajo.	48
4.6. Parámetros con los cuáles se ajusta el fondo por medio de una función gaussiana, tal cuál se muestra en la figuras 4.4, figura 4.5 y finalmente en la figura 4.6	49
4.7. Significancia estadística obtenida cómo resultado de considerar flujos e índices espectrales reportados por MAGIC.	49

Bibliografía

- [1] A. Carramiñana. First year results of the High Altitude Water Cherenkov observatory. In Journal of Physics Conference Series, volume 761 of Journal of Physics Conference Series, page 012034, October 2016.
- [2] M. Bertolotti. Celestial Messengers: Cosmic Rays: The Story of a Scientific Adventure. Astronomers' Universe. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] J. R. Hörandel. Early cosmic-ray work published in German. In J. F. Ormes, editor, American Institute of Physics Conference Series, volume 1516 of American Institute of Physics Conference Series, pages 52–60, February 2013.
- [4] Nobel Prize. Victor F. Hess - Biographical. *Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014*.
- [5] A. Moats, T. Bowen, R. Golden, R. Streitmatter, S. Stochaj, J. Ormes, and J. Lloyd-Evans. The Leap Experiment: Another Look at the Cosmic-Ray Low-Energy Antiproton Flux, pages 475–479. Springer Netherlands, Dordrecht, 1989.
- [6] V. V. Akimov, N. L. Grigorov, V. E. Nesterov, I. D. Rapoport, I. A. Savenko, G. A. Skuridin, and A. F. Titenkov. Measurements of the primary cosmic ray spectra in the 10^{11} - 10^{14} eV Akeno energy range from Proton-1, 2, 3 satellites. International Cosmic Ray Conference, 1:517, 1970.
- [7] M. Teshima, H. Ohoka, Y. Matsubara, T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, C. X. He, M. Honda, F. Ishikawa, and K. Kamata. Akeno 20 KM (2) air shower array (Akeno Branch). International Cosmic Ray Conference, 3, August 1985.
- [8] L. G. Cassiday, R. Cooper, C. S. Corbato, R. B. Dawson, W. J. Elbert, B. D. Kieda, S. Ko, C. E. Loh, H. M. Salamon, J. Smith, P. Sokolsky, B. S. Thomas, and M. B. Wheeler. The HIRES Fly's Eye Project. International Cosmic Ray Conference, 10:244, 1990.
- [9] M. Kachelriess. Lecture notes on high energy cosmic rays. ArXiv e-prints, January 2008.
- [10] Roger Blandford, Paul Simeon, and Yajie Yuan. Cosmic ray origins: An introduction. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, 256:9 – 22, 2014.
- [11] A. M. Hillas. The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays. ARA&A, 22:425–444, 1984.

-
- [12] G. Matthiae. The cosmic ray energy spectrum as measured using the Pierre Auger Observatory. *New Journal of Physics*, 12(7):075009, July 2010.
- [13] J. P. Rachen and P. L. Biermann. Extragalactic Ultra-High Energy Cosmic-Rays - Part One - Contribution from Hot Spots in Fr-II Radio Galaxies. *A&A*, 272:161, May 1993.
- [14] B. L. Fanaroff and J. M. Riley. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. *MNRAS*, 167:31P–36P, May 1974.
- [15] N. Fraija and A. Marinelli. Neutrino, γ -Ray, and Cosmic-Ray Fluxes from the Core of the Closest Radio Galaxies. *ApJ*, 830:81, October 2016.
- [16] W. L. Kraushaar and G. W. Clark. Search for Primary Cosmic Gamma Rays with the Satellite Explorer XI. *Physical Review Letters*, 8:106–109, February 1962.
- [17] F.A. Aharonian. *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation: A Crucial Window on the Extreme Universe*. World Scientific, 2004.
- [18] Pierre Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, and Robley A. Fréon. Extensive cosmic-ray showers. *Rev. Mod. Phys.*, 11:288–291, Jul 1939.
- [19] The Research University in the Helmholtz Association KIT. Corsika, Marzo 2017.
- [20] M.S. Longair. *High Energy Astrophysics*. Cambridge University Press, 2011.
- [21] John Vernon Jelley. *Cherenkov radiation and its applications*. Pergamon, London, 1958.
- [22] M. Actis, G. Agnetta, F. Aharonian, A. Akhperjanian, J. Aleksić, E. Aliu, D. Allan, I. Allekotte, F. Antico, L. A. Antonelli, and et al. Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental Astronomy*, 32:193–316, December 2011.
- [23] Chris Cesare. Spain and chile chosen to host gamma-ray telescope. Nature News. 22 Marzo 2017.
- [24] David Cyranoski. Chinese mountain observatory to probe cosmic-ray origins. Nature News. 22 Marzo 2017.
- [25] Krista Zala. Mexican observatory pushes the limits of gamma-ray astronomy. Nature News. 22 Marzo 2017.
- [26] HAWC Collaboration. VAMOS: A pathfinder for the HAWC gamma-ray observatory. *Astroparticle Physics*, 62:125–133, March 2015.
- [27] M A Castillo, H Salazar, A Tepe, L M Villasenor, and the HAWC Collaboration. Simulation of fano factor at hawc-30 array. *Journal of Physics: Conference Series*, 378(1):012003, 2012.
- [28] A. J. Smith and for the HAWC Collaboration. HAWC: Design, Operation, Reconstruction and Analysis. *ArXiv e-prints*, August 2015.

- [29] HAWC Collaboration. The HAWC Gamma-Ray Observatory: Observations of Cosmic Rays. ArXiv e-prints, September 2013.
- [30] A. Marinelli, K. Sparks, R. Alfaro, M. M. González, B. Patricelli, and N. Fraija. Scientific verification of High Altitude Water Cherenkov observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 742:216–219, April 2014.
- [31] Stefan Westerhoff. Hawc: A next-generation all-sky gamma-ray telescope. Advances in Space Research, 53(10):1492 – 1498, 2014. Cosmic Ray Origins: Viktor Hess Centennial Anniversary.
- [32] A. Udara Abeysekara, T. N. Ukwatta, D. Edmunds, J. Linnemann, A. Imran, G. Kunde, and I. Wisher. GPS Timing and Control System of the HAWC Detector. ArXiv e-prints, October 2014.
- [33] Z. Hampel-Arias and Stefan Westerhoff for the HAWC Collaboration. Gamma Hadron Separation using Pairwise Compactness Method with HAWC. ArXiv e-prints, August 2015.
- [34] A. U. Abeysekara and The HAWC COLLABORATION. Observation of the Crab Nebula with the HAWC Gamma-Ray Observatory. ArXiv e-prints, January 2017.
- [35] P. Sokolsky. Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics. Frontiers in physics. Westview, 2004.
- [36] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers. February 1998.
- [37] S. Agostinelli. Geant4 a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 506(3):250 – 303, 2003.
- [38] Rene Brun and Fons Rademakers. ROOT An object oriented data analysis framework. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 389(1 – 2):81 – 86, 1997. New Computing Techniques in Physics Research V.
- [39] A. U. Abeysekara and The HAWC COLLABORATION. The 2HWC HAWC Observatory Gamma Ray Catalog. ArXiv e-prints, February 2017.
- [40] R. Atkins and The Milagro Collaboration. Observation of TeV Gamma Rays from the Crab Nebula with Milagro Using a New Background Rejection Technique. ApJ, 595:803–811, October 2003.
- [41] K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere. ApJ, 622:759–771, April 2005.

- [42] P. W. Young, R. J. Lauer, G. Vianello, J. P. Harding, H. A. Ayala Solares, H. Zhou, and Michelle Hui for the HAWC Collaboration. A high-level analysis framework for HAWC. ArXiv e-prints, August 2015.
- [43] B.M. Peterson. An Introduction to Active Galactic Nuclei. Cambridge University Press, 1997.
- [44] N. Fraija. Gamma-ray fluxes from the core emission of Centaurus A: a puzzle solved. MNRAS, 441:1209–1216, June 2014.
- [45] V. Beckmann and C. Shrader. Active Galactic Nuclei. Wiley, 2013.
- [46] H. Netzer. The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei. Cambridge University Press, 2013.
- [47] N. Fraija. Correlation of γ -Ray and High-energy Cosmic Ray Fluxes from the Giant Lobes of Centaurus A. ApJ, 783:44, March 2014.
- [48] N. Fraija, M. M. González, M. Perez, and A. Marinelli. How Many Ultra-high Energy Cosmic Rays Could we Expect from Centaurus A? ApJ, 753:40, July 2012.
- [49] N. Fraija, M. M. González, and M. Pérez. Hadronic processes as origin of TeV emission in Fanaroff & Riley Class I: Cen A, M87 and NGC1275. In -Ray Bursts 2012 Conference (GRB 2012), page 131, 2012.
- [50] J. Aleksić and MAGIC Collaboration. Detection of very-high energy γ -ray emission from NGC 1275 by the MAGIC telescopes. A&A, 539:L2, March 2012.
- [51] M. Mariotti. MAGIC detects VHE gamma-ray emission from IC 310. The Astronomer's Telegram, 2510, March 2010.
- [52] J. Aleksić and MAGIC Collaboration. Detection of Very High Energy γ -ray Emission from the Perseus Cluster Head-Tail Galaxy IC 310 by the MAGIC Telescopes. ApJ, 723:L207–L212, November 2010.
- [53] A. Neronov, D. Semikoz, and I. Vovk. Very high-energy γ -ray emission from IC 310. A&A, 519:L6, September 2010.
- [54] Aleksić and MAGIC Collaboration. Rapid and multiband variability of the TeV bright active nucleus of the galaxy IC 310. A&A, 563:A91, March 2014.
- [55] M. Mariotti and MAGIC Collaboration. Discovery of Very High Energy Gamma-Ray Emission from NGC1275 by MAGIC. The Astronomer's Telegram, 2916, October 2010.
- [56] A. A. Abdo and FERMI Collaboration. Fermi Discovery of Gamma-ray Emission from NGC 1275. ApJ, 699:31–39, July 2009.
- [57] R. Mukherjee and VERITAS Collaboration. VERITAS detection of the radio galaxy NGC 1275 with elevated very-high-energy gamma-ray emission. The Astronomer's Telegram, 9931, January 2017.

-
- [58] S. Lombardi. Observation of the Perseus galaxy cluster with the MAGIC telescopes. International Cosmic Ray Conference, 8:185, 2011.
- [59] EAS. Plank.
- [60] NASA/ IPAC. Nasa/ipac infrared science archive.
- [61] EAS. Xmm-newton.
- [62] J.D. Myers. Fermi gamma-ray space telescope.
- [63] Centre de Données astronomiques de Strasbourg. Aladin sky atlas.
- [64] N. Fraija, A. Marinelli, A. Galván-Gómez, and E. Aguilar-Ruiz. Modeling the spectral energy distribution of the radio galaxy IC310. Astroparticle Physics, 89:14–22, March 2017.
- [65] N. Fraija, A. Marinelli, U. Luviano-Valenzuela, A. Galván-Gaméz, and C. Peterson-Bórquez. Lepton-hadronic processes and high-energy neutrinos in NGC 1275. In F. Massaro, C. C. Cheung, E. Lopez, and A. Siemiginowska, editors, Extragalactic Jets from Every Angle, volume 313 of IAU Symposium, pages 175–176, March 2015.
- [66] F. Lucarelli and The AGILE collaboration. AGILE confirmation of enhanced gamma-ray activity from NGC 1275. The Astronomer’s Telegram, 9934, January 2017.
- [67] R. Mirzoyan. MAGIC detection of a giant flaring activity from NGC 1275 at very-high-energy gamma rays. The Astronomer’s Telegram, 9929, January 2017.