



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Estudio de fuentes de rayos gamma ultra energéticos
detectados por HAWC

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Indira Angie García Téllez

Asesorada por

Dr. Tomás Capistrán Rojas

Dr. Ibrahim Torres Aguilar

Puebla Pue.
Octubre 2021



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Estudio de fuentes de rayos gamma ultra energéticos
detectados por HAWC

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Indira Angie García Téllez

Asesorada por

Dr. Tomás Capistrán Rojas

Dr. Ibrahim Torres Aguilar

Puebla Pue.
Octubre 2021

Título: Estudio de fuentes de rayos gamma ultra energéticos detectados por HAWC

Estudiante: INDIRA ANGIE GARCÍA TÉLLEZ

COMITÉ

Dr. Javier Miguel Hernández López
Presidente

Dr. Jorge Cotzomi Paleta
Secretario

Dra. Karen Salomé Caballero Mora
Vocal

Dr. Óscar Gustavo Morales Olivares
Suplente

Dr. Tomás Capistrán Rojas
Asesor

Dr. Ibrahim Torres Aguilar
Asesor

*A mis padres
y mi hermana.*

Agradecimientos

A mis padres, por brindarme amor, educación y valores, por permitirme seguir mis sueños y estar para mí en todo momento. A mi hermana, por apoyarme desde el primer momento en el que decidí tomar este camino, por creer en mí y por ser mi mayor ejemplo a seguir.

A mis asesores, al Dr. Ibrahim, por mostrarme este campo de la física, por recibirme cordialmente cuando le expresé mi interés para realizar esta tesis y por compartir sus conocimientos y consejos; al Dr. Tomás, por su infinita paciencia, disposición, apoyo y guía en este trabajo.

A mi jurado, el Dr. Javier, el Dr. Jorge, la Dra. Karen y el Dr. Óscar, por aceptar ser parte de este último paso en mi trayecto por la licenciatura y por haber contribuido en parte de mi formación académica.

A la Dra. Kelly Malone y el Dr. Joe Lundeen, por su apoyo técnico, indispensable para la realización de este trabajo.

También agradezco a las personas que, de alguna u otra manera, influyeron significativamente a que llegara hasta aquí. A mi *squad*, Ingrid, Mari, Majo, Joseph y Alexis, por acompañarme y apoyarme estos años en clases, laboratorios, exámenes, congresos, momentos llenos de estrés pero también en momentos de diversión, cumpleaños, posadas, viajes y más. A Alejandro, Hernán y Jonh, por su amistad y su apoyo. A profesores como el Mtro. Manuel Ibarra, el Dr. Rodolfo Palomino, el Dr. Javier Hernández y el Dr. Eduardo Moreno, por influir de manera especial en mi camino por la licenciatura.

Índice general

Agradecimientos	VII
Resumen	XV
1. Introducción	1
1.1. Espectro electromagnético	1
1.2. Rayos gamma	2
1.3. Chubascos atmosféricos extendidos	3
1.4. Modelo de Heitler	5
1.4.1. Modelo de Heitler para cascadas electromagnéticas	5
1.4.2. Modelo de Heitler para cascadas hadrónicas	6
1.5. Motivación	8
1.6. Objetivo	9
1.6.1. Objetivo general	9
1.6.2. Objetivos particulares	9
2. Observatorio de rayos gamma HAWC	11
2.1. Antecedentes	11
2.2. Detectores	12
2.3. Tubos fotomultiplicadores	12
2.4. Efecto Cherenkov	13
2.5. Estimadores de energía	15
2.5.1. Gran parámetro	15
2.5.2. Redes neuronales	16
3. Fuentes de rayos gamma ultra energéticos	19
3.1. Espectro de rayos cósmicos	20
3.2. PeVatrones	21
3.3. Productores de rayos gamma	22
3.4. Fuentes de rayos gamma	23
3.5. Modelos espectrales	24
3.5.1. Ley de potencias	24
3.5.2. Ley de potencias con corte exponencial	24
3.5.3. Log-parabola	24

4. Metodología	27
4.1. Datos	27
4.2. Análisis por bins	28
4.3. Generación de mapas	29
4.3.1. Mapas de significancia	31
4.4. Caracterización de fuentes	31
4.5. Cálculo del flujo integral	31
4.6. Ajuste espectral	32
5. Resultados	35
6. Conclusiones	41
A. Para la generación de mapas	43
A.1. Tabla 5.1	45
A.2. Tabla 5.2	47
A.3. Tabla 5.3	47
A.4. Tabla 5.4	48
A.5. Tabla 5.5	49
A.6. Tabla 5.6 y 5.7	49
B. Creación de mapas de significancia	51
C. Resultados del catálogo de altas energías	53

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético.	2
1.2. Representación esquemática de una cascada electromagnética [24].	4
1.3. Estructura de un chubasco atmosférico extendido [43].	5
1.4. Esquema de (a) una cascada electromagnética y (b) un chubasco hadrónico [35].	7
1.5. Matrices de comparación para los estimadores de energía GP (izquierda) y NN (derecha), histogramas en 2D normalizados con el número total de eventos. La línea punteada es la línea de identidad; los eventos sobre esta línea son aquellos que son reconstruidos correctamente [3].	8
2.1. Fotografía de la vista lateral del Observatorio HAWC.	12
2.2. Del lado izquierdo se muestra un esquema de un detector Cherenkov en agua. En color gris se representa el tanque de acero, el color azul fuerte el ‘bladder’, y en azul claro el agua ultra pura, además en la parte inferior se observan tres de los PMTs [6]. Del lado derecho se muestra la distribución de los trescientos detectores con cada uno de sus tubos fotomultiplicadores.	13
2.3. Fotografía de uno de los tubos fotomultiplicadores usados en el observatorio HAWC.	14
2.4. Emisión de radiación de Cherenkov en una onda de choque para partículas que atraviesan un medio de índice de refracción n con una velocidad que excede la velocidad de la luz en ese medio [24]	15
2.5. Red neuronal con múltiples capas ocultas (en este caso, sólo dos) [9]	16
2.6. Esquema comparativo de una (a) neurona biológica y una (b) neurona artificial [25].	17
3.1. Representación del espectro energético de rayos cósmicos [8]	20
3.2. Esquema representativo del efecto del campo magnético en diferentes partículas [17].	21
4.1. Diagrama de flujo para generar los mapas.	30
5.1. Mapa de significancia del plano galáctico para emisiones $\hat{E} > 56$ TeV. Como comparación se muestran las fuentes del segundo catálogo de HAWC en círculos negros abiertos.	35
5.2. Mapa de significancia análogo a la figura 5.1 pero para emisiones $\hat{E} > 100$ TeV.	35

5.3. Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Del lado izquierdo para emisiones mayores a 56 TeV, del lado derecho para emisiones mayores a 100 TeV.	36
5.4. Espectros de las fuentes con emisión significativa para $\hat{E} > 100$ TeV. En el primero se tiene a la fuente eHWC J1825-134 y en la segunda se muestra a la fuente eHWC J1907-063. Las barras de error son sólo incertidumbres estadísticas.	39
C.1. Mapa de significancia del plano galáctico para emisiones $\hat{E} > 56$ TeV. Como comparación se muestran las fuentes del segundo catálogo de HAWC en círculos negros abiertos.	53
C.2. Mapa de significancia análogo a la figura 5.1 pero para emisiones $\hat{E} > 100$ TeV.	53
C.3. Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Del lado izquierdo para emisiones mayores a 56 TeV, del lado derecho para emisiones mayores a 100 TeV.	54

Índice de tablas

4.1. fHit bins	28
4.2. Bines de energía	28
5.1. Fuentes que emiten a más de 56 TeV. F es el flujo integral para > 56 TeV; \sqrt{TS} es la raíz cuadrada del test estadístico para el ajuste del flujo integral. Todas las incertidumbres son sólo estadísticas.	36
5.2. Valores espectrales con ajuste a una ley de potencias con corte exponencial para las fuentes que emiten a más de 100 TeV. Las incertidumbres son sólo estadísticas. ϕ_0 es la norma de flujo a la energía pivote (10 TeV). $PL\ diff$ corresponde a $\sqrt{\Delta TS}$ entre el modelo espectral ajustado y una ley de potencias.	37
5.3. Valores del flujo integral calculado asumiendo un índice espectral de 2.0.	37
5.4. Valores de TS para los tres diferentes ajustes.	37
5.5. Valores de TS para el ajuste del espectro completo para las fuentes que emiten a más de 100 TeV.	38
5.6. Puntos de flujo para la fuente eHWC J1825-134.	38
5.7. Puntos de flujo para la fuente eHWC J1907+063.	38
6.1. Comparación de resultados del test estadístico para las fuentes que emiten a más de 56 y 100 TeV, con los estimadores de energía gran parámetro (GP) y redes neuronales (NN).	41
6.2. Comparación de los modelos de mejor ajuste para las fuentes que continúan emitiendo a más de 56 y 100 TeV, para gran parámetro (GP) y redes neuronales (NN).	42
C.1. Fuentes que emiten a más de 56 TeV. F es el flujo integral para > 56 TeV; \sqrt{TS} es la raíz cuadrada del test estadístico para el ajuste del flujo integral. Todas las incertidumbres son sólo estadísticas.	54
C.2. Valores espectrales con ajuste a una ley de potencias con corte exponencial para las fuentes que emiten a más de 100 TeV. Las incertidumbres son sólo estadísticas. ϕ_0 es la norma de flujo a la energía pivote (10 TeV). $PL\ diff$ corresponde a $\sqrt{\Delta TS}$ entre el modelo espectral ajustado y una ley de potencias.	54
C.3. Valores del flujo integral calculado asumiendo un índice espectral de -2.0.	55
C.4. Valores de TS para los tres diferentes ajustes.	55

C.5. Valores de TS para el ajuste del espectro completo para las fuentes que emiten a más de 100 TeV.	55
C.6. Puntos de flujo para la fuente eHWC j1825-134.	55
C.7. Puntos de flujo para la fuente eHWC j1907+063.	56

Resumen

El observatorio HAWC, es capaz de detectar partículas provenientes de los fenómenos más violentos del universo, existen fuentes que pueden acelerar partículas a muy altas energías, el estudio de éstas ayudará a entender los mecanismos de aceleración y propagación. En un estudio previo se presentó el primer catálogo de fuentes de rayos gamma ultra energéticos que emiten por arriba de 56 y 100 TeV con datos del Observatorio HAWC, usando el método gran parámetro como estimador de energía. En este trabajo se realizó el mismo análisis, pero aplicando el estimador de energía de redes neuronales. Con éste se encontraron las mismas nueve fuentes que emiten a más de 56 TeV, pero sólo dos de ellas se detectaron con emisiones mayores a los 100 TeV. En la mayoría de los casos se encontró un resultado más favorable con el estimador gran parámetro, sin embargo, la fuente eHWC J0534+220 tuvo una notable mejoría con el uso de redes neuronales. Además, se reportó y comparó el flujo integral de cada una de las fuentes, y se mostraron los espectros de aquellas con mayor energía.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Espectro electromagnético

La energía electromagnética abarca un amplio espectro, que va de las ondas de radio a los rayos gamma en un intervalo continuo (ver figura 1.1). Este espectro agrupa y clasifica todos los tipos de ondas electromagnéticas, por ejemplo, la luz visible, pero además se incluyen aquellas que no son perceptibles al ojo humano. Todas las ondas son de la misma naturaleza, pero difieren principalmente en frecuencia y longitud de onda, lo que conlleva comportamientos diferentes; a pesar de ello, todas tienen la misma velocidad [27].

Las unidades más comunes que se usan para el espectro electromagnético son: el electrón-voltio para energía, el metro para la longitud de onda y los Hertz para la frecuencia. No hay un límite exacto para la cota superior o inferior del espectro, pero suelen mostrarse rangos como los de la figura 1.1:

- 10^{-9} eV – 1 MeV
- 1 km – 10 pm
- 10^6 – 10^{20} Hz

para energía, longitud de onda y frecuencia, respectivamente.

La radiación electromagnética se ha clasificado en diferentes regiones cuyos límites no están bien definidos, pero se atribuyen intervalos como se puede observar en la figura 1.1. Estas regiones son: ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

La presencia de esta radiación se encuentra en todo el universo. Desde el espacio recibimos esta radiación en todas sus longitudes de onda emitidas por las distintas fuentes estelares y otros objetos siderales. Esta radiación puede deberse a cargas eléctricas en movimiento o por materia a altas temperaturas. Lo cual se presenta en estrellas a miles de grados o en la materia nebulosa en el espacio, sometida a fuertes campos magnéticos y campos gravitacionales, como sucede cerca de los agujeros negros.

Los fotones que se crean en estas fuentes viajan hasta llegar a la atmósfera de la Tierra y para su estudio, se han construido diversos instrumentos y observatorios. Siendo el principal interés para este trabajo la región de mayor energía del espectro, es decir, los rayos gamma,

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN
1.2. RAYOS GAMMA

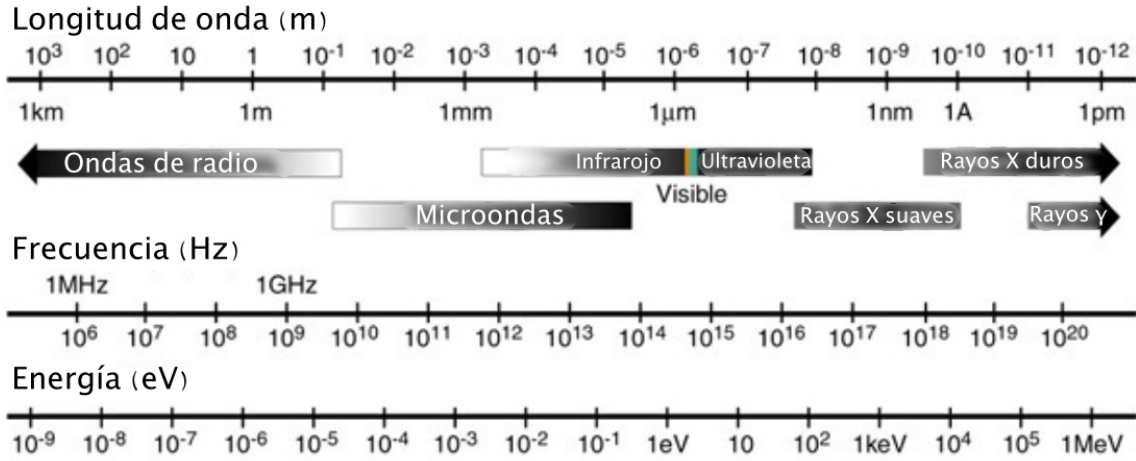


Figura 1.1: Espectro electromagnético.

específicamente los que se encuentran dentro del rango de detección del observatorio de gran altura de Cherenkov en agua (HAWC), del cual se hablará en el siguiente capítulo.

1.2. Rayos gamma

Los rayos gamma tienen la longitud de onda más corta y la energía más alta del espectro. La radiación electromagnética con energías superiores a 100 keV se denomina rayos gamma. No se ha definido un límite superior, sin embargo, se han observado rayos gamma con energías del orden de PeV [38].

Estos rayos fueron descubiertos por Paul Villard en 1900 mientras estudiaba la radiación que emana del radio [23]. Pero los inicios de la astronomía de los rayos gamma comienzan con predicciones en la década de 1950: en 1952 Hayakawa predijo la emisión difusa por el decaimiento del pion neutro, π^0 , y en ese mismo año Hutchinson predijo la emisión de estos rayos por bremsstrahlung. Por otro lado, los artículos de Burbidge, Fowler y Hoyle en 1957 y de Morrison en 1958 generaron una perspectiva positiva para la detección de estos fotones [41].

Las primeras detecciones confiables de rayos gamma desde el espacio y la atmósfera de la Tierra fueron las realizadas por el Explorer 11 en 1961. Pero fue hasta 1967 que se descubrió por casualidad el fenómeno de las explosiones de rayos gamma, por la red de satélites Vela del Departamento de Defensa de EE.UU. que fueron diseñados para monitorear la evidencia de pruebas nucleares clandestinas después del Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares [41]. Desde entonces, gracias al avance de la ciencia y la tecnología se ha estudiado más sobre la naturaleza y procedencia de estos rayos.

Los distintos tipos de fuentes de rayos gamma pueden ser: las supernovas y sus remanentes, objetos que giran rápidamente como púlsares y estrellas de neutrones, núcleos galácticos activos y agujeros negros que acumulan materia. En estas fuentes, los rayos gamma pueden producirse por diferentes mecanismos [24].

Algunas de estas formas de producción son:

- Radiación sincrotrón: Producida por partículas cargadas que describen una órbita circular con velocidades relativistas. Se emiten fotones en un cono estrecho en la dirección de la velocidad de las partículas. La energía es muy variable, ya que depende de la energía de las partículas cargadas.
- Bremsstrahlung: También llamada radiación de frenado, se debe al frenado de partículas cargadas en el campo eléctrico de los núcleos atómicos. Se trata de un espectro continuo de energías, que van desde cero hasta la energía cinética de la partícula cargada.
- Dispersión inversa de Compton: Los electrones acelerados a altas energías en la fuente chocan con los numerosos fotones de la radiación del cuerpo negro o fotones de luz estelar y transfieren parte de su energía a los fotones, que están ‘desplazados al azul’.
- Decaimiento π^0 : Los protones acelerados en las fuentes pueden producir piones cargados y neutros en interacciones protón-protón o protón-núcleo. Y los piones neutros se desintegran rápidamente en dos gammas.
- Aniquilación de pares: Las partículas cargadas pueden aniquilarse con sus antipartículas en energía. Las fuentes dominantes de este mecanismo de producción son las aniquilaciones electrón-positrón:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma. \tag{1.1}$$

La conservación del momento requiere que se produzcan al menos dos fotones.

- Fotones de transformaciones nucleares: Los elementos pesados reaccionan en explosiones de supernovas, en estos procesos no solo se producen isótopos estables sino también radiactivos. Estos radioisótopos emitirán, principalmente como consecuencia de una desintegración beta, fotones en el rango de MeV.

Las partículas creadas por estos mecanismos realizan una trayectoria recta desde su punto de creación hasta llegar a la atmósfera terrestre, donde colisionan con las moléculas de ésta, a las que se les llama partículas primarias. Después de que una partícula interacciona con la atmósfera, ésta pasa por algún proceso ocasionando la creación de más partículas, las cuales se denominan partículas secundarias, éstas vuelven a interactuar con las partículas de la atmósfera y siguen propagándose en la misma dirección en la que incidió la partícula primaria, produciendo así, nuevas partículas, hasta llegar a una energía tan baja que sea absorbida por la atmósfera.

1.3. Chubascos atmosféricos extendidos

Al resultado de todas las interacciones cuando una partícula de alta energía, que arriva desde el espacio, choca con la atmósfera, se le denomina chubascos (o cascadas) atmosféricos extendidos (EAS, por sus siglas en inglés) [8]. Su producción se puede deber tanto a un rayo gamma (cascada electromagnética) como a un rayo cósmico (cascada hadrónica).

Se atribuye el descubrimiento de este fenómeno al físico francés Pierre Victor Auger (1899-1993), quien en 1938 dió a conocer su estudio de la producción de partículas de alta

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN
1.3. CHUBASCOS ATMOSFÉRICOS EXTENDIDOS

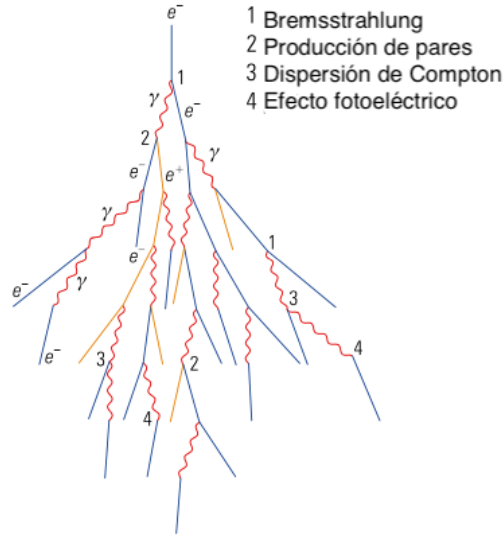


Figura 1.2: Representación esquemática de una cascada electromagnética [24].

energía de las cascadas atmosféricas debido a los rayos cósmicos [19]. Sin embargo, se reportaron observaciones previas de chubascos atmosféricos por parte del físico italiano Bruno Rossi (1905-1993) por un lado, y por otra parte, por el físico alemán Werner Kolhörster (1887-1946).

Un EAS puede constar de tres componentes:

- **Electromagnética:** Compuesta por fotones (γ), electrones (e^-) y positrones (e^+) principalmente producidos por el decaimiento de los mesones secundarios (en el caso de cascadas hadrónicas). Por ejemplo, un pion neutro decae en dos fotones (ver figura 1.3):

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (1.2)$$

Es una componente que se desarrolla rápidamente por medio de la radiación de Bremsstrahlung y producción de pares; sin embargo, también están presentes la pérdida de energía por ionización (por colisiones), el efecto fotoeléctrico y radiación Cherenkov en aire (ver figura 1.2). Forma aproximadamente el 90% del total de la producción de partículas de una cascada hadrónica.

- **Muónica:** Esta componente contiene muones (μ^-) y antimuones (μ^+). Se deben principalmente a la desintegración de piones y kaones cargados, por ejemplo:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.3)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \pi^0. \quad (1.4)$$

Representa alrededor del 9% de las partículas de un chubasco hadrónico. Por la naturaleza del muón, estos no interactúan casi con la atmósfera causando que penetren profundamente; y los pocos que se desintegran en la atmósfera, contribuyen a la componente electromagnética.

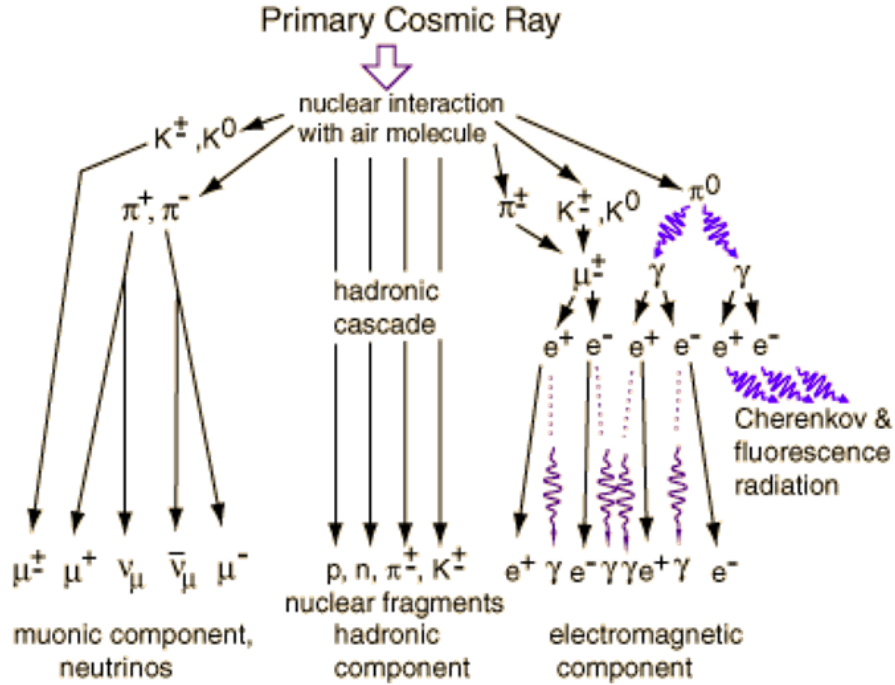


Figura 1.3: Estructura de un chubasco atmosférico extendido [43].

- Hadrónica:** Contiene nucleones y otros hadrones de alta energía. Se forman cuando los rayos cósmicos interactúan con las moléculas de la atmósfera (como el nitrógeno y el oxígeno) y producen partículas secundarias cuyas colisiones se basan en procesos hadrónicos. Revela información importante sobre la masa y la energía de la partícula primaria que induce el chubasco. Es la componente más pequeña respecto al porcentaje de partículas, con apenas el $\sim 1\%$; no obstante, las componentes electromagnética y muónica del EAS son producto de esta componente al desintegrarse las partículas que emergen de las interacciones hadrónicas.

1.4. Modelo de Heitler

En 1944, el físico alemán Walter Heinrich Heitler, creó un modelo fenomenológico simple para describir el desarrollo de los EAS con algunos parámetros básicos de la interacción de las partículas secundarias. Este modelo se creó para cascadas electromagnéticas, sin embargo, su estudio se extendió a las cascadas hadrónicas [35].

1.4.1. Modelo de Heitler para cascadas electromagnéticas

Aunque se pueden predecir las propiedades más importantes de un EAS con el modelo de Heitler, no cubre todos los detalles. Si se considera un γ como partícula primaria con cierta energía E_0 y además se supone que esta partícula viajará una distancia fija, d , llamada longitud de interacción (relacionada con la longitud de la radiación, λ_r), después de una interacción se producirán dos nuevas partículas, un par $e^+ e^-$, con energía $E_0/2$ cada

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN
1.4. MODELO DE HEITLER

una. A su vez, cada una de estas nuevas partículas producirá un γ mediante bremsstrahlung posterior a viajar una longitud de interacción, $d = \lambda_r \ln 2$. Los γ generados producen otro par $e^+ e^-$, repitiéndose el proceso, como se observa en la figura 1.4 (a).

Así que el número total de partículas en la cascada, después de n interacciones consecutivas, será 2^n . Por tanto, dada una profundidad ($X = n \times \lambda_r \ln 2$), el número total de partículas es:

$$N(X) = 2^n = e^{\frac{X}{\lambda_r}} \quad (1.5)$$

La multiplicación de partículas termina abruptamente cuando la energía de cada partícula cae por debajo de la energía crítica E_c , es decir, cuando el promedio de la energía perdida por colisión comienza a superar las pérdidas por producción de partículas secundarias. Por lo que el máximo de la cascada se alcanza cuando la energía de las partículas secundarias llega a E_c . Entonces, el número de las partículas secundarias es

$$N_{max} = \frac{E_0}{E_c} \quad (1.6)$$

Además, el número máximo de partículas estará dado también por el número total de divisiones, esto es:

$$N_{max} = 2^{n_{Total}} \quad (1.7)$$

Y la profundidad a la que la cascada llega a su máximo se obtiene al determinar el n_{Total} requerido para que la energía promedio de las partículas secundarias se reduzca a E_c . Así que de las dos últimas ecuaciones se deduce que:

$$n_{Total} = \frac{\ln E_0/E_c}{\ln 2} \quad (1.8)$$

Entonces podemos encontrar fácilmente que la profundidad máxima se puede expresar como:

$$X_{max} = \lambda_r \ln \frac{E_0}{E_c} \quad (1.9)$$

esto es, la profundidad es proporcional a la energía de la partícula primaria

$$X_{max} \propto \ln E_0. \quad (1.10)$$

1.4.2. Modelo de Heitler para cascadas hadrónicas

Las cascadas atmosféricas producidas por hadrones se pueden modelar usando una aproximación similar al de Heitler, como se mencionó anteriormente, su modelo para el caso electromagnético se puede extender para el caso hadrónico. Si se tiene un hadrón como partícula primaria con una energía E , se espera que al interactuar en la atmósfera se generen un total de N_{max} partículas secundarias, con una energía de E/N_{max} . Y de una forma simple, se puede suponer que un tercio de estas partículas serán partículas neutras (π^0) y los dos tercios restantes serán partículas cargadas (π^+ y π^-).

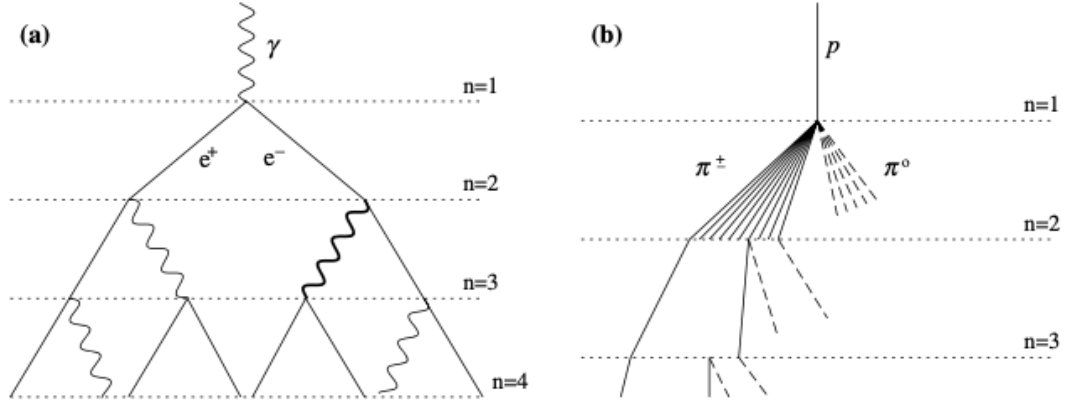


Figura 1.4: Esquema de (a) una cascada electromagnética y (b) un chubasco hadrónico [35].

En la figura 1.4 (b) se puede observar el diagrama de desarrollo para una cascada producida por un protón. Los piones neutros decaen en partículas electromagnéticas: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Por otro lado, los piones cargados decaen en muones y neutrinos: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ y $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

En cada interacción, la componente electromagnética obtiene un tercio de la energía de la componente hadrónica, después de n interacciones se tiene que:

$$E_h = \left(\frac{2}{3}\right)^n E_0 \quad (1.11)$$

$$E_{EM} = \left[1 - \left(\frac{2}{3}\right)\right]^n E_0. \quad (1.12)$$

A pesar de que la cascada sea generada por un hadrón, pasadas varias interacciones la componente electromagnética tendrá el mayor porcentaje de la energía ($\sim 90\%$ para $n = 6$) [39]. Así que la profundidad del chubasco corresponderá a la de la componente electromagnética, X_{max}^{EM} .

Dado que por la primera interacción hadrónica se producen partículas electromagnéticas de energía $\sim E_0/N_{max}$, se obtiene:

$$X_{max} \sim \lambda_{pi} + X_{max}^{EM}(E_0/N_{max}) \quad (1.13)$$

entonces

$$X_{max} \sim \lambda_{pi} + \lambda_r \ln \frac{E_0}{N_{max} E_c} \quad (1.14)$$

donde λ_{pi} corresponde a la longitud de interacción de la partícula (hadrónica) primaria. De esta forma, se tiene que la profundidad máxima nuevamente depende de la energía, sin embargo, en esta ocasión también lo hace de N_{max} .

El desarrollo de la cascada hadrónica cesa cuando la energía de los piones cargados cae por debajo de la energía crítica.

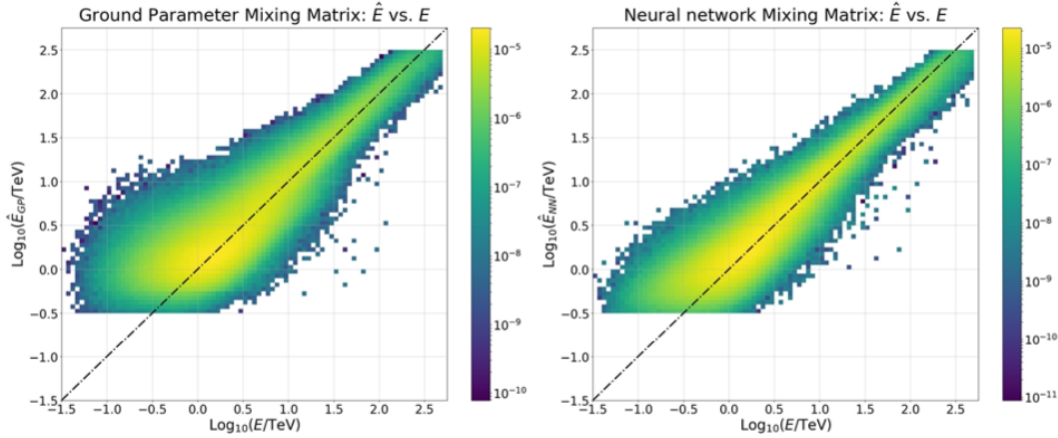


Figura 1.5: Matrices de comparación para los estimadores de energía GP (izquierda) y NN (derecha), histogramas en 2D normalizados con el número total de eventos. La línea punteada es la línea de identidad; los eventos sobre esta línea son aquellos que son reconstruidos correctamente [3].

1.5. Motivación

Como se mencionó anteriormente, los avances del estudio de los rayos gamma han sido muy significativos desde su descubrimiento, gracias al desarrollo científico y tecnológico. No obstante, aún queda una gran gama de investigaciones que se pueden hacer gracias a las múltiples herramientas de análisis con las que se cuentan hoy en día, y gracias a la enorme cantidad de datos que nos proporcionan los observatorios, como el ubicado en el volcán Sierra Negra.

Debido a la gran capacidad de detección de HAWC y puesto que cuenta con dos estimadores de energía, gran parámetro y redes neuronales (de los cuales se hablará en el siguiente capítulo), ha sido posibles estudiar diversas fuentes, como la nebulosa del Cangrejo. En un estudio previo de esta fuente [3], se presentó un análisis comparativo entre los dos métodos de estimación de energía (ver figura 1.5). Se reportaron buenos resultados con ambos métodos, sin embargo, uno de éstos puede resultar más favorable que el otro dependiendo del rango de energía.

Por otro lado, existe un catálogo de altas energías donde se reportan las fuentes de rayos gamma con emisión a más de 56 TeV y 100 TeV [4]. En este estudio, se empleó el método llamado gran parámetro para estimar la energía, reportando nueve fuentes que emiten a más de 56 TeV, de las cuáles tres de ellas presentaron emisiones superiores a los 100 TeV. Además, se calculó el flujo integral de cada objeto, los espectros de las tres fuentes de mayor energía y se discute la posibilidad de que sean PeVatrones (de los cuales se hablará en el capítulo 3).

En este trabajo se pretende estudiar las fuentes del catálogo antes mencionado con el método de redes neuronales con el fin de poder efectuar un análisis comparativo entre los resultados reportados en [4] y los obtenidos con este método, análogo al análisis comparativo que se hizo con la nebulosa del Cangrejo. Y, finalmente, poder discutir sobre dichas

diferencias entre los estimadores de energía.

1.6. Objetivo

1.6.1. Objetivo general

Estudiar las fuentes de rayos gamma ultra energéticas con datos del Observatorio de gran altura de Cherenkov en agua (HAWC), empleando el estimador de energía de redes neuronales, además de comparar dichos resultados con la información que se reporta en el catálogo de altas energías.

1.6.2. Objetivos particulares

1. Generar los mapas del cielo utilizando como estimador de energía el método de redes neuronales.
2. Identificar las fuentes de rayos gamma con emisiones superiores a 56 TeV y 100 TeV.
3. Calcular el flujo integral de las fuentes identificadas.
4. Realizar un ajuste espectral a dichas fuentes.
5. Comparar los resultados al usar el estimador de energía de redes neuronales con los resultados de gran parámetro reportados.

Capítulo 2

Observatorio de rayos gamma HAWC

Cuando un rayo gamma interacciona con las moléculas de la atmósfera se produce una cascada o chubasco de partículas secundarias que se pueden detectar a nivel del suelo por medio de diferentes experimentos. Uno de ellos es el observatorio de gran altura de Cherenkov en agua (HAWC, por sus siglas en inglés), un instrumento capaz de observar los chubascos generados por rayos gamma dentro de un rango de energía entre 300 GeV y más de 100 TeV. Se encuentra en las faldas del Volcán Sierra Negra, en el Parque Nacional Pico de Orizaba, en Puebla, México. En la figura 2.1 se puede observar la vista lateral del observatorio.

2.1. Antecedentes

HAWC es el sucesor de MILAGRO (Multiple Institution Los Alamos Gamma Ray Observatory), el primer observatorio en utilizar la técnica de Cherenkov en agua para detectar rayos gamma, ubicado en Nuevo Mexico a 2630 m.s.n.m. MILAGRO era sensible a energías de 50 GeV a 100 TeV, su componente principal era un estanque artificial de $60 \times 80 \times 7$ metros, lleno de agua ultra pura, con dos arreglos de tubos fotomultiplicadores (PMTs, por sus siglas en inglés), el superior a 1.5 m debajo de la superficie con 450 PMTs, y el inferior, 6 m debajo de la superficie con 273 PMTs [1].

Basándose en la experiencia de este primer experimento, HAWC se planeó con un diseño optimizado:

- A 4100 m.s.n.m., aumentando 1470 m.
- Con un área de $22000 m^2$, incrementando $17500 m^2$.
- Diseño modular, es decir, detectores por separado en lugar de un sólo estanque.

Lo que permite que HAWC tenga una mejor resolución angular y rechazo de fondo, un umbral de energía más bajo. Logrando una sensibilidad de 10 a 15 veces la de MILAGRO.

Para la construcción de este proyecto inicialmente se consideraron sitios en México, China, Estados Unidos y Bolivia, optando finalmente por las faldas del volcán Sierra Negra de Puebla, México. Anunciándolo en el marco de la Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos (ICRC, por sus siglas en inglés) realizada en Mérida en julio de 2007, se mostró en un estudio la factibilidad de instalar HAWC en México, aprovechando la infraestructura



Figura 2.1: Fotografía de la vista lateral del Observatorio HAWC.

del Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano. En 2011 inició la construcción de HAWC, la cual culminó en marzo de 2015, cuando HAWC entró en la fase de operación plena con 300 detectores instalados y funcionando [16]. Se estableció que cuando HAWC finalice su período de toma de datos, posteriormente se desmantelará todo el instrumento para asegurar la preservación del área protegida del Parque Nacional Pico de Orizaba.

2.2. Detectores

HAWC consiste en un arreglo de 300 detectores Cherenkov en agua (WCD, por sus siglas en inglés). Cada detector consta de un tanque de acero de 7.3 m de diámetro y 4.5 m de altura, contiene una bolsa plástica hermética de color negro (llamada 'bladder'), que contiene $\sim 200,000$ litros de agua filtrada y desmineralizada ultra pura. Además de cuatro tubos fotomultiplicadores orientados hacia arriba distribuidos en la parte inferior del WCD, ubicados tres de ellos en forma de triángulo y uno en el centro. En la figura 2.2 se puede observar la distribución de los detectores (lado derecho), y la estructura interna de éstos (lado izquierdo). Por su diseño, estos detectores operan de día y de noche independientemente de las condiciones climáticas.

2.3. Tubos fotomultiplicadores

Un tubo fotomultiplicador es un dispositivo de detección sensible a la luz y sellado al vacío que usa el principio fotoeléctrico para convertir la luz recibida en una señal eléctrica. El PMT fue el primer instrumento con la capacidad de detectar luz a nivel de un único fotón [10] y a pesar de ser un invento de hace más de 80 años, en la actualidad sigue siendo una gran herramienta para el desarrollo científico, que va evolucionando con la ciencia y la tecnología.

Consta de un fotocátodo, los fotones que llegan ahí, según el principio fotoeléctrico,

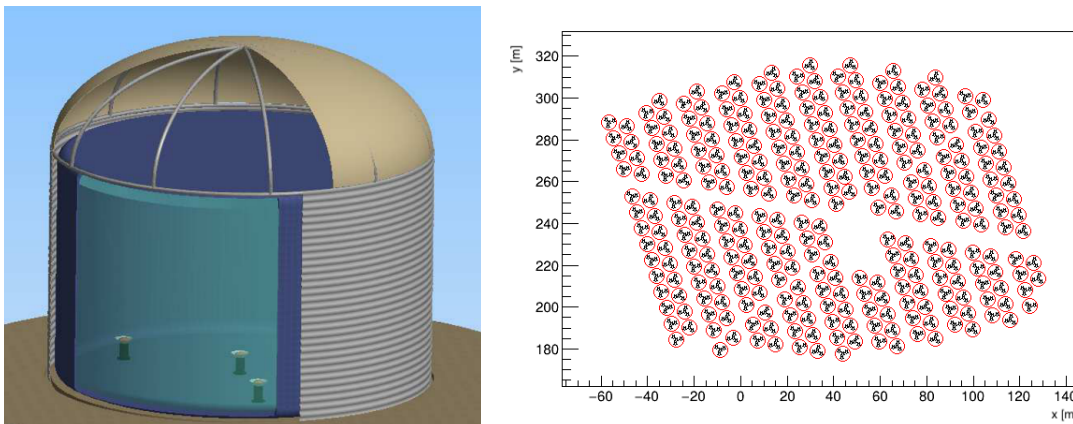


Figura 2.2: Del lado izquierdo se muestra un esquema de un detector Cherenkov en agua. En color gris se representa el tanque de acero, el color azul fuerte el ‘bladder’, y en azul claro el agua ultra pura, además en la parte inferior se observan tres de los PMTs [6]. Del lado derecho se muestra la distribución de los trescientos detectores con cada uno de sus tubos fotomultiplicadores.

pueden producir electrones a partir de la superficie del fotocátodo. Estos electrones libres se aceleran por una serie de placas metálicas (denominadas dínodos) gracias a una diferencia de potencial. Al último dínodo se le denomina ánodo, y es aquí donde los electrones se convierten en un pulso de voltaje [40], siendo éste el pulso de salida. Al ser diseñada cuidadosamente la geometría del tubo, el ancho del pulso de salida se puede hacer tan corto del orden de nanosegundos, lo que permite contar fotones individuales con una resolución de tiempo extremadamente alta [21].

Los PMTs de cada detector de HAWC se encuentran en la parte inferior, con 4 m de agua sobre cada uno. Tres de éstos son de 8”, instalados equidistantemente entre sí a 1.85 m, y uno (en el centro) de 10” [5], como el que se observa en la figura 2.3. Es decir, que el observatorio comprende un total de 1200 tubos fotomultiplicadores. Así, una vez que las partículas secundarias del chubasco atmosférico se han extendido dentro de los WCD, la radiación de Cherenkov producida es capturada por los tubos fotomultiplicadores.

2.4. Efecto Cherenkov

El efecto Cherenkov tiene lugar cuando una partícula cargada se mueve en un medio con una velocidad v mayor que la velocidad de la luz en dicho medio (c_n), donde $c_n = \frac{c}{n}$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío y n corresponde al índice de refracción del medio considerado. Es decir, este efecto sólo ocurre si

$$v \geq \frac{c}{n} \tag{2.1}$$

Produciendo una emisión de radiación electromagnética conocida como radiación Cherenkov. Esta radiación recibe su nombre en honor del físico ruso Pável Alekséyevich Cherenkov, quien junto con Serguéi Vavílov trabajó en la parte experimental del estudio de este fenómeno; mientras que Iliá Frank e Ígor Tamm lo explicaron teóricamente [42]. Motivo

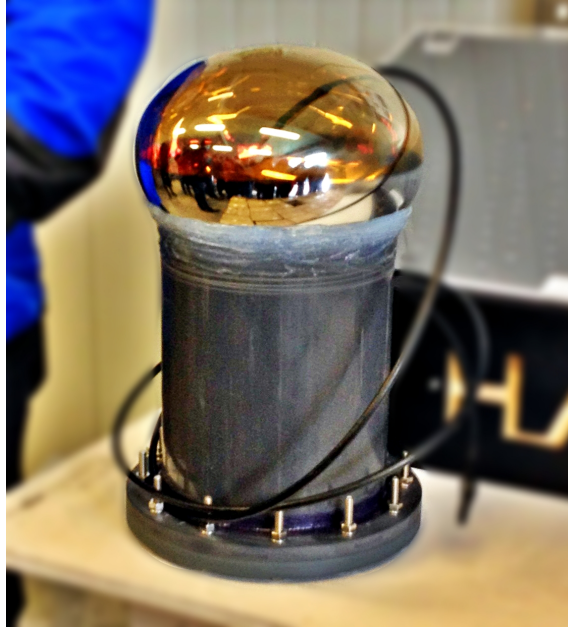


Figura 2.3: Fotografía de uno de los tubos fotomultiplicadores usados en el observatorio HAWC.

por el cual, en 1958, Cherenkov, Frank y Tamm ganaron el premio Nobel de física por su trabajo en la radiación Cherenkov.

Este método de detección mensura la radiación Cherenkov generada por las partículas secundarias de un chubasco atmosférico a medida que se propagan en el medio del detector. La luz que se emite tiene un espectro continuo con importantes fracciones en el visible y en el ultravioleta.

Cuando las partículas de un chubasco atmosférico pasan a través del agua, emiten luz Cherenkov porque viajan más rápido que la velocidad de la luz en el agua (aproximadamente $0.77 \times c$) [24].

Por ejemplo, cuando un electrón atraviesa por el medio, ocurre el fenómeno denominado polarización; es decir, la partícula atraerá cargas opuestas en su camino, pero al pasar por cada punto el material se neutraliza rápidamente y emite radiación a medida que el electrón se aleja. En el caso de que el electrón tenga una velocidad mayor que la de la luz en ese medio, la radiación interfiere constructivamente; de lo contrario, la interferencia es destructiva.

La luz se emite en un cono coherente a un ángulo tal que:

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (2.2)$$

desde la dirección de la partícula emisora; siendo $\beta = \frac{v}{c}$ la velocidad umbral. A esta expresión se le llama relación de Cherenkov o ángulo de Cherenkov [8].

Para una partícula ultra relativista se tendría que $\beta \approx 1$, y en estas circunstancias, el ángulo máximo está dado por

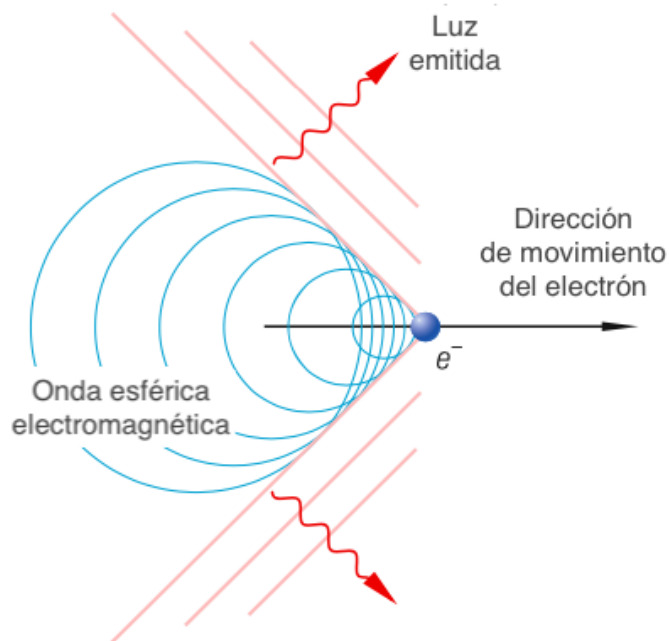


Figura 2.4: Emisión de radiación de Cherenkov en una onda de choque para partículas que atraviesan un medio de índice de refracción n con una velocidad que excede la velocidad de la luz en ese medio [24]

$$\theta_{c, mx} \approx \arccos\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.3)$$

Cuando el medio se trata de agua, como en el caso de HAWC, n tiene un valor ~ 1.33 , entonces

$$\theta_{c, mx} \approx 41^\circ \quad (2.4)$$

2.5. Estimadores de energía

HAWC cuenta con dos algoritmos independientes para estimar la energía: gran parámetro y redes neuronales. Estos dos métodos fueron desarrollados utilizando la simulación Monte Carlo estándar de HAWC, que se basa en el software de simulación de EAS, Corsika v7.4000 [26], y GEANT4 para propagar las partículas secundarias de estos chubascos a través de los detectores a los tubos fotomultiplicadores.

2.5.1. Gran parámetro

El estimador gran parámetro que se desarrolló en HAWC, se basa en el método originalmente creado para rayos cósmicos que propuso Hillas en la década de 1970 [28], la medición de la carga en el suelo a cierta distancia del eje del chubasco. El método adaptado

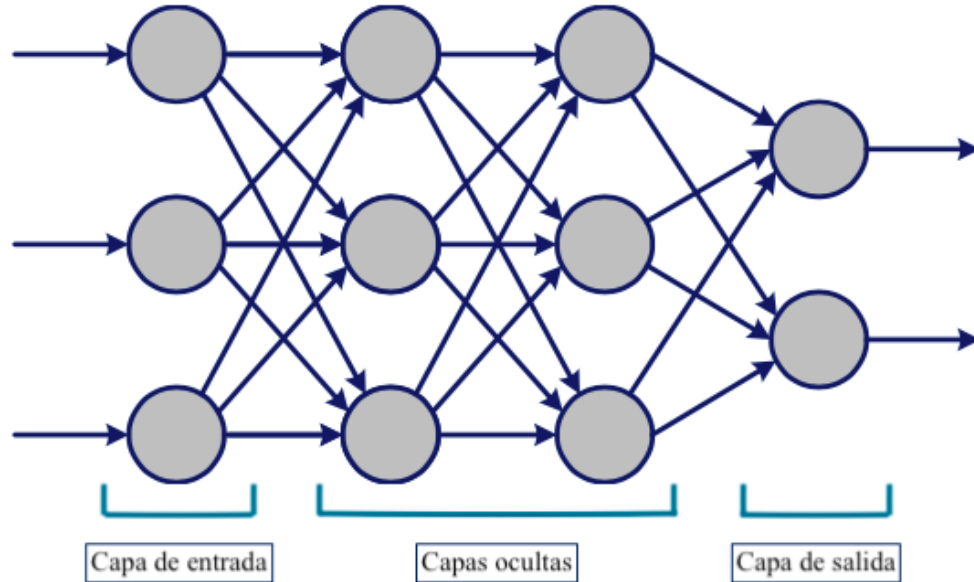


Figura 2.5: Red neuronal con múltiples capas ocultas (en este caso, sólo dos) [9]

a rayos gamma funciona de manera similar al de los experimentos de rayos cósmicos, aunque con modificaciones para poder considerar un tamaño menor en el arreglo del chubasco atmosférico producido por un rayos gamma.

Para la medición de la energía de una partícula primaria con un arreglo de detectores en la superficie se necesita medir la señal del detector desde una distancia particular del centro del chubasco, la cual debe estar relacionada con la energía de la partícula primaria. La elección de la distancia para medir esta señal característica dependerá de las incertidumbres.

El radio en el que se minimiza la incertidumbre de la densidad de energía en el chubasco (conocido como radio óptimo), debe estar lejos del eje del mismo debido a la presencia de grandes fluctuaciones de chubasco a chubasco que hace difícil la estimación de energía, pero al mismo tiempo debe estar lo suficientemente cerca del eje que la señal medida por el PMT es lo suficientemente grande para que los efectos de umbral en la electrónica no sean una complicación.

Para HAWC, el radio óptimo se encuentra a ~ 40 metros del eje del chubasco, independientemente del ángulo cenital o la energía de la partícula primaria. El radio óptimo es casi únicamente una función de la geometría del arreglo [37].

2.5.2. Redes neuronales

Una red neuronal está conformada por varias neuronas que se interconectan en un arreglo de capas que se divide en dos categorías: capas visibles y capas ocultas. Las visibles son la capa de entrada (recibe la información de fuentes externas), y la capa de salida (transfiere información de la red al exterior). La capa intermedia recibe el nombre de capa

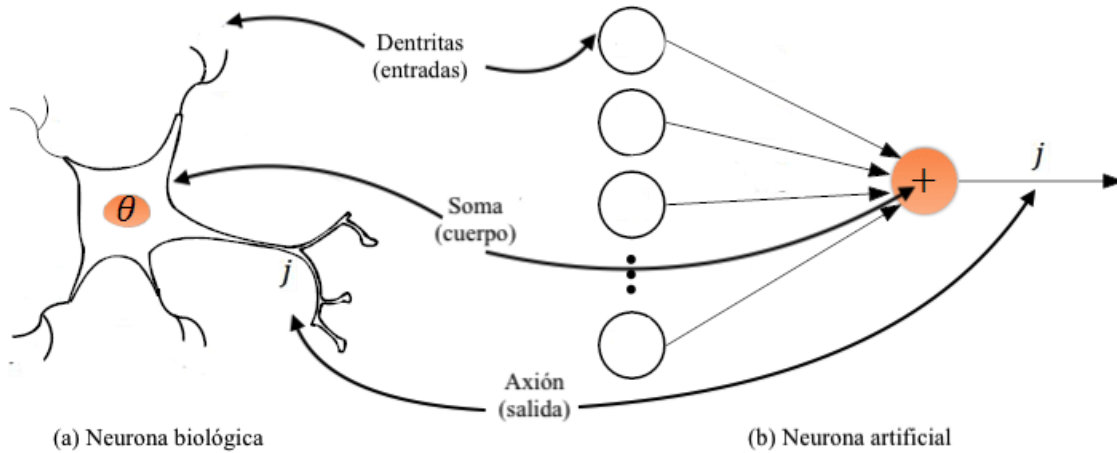


Figura 2.6: Esquema comparativo de una (a) neurona biológica y una (b) neurona artificial [25].

oculta, que puede o no estar constituida a su vez por varias capas (ver figura 2.5), no tienen un contacto directo con el exterior.

Al ser un modelo inspirado en el funcionamiento del cerebro humano, una neurona artificial se puede comparar con una neurona biológica, pues están basadas en ellas, como se muestra en la figura 2.6. Se pueden identificar los tres elementos fundamentales: las dentritas, encargadas de la entrada o colección de datos; el cuerpo o soma, responsable del procesamiento; y por último, el axión, que corresponde a la salida.

Debido a su constitución y fundamentos basados en la naturaleza del cerebro, este sistema ofrece ventajas como el aprendizaje adaptativo, la auto-organización, tolerancia a fallos, operaciones en tiempo real y la fácil inserción dentro de la tecnología existente. A través de un algoritmo de aprendizaje que puede o no estar supervisado, las redes neuronales ajustan sus parámetros para poder minimizar el error de la función que ajusta a los parámetros de entrada con la salida.

El método desarrollado por HAWC haciendo uso de redes neuronales es un algoritmo de estimación de energía de rayos gamma con el objetivo de calcular la estimación de energía precisa y ser lo suficientemente rápido para la reconstrucción de los datos de HAWC. El algoritmo emplea una red neuronal artificial para estimar las energías primarias de los eventos de fotones basándose en varias cantidades que se calculan como parte de la reconstrucción de eventos de HAWC.

Este estimador usa la arquitectura Perceptron Multicapa (MLP), comúnmente usada en el área de astronomía. Cuenta con dos capas ocultas. La primera y la segunda capa oculta tienen 15 y 14 nodos respectivamente.

Capítulo 3

Fuentes de rayos gamma ultra energéticos

Previo a introducir las fuentes de rayos gamma, es importante mencionar a los rayos cósmicos y la relación que existe de éstos con los rayos gamma. Los rayos cósmicos pueden ser considerados como aquella radiación extraterrestre compuesta por protones, núcleos atómicos y partículas alfa. Se descubrieron a principios del siglo XX; y desde entonces, se han realizado un gran número de experimentos en globos, aviones, satélites, y por supuesto, en la superficie de la Tierra [8].

La característica más notable de los rayos cósmicos es su espectro energético. Se define como el número de partículas a cierta energía E dentro de cierto intervalo pequeño de energía dE [11]. Este espectro, va desde 10^9 eV hasta 10^{20} eV, en unos 10 órdenes de magnitud de variación.

El espectro de los rayos cósmicos se empezó a estudiar a mediados del siglo pasado; en 1949, Enrico Fermi realizó una de las primeras predicciones sobre su distribución de energía, asumiendo que los rayos cósmicos son acelerados en colisiones con nubes magnéticas. Descubrió que esta distribución se podía describir mediante una ley de potencias, sin embargo, el modelo no predijo sobre el valor del índice espectral [22]. En 1959, G. V. Kulinov y G.B. Khristiansen observaron que el espectro de rayos cósmicos tenía ciertas características, notaron una ruptura alrededor de 1 PeV, a la que se le llamó ‘rodilla’ [31]. La figura 3.1 muestra una sugerente representación antropomórfica del espectro de energía de los rayos cósmicos.

Se espera que los rayos cósmicos sean de origen galáctico al menos hasta este punto de la rodilla. Así que, identificar las fuentes que aceleran las partículas a esta energía puede ayudar a comprender esta característica. No obstante, en este capítulo se verá que es necesario recurrir a los rayos gamma, específicamente, a la búsqueda de fuentes de rayos gamma ultra energéticos.

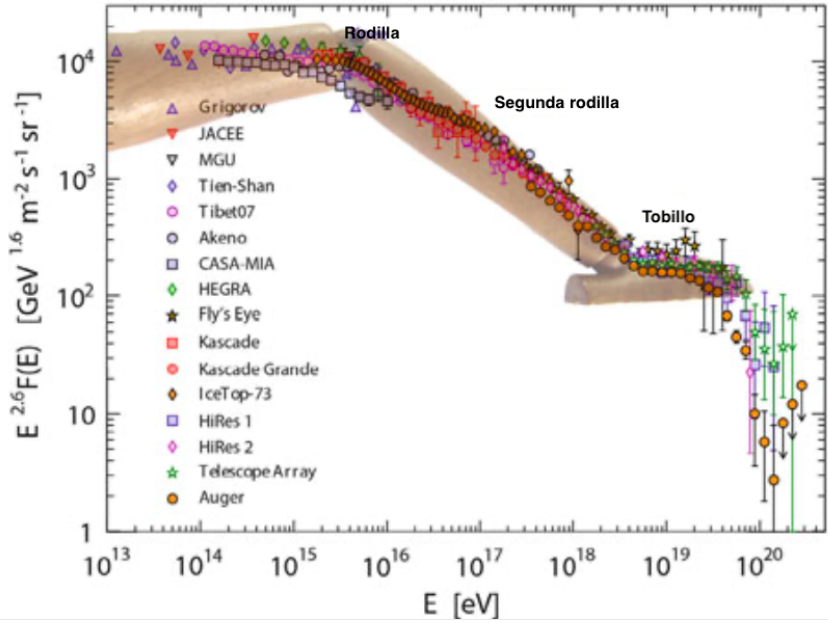


Figura 3.1: Representación del espectro energético de rayos cósmicos [8]

3.1. Espectro de rayos cósmicos

El espectro energético de los rayos cósmicos es un fenómeno muy complejo debido a los cambios de pendiente presentes a lo largo de su rango de energía. Los rayos cósmicos al final del espectro conocido tienen energías mucho mayores de la que cualquier acelerador artificial en la Tierra podría alcanzar. Por debajo de unos pocos GeV, el flujo es modulado por el viento solar, mostrando una anticorrelación con él y dependiendo también del campo geomagnético de la Tierra. Por encima de unos pocos GeV la intensidad del flujo de los rayos cósmicos sigue básicamente una ley de potencias:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

con el índice espectral, γ , generalmente entre 2.7 y 3.3.

Los pequeños cambios en el índice espectral de todas las partículas se pueden visualizar claramente multiplicando el flujo por alguna potencia de la energía.

El primero de ellos, llamado rodilla, ocurre alrededor de $E = 5 \times 10^{15}$ eV, y se asocia comúnmente a la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos; corresponde a un índice espectral de $\gamma \approx 2.7$ hasta antes de esta curvatura. La segunda característica clara, denominada “tobillo”, ocurre alrededor de $E = 5 \times 10^{18}$ eV y su naturaleza aún es controvertida, el índice espectral vuelve a $\gamma \approx 2.7$ pasando este punto. Otra característica, llamada segunda rodilla, a una energía de aproximadamente 400 PeV, marca una inclinación de aproximadamente 3.1 antes de ésta, y por encima, el espectro es más pronunciado con $\gamma \approx 3.2$. [8].

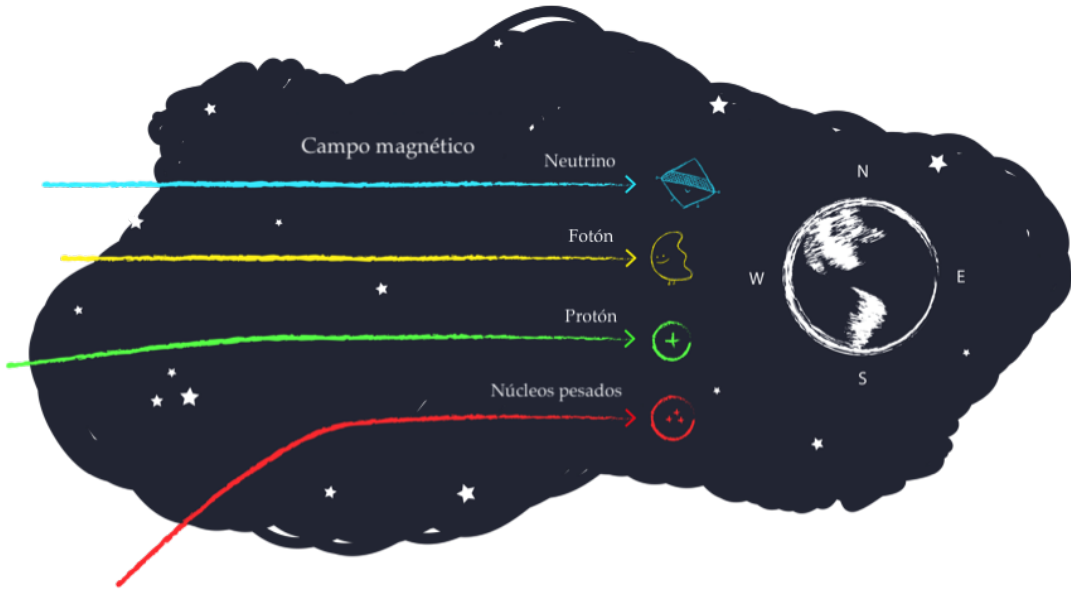


Figura 3.2: Esquema representativo del efecto del campo magnético en diferentes partículas [17].

3.2. PeVatrones

El corte de interés para este trabajo es la rodilla, que como se mencionó anteriormente, está aproximadamente a 1 PeV. Y se espera que los rayos cósmicos aún sean de origen galáctico en este punto. Es por ello que para comprender mejor esta característica del espectro se busca identificar las fuentes que aceleren partículas a esta energía, llamadas PeVatrones [4].

Sin embargo, debido a que los rayos cósmicos son partículas cargadas, se desvían en campos magnéticos en su camino a la Tierra, como se observa en la figura 3.2. Es decir, la observación de los rayos cósmicos en la Tierra no puede proporcionar información sobre su procedencia. Es por ello que en su lugar, se pueden usar rayos gamma para sondear PeVatrones, ya que estos rayos sí apuntan a sus sitios de producción.

Cuando los rayos cósmicos interactúan con su entorno (el medio interestelar, un fotón ambiental o el gas/plasma de una remanente de supernova), las partículas creadas incluyen piones neutros. Cada π^0 decae en dos rayos gamma. Para un rayo cósmico con energía de PeV, el rayo gamma es aproximadamente un orden de magnitud menos energético [29]. Una fuente con un espectro de rayos gamma duro (índice de ley de potencia 2-2.4) que se extiende a 100 TeV sin un corte espectral aparente sería una firma clara de un PeVatron. Así que las observaciones por encima de 50 TeV son esenciales para identificar candidatos a PeVatrones.

Los rayos gamma de muy alta energía se producen sólo en las interacciones de partículas cargadas aceleradas (núcleos, electrones o positrones) con materia ambiental o campos de radiación. La tasa de producción de los rayos gamma refleja el producto de las densidades de partículas de rayos cósmicos y los ‘objetivos’, siguiendo las partículas a medida

CAPÍTULO 3. FUENTES DE RAYOS GAMMA ULTRA ENERGÉTICOS

3.3. PRODUCTORES DE RAYOS GAMMA

que se propagan lejos del sitio de aceleración debido a la difusión de campos magnéticos o convección. Por lo tanto, las fuentes de rayos gamma ultra energéticos serán objetos extendidos, con tamaños y formas gobernados por velocidades de flujo de partículas, distribución de objetivos y posiblemente por la vida finita de partículas debido a interacciones o enfriamiento radiativo.

3.3. Productores de rayos gamma

A continuación se describen los principales objetos astronómicos responsables de la producción de rayos gamma:

Remanentes de supernova: SNR por sus siglas es inglés, es una nebulosa difusa en expansión que consiste en material expulsado en la propia explosión de la supernova, así como en otro material interestelar que ha sido arrastrado por paso de la onda de choque de la estrella que explotó. Los SNR han sido vistos como las fuentes más probables de rayos cósmicos galácticos hasta al menos la energía de la rodilla del espectro de rayos cósmicos, alrededor de 10^{15} eV, y posiblemente más allá de 10^{17} eV. Los rayos gamma de muy alta energía rastrean las poblaciones relevantes de partículas energéticas en los SNR.

Pulsar y Nebulosas de Viento de Pulsar: Un púlsar es una fuente extraterrestre de radiación que tiene una periodicidad regular, generalmente detectada en forma de ráfagas cortas de emisión de radio. Mientras que una nebulosa de viento de púlsar (PWN, por sus siglas en inglés) es un tipo de nebulosa que a veces se encuentra dentro de la capa de un SNR, impulsada por vientos generados por un púlsar central. Se ha detectado que emiten en diferentes bandas del espectro electromagnético, como: rayos X, infrarrojo, óptico, milimétrico, y rayos gamma.

Quásar: Los quásar (o QSO) son de los objetos más brillantes del universo. Un quásar es un núcleo activo de galaxia (AGN) extremadamente luminoso, en el que un agujero negro supermasivo está rodeado por un disco de acreción gaseoso. Este disco de acreción emite calor y luz intensos, causado por la fricción producida por el material que gira alrededor del agujero negro y, finalmente, entra en él.

Los electrones de alta energía producidos por un quásar y sometidos a dispersión de Compton inversa, radiación de sincrotrón o bremsstrahlung, son la fuente probable de los rayos gamma de esos objetos. Se cree que el agujero negro supermasivo en el centro de tales galaxias proporciona la fuente de energía que destruye intermitentemente las estrellas y enfoca las partículas cargadas resultantes en haces que emergen de sus polos rotacionales. Cuando esos rayos interactúan con el gas, el polvo y los fotones de menor energía, producen rayos X y rayos gamma.

Explosiones de rayos gamma: Las explosiones de rayos gamma (o GRB por sus siglas en inglés) son explosiones que producen emisiones repentinas de rayos gamma altamente energéticos que se han observado en galaxias distantes. Son los eventos electromagnéticos más brillantes y energéticos que se sabe que ocurren en el universo. Las observaciones han permitido tener dos modelos para las GRB según su duración; las ráfagas largas se producen a través del colapso del núcleo de una estrella masiva a un agujero negro, y las ráfagas cortas ocurren cuando dos estrellas de neutrones se fusionan para formar un agujero negro.

3.4. Fuentes de rayos gamma

Las fuentes astronómicas típicamente son nombradas de acuerdo a su ascensión recta y declinación con el siguiente formato: $Jhhmms-ddff$, donde J hace referencia al año juliano, hh a las horas, mm a los minutos, s a los segundos, dd a la declinación y ff a las fracciones decimales. Como es el caso en este trabajo que se estudian las fuentes del catálogo de fuentes de rayos gamma que emiten a más de 56 TeV [4]:

- **eHWC J0534+220.** Detectada en 1989, fue la primera fuente de rayos gamma de muy alta energía, conocida como la Nebulosa del Cangrejo, es una nebulosa de viento púlsar (PWN), con energías de hasta PeV.

Situada aproximadamente 6300 años luz de la Tierra, en la constelación de Tauro, este objeto fue el primero en el catálogo de objetos no cometarios que creó el astrónomo francés Charles Messier, mismo que lleva su nombre. Además, ha sido una fuente de calibración para instrumentos de rayos gamma.

- **eHWC J1809-193.** Se ha observado como una fuente extendida y se cree que esta fuente corresponde a un púlsar joven que alimenta una nebulosa de viento de púlsar [32]. Sin embargo, otras observaciones sugirieron que la emisión de rayos gamma podría originarse en un sistema de nubes moleculares [14], por lo que aún no se cuenta con una identificación precisa.
- **eHWC J1825-134.** Es uno de las más potentes y luminosas nebulosas de viento púlsar de rayos gamma de TeV. Se estudia la posibilidad que se combine esta fuente con LS 5039 [15].
- **eHWC J1839-057.** Esta fuente se presenta en el catálogo de fuentes de rayos gamma del observatorio HAWC [4], éste se asocia con la fuente 2HWC J1837-065. Pero aún no se asocia a algun tipo de fuente.
- **eHWC J1842-035.** Esta fuente se encuentra en el catálogo de fuentes de rayos gamma del observatorio HAWC [4], la cual es asociada a la fuente 2HWC J1844-032.
- **eHWC J1850+001.** Este es un caso de un sistema púlsar/PWN y refuerza la evidencia de que las fuentes de rayos X, rayos X duros y rayos gamma TeV son manifestaciones del mismo sistema [12].
- **eHWC J1907+063.** Se investiga la posibilidad de explicar la emisión de rayos gamma por rayos cósmicos acelerados en un remanente de supernova relacionada con una nebulosa de viento demagnetar o un magnetar (un tipo de estrella de neutrones alimentada con un campo magnético extremadamente fuerte) [30].
- **eHWC J2019+368.** Las observaciones llevaron a examinar propiedades de una nebulosa de viento de pulsar [36]. Y se estudia la posibilidad que pueda estar asociada con la fuente LHAASO J2018+3651 [13].
- **eHWC J2030+412.** Esta fuente se asocia con una nebulosa de viento de pulsar [2]. Podría estar físicamente asociada con PSR J2032+4127.

3.5. Modelos espectrales

Estas fuentes de rayos gamma emiten un espectro que se define como el flujo diferencial, $\frac{dN}{dE}$, como función de la energía. Se busca encontrar el mejor ajuste de estos espectros a una relación matemática, a las cuales se les conoce como modelos espectrales. A continuación se mencionan las más comunes de estas herramientas.

3.5.1. Ley de potencias

La ley de potencias aparece ampliamente en la física, la biología, la economía, las ciencias sociales y muchos otros campos. Por ejemplo, Los modelos actuales para los rayos cósmicos galácticos explican la forma de ley de potencia del espectro con la existencia de un mecanismo de aceleración ‘universal’ que genera espectros de esta forma con un índice espectral único (por debajo de una energía máxima que puede depender de la fuente) [11].

Este modelo se define como:

$$\frac{dN}{dE} = \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} \quad (3.1)$$

Donde ϕ_0 corresponde a la normalización del flujo y α es el índice de la ley de potencia que controla la dureza de la fuente. En esta expresión, E_0 no es un parámetro, sino una energía de referencia (llamada ‘energía de pivote’) elegida como la energía donde el error en el flujo absoluto es mínimo.

3.5.2. Ley de potencias con corte exponencial

Este modelo generalmente se ajusta cuando el espectro de las partículas emisoras tiene un decremento abrupto debido a algunos procesos limitantes en los mecanismos de aceleración. Una ley de potencias con corte exponencial es simplemente una ley de potencias multiplicado por una función exponencial.

La manera de denotar esta forma espectral es la siguiente:

$$\frac{dN}{dE} = \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} \exp \left(-\frac{E}{E_c} \right) \quad (3.2)$$

Como en los casos anteriores, ϕ_0 denota la norma de flujo y α el índice espectral, lo diferente en este modelo es la energía de corte E_c . El espectro del fondo gamma extragaláctico (EGB, por sus siglas en inglés) es un ejemplo al cual se le ha ajustado una ley de potencias con corte exponencial [7].

3.5.3. Log-parabola

El modelo ‘log-parabola’ es una de las formas más simples de representar espectros curvos cuando no muestran un corte nítido de alta energía como el de un exponencial. El nombre de esta forma espectral expresa el hecho de que en una representación log – log ($\log \phi(E)$ vs $\log E$) el espectro tiene la forma de una parábola.

Tiene sólo un parámetro adicional con respecto a una ley de potencia simple y también es muy útil para estimar otras magnitudes interesantes relevantes para el modelado físico de la región de emisión.

CAPÍTULO 3. FUENTES DE RAYOS GAMMA ULTRA ENERGÉTICOS
3.5. MODELOS ESPECTRALES

Este modelo se expresa como:

$$\frac{dN}{dE} = \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha - \beta \ln(E/E_0)} \quad (3.3)$$

En unidades de energía. El parámetro E_0 es la energía fija de referencia, o bien, la energía de pivote, así que el espectro está completamente determinado por ϕ_0 , que corresponde al factor de normalización del flujo, por α , el índice espectral y por β , que determina la curvatura del espectro (el radio de curvatura en el vértice de la parábola es igual a $1/|2\beta|$).

Otra ventaja del modelo 'log-parabola' es que la curvatura espectral se caracteriza solo por el parámetro β , mientras que en otros modelos, están en función de varios parámetros. Este modelo se ha utilizado con éxito para adaptarse a diversos fenómenos, como el espectro de la nebulosa del Cangrejo, y el espectro de la radiación sincrotrón.

Capítulo 4

Metodología

Como se mencionó anteriormente, HAWC cuenta con dos estimadores de energía. En este trabajo se usó el método de redes neuronales para poder comparar con los resultados reportados con el método gran parámetro [4]. Y al igual que en éste último, el análisis que se realizó comprende los siguientes pasos: generar los mapas del cielo, identificar las fuentes de rayos gamma, calcular el flujo integral y realizar el ajuste espectral de las fuentes, de los cuales se hablará en este capítulo.

Para este análisis es relevante hacer mención del uso del software de HAWC, ya que es esencial en todo el proceso. Hay dos componentes del software de HAWC los paquetes externos y AERIE. En los paquetes externos se incluyen bibliotecas, paqueterías y software; por ejemplo ROOT, que son requeridos para compilar la base de código HAWC. Mientras que AERIE son las siglas en inglés de Análisis y Reconstrucción de Eventos Integrados de Entorno, es una de las principales piezas del software debido a que comprende una gran variedad de ejecutables que se pueden usar para la reconstrucción y el análisis de datos.

4.1. Datos

Los datos utilizados fueron colectados por el observatorio HAWC y corresponden desde junio de 2015 a julio de 2018, lo que equivale a, un total de 1038.8 días de observación, mismo período de tiempo empleado para a realizar el catálogo de fuentes de rayos gamma que emiten por arriba de 56 y 100 TeV [4]. Mismos que se encuentran disponibles en el software de HAWC.

Es importante mencionar que dados los diferentes procesos que se hacen después de que la información es colecta por HAWC, se requiere el manejo de diversos tipos de archivos, como: archivos XCDF, es el formato que se usa para el almacenamiento de gran cantidad de datos en forma comprimida, significa ‘formato de datos explícitamente compactado’ (por sus siglas en inglés, *eXplicitly Compacted Data Format*) [18]; los archivos root son un conjunto de registros de datos consecutivos con una forma bien definida, puede contener directorios y objetos organizados en un número ilimitado de niveles [20]; archivos fits, es el formato en el que se almacenan los mapas del cielo y significa ‘sistema de transporte de imágenes flexibles’ (por sus siglas en inglés).

4.2. Análisis por bins

En HAWC los datos son agrupados en contenedores (o bins) por su porcentaje de PMT's con señal en cada evento (fHit) y por su rango de energía [33]. Dependiendo del análisis que se realice será necesario uno o ambos grupos de datos.

Los datos se dividen en 9 tamaños de bins, \mathcal{B} , dependiendo de la fracción fhit de los PMTs activos en el detector que participan en la reconstrucción del chubasco. Como se describe en la tabla 4.1. Para el análisis de energía, cada uno de los contenedores mencionados se sub divide en 12 bins de energía que se denotan con letras, como se muestra en la tabla 4.2.

En los estudios que se usan los bins tanto para su energía como el fHit, se utiliza la técnica forward-folding. Se usa este esquema de doble agrupamiento porque los parámetros para diferenciar entre gamma y hadrones, así como la resolución angular, dependen tanto de la energía como del tamaño del evento. Se puede pensar que al tener \mathcal{B} y la sub división de los bins de energía, proporcionaría un total de 108 bins. Sin embargo, en la práctica no se utilizan todos pues algunos bins tienen muy poca o nula cantidad de eventos.

Número de bin	fHit
1	6.7 - 10.5 %
2	10.5 - 16.2 %
3	16.2 - 24.7 %
4	24.7 - 35.6 %
5	35.6 - 48.5 %
6	48.5 - 61.8 %
7	61.8 - 74.0 %
8	74.0 - 84.0 %
9	84.0 - 100.0 %

Tabla 4.1: fHit bins

Número de bin	Rango de energía (TeV)
a	0.316 - 0.562
b	0.562 - 1.0
c	1.0 - 1.78
d	1.78 - 3.16
e	3.16 - 5.62
f	5.62 - 10.0
g	10.0 - 17.8
h	17.8 - 31.6
i	31.6 - 56.2
j	56.2 - 100
k	100 - 177
l	177 - 316

Tabla 4.2: Bins de energía

Los bins con más de 1000 eventos en un periodo de 48 horas se consideran con buena estadística. Cualquier bin con menos de 1000 eventos en el periodo de tiempo, debe pasar por un proceso diferente para obtener una buena estimación del fondo. Por otro lado, los bins con menos de 20 eventos tienen una estadística tan baja que resulta imposible obtener una buena estimación del fondo por lo que son descartados previamente.

4.3. Generación de mapas

Para generar los mapas se necesitó una serie de pasos que se observan en el diagrama de la figura 4.1. Y como se puede ver en el diagrama, existe una variación en la sucesión dependiendo si los bins son de baja estadística o no.

La generación de mapas de HAWC requiere la integración de un periodo grande de datos, lo que conlleva a agrupar los datos en intervalos de tiempo para poder analizarlos. Estos intervalos son llamados chunk, los cuales proporcionan estabilidad de datos y el periodo de integración ayuda a la estimación del fondo (en periodo entre 2 a 24 horas).

Posteriormente, son necesarias ciertas herramientas proporcionadas en el software de HAWC. A continuación son explicadas brevemente las aplicaciones para este trabajo:

- **aerie-apps-make-hawc-maps:** El primer paso es usar este ejecutable para producir un mapa por cada bin por cada período establecido de toma de datos. Toma los eventos uno por uno de un archivo XCDF de eventos reconstruidos y los envía a una instancia para generar los mapas. Se aplica un corte gamma/hadrón para cada bin. Tiende a usarse de forma paralela debido a la gran cantidad de datos.
- **aerie-apps-make-local-dists:** Genera archivos root por cada bin, es decir, crea un histograma de dos dimensiones con los datos proporcionados del archivo XCDF como el azimut, cenit y hora del evento (histograma por chunk).
- **aerie-apps-combined-maps:** Agrupa mapas individuales, es decir, es el encargado de combinar los mapas de todas las corridas por cada nHit bin.
- **hadd:** Con esta herramienta se combinan los archivos por cada bin después de obtener los archivos root para todos los bins de baja estadística con aerie-apps-make-local-dists.
- **aerie-apps-randomized-bkg:** Es un comando que solo se utiliza en los bins de baja estadística, el cual ayuda a mejorar el calculo del fondo. El siguiente paso para los bins de baja estadística es crear el mapa del fondo. Para ello es necesario como entrada tanto los archivos combinados por hadd como por aerie-apps-combined-maps.
- **aerie-apps-recalculate-bkg:** El fondo aleatorizado requiere ser suavizado o reajustado. Después de este paso, el fondo se ha calculado correctamente y se puede utilizar para calcular mapas de significancia.
- **skymaps-fits2maptree:** Convierte los archivos reajustados combinados de cada bin en un sólo archivo maptree, que es un archivo root donde se almacena el número de cuentas y otros datos para cada bin. Es necesario para poder realizar la mayor parte de los análisis y generar los resultados en el siguiente paso.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA
4.3. GENERACIÓN DE MAPAS

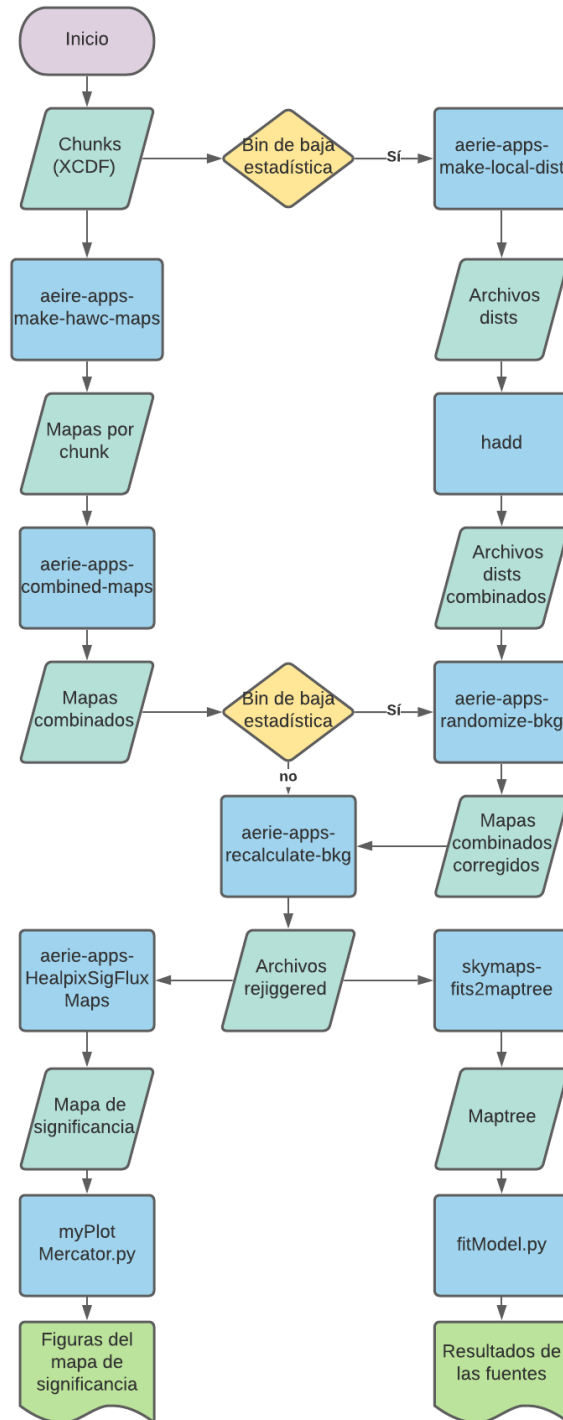


Figura 4.1: Diagrama de flujo para generar los mapas.

Finalmente, con ayuda de un programa que se puede encontrar en el repositorio de HAWC llamado `fitModel.py`, que es una colección de programas que usan 3ML y astro-modelos, útil para ajustar espectros astrofísicos, se obtienen los resultados para cada fuente y para cada uno de los análisis. En el apéndice A se explica de forma detallada los comandos usados para generar los mapas de este trabajo.

4.3.1. Mapas de significancia

Por otro lado, para realizar los mapas de significancia, además de los pasos previos mencionados, fue necesaria la herramienta `aerie-apps-HealpixSigFluxMap`, a la cual se le asigna un índice espectral que permanece fijo durante todo el proceso del ajuste (con la norma de flujo como el único parámetro para ajustar). Por último para generar la figura de los mapas se usó otro programa que forma parte de AERIE.

En los mapas se asumió un espectro con el modelo de ley de potencias con un índice de 2.0 y una morfología de disco con radio de 1.0° . Se eligió un índice espectral de 2.0 porque es el estándar usado en HAWC para el estudio de fuentes extendidas y porque se espera este índice para PeVatrones [4].

Se realizaron cuatro mapas de significancia. Los primeros dos son del plano galáctico, para fuentes con emisiones mayores de 56 y 100 TeV. Mientras que los otros dos corresponden a la región alrededor de la nebulosa del Cangrejo, de igual forma, para emisiones mayores a 56 y 100 TeV.

4.4. Caracterización de fuentes

Para obtener una ubicación y extensión de fuente definitiva, la ascensión recta, declinación y extensión, se ajustan simultáneamente para cada fuente en el mapa con emisiones mayores a 56 TeV bajo el supuesto de un espectro $E^{-2.0}$, con el 68 % de contención gaussiana. Esto último está relacionado con la función de dispersión puntual (PSF, por sus siglas en inglés), muestra qué tan bien, en promedio, se puede reconstruir la dirección de una fuente puntual. La resolución angular generalmente se define como un valor que caracteriza esta distribución, por ejemplo, el radio que contiene el 68 % de los eventos.

La extensión se fija al resultado de más alta energía ajustada. Estos resultados son insensibles al índice espectral. Se usa el prefijo ‘eHWC’ (energía-HAWC) para identificar las fuentes como en el primer catálogo HAWC construido usando mapas con un umbral de alta energía [4].

4.5. Cálculo del flujo integral

En los resultados para cada fuente se obtiene el dato de su flujo diferencial. Sin embargo, en el análisis es necesario calcular el flujo integral. Para lograrlo basta con integrar una de las expresiones antes mencionadas, desde la energía más baja contemplada hasta infinito, con respecto a la energía. Es decir:

- Para una ley de potencias:

$$\int_{E_0}^{\infty} \frac{dN}{dE} = \int_{E_0}^{\infty} \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} dE \quad (4.1)$$

- Para una ‘log-parábola’:

$$\int_{E_0}^{\infty} \frac{dN}{dE} = \int_{E_0}^{\infty} \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha - \beta \ln(E/E_0)} dE \quad (4.2)$$

- Para una ley de potencias con corte exponencial:

$$\int_{E_0}^{\infty} \frac{dN}{dE} = \int_{E_0}^{\infty} \phi_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha} \exp \left(-\frac{E}{E_c} \right) dE \quad (4.3)$$

Al realizar la integración según sea el caso de la fuente, se obtiene su flujo integral

4.6. Ajuste espectral

En HAWC, para estimar el flujo de fotones de las fuentes se utiliza la técnica de máxima verosimilitud (mejor conocida como *maximum likelihood*, en inglés).

Para explicar esta técnica, supongamos que una variable x se distribuye como la probabilidad de x , $P(x|p)$, donde p es cierto parámetro. Luego, se considera que se tienen varias muestras de $\{x_1, \dots, x_N\}$, y se desea estimar la p que produjo esos valores. Para ello, primero se construye la función de verosimilitud:

$$\mathcal{L}(p) = \prod_i^N P(x_i|p), \quad (4.4)$$

y la mejor estimación del parámetro \hat{p} es entonces

$$\text{máx } \mathcal{L}(p) = \mathcal{L}(\hat{p}). \quad (4.5)$$

Como siempre se maximiza la probabilidad, es más conveniente trabajar con su logaritmo

$$TS(p) = 2 \log \mathcal{L}(p) = 2 \sum_i^N \log P(x_i|p). \quad (4.6)$$

Donde TS hace referencia al *test estadístico*. Es una variable que se puede usar para cuantificar el error de la estimación. Por otro lado, el teorema de Wilks nos dice que si hay suficientes muestras, entonces ΔTS se distribuye como una χ^2 (también llamada distribución de Pearson), con los grados de libertad igual al número de parámetros libres [34]. Debido a que la diferencia es lo que siempre importa, se usa sólo TS para referirse a ΔTS . Además, debido a las propiedades de los logaritmos ΔTS también se conoce como razón de verosimilitud.

TS y su distribución se pueden usar para estimar la significancia de un modelo con respecto a otro, la hipótesis nula. Es necesario que sea un modelo anidado, es decir, la

hipótesis alternativa se puede reducir a la nula eligiendo los valores adecuados para sus parámetros libres. Para el caso de un parámetro, TS se distribuye como χ^2 con un grado de libertad, por lo que \sqrt{TS} se distribuye como una variable normal estandar. La significancia de un valor medido \hat{p} contra una hipótesis nula p_0 es entonces:

$$s(\hat{p}) = \sqrt{TS(\hat{p}) - TS(p_0)}. \quad (4.7)$$

Si lo que se busca es estimar el flujo de una fuente, y al mismo tiempo su significancia frente a una hipótesis única de fondo; entonces se estaría considerando que la hipótesis nula sólo es el fondo, esto es $f = 0$, entonces

$$TS(f) = 2 \log \frac{\mathcal{L}(f)}{\mathcal{L}(0)}. \quad (4.8)$$

La mejor estimación del flujo será:

$$\text{máx } TS(f) = TS(\hat{f}), \quad (4.9)$$

y la significancia se podrá encontrar como

$$s(\hat{f}) = \sqrt{TS(\hat{f})}. \quad (4.10)$$

Para realizar este ajuste se consideraron los modelos espectrales mencionados en la sección 3.5. Cada una de las fuentes que se encontraron con una significancia mayor a 5 para la emisión de 100 TeV, se ajustó a una ley de potencias, log-parábola y una ley de potencias con corte exponencial; se compararon los resultados del test estadístico para determinar con ello con cuál se obtiene un mejor resultado.

Al ajustar los espectros de emisión de las fuentes, no se consideraron modelos de fuentes múltiples o de componentes múltiples; en su lugar, se ajustó el espectro en la región de interés (radio de 3°) asumiendo una emisión en forma de Gauss.

Capítulo 5

Resultados

Nueve fuentes se detectaron con emisiones significativas ($\sqrt{TS} > 5$) para $\hat{E} > 56$ TeV. Ocho de estas fuentes se encuentran a $\pm 1^\circ$ del plano galáctico y tienen un tamaño aparente extendido, son las que se observan en la figura 5.1; y dos fuentes de éstas continúan emitiendo a 100 TeV, presentes en la figura 5.2, además se añadió como comparativo la tercera fuente que se presentó con el método gran parámetro.

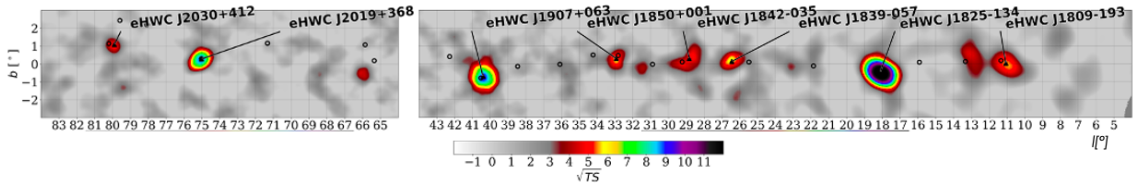


Figura 5.1: Mapa de significancia del plano galáctico para emisiones $\hat{E} > 56$ TeV. Como comparación se muestran las fuentes del segundo catálogo de HAWC en círculos negros abiertos.

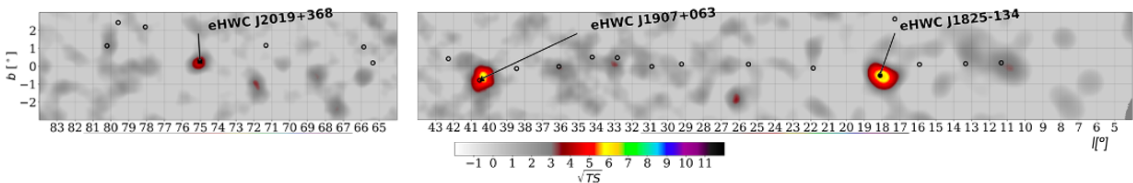


Figura 5.2: Mapa de significancia análogo a la figura 5.1 pero para emisiones $\hat{E} > 100$ TeV.

La novena es la única fuente puntual, se trata de la nebulosa del Cangrejo (eHWC J0534+220). Para esta fuente se presentan los mapas de significancia (figura 5.3 y 5.4) por separado.

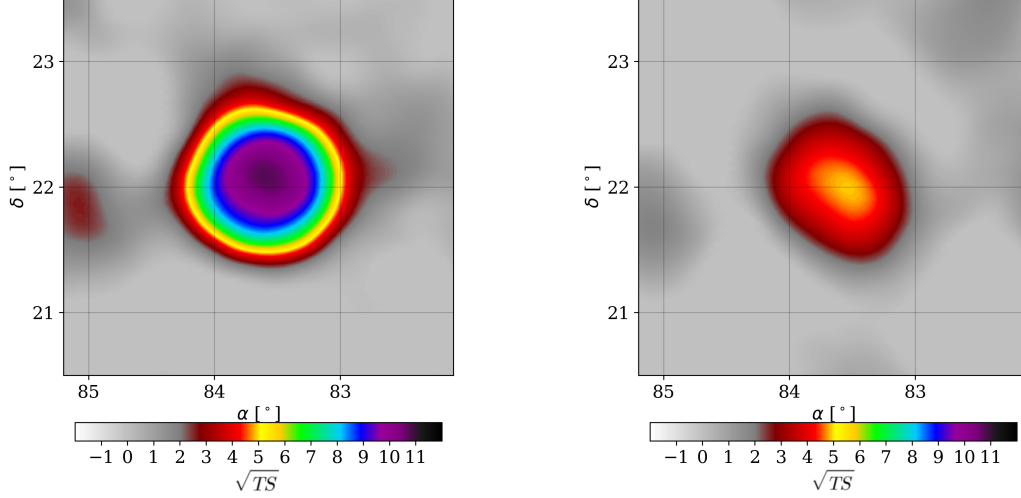


Figura 5.3: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Del lado izquierdo para emisiones mayores a 56 TeV, del lado derecho para emisiones mayores a 100 TeV.

Los valores de la ubicación de cada fuente (ascensión recta, RA, y declinación, Dec), la extensión, flujo para emisiones mayores a 56 TeV y test estadístico, asumiendo un índice espectral de -2.7 , se muestran en la tabla 5.1.

Fuente	RA($^{\circ}$)	Dec($^{\circ}$)	Extensión($^{\circ}$) > 56 TeV	F(10^{-14} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	$\sqrt{TS} >$ 56 TeV	$\sqrt{TS} >$ 100 TeV
eHWC J0534+220	83.62 ± 0.02	22.01 ± 0.02	FP	1.5 ± 0.2	13.35	3.95
eHWC J1809-193	272.44 ± 0.18	-19.44 ± 0.06	0.04 ± 0.07	$2.3^{+0.5}_{-0.7}$	5.8	3.31
eHWC J1825-134	276.41 ± 0.07	-13.43 ± 0.01	0.35 ± 0.06	$5.0^{+0.5}_{-0.6}$	13.65	6.04
eHWC J1839-057	279.71 ± 0.12	-5.64 ± 0.11	0.34 ± 0.08	$1.5^{+0.5}_{-0.7}$	6.24	1.76
eHWC J1842-035	280.65 ± 0.20	-3.48 ± 0.18	0.55 ± 0.17	1.5 ± 0.3	6.23	0.86
eHWC J1850+001	282.67 ± 0.11	0.11 ± 0.10	0.32 ± 0.07	$1.2^{+0.2}_{-0.3}$	5.59	2.83
eHWC J1907+063	286.90 ± 0.10	6.32 ± 0.10	0.57 ± 0.09	3.3 ± 0.4	10.54	6.63
eHWC J2019+368	305.04 ± 0.09	36.80 ± 0.06	0.27 ± 0.05	1.6 ± 0.2	9.08	4.41
eHWC J2030+412	307.80 ± 0.90	41.29 ± 0.07	0.11 ± 0.09	$0.8^{+0.1}_{-0.2}$	5.36	2.89

Tabla 5.1: Fuentes que emiten a más de 56 TeV. F es el flujo integral para > 56 TeV; \sqrt{TS} es la raíz cuadrada del test estadístico para el ajuste del flujo integral. Todas las incertidumbres son sólo estadísticas.

Las dos fuentes que continúan emitiendo a más de 100 TeV, es decir, que $\sqrt{TS} > 5$, son eHWC J1825-134 y eHWC J1907+063. Al comparar sus resultados con los tres modelos espectrales se encontró que el mejor ajuste para ambas es una ley de potencias con corte exponencial. En la tabla 5.2 se presentan los valores con este ajuste.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Fuente	\sqrt{TS}	Extensión(°)	ϕ_0 (10^{13} TeV $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	α	E_{cut} (TeV)	PL diff
eHWC J1825-134	38.61	0.52 ± 0.02	1.54 ± 0.10	2.20 ± 0.06	122_{31}^{+40}	4.36
eHWC J1907+368	35.82	0.70 ± 0.03	$0.84_{-0.06}^{+0.05}$	2.28 ± 0.04	210_{-80}^{+120}	2.51

Tabla 5.2: Valores espectrales con ajuste a una ley de potencias con corte exponencial para las fuentes que emiten a más de 100 TeV. Las incertidumbres son sólo estadísticas. ϕ_0 es la norma de flujo a la energía pivote (10 TeV). $PL\ diff$ corresponde a $\sqrt{\Delta TS}$ entre el modelo espectral ajustado y una ley de potencias.

Por otro lado, en la tabla 5.3 se presentan los valores del flujo integral y el test estadístico (como en la tabla 5.1), pero ahora asumiendo un índice espectral de 2.0.

Fuente	F(10^{-14} ph $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$\sqrt{TS} > 56$ TeV	$\sqrt{TS} > 100$ TeV
eHWC J0534+220	1.83 ± 0.2	13.1	5.12
eHWC J1809-193	$2.21_{-0.5}^{+0.7}$	5.6	3.24
eHWC J1825-134	5.53 ± 0.07	13.35	6.15
eHWC J1839-057	$1.60_{-0.3}^{+0.4}$	5.83	1.83
eHWC J1842-035	$1.82_{-0.3}^{+0.4}$	5.58	0.59
eHWC J1850+001	1.51 ± 0.03	5.51	2.91
eHWC J1907+063	3.90 ± 0.05	10.43	6.48
eHWC J2019+368	1.90 ± 0.03	8.78	4.19
eHWC J2030+412	0.98 ± 0.02	5.2	2.73

Tabla 5.3: Valores del flujo integral calculado asumiendo un índice espectral de 2.0.

El cálculo del flujo integral por encima de 56 TeV se repitió para una forma espectral de una ley de potencia convolucionada con una función escalonada a 56 TeV. Para las fuentes que emiten significativamente por encima de 100 TeV en energía reconstruida, este proceso se repitió con la función escalonada cambiando a 100 TeV. El TS para el ajuste de flujo integral, así como esta versión con el corte rígido, se dan en la tabla 5.4.

Fuente	TS	TS_{56}	$\sqrt{\Delta TS_{56}}$	TS_{100}	$\sqrt{\Delta TS_{100}}$
eHWC J0534+220	178.2	148.1	5.49	-	-
eHWC J1809-193	33.6	23.6	3.16	-	-
eHWC J1825-134	186.3	145.1	6.42	165.68	4.54
eHWC J1839-057	38.9	40.2	1.11	-	-
eHWC J1842-035	38.8	43.1	2.07	-	-
eHWC J1850+001	31.2	23.6	2.76	-	-
eHWC J1907+063	111.1	75.8	5.94	84.31	5.17
eHWC J2019+368	82.4	61.7	4.55	-	-
eHWC J2030+412	28.7	18.9	3.13	-	-

Tabla 5.4: Valores de TS para los tres diferentes ajustes.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Para las fuentes eHWC J1825-134 y eHWC J1907 + 063, el ajuste de corte rígido también se convolucionó con el modelo espectral de mejor ajuste en todo el rango de energía de HAWC. Estos resultados se dan en la tabla 5.5.

Fuente	TS	TS_{56}	$\sqrt{\Delta TS_{56}}$	TS_{100}	$\sqrt{\Delta TS_{100}}$
eHWC J1825-134	1490.7	1405.7	9.22	1475.3	3.9
eHWC J1907+063	1283.1	1217.5	8.09	1257.9	5.0

Tabla 5.5: Valores de TS para el ajuste del espectro completo para las fuentes que emiten a más de 100 TeV.

En las tablas 5.6 y 5.7 se presenta el \sqrt{TS} , la energía media y el flujo por cada bin de energía para las fuentes eHWC J1825-134 y eHWC J1907+368.

Bin	\sqrt{TS}	Energía media (TeV)	F(10^{-14} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
c	4.82	1.20	$(3.06 \pm 0.6) \times 10^{-11}$
d	10.14	2.06	$(2.89 \pm 0.2) \times 10^{-11}$
e	10.96	3.59	$(1.61 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
f	14.20	6.21	$(1.34 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
g	17.40	11.27	$(1.51 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
h	16.77	21.26	$(1.18 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
i	17.21	39.48	$(8.80 \pm 0.7) \times 10^{-12}$
j	12.33	75.15	$(5.33 \pm 0.7) \times 10^{-12}$
k	4.31	131.61	$(1.93 \pm 0.6) \times 10^{-12}$
l	4.12	224.84	$(2.79 \pm 1.0) \times 10^{-12}$

Tabla 5.6: Puntos de flujo para la fuente eHWC J1825-134.

Bin	\sqrt{TS}	Energía media (TeV)	F(10^{-14} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
c	8.5	1.11	$(1.59 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
d	11.0	1.96	$(1.32 \pm 0.1) \times 10^{-11}$
e	13.5	3.5	$(1.10 \pm 0.8) \times 10^{-11}$
f	14.3	6.7	$(8.80 \pm 0.6) \times 10^{-12}$
g	14.5	11.3	$(7.71 \pm 0.5) \times 10^{-12}$
h	15.2	20.2	$(6.90 \pm 0.5) \times 10^{-12}$
i	12.4	37.9	$(4.66 \pm 0.4) \times 10^{-12}$
j	8.3	69.0	$(3.09 \pm 0.4) \times 10^{-12}$
k	6.2	122.6	$(3.06 \pm 0.6) \times 10^{-12}$
l	2.1	204.5	$(1.24 \pm 0.7) \times 10^{-12}$

Tabla 5.7: Puntos de flujo para la fuente eHWC J1907+063.

Mientras que en la figura 5.4 se muestra el espectro de cada fuente ajustado a una ley de potencias con corte exponencial con estos puntos de flujo.

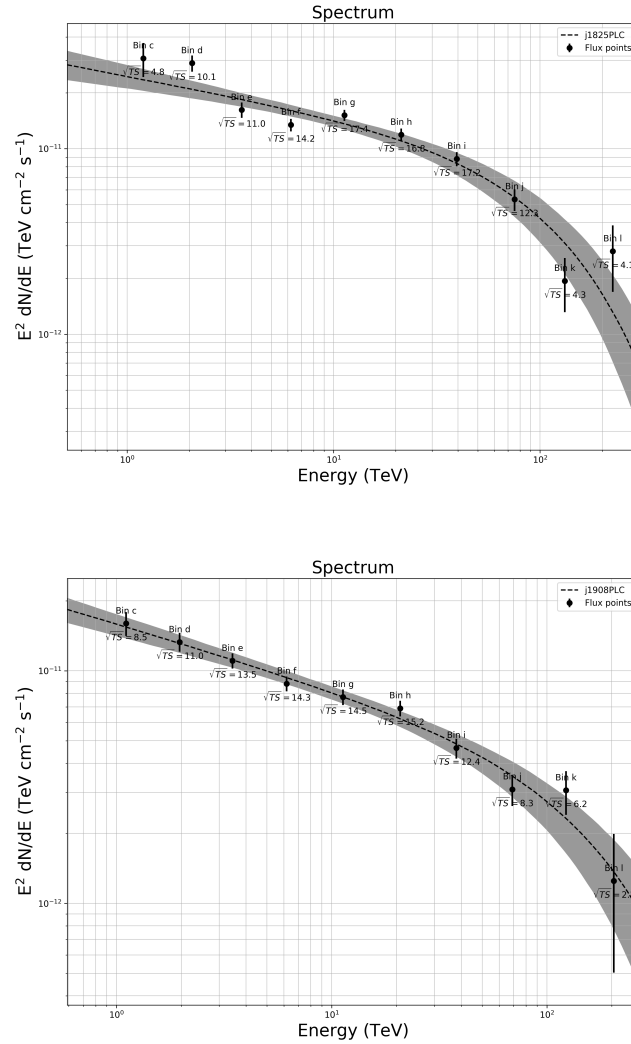


Figura 5.4: Espectros de las fuentes con emisión significativa para $\hat{E} > 100$ TeV. En el primero se tiene a la fuente eHWC J1825-134 y en la segunda se muestra a la fuente eHWC J1907-063. Las barras de error son sólo incertidumbres estadísticas.

Capítulo 6

Conclusiones

Se encontraron nueve fuentes con emisiones significativas mayores de 56 TeV, al igual que en el catálogo de altas energías [4]. Sin embargo, al comparar tanto los mapas de significancia (figura 5.1 y C.1) como los resultados del test estadístico (tablas 5.1 y C.1), se observa un mejor resultado en tres de las nueve fuentes con el método de redes neuronales.

En el caso de las emisiones mayores a 100 TeV las diferencias en los resultados con un método y otro son más notorias. Lo primero es que, de acuerdo al capítulo anterior, sólo se detectaron dos fuentes con emisiones significativas, es decir, las fuentes eHWC J1825-134 y eHWC J1907+063. Además, en todas las fuentes el test estadístico resultó menor con redes neuronales. Recordando que para éstos cálculos se usó un índice espectral de 2.7. Estas comparaciones las podemos observar en la tabla 6.1.

Fuente	$\sqrt{TS} > 56$ TeV (GP)	$\sqrt{TS} > 56$ TeV (NN)	$\sqrt{TS} > 100$ TeV (GP)	$\sqrt{TS} > 100$ TeV (NN)
eHWC J0534+220	12.0	13.35	4.44	3.95
eHWC J1809-193	6.97	5.8	4.82	3.31
eHWC J1825-134	14.5	13.65	7.33	6.04
eHWC J1839-057	7.03	6.24	3.06	1.76
eHWC J1842-035	6.63	6.23	2.70	0.86
eHWC J1850+001	5.31	5.59	3.04	2.83
eHWC J1907+063	10.4	10.54	7.30	6.63
eHWC J2019+368	10.2	9.08	4.85	4.41
eHWC J2030+412	6.43	5.36	3.07	2.89

Tabla 6.1: Comparación de resultados del test estadístico para las fuentes que emiten a más de 56 y 100 TeV, con los estimadores de energía gran parámetro (GP) y redes neuronales (NN).

Por otro lado, en los cálculos con un índice espectral de 2.0 (tablas 5.3 y C.3), para emisiones mayores a 56 TeV se encontró que las mismas tres fuentes que en el caso con índice de 2.7 muestran un mejor test estadístico con el estimador de redes neuronales. Además, para la Nebulosa del Cangrejo (la fuente J0534+220), en las emisiones mayores a 100 TeV se obtuvo un mejor resultado con el método de este trabajo.

Comparando los mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo con ambos estimadores de energía (figura 5.3 y C.3), se visualiza fácilmente que los resultados fueron más

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

favorables con redes neuronales. En cuanto a la tabla 5.1 y C.1, la mejoría sólo se presenta en emisiones mayores a 56 TeV.

Se encontró que el mejor ajuste para las fuentes eHWC J1825-134 y eHWC J1907+063 es la ley de potencias con corte exponencial, a diferencia de lo reportado previamente en [4] (como se puede observar en la tabla 6.2), en cuyo caso varía el mejor ajuste para la fuente eHWC J1907+063 con una log-parábola. Adicionalmente, ésta última fuente mencionada presenta un valor mayor del test estadístico en los resultados de este trabajo.

Fuente	Modelo para GP	Modelo para NN
eHWC J1825-134	Ley de potencias con corte exponencial	Ley de potencias con corte exponencial
eHWC J1907+368	Log-parábola	Ley de potencias con corte exponencial
eHWC J2019+368	Log-parábola	-

Tabla 6.2: Comparación de los modelos de mejor ajuste para las fuentes que continúan emitiendo a más de 56 y 100 TeV, para gran parámetro (GP) y redes neuronales (NN).

Para asegurar que las fuentes son verdaderas detecciones superiores a los 56 TeV y no son detecciones de rayos gamma de baja energía mal reconstruidos, el cálculo del flujo integral se repitió para una forma espectral de una ley de potencias convolucionada con una función escalonada, o corte rígido, a 56 TeV, los resultados se presentan en la tabla 5.4. En todos los casos el ajuste es mejor sin el corte rígido, tal como con gran parámetro (tabla C.4), sólo que en éste caso la detección más fuerte es para eHWC J1825-134 y no eHWC J1907+063.

Para las dos fuentes que se calculan los espectros, eHWC J1825-134 y eHWC J1907+063, el ajuste de corte rígido también se convoluciona con el modelo espectral de mejor ajuste, la ley de potencias con corte exponencial, estos resultados se dan en la tabla 5.5. Nuevamente el ajuste es mejor sin el corte rígido, lo mismo que ocurre con los resultados del catálogo de altas energías [4] (tabla C.5).

Finalmente, con los puntos de flujo para las fuentes eHWC J1825-134 y eHWC J1907+063, se encontró que en dos y tres bins, respectivamente, el estimador de redes neuronales dio un mayor valor en el test estadístico en contraste con el método de gran parámetro. Esto se puede observar en las tablas 5.6, 5.7, C.6 y C.7.

En general se mostró que se obtuvieron resultados más favorables con el estimador de gran parámetro, aplicado en el catálogo de altas energías [4]. Sólo en algunos casos particulares el estimador de redes neuronales resultó mejor, uno de los más notables fue para la nebulosa del Cangrejo, usando un índice espectral de 2.0.

Apéndice A

Para la generación de mapas

Para tener acceso a los datos y software de HAWC, es indispensable tener acceso al clúster del ICN-UNAM. En el repositorio se encuentran los archivos correspondientes a los chunks 103 a 603 resultantes de ejecutar `aerie-apps-make-hawc-maps` y `aerie-apps-make-local-dists` en las siguientes rutas respectivamente:

```
/storage/hawc/users/jlundeen/data/maps/nn-fhit/raw-di-flags/
```

```
/storage/hawc/users/jlundeen/data/local-dists/nn-fhit/raw/
```

Por lo que a partir de ellos empieza el proceso para este trabajo.

El primer paso fue combinar los mapas con `aerie-apps-combined-maps` y suavizar el fondo con `aerie-apps-recalculate-bkg`, para lo cual se usó lo siguiente:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_sw
4
5 if [[ -z $4 ]]
6 then
7     echo "Usage: $0 <dir> <bin> <first chunk> <last chunk> [ON]"
8     exit
9 fi
10
11 DIR=$1
12 BIN=$2
13 FIRST=$3
14 LAST=$4
15 ON=$5
16
17 QTMPDIR=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/QTMPDIR
18 mkdir -vp $QTMPDIR
19 cd $QTMPDIR
20
21 INFILES=""
22 for (( I=$FIRST; I<=$LAST;I++))
23 do
24     FILE=$(printf "$DIR/chunk-%6.6d-bin-{$BIN}.fits.gz" $I)
25     echo $FILE
26     if [[ -e $FILE ]]
```

APÉNDICE A. PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS

```
27     then
28         INFILES="$INFILES $FILE"
29     fi
30 done
31
32 echo $INFILES
33 ls -lh $INFILES
34 #mkdir -p $DIR/combined_837/
35
36 OFILE='printf "$QTMPDIR/chunks${ON}_%6.6d-%6.6d_bin${BIN}.fits.gz" $FIRST
37     $LAST '
38 RFILE='printf "$QTMPDIR/chunks${ON}_%6.6d-%6.6d_bin${BIN}_rejiggered.fits.
39     gz" $FIRST $LAST '
40 MFILE='printf "$QTMPDIR/chunks${ON}_%6.6d-%6.6d_bin${BIN}.root" $FIRST
41     $LAST '
42
43 LOG="$QTMPDIR/'basename $OFILE .fits.gz'.log"
44
45 aerie-apps-combine-maps -o $OFILE --input $INFILES &> $LOG
46 aerie-apps-recalculate-bkg -i $OFILE -o $RFILE --smooth "0.5,0" &>> $LOG
47
48 mv -v $OFILE /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/combined
49 mv -v $RFILE /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/rejiggered
50 mv -v $LOG /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/rejiggered/log
```

Donde <dir> corresponde a la ruta primero mencionada de los mapas por cada bin por cada corrida, <first chunk> y <last chunk> son 103 y 603 respectivamente. Mientras que <bin> va cambiando al pasar por la siguiente lista de bines: 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 1f, 1g, 1h, 2a, 2b, 2c, 2e, 2f, 2g, 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f, 3g, 4b, 4c, 4d, 4e, 4f, 4g, 4h, 5c, 5d 5e, 5f, 5g, 5h5, 5i, 6d, 6e, 6f, 6g, 6h, 6i, 7f, 7g, 7h, 7i, 7j, 8f, 8g, 8h, 8i, 8j, 8k, 9g, 9h, 9i, 9j, 9k, 9l.

Por otro lado, para los bines de baja estadística se hace lo siguiente para combinar los archivos root de **aerie-apps-make-local-dists**:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_sw
4
5 FIRST=103
6 LAST=603
7
8 for BIN in 6g 6d 6g 6i 7i 7j 7k 8f 8g 8i 8j 8k 9g 9h 9i 9j 9k 9l
9 do
10     INFILES=""
11     for (( I=${FIRST}; I<=${LAST}; I++))
12     do
13         FILE="/storage/hawc/users/jlundeen/data/local-dists/nn-fhit/raw
14 /chunk-000${I}-${BIN}"
15
16         if [ -f "$FILE" ]
17         then
18             INFILES="$INFILES $FILE"
19         fi
20     done
21
22     cd /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/dists
```

APÉNDICE A. PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS

A.1. TABLA 5.1

```
22 hadd bin_${BIN}.root $INFILES
23 done
```

Continuando con los bins de baja estadística, primero se crea el mapa de fondo con **aerie-apps-randomize-bkg**, seguido del suavizado del mismo con **aerie-apps-recalculate-bkg**:

```
1 DIR_1=/home/angiegt/hawc_software/hawc_aerie/config-hawc/reconstruction/
  crab-align
2 DIR_2=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/dists
3 DIR_3=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/combined
4 DIR=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
5
6 for BIN in 6d 6g 6i 7i 7j 8f 8g 8i 8j 8k 9g 9h 9i 9j 9k 9l
7 do
8 aerie-apps-randomize-bkg -o $DIR_3/randomized/bin-${BIN}.fits.gz -i
  $DIR_2/bin_${BIN}.root --zenith-alignment-file $DIR_1/zenith-pass4
  -2018-10-24.xml --useJ2000 --inputData $DIR_3/chunks_000103-000603_bin$
  {BIN}.fits.gz
9 aerie-apps-recalculate-bkg -i $DIR_3/randomized/bin-${BIN}.fits.gz -o
  $DIR/bin-${BIN}.fits.gz --smooth "0.5,0" >> $DIR/log/log_bin_${BIN}.log
10 done
```

Con esto se obtienen los archivos rejiggered para todos los bins. Ahora se genera el maptree para seguir con el proceso:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_sw
4
5 DIR=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
6
7 skymaps-fits2maptree --input $DIR/*.fits.gz --inputbins 1a,1b,1c,1d,1e,1f,1
  g,1h,2a,2b,2c,2d,2e,2f,2g,3a,3b,3c,3d,3e,3f,3g,4b,4c,4d,4e,4f,4g,4h,5c
  ,5d,5e,5f,5g,5h,5i,6d,6e,6f,6g,6h,6i,7f,7g,7h,7i,7j,8f,8g,8h,8i,8j,8k,9
  g,9h,9i,9j,9k,9l -o $DIR/maptree-NN-1038.root
```

En este punto ya se cuenta con todo lo necesario para hacer los análisis con ayuda de **fitModel.py** y otros archivos que se pueden encontrar en <https://gitlab.com/hawc-observatory/analysis-scripts/threeml-analysis-scripts> y <https://gitlab.com/hawc-observatory/papers/high-energy-catalog/-/tree/master/>.

A.1. Tabla 5.1

Para la localización y extensión se usó lo siguiente, sólo basta con introducir el nombre de cada una de las fuentes para el parámetro <source>. Cabe aclarar que para las fuentes eHWC J1809-193, eHWC J1825-139, eHWC J1839-057 y eHWC J1842-035, es necesario usar la bandera **-ROI-radius**, para eso se comenta la línea 19 y se descomenta la línea 21:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_hal
4
5 if [[ -z $1 ]]
6 then
```

APÉNDICE A. PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS

A.1. TABLA 5.1

```
7     echo "Usage: $0 <source> "
8     exit
9 fi
10
11 fuente=$1
12
13 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
14 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/location-fitting
15 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
16 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Loc-ext-2.7
17 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
18
19 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-loc.
    model --select-bins-by-energy 8j 9j 9k 9l -N ${fuente} -M $DIR_mt/
    maptree-NN-1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/
    results --hawcPlugin hal --allowNegSpectra --fluxPoints > $DIR_o/${
    fuente}-loc.log
20
21 #python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-loc.
    model --select-bins-by-energy 8j 9j 9k 9l -N ${fuente} -M $DIR_mt/
    maptree-NN-1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/
    results/ROI --hawcPlugin hal --allowNegSpectra --fluxPoints --ROI-
    radius 1 > $DIR_o/${fuente}-loc-ROI.log
```

Para el flujo se realiza el proceso para emisiones mayores a 56 y 100 TeV con lo siguiente, y sólo basta, nuevamente, con introducir el nombre de las fuentes para el parámetro <source>:

```
1 #!/bin/bash
2
3 source $HOME/.bashrc
4 hawc_hal
5
6 if [[ -z $1 ]]
7 then
8     echo "Usage: $0 <source> "
9     exit
10 fi
11
12 fuente=$1
13
14 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
15 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/integral-flux/model-
    files
16 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
17 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Flux-i2p7
18 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
19
20 # ----- Para 56 TeV -----
21 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p7.
    model --use-bins 8j 9j 9k 9l -N ${fuente}-i2p7-56 -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/
    --hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-flux-i2p7-56TeV.log
22
23 # ----- Para 100 TeV -----
24 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p7.
    model --use-bins 9k 9l -N ${fuente}-i2p7-100 -M $DIR_mt/maptree-NN
```

```
-1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/
--hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-flux-i2p7-100TeV.log
```

Con esto último, los archivos de salida nos arrojan la norma del flujo, por lo que se tiene que hacer el proceso explicado en la sección 4.4 para obtener el flujo integral. Por último, también se obtiene el parámetro TS, y al calcular su raíz cuadrada se consigue el valor de la raíz del test estadístico.

A.2. Tabla 5.2

Para esta tabla se hace el ajuste espectral de las fuentes que emiten a más de 100 TeV con los tres modelos espectrales:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_hal
4
5 if [[ -z $1 ]]
6 then
7     echo "Usage: $0 <source> "
8     exit
9 fi
10
11 fuente=$1
12
13 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
14 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/fit-results/model-files
15 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
16 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Spectral-fit-values
17 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
18
19 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-PLC-gaus
    .model --select-bins-by-energy -N ${fuente}PLC -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results --
    hawcPlugin hal --allowNegSpectra --fluxPoints > $DIR_o/${fuente}-PLC.
    log
20 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-PL-gaus.
    model --select-bins-by-energy -N ${fuente}PL -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results --
    hawcPlugin hal --allowNegSpectra --fluxPoints > $DIR_o/${fuente}-PL.log
21 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-LP-gaus.
    model --select-bins-by-energy -N ${fuente}LP -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results --
    hawcPlugin hal --allowNegSpectra --fluxPoints > $DIR_o/${fuente}-LP.log
```

Se obtendrán parámetros que corresponden a la extensión, la norma de flujo, α , la energía de corte y el test estadístico.

A.3. Tabla 5.3

Para el cálculo del flujo integral asumiendo un índice espectral de -2.0 se hace el mismo proceso que se mencionó en la Tabla 5.1 pero cambiando los datos del índice.

APÉNDICE A. PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS

A.4. TABLA 5.4

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_hal
4
5 if [[ -z $1 ]]
6 then
7     echo "Usage: $0 <source> "
8     exit
9 fi
10 fuente=$1
11
12 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
13 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/integral-flux/model-
    files
14 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
15 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Flux-i2p0
16 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
17
18 # ----- Para 56 TeV -----
19 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p0.
    model --use-bins 8j 9j 9k 9l -N ${fuente}-i2p0-56 -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/
    --hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-flux-i2p0-56TeV.log
20
21 # ----- Para 100 TeV -----
22 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p0.
    model --use-bins 9k 9l -N ${fuente}-i2p0-100 -M $DIR_mt/maptree-NN
    -1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/
    --hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-flux-i2p0-100TeV.log
```

A.4. Tabla 5.4

El test estadístico para diferentes ajustes se muestra en esta tabla. TS es el test estadístico para el cálculo del flujo integral con emisión mayor a 56 TeV de la tabla 5.1.

TS_{56} y TS_{100} corresponde al test estadístico convolucionado con una función escalonada a 56 TeV y 100 TeV, respectivamente. Se usó lo siguiente:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_hal
4
5 if [[ -z $1 ]]
6 then
7     echo "Usage: $0 <source> "
8     exit
9 fi
10 fuente=$1
11
12 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
13 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/hard-cutoff-fits/
    integral-flux-model-files
14 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
15 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Hard-cutoff
16 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
17
```

```

18 # ----- Para 56 TeV -----
19 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p7-56.
    model --use-bins 8j 9j 9k 9l -N ${fuente}intFluxCut56 -M $DIR_mt/
    maptree-NN-1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/
    results/ --hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-intflux.log
20
21 # ----- Para 100 TeV -----
22 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-i2p7
    -100.model --use-bins 8j 9j 9k 9l -N ${fuente}intFluxCut100 -M $DIR_mt/
    maptree-NN-1038.root -D $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/
    results/ --hawcPlugin hal > $DIR_o/${fuente}-intflux-100.log

```

Mientras que $\sqrt{\Delta TS_{56}} = \sqrt{TS - TS_{56}}$ y $\sqrt{\Delta TS_{100}} = \sqrt{TS - TS_{100}}$.

A.5. Tabla 5.5

Los valores de TS para los ajustes espectrales para las fuentes detectadas con emisiones mayores a 100 TeV. Aquí TS es el test estadístico para la forma espectral de mejor ajuste.

TS son los mismos valores obtenidos en la tabla 5.2. Mientras que los demás datos se obtienen con:

```

1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_hal
4
5 if [[ -z $1 ]]
6 then
7     echo "Usage: $0 <source> "
8     exit
9 fi
10 fuente=$1
11
12 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
13 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/analysis/hard-cutoff-fits/
    spectra-model-files
14 DIR_mt=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
15 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Step
16 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
17
18 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-PLC-
    step100.model -N ${fuente}PLC100 -M $DIR_mt/maptree-NN-1038.root -D
    $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/ --hawcPlugin
    hal > $DIR_o/${fuente}-step100.log
19
20 python $DIR/fitModel.py --estimator NN_2D --model $DIR_m/${fuente}-PLC-
    step56.model -N ${fuente}PLC56 -M $DIR_mt/maptree-NN-1038.root -D
    $DIR_d/detRes-NN-allDecs.root --like -o $DIR_o/results/ --hawcPlugin
    hal > $DIR_o/${fuente}-step56.log

```

A.6. Tabla 5.6 y 5.7

Para estas tablas se estará usando el programa plotFluxPoints.py que se encuentra disponible en <https://gitlab.com/hawc-observatory/analysis-scripts/threeml-analysis->

APÉNDICE A. PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS

A.6. TABLA 5.6 Y 5.7

scripts/-/blob/master/fitModel/plotFluxPoints.py. Además, serán necesarios los archivos generados en la tabla 5.2.

```
1
2 DIR=/home/angiegt/hawc_software/threeml-analysis-scripts/fitModel
3 DIR_m=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/PlotFluxPoints
4 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/fitModel/Spectral-fit-values
5 DIR_d=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
6
7 python $DIR/plotFluxPoints.py --fitModelNames "j1825PLC" --fitModelDir
  $DIR_o/results --sourceName "j1825PLC" --detRes $DIR_d/detRes-NN-
  allDecs.root -o $DIR_m/ > $DIR_m/j1825-FP.log
8
9 python $DIR/plotFluxPoints.py --fitModelNames "j1908PLC" --fitModelDir
  $DIR_o/results --sourceName "j1908PLC" --detRes $DIR_d/detRes-NN-
  allDecs.root -o $DIR_m/ > $DIR_m/j1908-FP.log
```

Apéndice B

Creación de mapas de significancia

Para los mapas de significancia se usa **aerie-apps-HealpixSigFluxMap** de la siguiente manera para 56 y 100 TeV:

```
1 #!/bin/bash
2 source $HOME/.bashrc
3 hawc_sw
4
5 DIR=/storage/hawc/users/angiegt/maps/combine-chunks/NN-837
6 cd /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/countsmaps
7 DIR_o=/storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps
8
9 aerie-apps-HealpixSigFluxMap -i bin-7j.fits.gz bin-8j.fits.gz bin-9j.fits.
   gz bin-9k.fits.gz bin-9l.fits.gz -b 7j 8j 9j 9k 9l -d $DIR/detRes-NN-
   allDecs.root --index 2.0 --extension 0.5 --nthreads 10 --padding 1 --
   pivot 7 --ntransits 1038.75 -o $DIR_o/gr56-NN-1038.fits.gz
10
11 aerie-apps-HealpixSigFluxMap -i bin-9k.fits.gz bin-9l.fits.gz -b 9k 9l -d
   $DIR/detRes-NN-allDecs.root --index 2.0 --extension 0.5 --nthreads 10
   --padding 1 --pivot 7 --ntransits 1038.75 -o $DIR_o/gr100-NN-1038.fits.
   gz
```

Generar las figuras requiere usar un programa llamado **myPlotMercator.py**, que se encuentra en <https://gitlab.com/hawc-observatory/papers/high-energy-catalog/-/tree/master/images>.

Para 56 TeV:

```
1 myPlotMercator.py /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/gr56-NN
   -1038.fits.gz --milagro --interpolation -m -2 --xyrange 44 4 -3 3 -c G
   --yhotspots 2HWC.yaml --hotspots hotspots.txt --cat-labels-angle 6 -m
   -2 -M 12 -o /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/sig-map-56-
   NN-1038-1.png
2
3 myPlotMercator.py /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/gr56-NN
   -1038.fits.gz --milagro --interpolation -m -2 --xyrange 64 84 -3 3 -c G
   --yhotspots 2HWC.yaml --hotspots hotspots.txt --cat-labels-angle 6 -m
   -2 -M 12 -o /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/sig-map-56-
   NN-1038-2.png
```

Y para 100 TeV:

APÉNDICE B. CREACIÓN DE MAPAS DE SIGNIFICANCIA

```
1 myPlotMercator.py /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/gr100-NN
  -1038.fits.gz --milagro --interpolation -m -2 --xyrange 44 4 -3 3 -c G
  --yhotspots 2HWC.yaml --hotspots hotspots.txt --cat-labels-angle 6 -m
  -2 -M 12 -o /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/sig-map-100-
  NN-1038-1.png
2
3 myPlotMercator.py /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/gr100-NN
  -1038.fits.gz --milagro --interpolation -m -2 --xyrange 64 84 -3 3 -c G
  --yhotspots 2HWC.yaml --hotspots hotspots.txt --cat-labels-angle 6 -m
  -2 -M 12 -o /storage/hawc/users/angiegt/make-maps/sig_maps/sig-map-100-
  NN-1038-2.png
```

Apéndice C

Resultados del catálogo de altas energías

Aquí se presentan los resultados del catálogo de altas energías [4], en el cual se usó el estimador de energía gran parámetro.

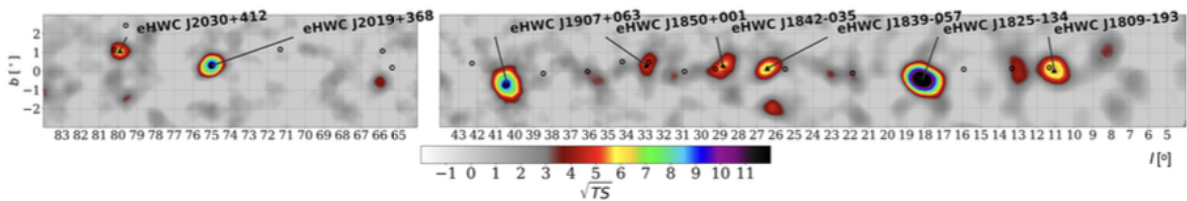


Figura C.1: Mapa de significancia del plano galáctico para emisiones $\hat{E} > 56$ TeV. Como comparación se muestran las fuentes del segundo catálogo de HAWC en círculos negros abiertos.

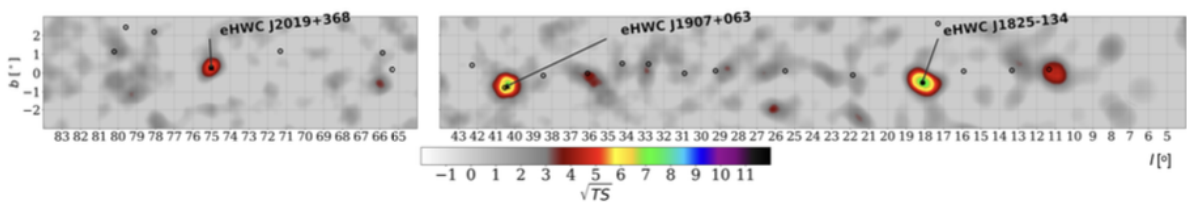


Figura C.2: Mapa de significancia análogo a la figura 5.1 pero para emisiones $\hat{E} > 100$ TeV.

APÉNDICE C. RESULTADOS DEL CATÁLOGO DE ALTAS ENERGÍAS

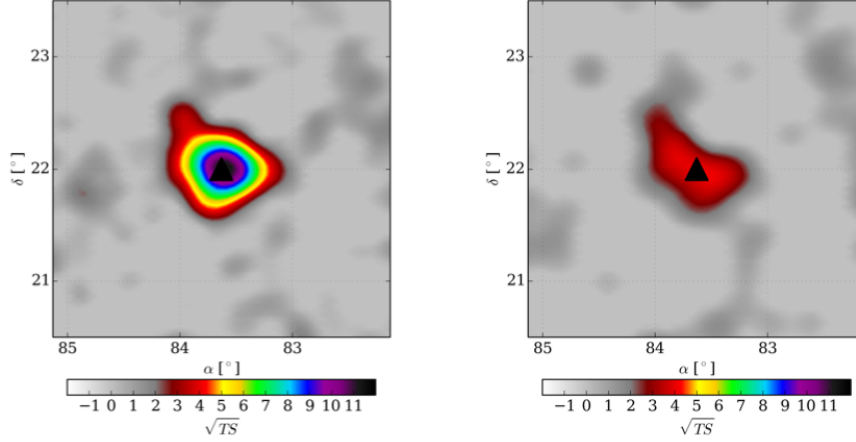


Figura C.3: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Del lado izquierdo para emisiones mayores a 56 TeV, del lado derecho para emisiones mayores a 100 TeV.

Fuente	RA($^{\circ}$)	Dec($^{\circ}$)	Extensión($^{\circ}$) > 56 TeV	F(10^{-14} ph $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$\sqrt{TS} >$ 56 TeV	$\sqrt{TS} >$ 100 TeV
eHWC J0534+220	83.61 ± 0.02	22.00 ± 0.03	FP	1.2 ± 0.2	12.0	4.44
eHWC J1809-193	272.46 ± 0.13	-19.34 ± 0.14	0.34 ± 0.13	$2.4^{+0.6}_{-0.5}$	6.97	4.82
eHWC J1825-134	276.40 ± 0.06	-13.37 ± 0.06	0.36 ± 0.05	4.6 ± 0.5	14.5	7.33
eHWC J1839-057	279.77 ± 0.12	-5.71 ± 0.10	0.34 ± 0.08	1.5 ± 0.3	7.03	3.06
eHWC J1842-035	280.72 ± 0.15	-3.51 ± 0.11	0.39 ± 0.09	1.5 ± 0.3	6.63	2.70
eHWC J1850+001	282.59 ± 0.21	0.14 ± 0.12	0.37 ± 0.16	$1.1^{+0.3}_{-0.2}$	5.31	3.04
eHWC J1907+063	286.91 ± 0.10	6.32 ± 0.09	0.52 ± 0.09	2.8 ± 0.4	10.4	7.30
eHWC J2019+368	304.95 ± 0.07	36.78 ± 0.04	0.20 ± 0.05	$1.6^{+0.3}_{-0.2}$	10.2	4.85
eHWC J2030+412	307.74 ± 0.09	41.23 ± 0.07	0.18 ± 0.06	0.9 ± 0.2	6.43	3.07

Tabla C.1: Fuentes que emiten a más de 56 TeV. F es el flujo integral para > 56 TeV; \sqrt{TS} es la raíz cuadrada del test estadístico para el ajuste del flujo integral. Todas las incertidumbres son sólo estadísticas.

Fuente	\sqrt{TS}	Extensión($^{\circ}$)	ϕ_0 (10^{13} TeV $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	α	E_{cut} (TeV)	PL diff
eHWC J1825-134	41.1	0.53 ± 0.02	2.12 ± 0.15	2.12 ± 0.06	61 ± 12	7.4
Fuente	\sqrt{TS}	Extensión($^{\circ}$)	ϕ_0 (10^{13} TeV $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)	α	β	PL diff
eHWC J1907+368	37.8	0.67 ± 0.03	0.95 ± 0.05	2.46 ± 0.03	0.11 ± 0.02	6.0
eHWC J2019+368	32.2	0.30 ± 0.02	0.45 ± 0.03	2.08 ± 0.06	0.26 ± 0.05	8.2

Tabla C.2: Valores espectrales con ajuste a una ley de potencias con corte exponencial para las fuentes que emiten a más de 100 TeV. Las incertidumbres son sólo estadísticas. ϕ_0 es la norma de flujo a la energía pivote (10 TeV). $PL \text{ diff}$ corresponde a $\sqrt{\Delta TS}$ entre el modelo espectral ajustado y una ley de potencias.

APÉNDICE C. RESULTADOS DEL CATÁLOGO DE ALTAS ENERGÍAS

Fuente	$F(10^{-14} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	$\sqrt{TS} > 56 \text{ TeV}$	$\sqrt{TS} > 100 \text{ TeV}$
eHWC J0534+220	$1.5^{+0.3}_{-0.2}$	11.7	4.27
eHWC J1809-193	$2.6^{+0.7}_{-0.6}$	6.76	4.69
eHWC J1825-134	$5.4^{+0.7}_{-0.6}$	14.0	7.35
eHWC J1839-057	$1.7^{+0.4}_{-0.3}$	6.63	3.03
eHWC J1842-035	$1.7^{+0.4}_{-0.3}$	6.06	2.52
eHWC J1850+001	$1.3^{+0.4}_{-0.3}$	5.18	3.09
eHWC J1907+063	$3.4^{+0.5}_{-0.4}$	10.3	7.17
eHWC J2019+368	1.9 ± 0.03	9.86	5.5
eHWC J2030+412	$1.1^{+0.3}_{-0.2}$	6.16	2.96

Tabla C.3: Valores del flujo integral calculado asumiendo un índice espectral de -2.0.

Fuente	TS	TS_{56}	$\sqrt{\Delta TS_{56}}$	TS_{100}	$\sqrt{\Delta TS_{100}}$
eHWC J0534+220	143.7	130.1	3.7	-	-
eHWC J1809-193	48.6	31.4	4.1	-	-
eHWC J1825-134	210.8	177.5	5.8	198.0	3.4
eHWC J1839-057	49.4	44.2	2.3	-	-
eHWC J1842-035	44.0	40.3	1.9	-	-
eHWC J1850+001	28.2	20.3	2.8	-	-
eHWC J1907+063	108.7	63.0	6.8	88.7	4.5
eHWC J2019+368	104.6	77.7	5.2	102.3	1.5
eHWC J2030+412	41.4	33.7	2.8	-	-

Tabla C.4: Valores de TS para los tres diferentes ajustes.

Fuente	TS	TS_{56}	$\sqrt{\Delta TS_{56}}$	TS_{100}	$\sqrt{\Delta TS_{100}}$
eHWC J1825-134	1685.7	1643.2	6.5	1674.9	3.3
eHWC J1907+063	1429.0	1370.0	7.6	1409.0	4.6
eHWC J2019+368	1039.4	999.4	6.3	1032.5	2.6

Tabla C.5: Valores de TS para el ajuste del espectro completo para las fuentes que emiten a más de 100 TeV.

Bin	\sqrt{TS}	Energía media (TeV)	$F(10^{-14} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$
c	4.29	1.34	$(2.41 \pm 0.56) \times 10^{-11}$
d	11.3	1.96	$(2.22 \pm 0.20) \times 10^{-11}$
e	12.9	2.91	$(2.58 \pm 0.21) \times 10^{-11}$
f	14.7	5.20	$(2.24 \pm 0.17) \times 10^{-11}$
g	16.0	9.54	$(1.77 \pm 0.13) \times 10^{-11}$
h	20.2	15.95	$(1.63 \pm 0.11) \times 10^{-11}$
i	17.2	30.44	$(1.08 \pm 0.09) \times 10^{-11}$
j	12.6	58.18	$(6.22 \pm 0.76) \times 10^{-12}$
k	5.72	98.17	$(2.59 \pm 0.68) \times 10^{-12}$
l	4.03	153.5	$(3.45 \pm 1.25) \times 10^{-12}$

Tabla C.6: Puntos de flujo para la fuente eHWC j1825-134.

APÉNDICE C. RESULTADOS DEL CATÁLOGO DE ALTAS ENERGÍAS

Bin	\sqrt{TS}	Energía media (TeV)	$F(10^{-14} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$
c	11.7	1.16	$(1.59 \pm 0.14) \times 10^{-11}$
d	12.4	1.80	$(1.52 \pm 0.13) \times 10^{-11}$
e	13.7	3.13	$(1.51 \pm 0.11) \times 10^{-11}$
f	16.2	5.59	$(1.21 \pm 0.08) \times 10^{-11}$
g	16.3	10.13	$(9.36 \pm 0.63) \times 10^{-12}$
h	13.6	19.0	$(6.36 \pm 0.53) \times 10^{-12}$
i	11.4	34.79	$(4.25 \pm 0.46) \times 10^{-12}$
j	7.66	60.89	$(2.78 \pm 0.46) \times 10^{-12}$
k	6.54	105.4	$(2.49 \pm 0.53) \times 10^{-12}$
l	2.66	180.8	$(1.25 \pm 0.61) \times 10^{-12}$

Tabla C.7: Puntos de flujo para la fuente eHWC j1907+063.

Referencias

- [1] AA Abdo, AU Abeysekara, R Alfaro, BT Allen, C Alvarez, JD Álvarez, R Arceo, JC Arteaga-Velázquez, T Aune, HA Ayala Solares, et al. Milagro limits and hawc sensitivity for the rate-density of evaporating primordial black holes. *Astroparticle Physics*, 64:4–12, 2015.
- [2] AU Abeysekara, A Albert, R Alfaro, C Alvarez, JD Álvarez, R Arceo, JC Arteaga-Velázquez, HA Ayala Solares, AS Barber, B Baughman, et al. The 2hwc hawc observatory gamma-ray catalog. *The Astrophysical Journal*, 843(1):40, 2017.
- [3] AU Abeysekara, A Albert, R Alfaro, C Alvarez, JD Álvarez, JR Camacho, R Acero, JC Arteaga-Velázquez, KP Arunbabu, D Avila Rojas, et al. Measurement of the crab nebula at the highest energies with hawc. *arXiv preprint arXiv:1905.12518*, 2019.
- [4] AU Abeysekara, A Albert, R Alfaro, JR Angeles Camacho, JC Arteaga-Velázquez, KP Arunbabu, D Avila Rojas, HA Ayala Solares, V Baghmanyman, E Belmont-Moreno, et al. Multiple galactic sources with emission above 56 tev detected by hawc. *Physical review letters*, 124(2):021102, 2020.
- [5] AU Abeysekara, R Alfaro, C Alvarez, JD Álvarez, R Arceo, JC Arteaga-Velázquez, HA Ayala Solares, AS Barber, BM Baughman, N Bautista-Elivar, et al. Search for gamma-rays from the unusually bright grb 130427a with the hawc gamma-ray observatory. *The Astrophysical Journal*, 800(2):78, 2015.
- [6] A.U. Abeysekara, R. Alfaro, C. Alvarez, J.D. Álvarez, F. Ángeles, R. Arceo, J.C. Arteaga-Velázquez, A. Avila-Aroche, H.A. Ayala Solares, C. Badillo, and et al. Vamos: A pathfinder for the hawc gamma-ray observatory. *Astroparticle Physics*, 62:125–133, Mar 2015.
- [7] Markus Ackermann, M Ajello, A Albert, WB Atwood, Luca Baldini, J Ballet, G Barbiellini, D Bastieri, K Bechtol, R Bellazzini, et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 mev and 820 gev. *The Astrophysical Journal*, 799(1):86, 2015.
- [8] Mário Joao Martins Pimenta Alessandro De Angelis. *Introduction to particle and astroparticle physics*. Springer, Italia, 2015.
- [9] Fernando Berzal. *Redes neuronales & deep learning: Volumen II*. Independently published, 2019.

- [10] Alan Migdall Sergey Polyakov Jingyun Fan Joshua Bienfang. *Single-Photon Generation and Detection*. Academic Press, EE.UU., 2013.
- [11] Peter L Biermann and Günter Sigl. Introduction to cosmic rays. pages 1–26, 2001.
- [12] Laila Vleeschower Calas, Sarah Kaufmann, César Álvarez Ochoa, and Omar Tibolla. Studies of high-energy pulsars: The special case of psr j1849-0001. *Nuclear and particle physics proceedings*, 297:102–105, 2018.
- [13] Zhen Cao, FA Aharonian, Q An, LX Bai, YX Bai, YW Bao, D Bastieri, XJ Bi, YJ Bi, H Cai, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray galactic sources. *Nature*, pages 1–4, 2021.
- [14] G Castelletti, E Giacani, and Alberto Petriella. Unveiling the origin of hess j1809-193. *Astronomy & Astrophysics*, 587:A71, 2016.
- [15] T Collins, G Rowell, AMW Mitchell, F Voisin, Y Fukui, H Sano, R Alsulami, and S Einecke. Explaining the extended gev gamma-ray emission adjacent to hess j1828-137. *arXiv e-prints*, pages arXiv–2104, 2021.
- [16] Colaboración de HAWC. La red hawc. [urlhttps://www.hawc-observatory.org/support/redhawc.php](https://www.hawc-observatory.org/support/redhawc.php).
- [17] Colaboración del IceCube. Measuring cosmic rays. [urlhttps://masterclass.icecube.wisc.edu/en/icetop/measuring-cosmic-rays/](https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/icetop/measuring-cosmic-rays/).
- [18] Colaboración del Observatorio Pierre Auger. Data format documentation. [urlhttps://private.hawc-observatory.org/hawc.umd.edu/internal/db/226609.pdf](https://private.hawc-observatory.org/hawc.umd.edu/internal/db/226609.pdf).
- [19] Colaboración del Observatorio Pierre Auger. Pierre auger on cosmic rays. [urlhttps://www.auger.org/index.php/cosmic-rays/pierre-auger](https://www.auger.org/index.php/cosmic-rays/pierre-auger).
- [20] Colaboración del Observatorio Pierre Auger. Root manual. [urlhttps://root.cern/manual/storing_root_objects/](https://root.cern/manual/storing_root_objects/).
- [21] Silvano Donati. *Photodetectors: devices, circuits, and applications*. Prentice Hall PTR, EE.UU., 2000.
- [22] Enrico Fermi. On the origin of the cosmic radiation. *Physical review*, 75(8):1169, 1949.
- [23] Leif Gerward. Paul villard and his discovery of gamma rays. *Physics in perspective*, 1(4):367–383, 1999.
- [24] Claus Grupen. *Astroparticle Physics*. Springer, Siegen, Germany, 2020.
- [25] Serguei Guerra Fernández, Yasser Lomaña Padilla, Omar A Guzmán Obregón, and Yudel Pérez Arbellá. Optimización de la estimación de doa en sistemas de antenas inteligentes usando criterios de redes neuronales. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 34(1):70–86, 2013.
- [26] D. Heck, J. Knapp, J-N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Technical report, 1998.

- [27] P Hewitt. *Física conceptual*. Trillas, México, 1996.
- [28] Marsden D. Hollows J. Hunter H. Hillas, A. in proceedings of the 12th international conference on cosmic rays. page 1001.
- [29] JA Hinton and W Hofmann. Teraelectronvolt astronomy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 47:523–565, 2009.
- [30] B Hnatyk, R Hnatyk, V Zhdanov, and V Voitsekhovskiy. High-energy and very high-energy gamma-ray emission from the magnetar sgr 1900+ 14 neighbourhood. *arXiv preprint arXiv:2009.06081*, 2020.
- [31] Karl-Heinz Kampert and Alan A Watson. Extensive air showers and ultra high-energy cosmic rays: a historical review. *The European Physical Journal H*, 37(3):359–412, 2012.
- [32] Noel Klingler, Oleg Kargaltsev, George G Pavlov, and Bettina Posselt. The variable pulsar wind nebula of psr j1809–1917. *The Astrophysical Journal*, 868(2):119, 2018.
- [33] Kelly Malone. *Spectral fitting with energy estimators*. HAWC OBSERVATORY, 2019.
- [34] Israel Martinez. Analysis workshop. *HAWC Colaboration*, 2015.
- [35] James Matthews. A heitler model of extensive air showers. *Astroparticle Physics*, 22(5-6):387–397, 2005.
- [36] T Mizuno, N Tanaka, H Takahashi, J Katsuta, K Hayashi, and R Yamazaki. X-ray studies of the extended tev gamma-ray source ver j2019+ 368. *The Astrophysical Journal*, 841(2):104, 2017.
- [37] David Newton, J Knapp, and AA Watson. The optimum distance at which to determine the size of a giant air shower. *Astroparticle Physics*, 26(6):414–419, 2007.
- [38] Chinese Academy of Sciences. The highest-energy gamma rays discovered by the tibet asgamma experiment. [urlhttps://phys.org/news/2019-07-highest-energy-gamma-rays-tibet-asgamma.html](https://phys.org/news/2019-07-highest-energy-gamma-rays-tibet-asgamma.html).
- [39] T Pierog, R Engel, and D Heck. Impact of uncertainties in hadron production on air-shower predictions. *Czechoslovak Journal of Physics*, 56(1):A161–A172, 2006.
- [40] M. Rosales. *Sistema de Adquisición de Datos para la Caracterización de Fotomultiplicadores para Experimentos de Altas Energías*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Enero 2013.
- [41] Volker Schönfelder. *The Universe in Gamma Rays*. Springer, Berlín, 2001.
- [42] I. E. Tamm. *Selected Papers*. Springer-Verlag, Berlín, 1991.
- [43] Anne Zilles. *Emission of Radio Waves in Particle Showers: Validation of microscopic simulations with the SLAC T-510 experiment and their potential in the future Square Kilometre Array*. Springer, 2017.