



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DEL POSGRADO EN ASTROFÍSICA

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES EMISORAS DE NEUTRINOS ENTORNO A LOS
BLAZARES REPORTADOS POR FERMI-LAT.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
EDWIN ANTONIO GALVÁN GÁMEZ.

NISSIM ILLICH FRAIJA CABRERA
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA.

DR. JOSÉ ANTONIO DE DIEGO ONSURBE
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA.

GUSTAVO ADOLFO MEDINA TANCO
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, CIUDAD UNIVERSITARIA.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

Esta tesis es resultado del trabajo realizado en cuatro años de doctorado en el posgrado en astrofísica, y que no refleja todo el esfuerzo realizado durante este periodo. Sin embargo, sería mucho más injusto no reconocer a la gente que estuvo al rededor de este autor. A ustedes les dedico este trabajo y les agradezco.

Al frente de la línea y hombro con hombro se encuentra mi familia; a ustedes David Leonardo, María Virginia y Julio Antonio, que son testigos del esfuerzo realizado todos los días y sin importar de la situación o el momento, al voltear ustedes siempre están ahí. Me faltan palabras para expresar todo mi agradecimiento que les tengo. Alondra, Naeth, Carmen, Loreto, Rosa, Cassandra, Raúl, Tito, Yaz, Andy, Amanda, Paco, Mary, Gustavo, Ole, Valo, en general a toda mi familia (perdón por no mencionarlos a todos) les dedico este ápice de esfuerzo.

Con amor a Alejandra Zaavik (mi shosha), que compartió muchas veces su hombro para seguir adelante, muchas veces sin saber a donde ir a parar y al final nos alcanzó. Junto a ella siempre se encontraron Gisela, Isidro, Lucho y Estrella, que no dejarán de acompañarla nunca. Siempre estaré agradecido por estar con ella, no fue fácil.

No hay justicia si no menciono (sin ningún orden particular, muchachos disculpen) Alonso, Fernando, Erick, Estefanía, Lara, Leonardo. Una buena tarde/noche es sinónimo de su compañía durante este proceso. Alonso, esa Telecaster y la Dreadnought me han acompañado en más de un momento gris, siempre estaré agradecido por ello. Erick, siempre me gustará saber tu punto de vista sobre temas en los cuales no soy muy diestro, las discusiones, aun que cada vez menores, se siguen disfrutando como el primer día. Fernando, Estefanía, tanto tiempo y poder aún tomar un café por la tarde y divagar, gracias por estar ahí a pesar del tiempo. Lara, a pesar de que esas discusiones llegaron tarde, llegaron y las he disfrutado como nunca. Leo, al igual que Lara llegaron tarde esas cenas de viernes, mismas que se agradecen para alejar el estrés y las presiones de todos los días. A esta lista están sumados, Gerardo, Tania, Abel, Santibañez, Omar y compañía y que aunque interactuamos poco tampoco son ajenos.

Finalmente a aquellos que no están ya; Juana, Teofilo, Silvino, siempre los recordaré, así como aquellos con los cuales compartí camino y hemos tomado rutas distintas.

A todos ustedes ¡GRACIAS, TOTALES!

Edwin Antonio Galván Gámez.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer de manera muy afectuosa a mi comité tutor; al Dr. José Antonio de Diego Onsurbe y al Dr. Gustavo Adolfo Medina Tanco por su guía a lo largo de 4 años de trabajo, a sus comentarios y su retroalimentación realizada cada semestre en esas nutridas reuniones de comité tutor, muchas gracias.

Agradezco profundamente a los sinodales de este trabajo; al Dr. Simone Dichiara, Dr. Hermes León Vargas, Dr. Antonio Marinelli, a la Dra. Alenka Negrete Peñaloza y al Dr. José Antonio de Diego Onsurbe por dedicar su tiempo y esfuerzo para la revisión de este trabajo así como sus comentarios enriquecedores.

Finalmente pero no al último, me gustaría agradecer al Dr. Nissim Fraija. Por todos esos años de enseñanzas, discusiones y colaboración como iguales. Los cuales comenzaron en la licenciatura de un estudiante lo más de rebelde, y que siempre estará agradecido por ello.

Nissim Fraija agradece el apoyo financiero de UNAM-DGAPA-PAPIIT a través de la beca IN106521. Antonio Galván agradece el apoyo de la beca nacional del Conacyt/Conahcyt al CVU 893937.

Índice general

1. Introducción	17
2. Observaciones	21
2.1. Selección de la muestra de neutrinos de altas energías	21
2.2. Selección de las fuentes puntuales emisoras de rayos- γ	25
3. Análisis	31
3.1. Análisis en la región de error de HESE 44	32
3.2. Análisis en la región de error de HESE 76	35
3.3. Análisis en la región de error de IceCube-181014A	36
3.4. Análisis en la región de error de IceCube-190730A	37
3.5. Análisis en la región de error de IceCube-191215A	41
3.6. Análisis en la región de error de IceCube-200109A	41
3.7. Análisis en la región de error de IceCube-201130A	44
3.8. Análisis en la región de error de IceCube-211216A	46
4. Modelo	51
4.1. Radiación de Sincrotrón	52
4.2. Dispersión Compton Inversa	52
4.3. Proceso fotopión	52
5. Distribución Espectral de Energía	55
6. Resultados y conclusiones	71
A. Publicación de trabajos	75

Índice de figuras

1.1.	Topologías detectadas por IceCube.	18
	(a). Topología de un evento tipo <i>track</i> detectada dentro del observatorio IceCube . . .	18
	(b). Topología de un evento tipo <i>shower</i> detectada dentro del observatorio IceCube . .	18
2.1.	Eventos tipos <i>track</i> detectados por IceCube.	28
3.1.	Proyeccion cartesiana de los neutrinos HESE 44, HESE 76, IceCube-181014 y IceCube-190730A detectados por IceCube en correlación espacial con FSRQ.	33
	(a). Región de error del neutrino HESE 44	33
	(b). Región de error del neutrino HESE 76	33
	(c). Región de error del neutrino IceCube-181014	33
	(d). Región de error del neutrino IceCube-190730A	33
3.2.	Proyeccion cartesiana de los neutrinos IceCube-190730A, IceCube-200109A, IceCube-201130A y IceCube-211216A detectados por IceCube en correlación espacial con FSRQ.	34
	(a). Región de error del neutrino IceCube-191215A	34
	(b). Región de error del neutrino IceCube-200109A	34
	(c). Región de error del neutrino IceCube-201130A	34
	(d). Región de error del neutrino IceCube-211216A	34
3.3.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ PKS B2224+006	35
3.4.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ PKS 1555+001	37
3.5.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ PKS 1454-354	38
3.6.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ PKS 1502+106	40
3.7.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ 87GB 185759.9+570427	42
3.8.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ TXS 1100+122	45
3.9.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ PMN J0206-1150	47
3.10.	Curva de luz en multifrecuencia del FSRQ OX 110	49
5.1.	Distribución Espectral de Energía de 4FGLJ2226.8+0051, 4FGLJ1557.9-0001, 4FGLJ1457.4-3539 and 4FGLJ1504.4+1029 para ventanas de tiempo semanales, mensuales y anuales.	58
	(a). Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J2226.8+0051	58
	(b). Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J2226.8+0051	58
	(c). Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J2226.8+0051	58

(d).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGLJ1557.9-0001	58
(e).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGLJ1557.9-0001	58
(f).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGLJ1557.9-0001	58
(g).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J1457.4-3539	58
(h).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J1457.4-3539	58
(i).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J1457.4-3539	58
(j).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J1504.4+1029	58
(k).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J1504.4+1029	58
(l).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J1504.4+1029	58
5.2.	Distribución espectral de energía para las fuentes 4FGLJ1103.0+1157, 4FGLJ1858.7+5708, 4FGLJ0206.4-1151 y 4FGLJ2108.5+1434.	59
(a).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J1858.7+5708	59
(b).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J1858.7+5708	59
(c).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J1858.7+5708	59
(d).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J1103.0+1157	59
(e).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J1103.0+1157	59
(f).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J1103.0+1157	59
(g).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J0206.4-1151	59
(h).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J0206.4-1151	59
(i).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J0206.4-1151	59
(j).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo semanal de la fuente 4FGL J2108.5+1434	59
(k).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo mensual de la fuente 4FGL J2108.5+1434	59
(l).	Distribución espectral de energía en una ventana de tiempo anual de la fuente 4FGL J2108.5+1434	59
5.3.	Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J2226.8+0051.	60

5.4. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J1557.9-0001.	61
5.5. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J1457.4-3539.	62
5.6. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J1557.9-0001	63
5.7. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGLJ1504.4+1029.	64
5.8. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J0206.4-1151.	65
5.9. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J1858.7+5708.	66
5.10. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J1103.0+1157.	67
5.11. Corner plot resultante del ajuste a la fuente 4FGL J2108.5+1434.	68

Índice de tablas

2.1.	High Energy Starting Event de tipo <i>track</i> reportados por IceCube.	22
2.2.	Eventos tipo Extremely High Energy reportados por IceCube.	23
2.3.	Eventos de neutrinos del sistema de alerta en tiempo real notificados a través de las notificaciones de AMON-GCN	24
2.4.	Alertas tipo <i>Golden</i> reportadas por IceCube	26
2.5.	Alertas tipo <i>Bronze</i> reportadas por IceCube	27
3.1.	FSRQ detectados por Fermi-LAT en coincidencia espacial con neutrinos detectados por IceCube	32
5.1.	Valores obtenidos del Monte Carlo Markov Chain para los ajustes de la SED en ventanas de tiempo mensuales	57
5.2.	Valores obtenidos del Monte Carlo Markov Chain para los ajustes de la SED en ventanas de tiempo anuales	69

Motivación

La detección del neutrino IceCube-170922A por IceCube en dirección del blázar TXS 0506+056 en estado de Flare, así como la detección de un cúmulo de neutrinos en dirección a la galaxia NGC 1068 son evidencia de progenitores puntuales de neutrinos. Recientemente, se ha detectado un flujo difuso de neutrinos en la Vía Láctea, la cuál rechaza la una componente de fondo a un nivel estadístico de 4.5σ abriendo una nueva discusión de como son producidas estas partículas y cuáles son los progenitores de las mismas. Neutrinos pueden producirse en interacciones de protones relativistas con materia o con radiación. Cuando los protones interactúan con radiación, cuyas interacciones son llamadas coloquialmente como $p\gamma$, un flujo de neutrinos de altas energías es esperado como consecuencia de estas interacciones, así como un flujo de rayos- γ , esto debido a que se producen piones cargados y neutrinos en dichas interacciones. IceCube cuenta con un sistema de alertas en tiempo real, dicho sistema distribuye una notificación a observatorios en distintas frecuencias en el espectro electromagnético con la finalidad de encontrar una contra-parte electromagnética al momento de detectar un neutrino.

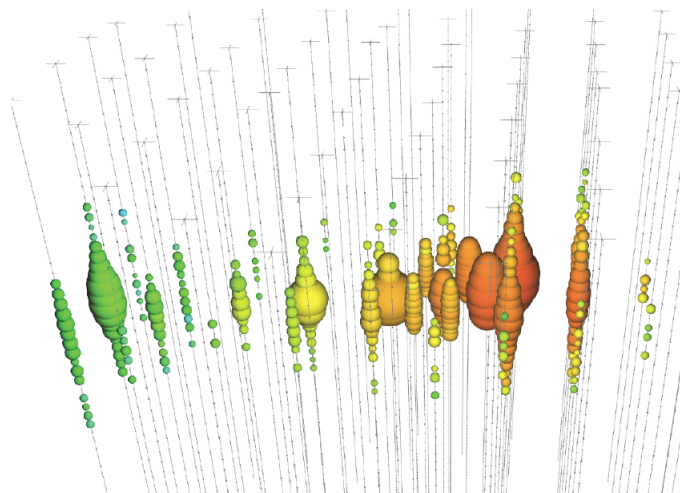
En este trabajo se analizan cuásares detectados por Fermi-LAT posicionados dentro de la región de incertidumbre a la mejor posición reconstruida del neutrino detectado. El la distribución espectral de energía de dichos cuásares es construida con observaciones historicas y cuási-simultaneas a la detección del neutrino y se busca emisión de rayos- γ en ventanas de tiempo cuyas escalas van de semanas, meses y años centradas a la detección del neutrino. Usando observaciones en multi-frecuencia, modelamos la distribución espectral de energía asumiendo un modelo leptohadrónico de una zona y estimamos el flujo de neutrinos. A pesar de que estos cuásares se encuentran en coincidencia espacial con los neutrinos, el flujo de neutrinos esperados es al menos un orden de magnitud menor al flujo observado por IceCube.

1 Introducción

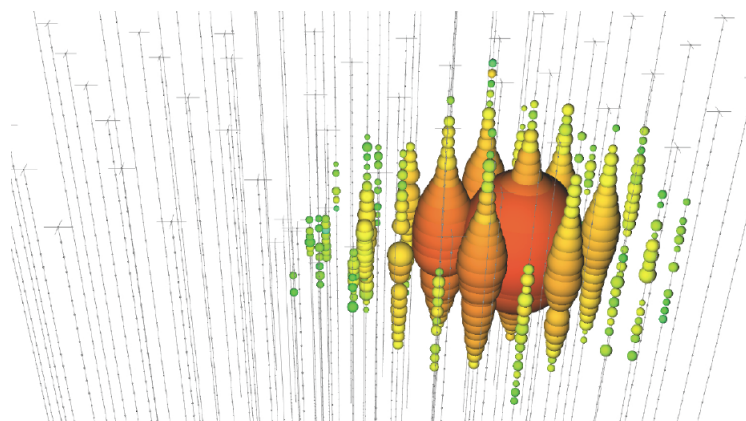
Victor Hess descubrió los rayos cósmicos (del inglés Cosmic rays (CRs)) hace más de un siglo y sin embargo, el lugar de origen de los rayos cósmicos continua siendo un tema abierto en la astrofísica. La interacción de RC con campos magnéticos imposibilitan determinar el sitio donde son acelerados los RC [Gaisser et al., 2013], lo cual motiva a tener distintos mensajeros que provean información del sitio de producción de CRs. En el caso particular de fotones de rayos gamma (rayos γ) los cuales interactúan con fotones de fondo en bandas menos energéticas y abarcan frecuencias desde Radio hasta Ultra-Violeta suprimen el flujo detectado de rayos γ por un factor exponencial que depende de la energía de los fotones de altas energías y de la distancia de la fuente a la tierra [Gilmore et al., 2012, Franceschini and Rodighiero, 2017]. Ante estas adversidades, los neutrinos son una buena alternativa, debido a que no tienen carga eléctrica, pueden atravesar campos magnéticos sin comprometer la trayectoria en dirección a la tierra. Además, debido a que interactúan de manera débil y gravitacional con la materia no son atenuados en su viaje a la tierra como los fotones. Es por ellos que la presencia de neutrinos de altas energías aporta evidencias para identificar fuentes aceleradoras de CRs [Halzen and Hooper, 2002].

Hasta el momento, solo se ha identificado una fuente emisora de neutrinos de manera continua. Se trata del Núcleo Activo de Galaxia (AGN) Seyfert tipo 2, NGC 1068. Esta fuente es consistente con un cúmulo de neutrinos con una significancia estadística de 4.2σ [IceCube Collaboration et al., 2022]. Adicionalmente a esta fuente, el 22 de Septiembre de 2017, IceCube detectó el neutrino IceCube-170922A cuya energía reconstruida fue superior a 0.1 PeV. El blázar TXS 0506+056 está localizado dentro de la región de incertidumbre a la posición de arribo del neutrino. Al momento de la detección del neutrino, el blázar TXS 0506+056 se encontraba en estado de Flare y presentó una probabilidad de una asociación entre estos dos fenómenos de $\sim 3\sigma$. Posteriormente a esta detección, IceCube realizó una búsqueda en los datos históricos en la dirección de este blázar y encontraron un *flare* de neutrinos que excedía el background en 3.5σ en un periodo de 7 meses conformados de Septiembre de 2014 a Marzo de 2015. Durante este periodo de tiempo, el blázar TXS 0506+056 no presentó un incremento en el flujo detectado en su contraparte electromagnética [IceCube Collaboration et al., 2018b].

IceCube no detecta neutrinos de manera directa, si no, de manera indirecta, a través de sus 5160 Modulo Digital Óptico (DOM) [IceCube Collaboration, 2013]. La luz Cherenkov producida por partículas secundarias creadas debido a la interacción entre neutrinos con los núcleos de hielo presentes en el detector. Los neutrinos interactúan mediante Corriente Cargadas (CC) y Corriente Neutras (CN). En interacciones CC el núcleo es fragmentado, liberando una cascada de hadrones, donde aproximadamente el 80% de la energía es transferida a leptones cargados creados. En el caso del



(a) Topología tipo *track* detectada dentro del observatorio IceCube.



(b) Topología tipo *shower* detectada dentro del observatorio IceCube.

Figura 1.1: Topologías detectadas por IceCube. Imagen tomada de [Bose and Rakshit, 2021]

neutrino muónico y así como su anti-neutrino ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$), muones secundarios son creados a lo largo de la cascada hadrónica. Esos muones pueden viajar varios kilómetros antes de su decaimiento. Debido a esto, la luz depositada en el detector tiene una topología característica llamada *track*. Este tipo de topología se puede apreciar en la figura 1.1a.

En el caso de neutrinos electrónicos así como sus anti-neutrinos ($\nu_e, \bar{\nu}_e$) produce una traza de tipo *shower* o de cascada. Este tipo de cascadas superponen a la cascada hadrónica, adoptando una forma esférica dentro del detector tal cual se puede apreciar en la figura 1.1b. Debido a que al momento de la interacción del neutrino con los núcleos de hielo, la cascada hadrónica conserva el momento del neutrino incidente es posible que la dirección y energía del neutrino sean reconstruidos a partir de la luz depositada dentro del detector. En el caso de eventos de tipo CC – ν_μ , las largas distancias de luz depositadas permiten reconstruir de manera óptima la posición de arribo del neutrino, con una incertidumbre menor a 1.0 deg a la mejor posición reconstruida [Aartsen et al., 2016]. Sin embargo, la reconstrucción de la energía del neutrino primario no es la óptima debido que solo una pequeña

fracción del evento está contenido dentro del detector. La energía reconstruida de estos eventos es un límite inferior a la energía del neutrino primario. En eventos de neutrinos tipo $CC - \nu_e$, la reconstrucción de la energía es reconstruida con una mayor precisión, sin embargo, una peor resolución angular es obtenida, como consecuencia se ve reflejado un incremento a la incertidumbre de la mejor posición reconstruida del neutrino, alcanzando errores del orden de $\mathcal{O}(10 - 15)$ deg [IceCube Collaboration, 2013]. Cascadas del tipo CN involucran eventos donde el neutrino cede una pequeña fracción de su energía al núcleo en su camino por el medio. De este tipo de interacciones se esperan neutrinos de todos los sabores, cuya producción dentro del detector se limita únicamente a topologías de tipo *shower* [Bose and Rakshit, 2021].

El instrumento LAT a bordo del satélite Fermi detecta fotones de altas energías, en el régimen de los rayos γ , tradicionalmente en un rango energético que va desde los 20 MeV hasta los 300 GeV [Atwood et al., 2009]. La colaboración de LAT ha hecho públicos distintos catálogos de las fuentes detectadas en ese rango energético. El primer catálogo denominado 1FGL reportó las observaciones de los primeros 11 meses de operaciones del instrumento que comenzó a operar en Agosto del 2008. En este catálogo se reportaron 1451 fuentes detectadas con una significancia estadística mayor a 5σ y caracterizadas en el rango energético de 100 MeV a 100 GeV [Abdo et al., 2010]. Posteriormente publicó el catálogo 2FGL, abarcando un periodo de 24 meses a partir de Agosto de 2008, el cual estaba conformado por 1873 fuentes que emiten radiación electromagnética en el rango energético de 100 MeV hasta 100 GeV, en donde en dicho análisis tuvo mejoras en los modelos isotópicos y difusos galácticos en comparación a su predecesor [Nolan et al., 2012]. De la misma manera, en un intervalo de 4 años de operaciones, y abarcando un rango energético que abarca de los 100 MeV a los 300 GeV, se publicó el 3FGL. Este catálogo está conformado por 3033 fuentes que emiten rayos γ que fueron detectadas con una significancia estadística mayor a 4σ . Con respecto a sus predecesores, en el 3FGL se encuentran mejoras en la calibración de los eventos reconstruidos, actualizaciones en las plantillas de la emisión de rayos γ difusa galáctica, un método refinado para la detección de fuentes, y métodos mejorados para la asociación de fuentes de rayos γ con potenciales contrapartes en otras frecuencias del espectro electromagnético [Acero et al., 2015]. De las 3033 fuentes reportadas en el catálogo, 1100 fuentes fueron clasificadas ó asociadas a blazares, así como otras fuentes de AGNs de tipo no blázar.

El catálogo más reciente es el 4FGL el cuál abarca un periodo de observaciones de 8 años en la primera entrega de datos (conocida como 4FGL-DR1) conformado por 5064 fuentes de rayos γ [Abdollahi et al., 2020]. Dentro de las características de este catálogo, se encuentran; una mejora a la resolución angular del $\sim 20\%$ en energías mayores a 3 GeV, la cual se traduce en un incremento en la área efectiva de 2.5m^2 sr en el rango energético de 2 - 300 GeV. El modelo de la emisión difusa galáctica fue caracterizada como combinación lineal de plantillas que representan fracciones de la emisión galáctica difusa, los cuales fueron actualizados respecto a entregas previas, además de adicionar nuevas plantillas. Adicionalmente, se han añadido pesos a los análisis likelihood más significativos con el objetivo de mitigar el limitado conocimiento que se tiene de la emisión galáctica difusa. Entregas de catálogos posteriores, no tenían en cuenta el impacto de la dispersión de la energía, lo que significa en que la energía reconstruida no era la energía inicial del rayos γ que incidió en el detector.

La muestra original del 4FGL consideró el periodo de ochos años de observaciones, en un intervalo energético que abarca los 50 MeV hasta 1 TeV. Posteriores entregas incrementaron el tiempo de observación. La segunda entrega del 4FGL [Ballet et al., 2020], el 4FGL-DR2 consideró un periodo de

10 años de operaciones, mientras que el 4FLG-DR3 [Abdollahi et al., 2022] considero una ventana de 12 años de observaciones. Dentro de cada una de las entregas del 4FLG, existe una sub-muestra conocida como 4LAC. Este sub-catálogo reporta los AGN detectados por Fermi-LAT en dicho intervalo energético. De este modo, la entrega del 4LAC [Ajello et al., 2020] corresponde a los primeros 8 años de observaciones. Este catálogo esta conformado principalmente por blázares, que están caracterizados por tener *jets* relativistas apuntando en dirección de la Tierra. Dentro de los blázares existen dos sub familias, los BL Lacs y los FSRQ. Este catálogo considera AGNs cuya latitud galáctica cumple la condición $b \geq 10^\circ$, la cuál está conformada por 2614 AGNs de los cuales; 591 FSRQ de los cuales, son 540 LSP; 9 ISP, 4 HSP y 38 con una clasificación espectral no identificada. Adicionalmente, 1027 BL Lacss de los cuales; son 288 LSP; 270 ISP, 316 HSP y 153 con una clasificación espectral no identificada. Además; 941 blázares con una clasificación desconocida, de los cuales; 327 son LSP; 128 ISP, 126 HSP y 360 con una clasificación espectral no identificada. La población de AGNs que no son del tipo blázar son; 9 NLSy1, 31 RG, 5 CSS, 2 SSRQ, 0 SEY y 8 AGNs de otro tipo. Adicionalmente, una sub muestra conocida como *Low Latitude Sample* que considera AGNs cuya longitud galáctica cumple la condición $b < 10^\circ$.

Los FSRQ son los blázares más energéticos en la banda de los rayos γ son candidatos naturales a ser progenitores de neutrinos [Murase et al., 2014, Dermer et al., 2014, Kadler et al., 2016, Righi et al., 2020], sin embargo aún es desfavorecida esta hipótesis por falta de observaciones realizadas por IceCube, salvo por el blázar TXS 0506+056 el cuál ha sido propuesto como un FSRQ en vez de un BL LAC [Padovani et al., 2019].

2 Observaciones

2.1. Selección de la muestra de neutrinos de altas energías detectados por IceCube

Debido a que los eventos tipo *shower* detectados por IceCube presentan un error angular del orden $\mathcal{O}(10)$ deg, los excluirémos de este trabajo, pues son desfavorecidos para encontrar contrapartes puntuales. De esta manera, buscaremos conciliar fuentes puntuales de rayos γ detectadas por Fermi-LAT con eventos tipo *track* detectados por IceCube. Para ello, consideramos; 22 de los 82 eventos tipo HESE [IceCube Collaboration, 2013, Aartsen et al., 2014, Kopper et al., 2015, Kopper and IceCube Collaboration, 2017], los cuales están listados en la tabla 2.1. Esta muestra abarca seis años de adquisición de datos (del 2010 a 2016). La tabla esta organizada (de izquierda a derecha); el ID del neutrino en el catálogo HESE, el límite inferior de la energía reconstruida del neutrino; seguido del tiempo de detección del neutrino, seguidos de la mejor posición reconstruida de la dirección de arribo del neutrino y finalmente, la incertidumbre en la posición del neutrino.

En este trabajo, también hemos considerado lo eventos reportados en el catálogo EHE [Aartsen et al., 2016, Haack et al., 2017]. Esta muestra esta conformada por 36 eventos a lo largo de ocho años de adquisición de datos, observando neutrinos del muón (ν_μ) arribando desde el hemisferio norte de la Tierra. La muestra esta reportada en la tabla 2.2, la cual está ordenada de izquierda a derecha como; el ID dentro del catalogo EHE; seguido de la cota inferior de la energía del neutrino. En la tercer columna el tiempo en el que fue detectado el neutrino de altas energías, seguido de la *signalness* que es el valor esperado de que el evento sea de origen astrofísico dividido por el total entre el fondo y los eventos astrofísicos esperados. Finalmente, las últimas dos columnas representan los valores de la mejor posición reconstruida de llegada del neutrino.

IceCube tiene implementado un sistema de alertas en tiempo real descrito en [Aartsen et al., 2017]. Dicho sistema consiste en; sí un neutrino es detectado por IceCube, el sistema manda una serie de notificaciones a través de The Gamma-ray Coordinates Network (GCN) a observatorios a lo largo de todo el espectro electromagnético con el objetivo de localizar una contra-parte electromagnética cuyo flujo decae exponencialmente. Este sistema de alertas implementó dos canales distintos. El primer canal, selecciona eventos HESE tipo *track*, mientras que el segundo canal, seleccionaba eventos de tipo EHE. Dichos canales operaban de manera independiente y simultáneamente. La eficiencia de este sistema quedó demostrada con la detección del neutrino IceCube-170922A. Al momento de esta detección y posterior notificación de este evento, Fermi-LAT apuntó en dirección de este neutrino y encontró al blazár TXS 0506+056 dentro de la posición de incertidumbre de detección del neutrino.

Tabla 2.1: High Energy Starting Event de tipo *track* reportados por IceCube.

ID	Energía (TeV)	Tiempo (MJD)	R.A. (deg)	Dec (deg)	ErrAng (deg)
3	$78.7^{+10.8}_{-8.7}$	55451.07	127.9	31.2	1.4
5	71.4^{+9}_{-9}	55512.55	110.6	-0.4	1.2
8	$32.6^{+10.3}_{-11.1}$	55608.82	182.4	-21.2	1.3
13	$252.7^{+25.9}_{-21.6}$	55756.11	67.9	40.3	1.2
18	$31.5^{+4.6}_{-3.3}$	55923.53	345.6	-24.8	1.3
23	$82.2^{+8.6}_{-8.4}$	55949.56	208.7	-13.2	1.9
28	$46.1^{+5.7}_{-4.4}$	56048.57	164.8	-71.5	1.3
37	$30.8^{+3.3}_{-3.5}$	56390.18	167.3	20.7	1.2
38	$200.5^{+16.4}_{-16.4}$	56470.11	93.3	14	1.2
43	$46.5^{+5.9}_{-4.5}$	56628.56	206.6	-22	1.3
44	$84.6^{+7.4}_{-7.9}$	56671.87	336.7	0.0	1.2
45	$429.9^{+57.4}_{-49.1}$	56679.20	219	-86.3	1.2
47	$74.3^{+8.3}_{-7.2}$	56704.60	209.4	67.4	1.2
53	$27.6^{+2.6}_{-2.2}$	56767.06	239	-37.7	1.2
58	$52.6^{+5.2}_{-5.7}$	56859.75	102.1	-32.4	1.3
61	$53.8^{+7.2}_{-6.3}$	56970.20	55.6	-16.5	1.2
62	$75.8^{+6.7}_{-7.1}$	56987.77	187.9	13.3	1.3
63	$97.4^{+9.6}_{-9.6}$	57000.14	160	6.5	1.2
71	$73.5^{+10}_{-10.5}$	57140.47	80.7	-20.8	1.2
76	$126.3^{+12}_{-12.7}$	57276.56	240.2	-0.4	1.2
78	$56.7^{+7}_{-6.9}$	57363.44	0.4	7.5	1.2
82	$159.3^{+15.5}_{-15.3}$	57505.24	240.9	9.4	1.2

Tabla 2.2: Eventos tipo Extremely High Energy reportados por IceCube.

ID	Energía Aproximada (TeV)	Tiempo (MJD)	Signalness	R.A. (Deg)	Dec (Deg)
1	480	55056.70	0.78	29.51 ^{+0.40} _{-0.38}	1.23 ^{+0.18} _{-0.22}
2	250	55141.13	0.52	298.21 ^{+0.53} _{-0.57}	11.74 ^{+0.32} _{-0.38}
3	340	55355.49	0.65	344.93 ^{+3.39} _{-2.90}	23.58 ^{+2.31} _{-4.13}
4	260	55370.74	0.54	141.25 ^{+0.46} _{-0.45}	47.80 ^{+0.56} _{-0.48}
5	230	55387.54	0.49	306.96 ^{+2.70} _{-2.28}	21.00 ^{+2.25} _{-1.56}
6	770	55421.51	0.89	252.00 ^{+9.56} _{-16.65}	15.21 ^{+9.35} _{-7.41}
7	460	55464.90	0.77	266.29 ^{+0.58} _{-0.62}	13.40 ^{+0.52} _{-0.45}
8	660	55478.38	0.86	331.08 ^{+0.49} _{-0.80}	11.09 ^{+0.41} _{-0.49}
9	950	55497.30	0.92	88.95 ^{+0.48} _{-0.53}	0.50 ^{+0.25} _{-0.21}
10	520	55513.60	0.8	285.95 ^{+1.29} _{-1.50}	3.15 ^{+0.70} _{-0.63}
11	240	55589.56	0.52	307.71 ^{+0.52} _{-0.44}	1.03 ^{+0.19} _{-0.21}
12	300	55702.77	0.6	235.13 ^{+2.70} _{-1.76}	20.3 ^{+1.00} _{-1.43}
13	210	55722.43	0.47	272.22 ^{+1.23} _{-1.19}	35.55 ^{+0.69} _{-0.69}
14	210	55764.22	0.46	315.66 ^{+5.91} _{-5.35}	5.29 ^{+4.85} _{-4.72}
15	300	55896.86	0.59	222.87 ^{+1.95} _{-7.73}	1.87 ^{+1.25} _{-1.18}
16	660	55911.28	0.86	36.65 ^{+1.85} _{-1.71}	19.1 ^{+2.21} _{-2.21}
17	200	56062.96	0.45	198.74 ^{+1.44} _{-1.09}	31.96 ^{+0.81} _{-0.85}
18	260	56146.21	0.55	330.10 ^{+0.65} _{-0.82}	1.57 ^{+0.46} _{-0.42}
19	210	56211.77	0.46	205.11 ^{+0.54} _{-0.66}	-2.39 ^{+0.42} _{-0.51}
20	750	56226.60	0.88	169.61 ^{+1.16} _{-1.11}	28.04 ^{+0.67} _{-0.66}
21	670	56470.11	0.87	93.38 ^{+0.83} _{-0.90}	14.46 ^{+0.86} _{-0.94}
22	400	56521.83	0.71	224.89 ^{+0.87} _{-1.19}	-4.44 ^{+1.21} _{-0.94}
23	390	56579.91	0.49	32.94 ^{+0.63} _{-0.62}	10.2 ^{+0.34} _{-0.49}
24	850	56666.50	0.9	293.29 ^{+0.55} _{-1.08}	32.82 ^{+0.39} _{-0.41}
25	400	56799.96	0.73	349.39 ^{+2.89} _{-4.12}	18.05 ^{+1.94} _{-1.80}
26	340	56817.64	0.66	106.26 ^{+2.27} _{-1.90}	1.29 ^{+0.83} _{-0.74}
27	4450	56819.20	0.99	110.63 ^{+0.46} _{-0.55}	11.42 ^{+0.17} _{-0.17}
28	210	57049.48	0.46	100.48 ^{+0.95} _{-1.87}	4.56 ^{+0.68} _{-0.50}
29	240	57157.94	0.52	91.60 ^{+0.16} _{-0.74}	12.18 ^{+0.37} _{-0.35}
30	300	57217.90	0.61	325.50 ^{+1.77} _{-1.46}	26.10 ^{+1.68} _{-1.85}
31	380	57246.80	0.69	328.40 ^{+0.59} _{-0.75}	6.00 ^{+0.48} _{-0.34}
32	220	57269.80	0.51	134.00 ^{+0.39} _{-0.58}	28.00 ^{+0.47} _{-0.47}
33	230	57312.70	0.52	197.60 ^{+2.46} _{-2.09}	19.90 ^{+2.82} _{-2.21}
34	740	57340.90	0.86	76.30 ^{+0.75} _{-0.74}	12.60 ^{+0.61} _{-0.58}
35	380	57478.60	0.69	15.60 ^{+0.45} _{-0.58}	15.60 ^{+0.53} _{-0.60}
36	330	57672.10	0.64	9.70 ^{+0.00} _{-0.00}	26.60 ^{+0.00} _{-0.00}

Tabla 2.3: Eventos de neutrinos del sistema de alerta en tiempo real notificados a través de las notificaciones de AMON-GCN. La parte superior de la tabla corresponde a las alertas notificadas en el flujo HESE, mientras que la parte inferior muestra los eventos EHE. Las alertas son públicas en https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_hese_events.html y https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_ehe_events.html para los flujos HESE y EHE respectivamente.

Nombre	Tiempo (MJD)	Signalness	R.A. (deg)	Dec (deg)	Ref (GCN)
190504A [†]	58607.76	0.63	65.78 ± 1.22	5.78 ± 1.22	24392
190331A	58573.28	0.57	$337.68^{+0.23}_{-0.34}$	$-20.70^{+0.30}_{-0.48}$	24028
190221A	58535.35	0.37	$268.81^{+1.20}_{-1.80}$	$-17.04^{+1.30}_{-0.50}$	23918
190124A	58507.15	0.91	$307.4^{+0.80}_{-0.90}$	$-32.18^{+0.70}_{-0.70}$	23785
190104A	58487.35	0.35	$357.98^{+2.30}_{-2.10}$	$-26.65^{+2.20}_{-2.50}$	23605
181014A	58405.49	0.10	$225.15^{+1.40}_{-2.85}$	$-34.80^{+1.15}_{-1.85}$	23338
171015A	58041.06	0.51	$162.86^{+2.60}_{-1.70}$	$-15.44^{+1.60}_{-2.00}$	22016
170312A	57824.57	0.78	$305.15^{+0.50}_{-0.50}$	$-26.61^{+0.50}_{-0.50}$	20857
161103A	57695.38	0.30	$40.83^{+1.10}_{-0.70}$	$12.56^{+1.10}_{-0.65}$	20119
190503A	58606.72	0.36	$120.28^{+0.57}_{-0.77}$	$6.35^{+0.76}_{-0.70}$	24378
180908A	58369.83	0.34	$144.58^{+1.55}_{-1.45}$	$-2.13^{+0.90}_{-1.20}$	23214
171106A	58063.77	0.74	$340.00^{+0.70}_{-0.50}$	$7.40^{+0.35}_{-0.25}$	22105
170922A	58018.87	0.56	$77.43^{+1.30}_{-0.80}$	$5.72^{+0.70}_{-0.40}$	21916
170321A	57833.31	0.28	$98.30^{+1.20}_{-1.20}$	$-15.02^{+1.20}_{-1.20}$	20929
161210A	57732.83	0.49	$46.58^{+1.10}_{-1.00}$	$14.98^{+0.45}_{-0.40}$	20247
160806A [‡]	57606.51	0.28	122.81 ± 0.1	-0.80 ± 0.1	19787

[†] El error corresponde a un radio al 90 % de contención.

[‡] El error corresponde a un radio al 50 % de contención.

Fermi-LAT encontró que este blázar se encontraba en estado de *flare* al momento de la detección del neutrino [Tanaka et al., 2017, IceCube Collaboration et al., 2018a]. La muestra de neutrinos utilizados de este sistema se encuentran reportados en la tabla 2.3. Las columnas de la tabla están organizadas de izquierda a derecha con el siguiente orden; comenzando con el nombre del neutrino publicado en la GCN, seguido del tiempo de detección del neutrino. La tercera columna es la *Signalness* definida previamente. La cuarta y quinta columna son la mejor posición reconstruida del neutrino y al final el número de GCN con la que fue reportada. La tabla 2.3 está dividida en dos partes; la parte superior corresponde a los eventos HESE reportados, mientras que la parte inferior de la tabla son eventos EHE detectados por este sistema de alarmas.

A partir del año 2019, IceCube implementó un nuevo sistema de monitoreo en tiempo real, descrito en [Blaufuss et al., 2019]. Este sistema de alarmas contempla una cantidad mayor de eventos candidatos a ser detecciones de neutrinos. Presentando un sistema más robusto contra caracterizaciones impropias de eventos, una mejora en los textos de las alertas y una señal consistente entre todas las alertas. Adicionalmente, se añadieron dos nuevos canales; *Golden* y *Bronze*. Eventos con una señal

por encima del 50 % son clasificados como alertas tipo *golden*, mientras que eventos cuya señal se encuentra en el intervalo de 30 %-50 % son catalogados como alertas tipo *Bronze*. En este trabajo, incluimos las alertas reportadas por este sistema de alertas hasta inicios de Marzo de 2022. Estos eventos están reportados en las tablas 2.4 y 2.5 para las alertas *Golden* y *Bronze* respectivamente. Las tablas están organizadas de la siguiente manera; la primer columna de la tabla se reporta el nombre del neutrino, seguido por la energía reconstruida del evento. La tercer columna reporta el tiempo de arribo del neutrino al detector, mientras que las quinto y sexta columna están reportados la Ascensión Recta (RA) y la Declinación (Dec) de la mejor posición reconstruida para este evento. Finalmente, la última columna es el número de GCN en el cuál se reportó dicha alerta.

La distribución espacial de los neutrinos reportados en las tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 se muestran en la figura 2.1. Los eventos presentan una distribución isotrópica y no muestra una dirección preferencial de arribo. Dadas las energías de los neutrinos reportados en sus catálogos y en las alertas vía GCN, hemos calculado el flujo isotrópico de neutrinos como [Razzaque, 2013, Aartsen et al., 2013];

$$E_\nu^2 \phi_\nu(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau) \approx \frac{1}{4\pi} \frac{E_\nu}{(A_e + A_\mu + A_\tau)t_{\text{live}}} \frac{\text{GeV}}{\text{cm}^2\text{s sr}}, \quad (2.1)$$

donde $A_{e,\nu,\tau}$ corresponde al área efectiva del detector a lo largo de 13 años de operaciones. El área efectiva puede ser encontrada en la página web de IceCube¹.

2.2. Selección de las fuentes puntuales emisoras de rayos- γ detectadas por Fermi-LAT

Para este trabajo, consideramos los blázares detectados por Fermi-LAT en 10 años de operaciones y reportados en el 4LAC-DR2 [Ajello et al., 2020, Lott et al., 2020]. Este catálogo está conformado por las fuentes enumeradas en la sección 1 con la adición de 262 AGNs. Los cuales están conformados por: 39 FSRQ de los cuáles; 36 son LSP, 2 ISP y 0 HSP con 1 fuente sin una identificación espectral claramente identificadas. 58 BL Lacs de los cuáles; 13 son LSP, 13 ISP, 23 HSP y 9 fuentes sin una identificación espectral claramente identificadas. Adicionalmente, se detectaron 63 blázares de tipo desconocido, de los cuales; 71 son LSP, 26 ISP, 23 HSP y 43 fuentes sin una clasificación espectral claramente identificada. Finalmente, 2 nuevas radio-galaxias fueron detectadas en el intervalo energético de Fermi-LAT. En la parte principal de este trabajo tomaremos particular interés en los Cuasarés detectados por LAT.

¹<https://icecube.wisc.edu/science/data-releases/>

Tabla 2.4: Alertas tipo *Golden* reportadas por IceCube. Las alertas están disponibles en https://gcn.gsfc.nasa.gov/amon_icecube_gold_bronze_events.html

Nombre	Energía (TeV)	Tiempo (MJD)	Signales	R.A. (deg)	Dec (MJD)	Referencia
220306A	413.05	59644.15	0.77	314.82 ^{+0.54} _{-0.52}	8.61 ^{+0.47} _{-0.55}	31692
220304A	263.21	59642.73	0.63	48.78 ^{+7.68} _{-6.24}	4.48 ^{+5.91} _{-4.96}	31679
220303A	398.11	59641.75	0.76	267.80 ^{+1.50} _{-1.17}	11.42 ^{+0.89} _{-1.14}	31670
220221A	157.43	59631.02	0.67	287.84 ^{+4.00} _{-3.96}	20.74 ^{+4.31} _{-2.26}	31618
220202A	150.94	59612.49	0.21	21.36 ^{+1.10} _{-0.77}	-3.88 ^{+0.42} _{-0.64}	31543
211117A	195.03	59535.16	0.53	225.93 ^{+0.51} _{-0.51}	-0.20 ^{+0.51} _{-0.51}	31093
210922A	750.76	59479.76	0.93	60.73 ^{+0.96} _{-0.66}	-4.18 ^{+0.42} _{-0.55}	30862
210811A	217.67	59437.08	0.66	270.79 ^{+1.07} _{-1.08}	25.28 ^{+0.79} _{-0.84}	30627
210210A	287.41	59255.49	0.65	206.06 ^{+1.40} _{-0.95}	4.78 ^{+0.62} _{-0.56}	29454
201222A	185.78	59205.03	0.53	206.37 ^{+0.90} _{-0.80}	13.44 ^{+0.55} _{-0.38}	29120
201221A	174.54	59204.52	0.56	261.69 ^{+2.29} _{-2.50}	41.81 ^{+1.29} _{-1.20}	29102
201209A	418.60	59192.42	0.19	6.86 ^{+1.02} _{-1.22}	-9.25 ^{+0.99} _{-1.14}	29012
201130A	203.47	59183.84	0.15	30.54 ^{+1.13} _{-1.31}	-12.10 ^{+1.15} _{-1.13}	28969
201115A	177.38	59168.08	0.46	195.12 ^{+1.27} _{-1.49}	1.38 ^{+1.30} _{-1.11}	28889
201114A	214.29	59167.62	0.56	105.25 ^{+1.28} _{-1.12}	6.05 ^{+0.95} _{-0.95}	28887
201007A	682.65	59129.91	0.89	265.17 ^{+0.52} _{-0.52}	5.34 ^{+0.32} _{-0.23}	28575
200929A	182.89	59121.74	0.47	29.53 ^{+0.53} _{-0.53}	3.47 ^{+0.71} _{-0.35}	28532
200926A	670.50	59118.32	0.44	96.46 ^{+0.73} _{-0.55}	-4.33 ^{+0.61} _{-0.76}	28504
200615A	496.36	59015.61	0.83	142.95 ^{+1.18} _{-1.45}	3.66 ^{+1.19} _{-1.06}	27950
200109A	375.23	58857.98	0.77	164.49 ^{+4.94} _{-4.19}	11.87 ^{+1.16} _{-1.36}	26696
191119A	176.48	58806.04	0.45	230.10 ^{+4.76} _{-6.48}	3.17 ^{+3.36} _{-2.09}	26258
191001A	217.42	58757.83	0.59	314.08 ^{+6.56} _{-2.26}	12.94 ^{+1.50} _{-1.47}	25913
190922B	187.37	58748.96	0.51	5.76 ^{+1.19} _{-1.37}	-1.57 ^{+0.93} _{-0.82}	25806
190922A	3113.90	58748.40	0.20	167.43 ^{+3.40} _{-2.63}	-22.39 ^{+2.88} _{-2.89}	25802
190730A	298.81	58694.86	0.67	225.79 ^{+1.28} _{-1.43}	10.47 ^{+1.14} _{-0.89}	25225
190619A	198.70	58653.55	0.55	343.26 ^{+4.08} _{-2.63}	10.73 ^{+1.51} _{-2.61}	24854

† El error corresponde a un radio al 90% de contención.

Tabla 2.5: Alertas tipo *Bronze* comunicadas por IceCube. Las alertas están disponibles en https://gc.gsfc.nasa.gov/amon_icecube_gold_bronze_events.html

Nombre	Energía (TeV)	Tiempo (MJD)	Signaless	R.A. (deg)	Dec (deg)	Referencia
220225A	153.57	59635.59	0.38	$34.70^{+3.10}_{-2.60}$	$0.00^{+1.80}_{-1.50}$	31650
220115A	109.95	59594.50	0.37	$357.4^{+1.75}_{-1.18}$	$25.28^{+1.03}_{-0.95}$	31451
211216B	112.54	59564.98	0.35	$199.34^{+1.66}_{-1.78}$	$17.04^{+1.39}_{-1.36}$	31249
211216A	113.01	59564.29	0.34	$316.05^{+2.58}_{-1.95}$	$15.79^{+1.29}_{-1.63}$	31241
211208A	171.08	59556.83	0.50	$114.52^{+2.82}_{-2.50}$	$15.56^{+1.81}_{-1.39}$	31191
211125A	117.49	59543.26	0.39	$43.59^{+3.13}_{-2.71}$	$1.54^{+2.53}_{-2.53}$	31126
211123A	142.07	59541.60	0.36	$265.52^{+3.14}_{-2.84}$	$7.33^{+2.38}_{-2.48}$	31110
211116A	161.32	59534.43	0.40	$42.45^{+1.39}_{-1.50}$	$0.15^{+0.98}_{-0.94}$	31085
211023A	120.64	59510.35	0.33	$253.30^{+1.05}_{-1.08}$	$-1.72^{+1.16}_{-1.11}$	30957
210730A	109.42	59425.92	0.32	$105.73^{+2.00}_{-1.85}$	$14.79^{+0.91}_{-0.86}$	30559
210629A	120.95	59394.75	0.35	$340.75^{+1.11}_{-2.23}$	$12.94^{+0.91}_{-0.93}$	30342
210608A	105.17	59373.15	0.31	$337.41^{+4.89}_{-11.64}$	$18.37^{+3.75}_{-3.24}$	30153
210516A	109.12	59350.60	0.29	$91.76^{+1.05}_{-0.97}$	$9.52^{+0.50}_{-0.58}$	30026
210510A	113.03	59344.20	0.28	$268.42^{+1.47}_{-1.60}$	$3.81^{+0.68}_{-0.64}$	29976
201120A	153.96	59173.40	0.50	$307.53^{+5.34}_{-5.59}$	$40.77^{+4.97}_{-2.80}$	28927
201021A	105.27	59143.27	0.30	$260.82^{+1.73}_{-1.68}$	$14.55^{+1.35}_{-0.74}$	28715
201014A	146.93	59136.09	0.41	$221.22^{+1.00}_{-0.75}$	$14.44^{+0.67}_{-0.46}$	28616
200926B	121.42	59118.94	0.43	$184.75^{+3.64}_{-1.55}$	$32.93^{+1.15}_{-0.91}$	28509
200921A	117.17	59113.79	0.41	$195.29^{+2.35}_{-1.73}$	$26.24^{+1.51}_{-1.77}$	28468
200916A	110.48	59108.86	0.32	$109.78^{+1.08}_{-1.44}$	$14.36^{+0.88}_{-0.85}$	28433
200911A	110.79	59103.59	0.41	$51.11^{+4.42}_{-11.01}$	$38.11^{+2.35}_{-1.99}$	28411
200806A	107.35	59067.57	0.40	$157.25^{+1.21}_{-0.89}$	$47.75^{+0.65}_{-0.64}$	28210
200620A	113.50	59020.12	0.32	$162.11^{+0.64}_{-0.95}$	$11.95^{+0.63}_{-0.48}$	27997
200614A	115.05	59014.52	0.42	$33.84^{+4.77}_{-6.39}$	$31.61^{+2.75}_{-2.28}$	27941
200512A	108.77	58981.31	0.32	$295.18^{+1.72}_{-2.26}$	$15.79^{+1.26}_{-1.29}$	27719
200425A	134.87	58964.97	0.48	$100.10^{+4.67}_{-3.14}$	$53.57^{+2.45}_{-1.60}$	27651
200421A	126.97	58960.02	0.33	$87.93^{+3.44}_{-2.83}$	$8.23^{+2.09}_{-1.84}$	27612
200410A	110.00	58949.97	0.31	$242.58^{+14.05}_{-13.35}$	$11.61^{+7.87}_{-6.21}$	27534
200227A [†]	109.50	58906.23	0.35	348.26 ± 0.51	21.32 ± 0.51	27235
200120A	6070.20	58868.78	0.33	$67.46^{+0.36}_{-0.43}$	$-14.63^{+0.32}_{-0.25}$	26832
200117A	108.39	58865.46	0.38	$116.24^{+0.71}_{-1.24}$	$29.14^{+0.90}_{-0.78}$	26802
191231A	155.38	58848.45	0.46	$46.36^{+4.27}_{-3.47}$	$20.42^{+2.11}_{-2.80}$	26620
191215A	132.65	58832.46	0.47	$285.87^{+2.88}_{-3.19}$	$58.92^{+1.85}_{-2.25}$	26435
191204A	130.20	58821.94	0.33	$79.72^{+3.20}_{-1.74}$	$2.80^{+1.12}_{-1.23}$	26341
191122A	128.44	58809.94	0.33	$27.25^{+1.70}_{-2.90}$	$-0.04^{+1.17}_{-1.49}$	26276
190819A	113.16	58714.73	0.29	$148.80^{+2.07}_{-3.24}$	$1.38^{+1.00}_{-0.75}$	25402
190712A	108.67	58676.05	0.30	$76.46^{+5.09}_{-6.83}$	$13.06^{+4.48}_{-3.44}$	25057
190704A	154.99	58668.78	0.49	$161.85^{+2.16}_{-4.33}$	$27.11^{+1.81}_{-1.83}$	24981
190629A	107.67	58653.80	0.34	$27.22^{+0.01}_{-0.01}$	$84.33^{+4.95}_{-3.13}$	24910

[†] The error corresponds to a radius at 90% containment.

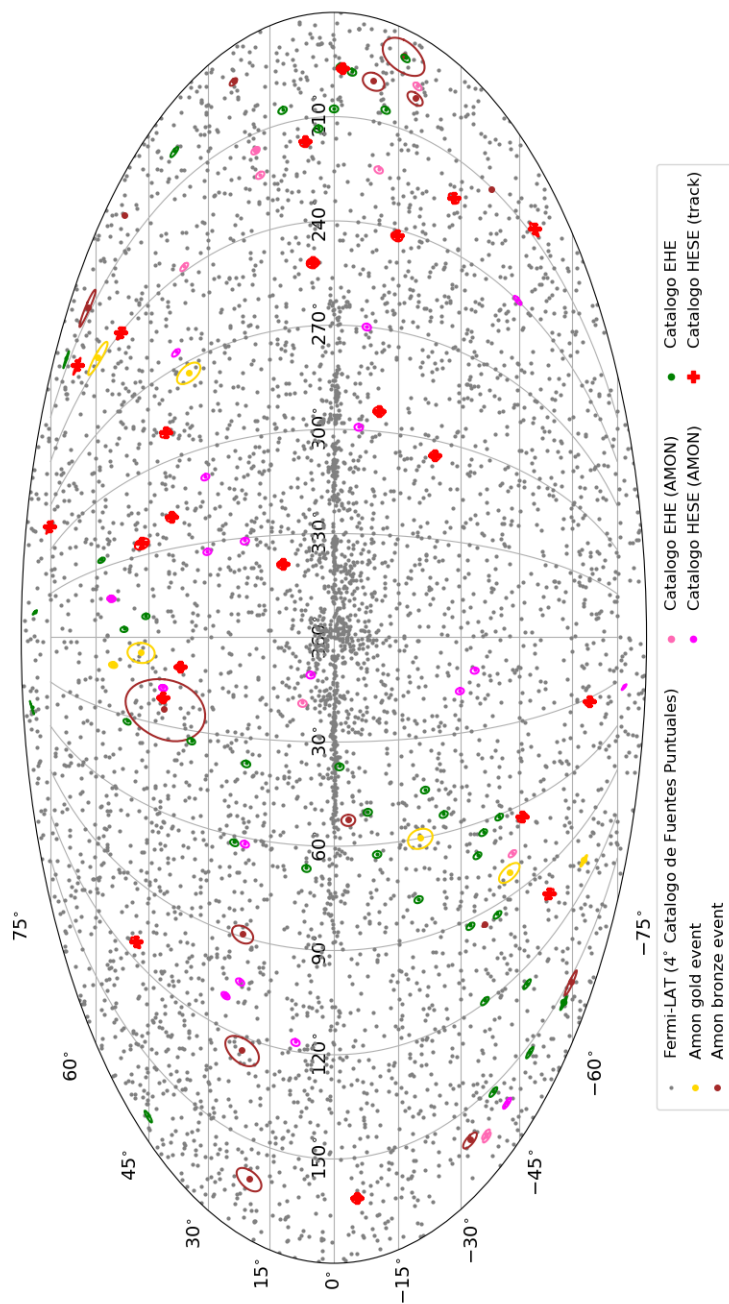


Figura 2.1: Eventos tipos *track* detectados por IceCube. En puntos rojos, eventos reportados en el catálogo HESE, en verde, los del catálogo EHE. En rosa y magenta los neutrinos EHE y HESE reportados en GCNs. Los neutrinos de alertas tipo *Golden* y *Bronze* en colores oro y bronce respectivamente. Finalmente, en puntos grises están representadas las fuentes puntuales detectadas por Fermi-LAT que han sido reportadas en el catálogo 4FGL-DR2.

Hemos tomado en cuenta la fotometría reportada en el 4FGL-DR2 con una resolución de 30 días para la banda de rayos- γ para cada una de las fuentes consideradas dentro de las correlaciones a lo largo de 10 años. Las curvas de luz fotométricas son públicas y están disponibles en la página web de Fermi-LAT².

La distribución espectral de cada fuente en la banda de los rayos γ ha sido obtenido vía el análisis likelihood siguiendo el procedimiento estándar de la colaboración de Fermi-LAT³. Los archivos de datos en crudo y el estado del detector han sido descargados del sitio público Data Server⁴. Estos datos han sido tratados con el algoritmo `pass8`. El conjunto de datos seleccionados están centrados en las posiciones de los neutrinos, enmascarados en un radio de 15° y en el intervalo energético que abarca de 100 MeV a 1 TeV .

El análisis likelihood fue realizado utilizando las `Fermi Science Tools` [Fermi Science Support Development Team, 2019] implementada bajo la interface para python llamada `fermipy` [Wood et al., 2017] en su versión 1.2.0 y con versión 2.2.0 de las `Fermi-tools`. La entrada del análisis likelihood fue realizado vía archivos `yaml`. Un corte en selección a los datos fue aplicada a la posición del neutrino en el rango de energía de 100 MeV a 1 TeV en un radio de 15° . De esta selección de datos, se conservan solo los eventos tipo `source` (es decir `evclass=128`) y eventos del tipo `front+back` de la traza del detector, dentro de todas las PSF y subclases energéticas (`evtype=3`). Nuevamente, los datos seleccionados se mantuvieron en el rango energético de 100 MeV a 1 TeV y cumpliendo la condición de filtrado `(DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)` recomendado por la colaboración de LAT en los intervalos de tiempo en los cuales se garantiza que el instrumento está en un correcto funcionamiento y que la fuente de interés estuviera en el campo de visión del instrumento. Se seleccionó una región de interés de 10° la cuál fue binneada en regiones de tamaño de 0.1° y considerados ocho *binnes* energéticos por décadas de energías. Las plantillas para la emisión difusa galáctica y el modelo isotropico difuso utilizados son `gll_iem_v07.fits` y `iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt` respectivamente.

²https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/10yr_catalog/ap_lcs.php

³https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/binned_likelihood_tutorial.html

⁴<https://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>

3 Análisis

Una correlación espacial fue realizada entre las fuentes detectadas por Fermi-LAT y los neutrinos detectados por IceCube descritos en la sección anterior. La intención de esta correlación es encontrar potenciales contrapartes electromagnéticas a los neutrinos. Para ello, hemos considerado la mejor posición reconstruida del neutrino y la incertidumbre reportada a la mejor posición. Consideramos que existe una correlación espacial si la separación angular entre la posición del neutrino y la fuente en rayos γ es menor que el radio de incertidumbre. Hemos encontrado ocho correlaciones espaciales entre neutrinos y FSRQ. Las fuentes correlacionadas se encuentran listadas en la tabla 3.1.

Por completitud hemos calculado la probabilidad de que un quásar se encuentre dentro de la región de error del neutrino por serendipia, es decir, que la correlación espacial sea por coincidencia. Para ello, simulamos posiciones de neutrinos aleatoriamente distribuidos uniformemente en la esfera celeste con una distribución $0^\circ \leq b \leq 360^\circ$ para la longitud galáctica, mientras para la latitud galáctica tomamos valores $|b| \leq \arcsin(10^\circ)$. Con esa distribución aleatoria de posiciones realizamos 1000 experimentos sobre la distribución de quásares detectados por Fermi-LAT, de tal modo que definimos la probabilidad por serendipia como el promedio del número de coincidencias entre la cantidad de experimentos realizados. Esta probabilidad y el error a un sigma de esta probabilidad se encuentra reportada en la última columna de la tabla 3.1. Por simplicidad tomamos la incertidumbre de la posición del neutrino de manera simétrica reportada al momento de su detección por IceCube. Notamos que los eventos IceCube-191215A, IceCube-200109A y IceCube-211216A presentan una probabilidad poco significativa de que se encuentren asociados espacialmente. El resto de los eventos superan levemente la barrera de tener una probabilidad menor al 10% de ser eventos productos de la serendipia, de tal modo que la coincidencia espacial no es suficiente evidencia para afirmar que estos quásares son progenitores de los eventos detectados por IceCube.

Las figuras 3.1 y 3.2 muestran las proyecciones en el cielo de los neutrinos detectados por IceCube y que están en coincidencia espacial con algún FSRQ encontrados en este trabajo. En ellas muestran las fuentes de rayos γ en la vecindad de la detección del neutrino, así como también la de sus contrapartes en bandas a menores energías. Las regiones sombreadas denotan las regiones de incertidumbre del neutrino. Las regiones circulares, muestran la región de incertidumbre del neutrino. En el caso de las alertas producto del sistema de notificaciones en tiempo real de neutrinos, una región cuadrilátera grisácea muestran la región de incertidumbre en la revisión de las alertas.

De la muestra de blázares detectados por LAT se encontraron 27 coincidencias espaciales, de las cuáles solo 8 de estos blázares están identificados espectralmente como quásares y han sido reportados por experimentos en frecuencias menos energéticas. Estas asociaciones se encuentran reportadas

Tabla 3.1: FSRQ detectados por Fermi-LAT en coincidencia espacial con neutrinos detectados por IceCube. La primera columna es el nombre de la fuente de rayos γ en el catálogo 4FGL. La segunda columna es la significación estadística media a lo largo de diez años de observaciones del LAT. La tercera columna es el tipo espectral de la fuente, seguido de la frecuencia pico en la protuberancia sincrotrón en la SED. En la quinta columna se indica el índice espectral y en la sexta la luminosidad de cada fuente. El desplazamiento al rojo se indica en la séptima columna. En la octava columna aparece la fuente asociada a la fuente de rayos γ detectada por Fermi-LAT. Mientras, en la novena columna está el neutrino de IceCube asociado al FSRQ seguido por la incertidumbre de la reconstrucción espacial del evento. La siguiente columna es la separación angular entre el neutrino y la fuente de rayos γ . Finalmente, la última columna es la probabilidad por serendipia entre un FSRQ y el neutrino detectado por IceCube considerando la incertidumbre en la localización del neutrino.

Nombre 4FGL	σ_{prom}	Tipo Espectral	ν_{sync} (Hz)	Índice Espectral	Luminosidad (erg s ⁻¹)	z	Contraparte Asociada	IceCube neutrino	Incertidumbre (deg)	Sep. Ang. (deg)	\mathcal{P}
J2226.8+0051	5.45	LSP	5.75×10^{12}	2.53	1.25×10^{47}	2.26	PKS B2224+006	HESE 44	1.20	0.68	0.08 ± 0.015
J1557.9-0001	4.43	LSP	1.72×10^{12}	2.19	6.46×10^{46}	1.77	PKS 1555+001	HESE 76	1.20	0.81	0.08 ± 0.015
J1457.4-3539	64.84	LSP	1.01×10^{13}	2.18	4.92×10^{47}	1.42	PKS 1454-354	IceCube-181014	1.23	1.09	0.09 ± 0.023
J1504.4+1029	230.28	LSP	5.00×10^{12}	2.12	4.65×10^{48}	1.84	PKS 1502+106	IceCube-190730A	1.18	0.31	0.08 ± 0.020
J1858.7+5708	8.01	-	-	2.10	3.70×10^{43}	0.077	87GB 185759.9+570427	IceCube-191215A	2.54	1.88	0.38 ± 0.029
J1103.0+1157	38.03	ISP	1.27×10^{14}	2.30	7.40×10^{46}	0.91	TXS 1100+122	IceCube-200109A	2.91	1.26	0.51 ± 0.040
J0206.4-1151	34.14	LSP	6.92×10^{12}	2.38	2.33×10^{47}	1.66	PMN J0206-1150	IceCube-201130A	1.18	1.07	0.08 ± 0.011
J2108.5+1434	11.19	LSP	6.76×10^{12}	2.70	2.16×10^{47}	2.02	OX 110	IceCube-211216A	1.55	1.61	0.13 ± 0.015

por [Ajello et al., 2022]. Para cada una de estas fuentes se deriva el espectro en el rango energético de 100 MeV a 1 TeV en tres ventanas de tiempo centradas al momento de detección del neutrino por IceCube. La primer ventana de tiempo; semanal, cubriendo una semana antes y una semana posterior a la detección del neutrino, mensual abarcando un mes antes y un mes posterior a la detección del neutrino y finalmente la ventana anual, que abarca un año previo y un año posterior a la detección del neutrino. Esta estrategia ha sido adoptada por el comportamiento observado por el blázar TXS 0506+056 en la detección del flare de neutrinos previa la detección del evento IceCube-170922A [IceCube Collaboration et al., 2018b].

3.1. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J2226.8+0051 y el neutrino HESE 44 detectado por IceCube

IceCube detectó el neutrino HESE 44 el 2014-01-14 21:07:12.00 UTC (56671.88 MJD). La energía depositada en el detector por este neutrino es de aproximadamente $E_\nu = 84.6_{-7.9}^{+7.4}$ TeV. La mejor posición reconstruida para este neutrino es R.A., Dec = 336.7° , 0.0° (J2000) con un error angular medio de 1.20° [Kopper et al., 2015]. Dentro de la región de error de la llegada del neutrino hay una fuente 4LAC reportada, se trata de la fuente emisora de rayos γ 4FGL J2226.8+0051. Esta fuente de rayos γ está situada en R.A., Dec = 336.712° , 0.8622° (J2000). Tiene una separación angular de la posición del neutrino de 0.86° tal como se muestra en la figura 3.1a. Esta fuente de rayos γ está asociada en otras bandas con el FSRQ PKS B2224+006 [Healey et al., 2007]. Esta fuente se encuentra en R.A., Dec = 336.69° , 0.869814° (J2000) con un desplazamiento al rojo $z = 2.25 \pm 0.00058$ [Albaret et al., 2017].

En el momento de la detección del neutrino, no existe un programa de seguimiento multimensajero; por esta razón, sólo tenemos en cuenta las observaciones ópticas y de rayos γ de esta fuente. La figura 3.3 muestra la curva de luz que cubre los rayos ópticos y γ de PKS B2224+006. La banda de rayos

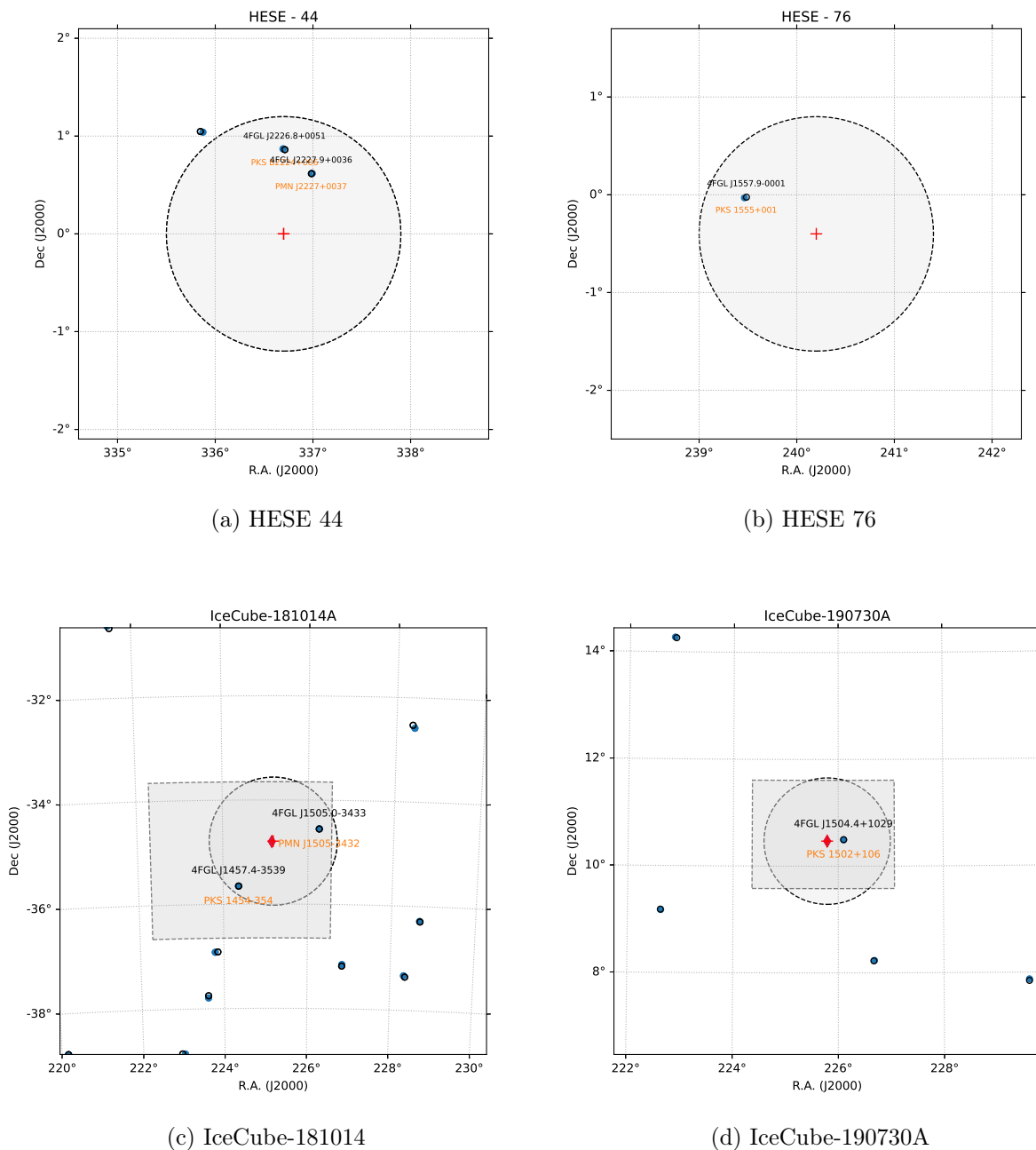
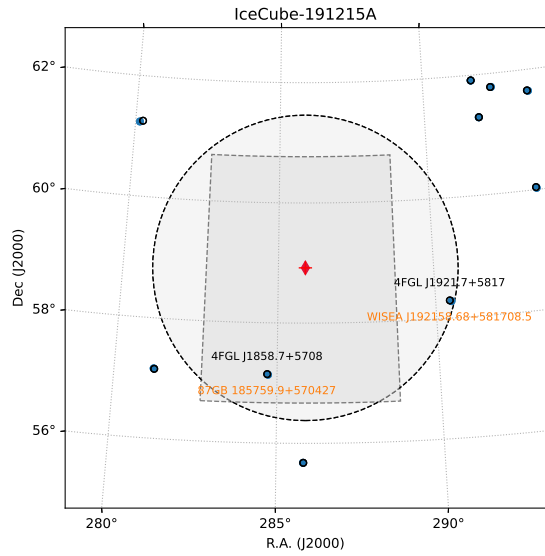
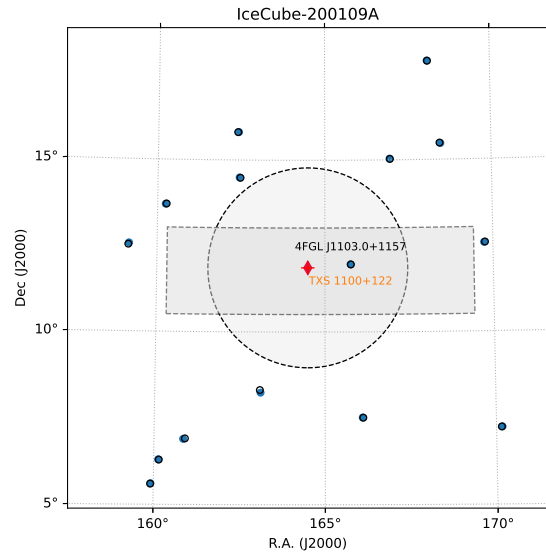


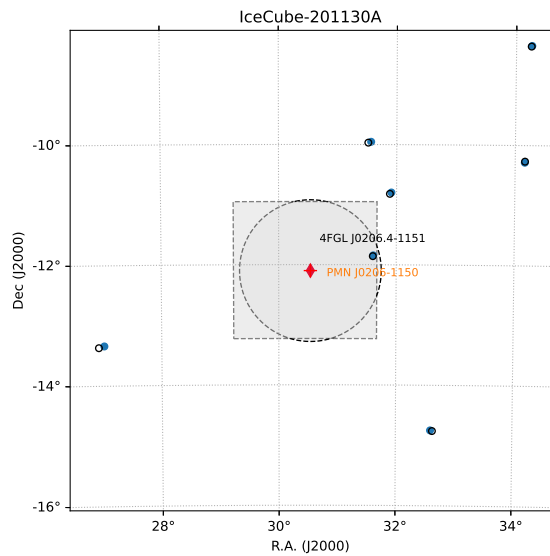
Figura 3.1: Proyección en el cielo en coordenadas ecuatoriales en la posición de arriba de los neutrinos detectados por IceCube. Al centro, en diamante rojo, se representa la mejor posición del neutrino reconstruida. El círculo gris representa la región de incertidumbre reportada en la alerta inicial. El área rectangular en gris representa la incertidumbre del neutrino en la revisión de la alerta. En puntos negros transparentes las fuentes que emiten rayos γ reportadas en el 4LAC. Encima de los puntos en letras color negras el nombre de la fuente del 4LAC. En puntos azules, la contra-parte en bandas menos energéticas y en letras al inferior en color naranja, el nombre de la contraparte a la fuente en rayos γ . Las posiciones corresponden a los eventos, HESE 44, HESE 76, IceCube-181014 y IceCube-190730A.



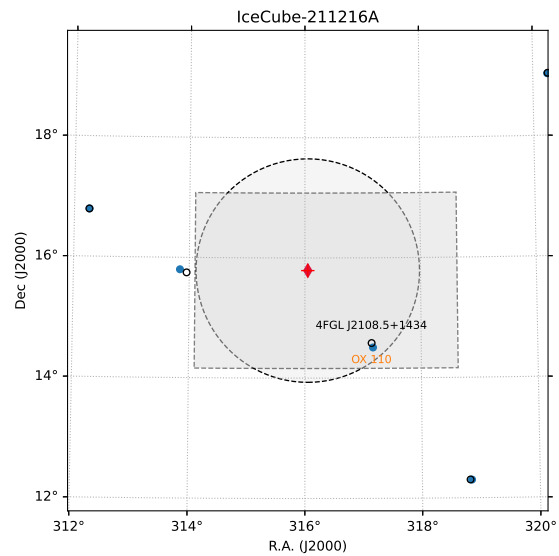
(a) IceCube-191215A



(b) IceCube-200109A



(c) IceCube-201130A



(d) IceCube-211216A

Figura 3.2: Igual que la figura 3.1, pero para los eventos; IceCube-190730A, IceCube-200109A, IceCube-201130A y IceCube-211216A

γ no muestra un aumento de actividad dentro de la media de 1σ (franja naranja) alrededor de la llegada del neutrino (línea roja vertical). Mientras tanto, la banda óptica no tiene observaciones de esta fuente en el momento de la detección del neutrino.

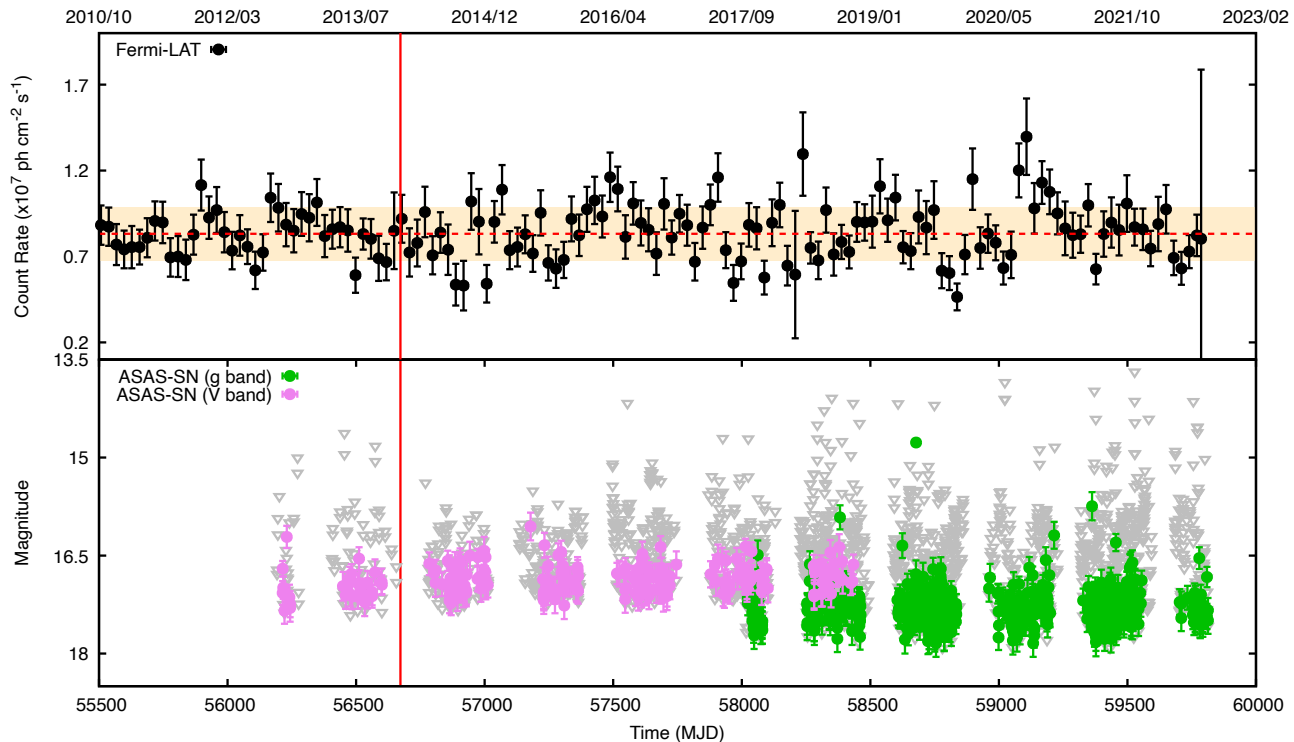


Figura 3.3: Curva de luz de PKS B2224+006. El panel superior muestra las observaciones Fermi-LAT en el rango de energía de 100 MeV hasta 200 GeV. La línea horizontal roja discontinua es el flujo medio en el comportamiento a largo plazo. Mientras tanto, la franja naranja denota 1σ sobre el flujo medio. El panel inferior muestra la banda óptica de esta fuente. La banda g se muestra en puntos verdes, y en puntos violetas se representa la banda V. Los límites superiores de estas observaciones se muestran como triángulos grises invertidos. Ambas bandas proceden de ASAS-NS. La línea roja vertical es el tiempo de llegada del neutrino a IceCube.

3.2. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J1557.9-0001 y el neutrino HESE 76 detectado por IceCube

La detección del neutrino HESE 76 fue realizada por IceCube el 2015-09-11 a las 13:40:48.00 UTC (57276.57 MJD) con una energía depositada en el experimento de $E_\nu = 126.3_{-12.7}^{+12.0}$ TeV. El ajuste de la mejor posición reconstruida para este neutrino fue R.A., Dec = 240.2° , -0.4° (J2000) con un error angular medio de 1.2° [Kopper and IceCube Collaboration, 2017]. Se identifica la presencia de una fuente reportada en el 4LAC dentro de la incertidumbre de la región de posición del neutrino, se trata de la fuente de rayos γ 4FGL J1557.9-0001. Esta fuente está situada en R.A., Dec = 239.48° , -0.02° (J2000) con una separación angular de 0.81° de la mejor posición reconstruida del

neutrino. Esta correlación se muestra en la figura ???. La fuente de rayos γ está asociada al FSRQ PKS 1555+001 [Healey et al., 2007] situado en R.A., Dec = 239.46°, -0.03° (J2000) [Johnston et al., 1995] con un desplazamiento al rojo de $z = 1.77000$ [Gattano et al., 2018].

Similarmente a la detección del neutrino HESE 44 mencionada anteriormente, no hubo un programa de seguimiento en tiempo real para encontrar la contra-parte electromagnética del neutrino. La curva de luz del objeto PKS 1555+001 en rayos γ y óptico se muestra en la Figura 3.4. El flujo de rayos γ observado no muestra un aumento de la actividad. El comportamiento del flujo en el momento de la llegada del neutrino a IceCube tiende en la media general histórica dentro de 1σ .

Además de esto, los datos ópticos si muestran un aumento del flujo de esta fuente. Los datos del Southern Sky Survey Mapper muestran un aumento en las bandas *griz* previo a la llegada del neutrino a IceCube. En concreto, se observa un pico en el filtro z antes de la detección temporal del neutrino que disminuye exponencialmente y aumenta moderadamente una vez detectado el neutrino. Este comportamiento también puede apreciarse en banda V en los datos de ASAS-SN.

3.3. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J1457.4-3539 y el neutrino IceCube-181014A detectado por IceCube

El 2018-10-14 a las 11:52:19.07 UTC (MJD 58405.49), IceCube detectó la traza del neutrino IC181014A a través de la selección de eventos AMON-HESE. La mejor posición reconstruida para este evento tras aplicar sofisticados algoritmos de reconstrucción sobre la alerta inicial fue R.A., Dec = $225.15^{+1.40^\circ}_{-2.85^\circ}$, $-34.80^{+1.15^\circ}_{-1.85^\circ}$ (J2000) [IceCube Collaboration, 2018] con una energía $E_\nu = 62$ TeV [Abbasi et al., 2023]. Dentro de la región de error de posición del neutrino se reporta la fuente emisora de rayos γ Fermi-LAT 4FGL J1457.4-3539 situada en R.A., Dec = 224.36°, -35.65° con una separación angular de 1.09° de la posición del neutrino mejor reconstruida, tal se aprecia en la figura 3.1c. Esta fuente está asociada al FSRQ PKS 1454-354 situado en R.A., Dec = 224.36°, -35.65° (J2000) [Fey et al., 2006] con un desplazamiento al rojo $z = 1.42$ [Gattano et al., 2018]. Para este neutrino, se hizo un seguimiento deficiente para buscar una contraparte electromagnética realizado por el satélite Fermi. En el momento de la detección, la posición del neutrino para Fermi-LAT estaba oculta por la Tierra. El instrumento LAT busca en escalas de tiempo de meses a años para encontrar una nueva fuente transitoria de rayos γ sin encontrar ninguna fuente emisora de rayos γ nueva con una significancia estadística superior a 5σ . Se colocó un límite superior de flujo de fotones a energías >100 MeV alrededor de 4.5×10^{-8} (2.74×10^{-8}) ph cm⁻² s⁻¹ a 1 día (7 meses) antes del tiempo de disparo del neutrino [Venters et al., 2018]. La figura 3.5 muestra el comportamiento de PKS 1454-354 a lo largo de 13 años. Las curvas de luz de Fermi-LAT, Swift-BAT, Swift-XRT, Southern Sky Survey y ASAS-SN se muestran de arriba a abajo. A lo largo de esas longitudes de onda, esta fuente no muestra un aumento de actividad en el momento de llegada del neutrino; se observa un discreto incremento en la banda de rayos γ . Este incremento es apenas más significativo que 1σ (mostrado como una banda horizontal naranja en la figura) en el flujo medio de fotones de esta fuente.

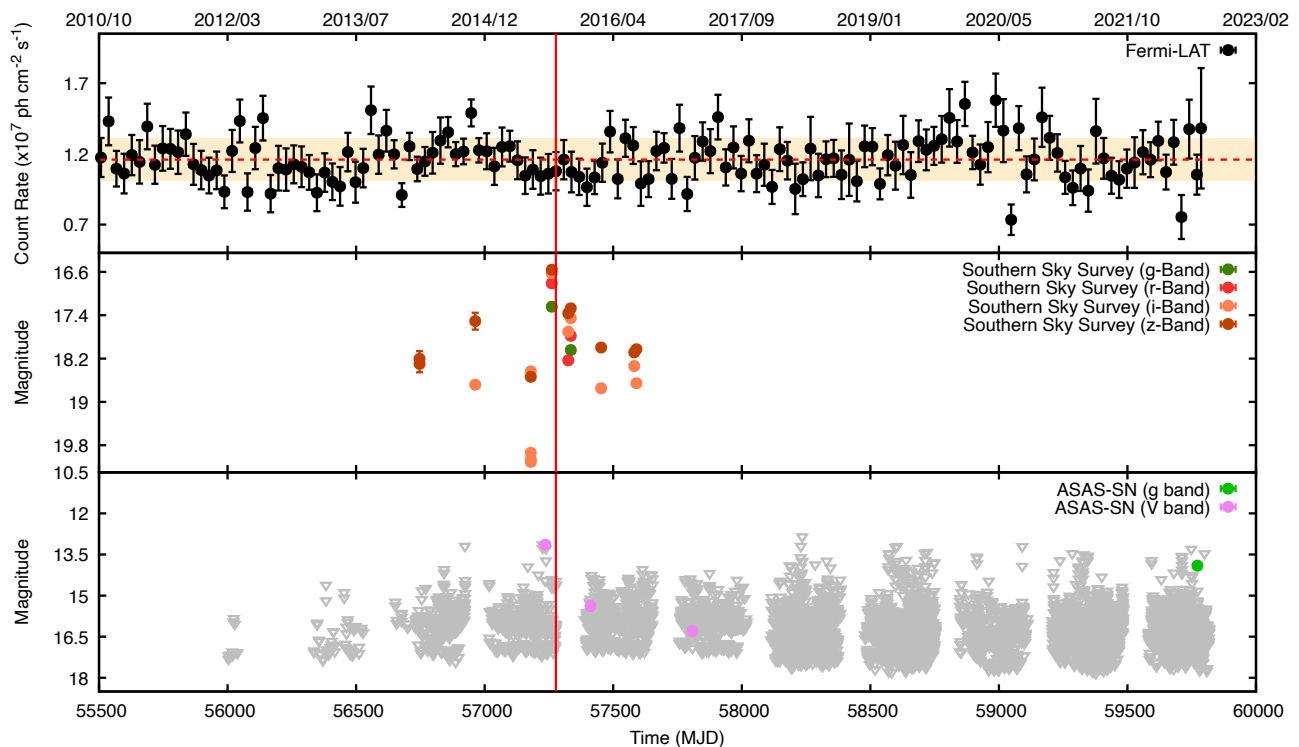


Figura 3.4: Curva de luz de PKS 1555+001. El panel superior muestra las observaciones Fermi-LAT en el rango de energía de 100 MeV a 200 GeV. La línea horizontal roja discontinua es el flujo medio en el comportamiento a largo plazo, mientras que la franja naranja denota 1σ sobre el flujo medio. El panel central muestra datos ópticos del Southern Sky Survey en las bandas g (puntos verdes), r (puntos rojos), i (puntos melocotón) y z (puntos marrones). El panel inferior muestra la banda óptica de esta fuente. En los puntos verdes se muestra la banda g, y en los puntos violetas se representa la banda V. Los límites superiores de estas observaciones se muestran como triángulos grises invertidos. Ambas bandas proceden de ASAS-NS. La línea roja vertical es el tiempo de llegada del neutrino a IceCube.

3.4. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J1504.4+1029 y el neutrino IceCube-190730A detectado por IceCube

El 2019-07-30 a las 20:50:41.31 UTC (MJD 58694.86) IceCube alertó por medio del canal *Golden* la detección del neutrino IceCube-190730A. La mejor posición reconstruida para este neutrino es R.A., Dec = $225.79^{+1.28}_{-1.43}$, $10.47^{+1.14}_{-0.89}$ (J2000) tras aplicar sofisticados algoritmos a la alerta original. Este evento presentó una probabilidad del 67% de tener un origen astrofísico y con una energía $E_\nu = 298$ TeV. Esta alerta tiene un FAR = 0.68 eventos por año debido al fondo atmosférico [IceCube Collaboration, 2019a]. Dentro de la región de error de llegada, hay una fuente de rayos γ reportada en el 4LAC, la 4FGL J1504.4+1029 situada en R.A., Dec = 226.10° , 10.49° (J2000) manteniendo una separación angular de la posición del neutrino de 0.31° , esta correlación espacial se observa en la figura 3.1d. Este emisor de rayos γ se identifica con el FSRQ PKS 1502+106 en bandas menos energéticas. Esta fuente se encuentra localizada en R.A., Dec = 226.10° , 10.49° (J2000) [Johnston et al., 1995] con un corrimiento al rojo de $z = 1.837 \pm 0.0001$ [Albaret et al., 2017].

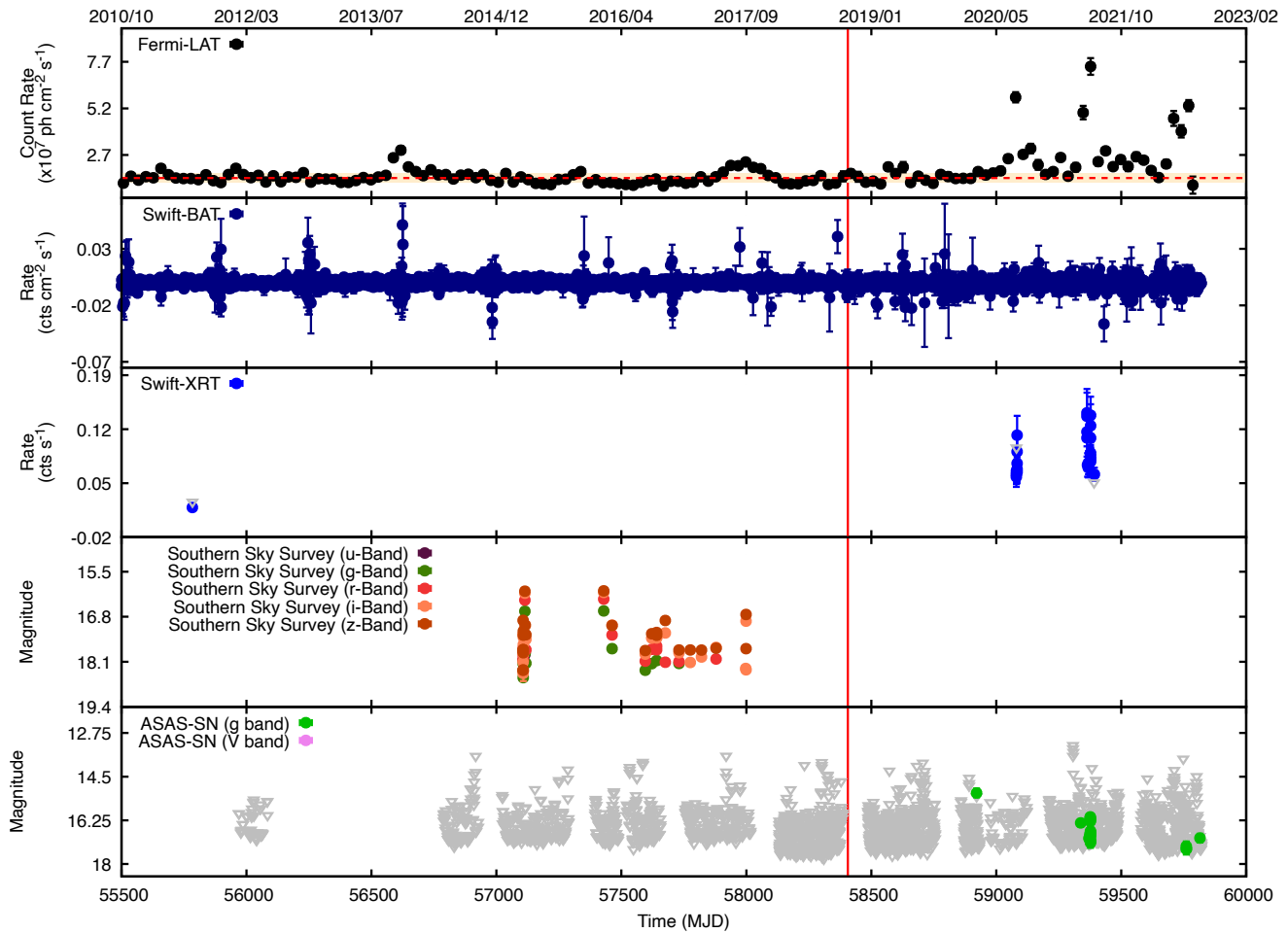


Figura 3.5: Curva de luz en múltiples longitudes de onda de PKS 1454-354. En el panel superior se muestran en puntos negros las observaciones Fermi-LAT de esta fuente en el rango de energía de 100 MeV a 200 GeV; la línea roja discontinua muestra la tasa de recuento media de esta fuente encerrada con una banda naranja que representa 1σ de la media, seguida de la tasa detectada por los experimentos Swift-BAT y Swift-XRT, en puntos azul marino y azul, respectivamente. Los datos ópticos tomados del Southern Sky Survey en las bandas u (púrpura), g (verde), r (rojo), i (naranja) y z (marrón) y las bandas ASAS-SN g(verde) y V (violeta) se muestran en los dos paneles inferiores. Los triángulos grises representan los límites superiores obtenidos por el experimento ASAS-SN. Una línea roja vertical representa el tiempo de llegada del neutrino al experimento IceCube.

Una vez emitida la alerta, se realizó un seguimiento de los observatorios electromagnéticos en varias bandas. En el filtro de banda L cubierto por GOTO, no se aprecia actividad óptica notable de PKS 1502+106 al momento de la detección del neutrino [Steeghs et al., 2019]. Los telescopios MASTER-Tavrida y MASTER-IAC siguieron el evento tras 63 y 89 segundos desde el momento de la alerta, respectivamente, colocando límites superiores en la magnitud de 18 mag y 20 mag, respectivamente [Lipunov et al., 2019a]. Mientras tanto, Integral se situó en 81° a partir de la localización del neutrino en la banda de rayos X. Ello implica una fuerte respuesta suprimida de sus detectores y la presencia de excesivas variaciones del fondo, lo que aumenta la probabilidad de asociación espuria de homólogos. Asumiendo los espectros típicos de un estallido largo de rayos gamma, situaron un límite superior al flujo de 4.7×10^{-8} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ en el rango de energía de 75-2000 keV a T0+30 segundos [Ferrigno et al., 2019]. En rayos γ de altas energías, HAWC no encontró detección en una posible contrapartida electromagnética, y la significancia estadística máxima encontrada fue de 2.38σ en R.A., Dec = 226.5° , 10.35° (J2000), colocando un límite superior al flujo de 1.251×10^{-11} (E/TeV) $^{-0.3}$ TeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ [Galván et al., 2019].

La figura 3.6 muestra el comportamiento de trece años de PKS 1502+106 visto en varias multilongitudes de onda. A primera vista, en el momento de la detección del neutrino (línea roja vertical en la figura), la banda de rayos γ (panel superior) muestra un estado de reposo en comparación con los estados de *flare* en 2010. Se aprecia un incremento en su actividad desde diciembre de 2014 hasta febrero de 2019 y la actividad de mayor flujo en junio de 2020. La línea roja discontinua horizontal muestra la emisión media entre las observaciones históricas del Fermi-LAT excluyendo los estados de erupción; mientras tanto (y solo para este caso), la franja naranja muestra el 2σ de la emisión media.

Este estado de reposo es observable en la banda de los rayos X. En el caso de Swift-BAT, la posición del neutrino estaba fuera del campo de visión del detector, y en el caso de Swift-XRT, este instrumento no mostró un aumento de la actividad de esta fuente [Santander et al., 2019]. Adicionalmente a esto, en bandas ópticas, no muestran un aumento de flujo, mientras que, en bandas de radio, este objeto muestra un incremento considerable en el flujo detectado. Los datos históricos de OVRO y Metsähovi a 15 GHz y 37 GHz [Hovatta et al., 2021], respectivamente, muestran un incremento de actividad en los datos de radio que cae previamente en la detección de neutrinos. Este comportamiento también se observó en el blázar TXS0506+056 previamente a la detección del neutrino IceCube-190722A [IceCube Collaboration et al., 2018a]. En la misma dirección a la detección del neutrino, el observatorio VLBA detecta a 15 GHz un alto flujo en la polarización lineal y la densidad de flujo Stokes I total. Por otro lado, el flujo de polarización lineal disminuye drásticamente la densidad de flujo de Stokes en cambio sigue creciendo. Este comportamiento se refleja en el panel inferior de la figura 3.6 donde se aprecia un posible pico en la polarización que cae drásticamente después de detectar el neutrino por IceCube; mientras tanto, el Ángulo de Posición del Vector Eléctrico disminuye lentamente.

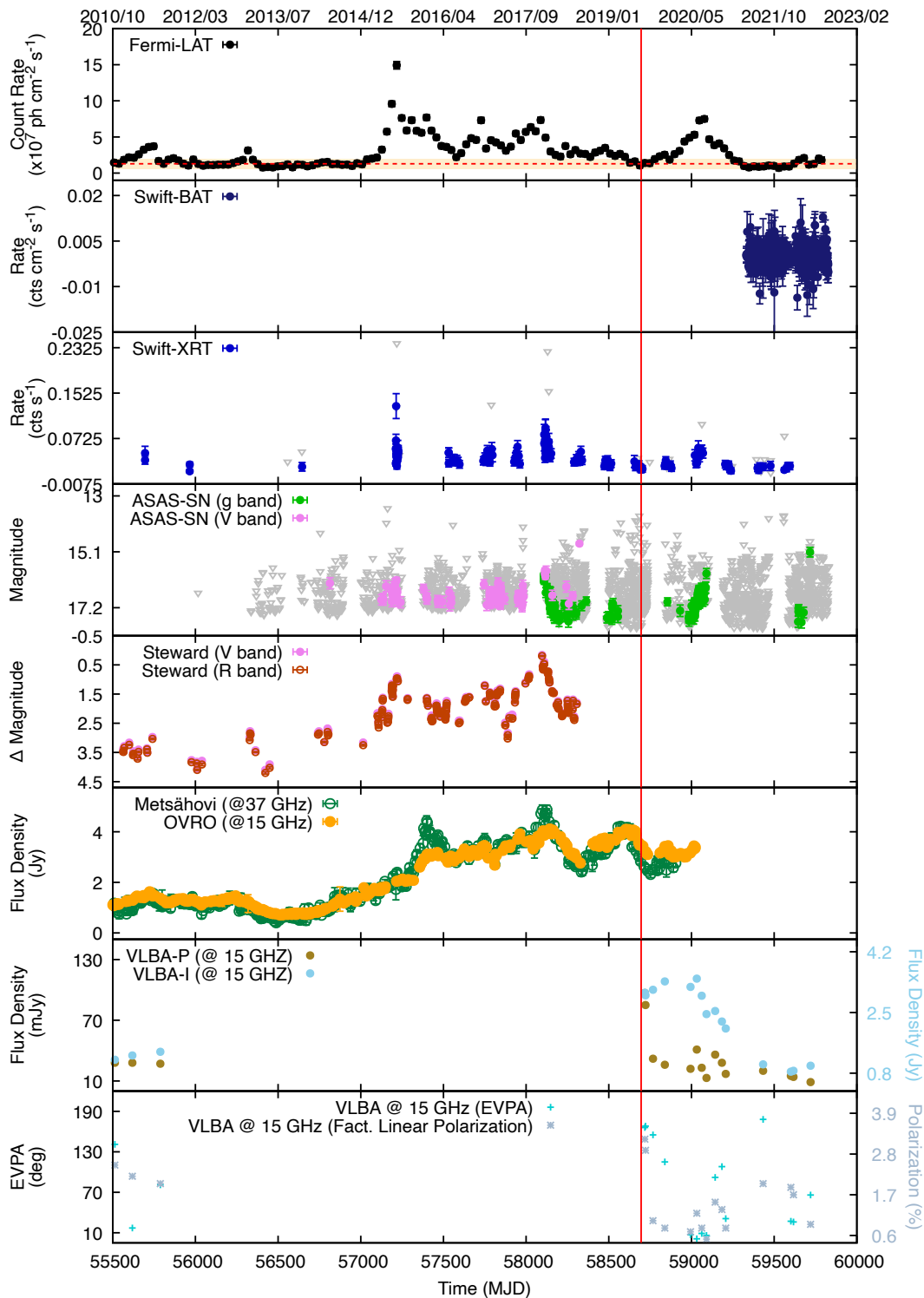


Figura 3.6: Curva de luz multifrecuencia de PKS 1502+106 en 13 años. En el panel superior, la tasa Fermi-LAT detectada de esta fuente en el rango de energía de 100 MeV a 200 GeV, seguida de la tasa detectada por Swift-BAT y Swift-XRT, respectivamente. En los paneles centrales se muestran los datos ópticos registrados por ASAS-SN (bandas g y V) y Steward (bandas V y R). En los paneles inferiores, datos de radio de Metsähovi y datos OVRO tomados de [Hovatta et al., 2021], seguidos de datos tomados de VLBA. Una línea roja vertical representa el tiempo de llegada del neutrino a IceCube. En el texto se ofrece una descripción detallada.

3.5. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J1858.7+5708 y el neutrino IceCube-191215A detectado por IceCube

IceCube reportó la detección del neutrino IceCube-191215A el 2019-12-15 a las 11:09:57.63 UTC (MJD 58832.465) como un evento tipo *track* bajo el sistema de alerta *bronze*. La posición mejor reconstruida para este evento es R.A., Dec = $285.87^{\circ}_{-3.19}$, $58.92^{\circ}_{-2.25}$ (J2000). Este evento presentó una probabilidad del 47 % de ser astrofísico y una tasa de falsa alarma de 0.34 eventos por año debido al fondo atmosférico. La energía de este neutrino fue $E_{\nu} = 132$ TeV [IceCube Collaboration, 2019b]. Dentro de la región de error de la posición del neutrino hay una fuente reportada en el 4LAC, se trata de la fuente emisora de rayos γ 4FGL J1858.7+5708 situada en R.A., Dec = 284.69° , 57.14° (J2000), manteniendo una distancia angular respecto a la posición del neutrino de 1.88° tal como se observa en la figura 3.2a. Esta fuente está asociada al FSRQ 87GB 185759.9+570427 [D’Abrusco et al., 2014] que es una BCU. Esta fuente se sitúa en A.R., Dec = $284,72^{\circ}$, $57,13^{\circ}$ (J2000) [Condon et al., 1998] con un desplazamiento al rojo $z = 0.077$ [Abdollahi et al., 2020]. La curva de luz histórica de 4FGL J1858.7+5708 que se muestra en la figura 3.7, la emisión en rayos γ en el panel superior, no muestra un aumento de la actividad con respecto a la media dentro de 1σ en la emisión histórica. En la banda óptica también muestra un comportamiento en actividad baja.

A la llegada del neutrino, la colaboración de Fermi-LAT escaneó la vecindad del neutrino; en escalas de tiempo de un día y un mes antes del momento de detección del neutrino. En dicha búsqueda no se encontró un exceso significativo en rayos γ que de evidencia de actividad de esta fuente en ese periodo de tiempo. En escalas temporales de meses a años, no encuentran un nuevo exceso de emisión debido a una nueva fuente de rayos γ con energías >100 MeV. Se colocó un límite superior en la posición del neutrino mejor ajustada de 4.2×10^{-8} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ a un día y 1.0×10^{-8} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ a un mes [Garrappa et al., 2019]. En rayos γ suaves, el campo de visión de INTEGRAL difería de 28° respecto a la mejor posición reconstruida del neutrino; esto implica una respuesta fuertemente suprimida de sus instrumentos. En el momento de la detección del neutrino, no encontraron ninguna contrapartida significativa en el rango de energía de 75-2000 keV, situando un límite superior en torno a 3.4×10^{-7} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ en un segundo y 1.0×10^{-7} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ a los ocho segundos suponiendo un GRB largo típico [Gotz et al., 2019]. Después de 62 segundos tras el tiempo de *trigger*, el telescopio Master-Tunka apunta a la posición de la región de neutrinos, colocando un límite superior de 15 mag. Del mismo modo, el telescopio MASTER-Amur apunta a la posición del neutrino 248 segundos después del tiempo de disparo, colocando un límite superior de 17.7 mag [Lipunov et al., 2019b].

3.6. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J1103.0+1157 y el neutrino IceCube-200109A detectado por IceCube

El 2020-01-09 a las 23:41:39.94 UT (MJD 58857.987), a través del sistema de alerta *Golden*. IceCube detectó el neutrino con topología tipo *track* IceCube-200109A. Este evento tiene una señal de 0.769 y una tasa de falsas alarmas de 0.64 eventos por año debido a fondo atmosféricos. La posición mejor reconstruida para este neutrino es R.A., Dec = $164.49^{\circ}_{-4.19}$, $11.87^{\circ}_{-1.36}$ (J2000) [IceCube Collaboration, 2020a]. Dentro de la región de error del neutrino se reporta la fuente de rayos- γ 4FGL J1103.0+1157 situada en R.A., Dec = 165.77° , 11.96° (J2000) con una separación angular de 1.26°

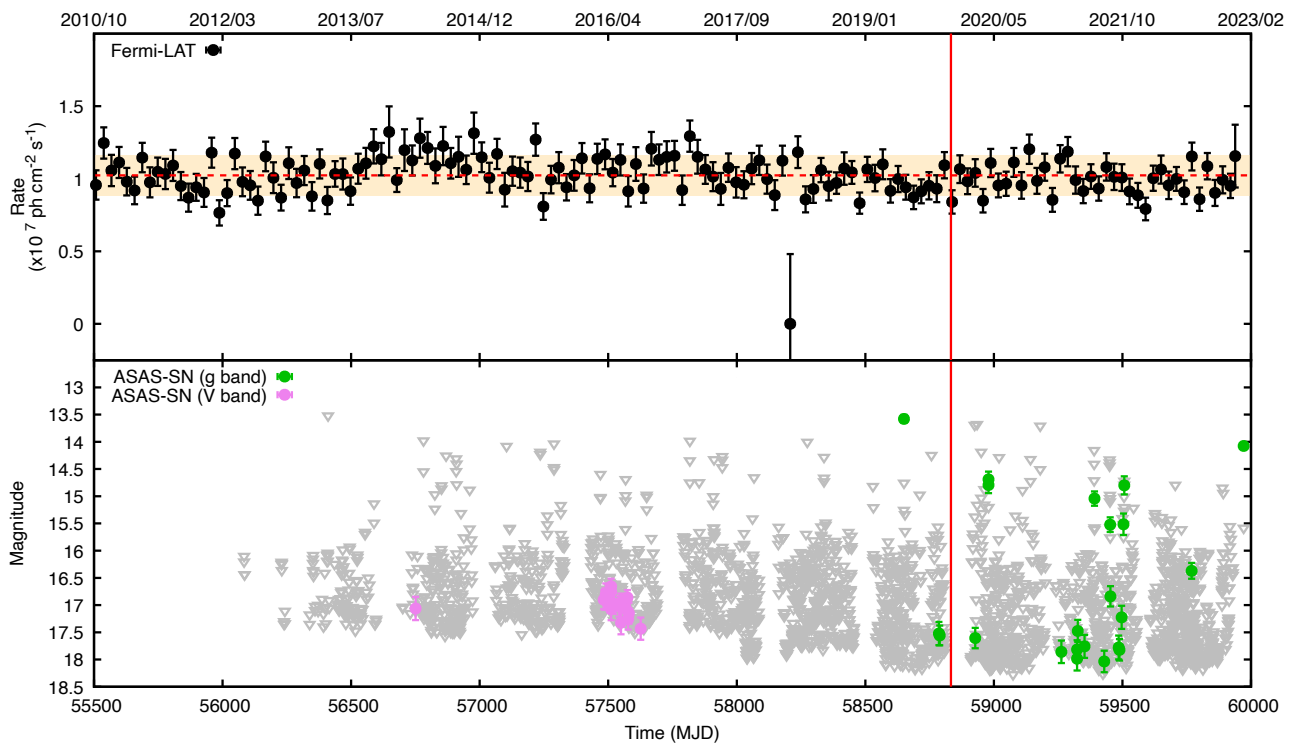


Figura 3.7: Curva de luz histórica de 87GB 185759.9+570427. En el panel superior, se muestra la curva de luz Fermi-LAT en el rango de energía de 100 MeV hasta 200 GeV. La línea roja horizontal discontinua representa la emisión media, mientras que la franja naranja muestra 1σ del flujo medio. El panel inferior muestra la banda óptica, detectada por ASAS-SN. Este objeto también muestra en el óptico un comportamiento quiescente. La línea roja vertical indica la hora de llegada del neutrino al detector IceCube.

de la posición del neutrino tal como se aprecia en la figura 3.2b. Esta fuente está asociada al FSRQ TXS 1100+122. Esta fuente se encuentra en R.A., Dec = 165.76°, 11.97° (J2000) [Petrov et al., 2005] con un desplazamiento al rojo de $z = 0.912 \pm 0.00011$ [Albaret et al., 2017].

Una vez enviada la alerta a los observatorios se realizó una campaña de seguimiento en múltiples longitudes de onda. El telescopio robótico MASTER-Tavrida apuntó en la dirección de mejor ajuste del neutrino 75 segundos después del momento del *trigger*, situando un límite superior de 16.1 mag. Del mismo consorcio, el telescopio robótico MASTER-IAC apunta a la dirección del neutrino 105 segundos después del momento del *trigger*, colocando un límite superior de 17.0 mag [Lipunov et al., 2020a]. En el momento del *trigger* del neutrino, Fermi-GBM estaba observando la posición del neutrino. No había ningún disparo a bordo alrededor del momento del evento del candidato a neutrino y no se encontró una señal significativa de una posible contrapartida electromagnética de la detección del neutrino.

GBM colocó un conjunto de límites superiores en tres ventanas temporales diferentes, asumiendo tres índices espectrales en las plantillas de estallidos de rayos gamma. Suponiendo un espectro suave de los límites superiores establecidos fueron de $(7.3; 2.1; 0.4) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos respectivamente, entonces, suponiendo un espectro típico los límites superiores fueron de $(11.0; 2.8; 0.6) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos y, por último, considerando un espectro duro, los límites superiores colocados fueron de $(16.0; 3.6; 1.2) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos [Wood and Fermi-GBM Team, 2020].

El telescopio Swift observó la región de arriba del neutrino ~ 6 horas después del *trigger*. Centrado en R.A., Dec = 164.49°, 11.87° con un radio de 66', el instrumento XRT observó durante ~ 230 segundos en modo PC. No se detectaron fuentes transitorias significativas, pero sí dos fuentes de rayos X. La primera, HEI 155, es un sistema estelar múltiple, y la fuente de rayos X 1RXS J110123.1+123524. Se estableció un límite superior al flujo en el intervalo de energía 0.3-10 keV de $1.2 \times 10^{-12} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para un espectro típico de un AGN con un índice espectral de 1.7 y $n_H = 3.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$. Al mismo tiempo que las observaciones XRT, el experimento UVOT apunta a la región de neutrinos con una exposición de ~ 219 segundos. UVOT no encontró ninguna fuente transitoria y estableció un límite superior al flujo de 18.9 mag [Evans et al., 2020].

La región del cielo de la llegada del neutrino cae en el campo de visión de HAWC en el momento del disparo. Considerando una ventana de tiempo que cubre al tránsito que comienza el 2020-01-08 13:01:36 (UTC), y termina el 2020-01-10 13:29:43 (UTC). La mayor significación detectada por HAWC fue de aproximadamente -1.76σ *post-trial* en R.A., Dec = 164.0°, 11.15° (J2000) colocando un límite superior al flujo en $1.12 \times 10^{-11} (\text{E/TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. No se encontró ningún exceso nuevo en una búsqueda de archivo de los datos de HAWC desde noviembre de 2014 hasta noviembre de 2019. La significancia estadística más alta encontrada fue de 0.89σ *post-trials* en R.A., Dec = 167.39°, 11.03° (J2000) colocando un límite superior al flujo de $3.02 \times 10^{-13} (\text{E/TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [Ayala and HAWC Collaboration, 2020a].

El Zwicky Transient Facility también buscó en la región del cielo desde la dirección del neutrino con el telescopio Palomar de 48 pulgadas. Las observaciones en las bandas *r,g* comenzaron ~ 32.4 horas después del *trigger*. Cubriendo 22.4deg^2 , con una exposición de 300 segundos, se estableció un límite

superior al flujo de 21 mag. La figura 3.8 muestra la curva de luz histórica de TXS 1100+122 en tres regímenes de bandas de energía, rayos- γ , óptico y radio, respectivamente, de arriba a abajo. La curva de luz Fermi-LAT muestra un estado de baja actividad a la llegada del neutrino y exhibe un incremento contenido dentro de 1σ al promedio de la *rate* de conteo histórico. Mientras tanto, en óptico, sólo el telescopio ASAS-SN puso límites superiores. En radio, hay observaciones discretas de los telescopios RFC, MOJAVE, NVSS, FIRST VLASS y VLBI. En el caso de la banda de radio, los telescopios VLBI (4.9, 8.4, 23.5 GHz) y VLASS (3.0 GHz) realizan observaciones post-*trigger*, pero no está clara la naturaleza del comportamiento de estas bandas previo a la detección del neutrino. Datos de radio fueron tomados de [Nanci et al., 2022].

3.7. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J0206.4-1151 y el neutrino IceCube-201130A detectado por IceCube

La detección del neutrino IceCube-201130A se produjo el 2020-11-30 a las 20:21:46.48 UTC (59183.85 MJD) como una alerta tipo *golden*. La posición mejor reconstruida para este neutrino es R.A., Dec = $30.54^{+1.13}_{-1.31}$, $-12.09^{+1.15}_{-1.13}$ (J2000) con una energía $E_\nu = 203$ TeV. Este evento presentó una probabilidad de ser de origen astrofísico de al menos el 50 % y un FAR de 1.32 eventos por año debido a fondos atmosféricos [IceCube Collaboration, 2020b]. Dentro de la región de error de la posición del neutrino, se localiza en R.A., Dec = 31.60° , -11.85° (J2000) la fuente emisora de rayos γ reportada en el 4LAC, se trata de la fuente 4FGL J0206.4-1151 manteniendo una separación angular de 1.07° de la posición del neutrino, ésta correlación se muestra en la figura 3.2c. Esta fuente de rayos γ está asociada al FSRQ PMN J0206-1150 situado en R.A., Dec = 31.60° , -11.84° (J2000) con un corrimiento al rojo de $z = 1.663$ [Healey et al., 2008].

En el momento de la detección del neutrino, se llevó a cabo una amplia campaña para encontrar una posible contraparte electromagnética del neutrino. El telescopio MASTER-IAC apuntó a la región de arriba del neutrino 82 segundos después del disparo situando un límite superior de 17.2 mag; por su parte, el telescopio MASTER-SAAO buscó en la dirección del neutrino 101 segundos después del momento del disparo, colocando un límite superior al flujo de 17.8 mag [Lipunov et al., 2020b]. Fermi-LAT escaneó la región de error de neutrinos y no encontró ningún exceso significativo superior a 5σ en la emisión de rayos γ a escalas temporales de un día. Un análisis preliminar con escalas temporales de días a años no encontró ningún exceso significativo superior a 5σ con energías $E_\gamma > 100$ MeV en la posición del neutrino. Suponiendo un espectro de ley de potencia con índice espectral = 2, imponiendo un límite superior al flujo en 6.3×10^{-10} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ para un tiempo de ~ 12 años. Para escalas temporales de un mes y un día, los límites superiores al flujo se situaron a 1.4×10^{-8} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ y 1.4 ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$ respectivamente previo a la detección del neutrino [Garrappa et al., 2020].

La misión Swift escanea la fuente 4FGL J0206.4-1151 localizada en la región de neutrinos detectada por LAT. El instrumento XRT detecta un flujo no absorbido de alrededor de $1.6^{+1.1}_{-0.4} \times 10^{-13}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ en el rango de energía de 0.3-10 keV. Mientras tanto, el instrumento UVOT informa de que esta fuente se detecta por encima de 3σ en todas sus bandas, con las magnitudes V = 19.48 ± 0.42 mag, B = 19.68 ± 0.21 mag, U = 18.99 ± 0.17 mag, W1 = 19.24 ± 0.18 mag, M2 = 19.30 ± 0.11 mag, W2 = 19.21 ± 0.11 mag [Gregoire et al., 2020]. La posición de mejor

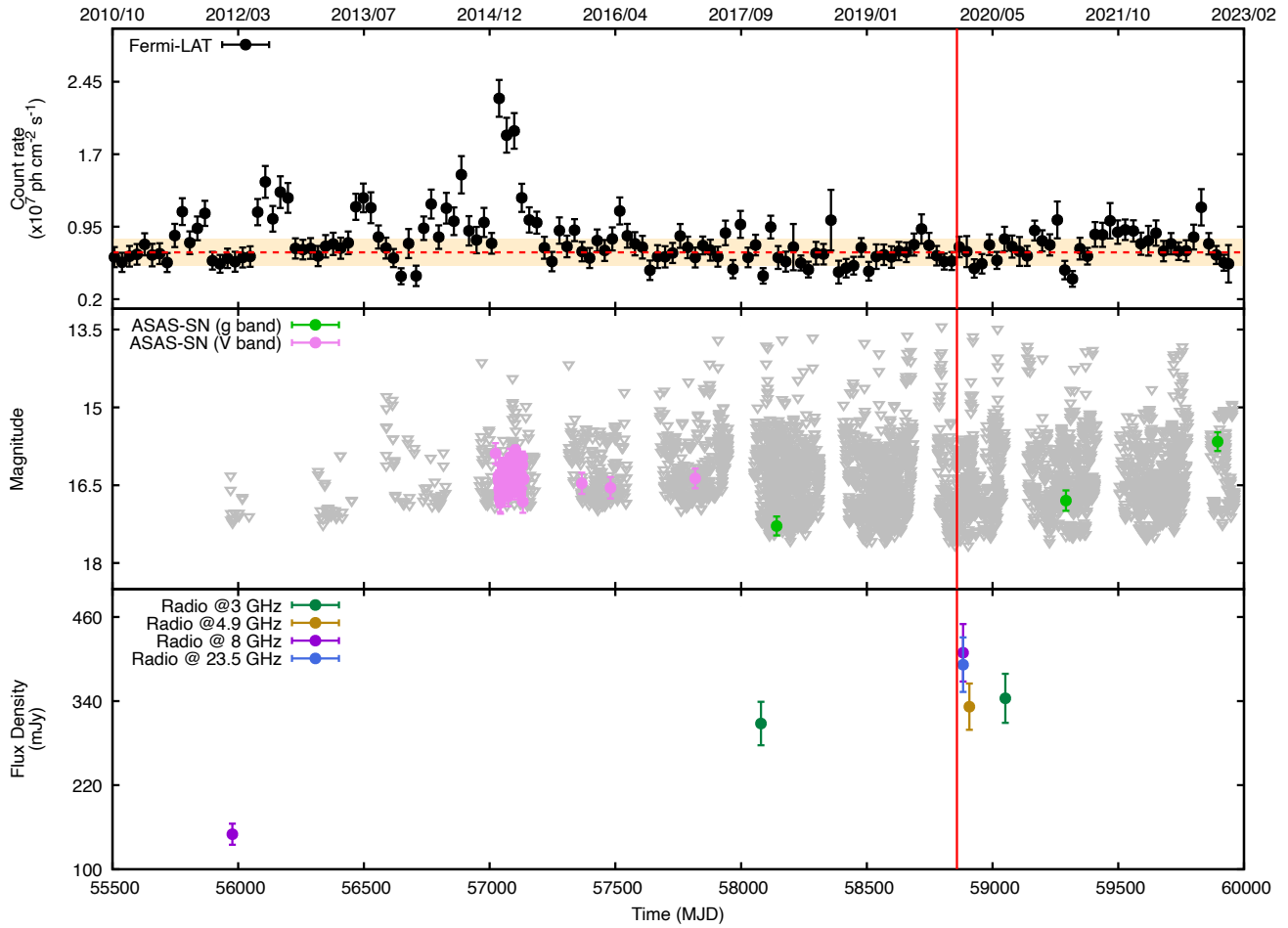


Figura 3.8: Curva de longitud de onda múltiple de TXS 1100+122. En el panel superior se muestra la tasa de fotones detectados por LAT de esta fuente en el rango de energía de 100 MeV a 200 GeV. La línea roja discontinua representa la emisión promedio en 13 años de adquisición de datos encerrada en una banda naranja que enmarcar 1σ de la emisión promedio. En el panel central, los datos ópticos se tomaron de ASAS-SN en banda g (verde) y banda V (violeta). Por último, en la parte inferior, los datos de radio tomados para VLBI en 3.0, 4.9, 8.0 y 23.5 GHz. Los datos de radio están tomados de [Nanci et al., 2022]. La línea roja vertical representa el tiempo de llegada del neutrino al detector IceCube.

ajustada del neutrino estaba fuera del campo de visión de HAWC en el momento de la detección; por lo tanto, se realizó una búsqueda de una contrapartida electromagnética un tránsito antes, y después de la hora de llegada del neutrino a IceCube, también se realizó una búsqueda histórica en los datos históricos sobre la posición del neutrino. No hubo un exceso de 5σ en el rango de energía TeV para la búsqueda combinada de dos tránsitos. Se obtuvo un límite superior de $1.87 \times 10^{-11} (E/\text{TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, la adquisición de datos comenzó el 29/11/2020 a las 05:47:42 (UTC) y finalizó el 2020-12-01 06:08:38 (UTC). Mientras tanto, una búsqueda en los datos históricos tampoco se encontró un exceso en γ -rayos para una posible contraparte electromagnética. Se impuso un límite superior de $5.46 \times 10^{-13} (E/\text{TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a partir de datos adquiridos desde noviembre de 2014 hasta junio de 2019 [Ayala and HAWC Collaboration, 2020b].

En la figura 3.9 se muestra la curva de luz histórica de PMN J0206-1150 durante los estados estacionario y de *flare*. Los estados de *flare* exhibidos durante tres periodos, entre abril de 2016 y principios de febrero de 2017, pueden apreciarse en la banda de rayos γ (panel superior). A pesar de ello, se aprecia un débil incremento de la tasa en la llegada temporal de neutrinos; este incremento apenas supera el 1σ sobre la media histórica. En rayos X, esta fuente se detecta en la llegada temporal del neutrino. En la banda óptica, se aprecia un aumento del flujo en la banda g detectado por ASAS-SN que disminuyó lentamente tras la detección del neutrino. En las bandas de radio, el VLBA en 15 GHz detecta un aumento del flujo tras la detección del neutrino, lo que refleja un aumento del EVPA y de la fracción de polarización detectada en las bandas de radio.

3.8. Análisis entre la fuente de rayos- γ 4FGL J2108.5+1434 y el neutrino IceCube-211216A detectado por IceCube

El 2021-12-16 a las 07:07:38.13 UT, IceCube detectó el neutrino IC211216A bajo el sistema de alertas tipo de *bronze* con una probabilidad del 34.3% de ser de origen astrofísico. La energía registrada para este evento fue de 113.0 TeV con un FAR = 2.37 eventos por año debido a los fondos atmosféricos. La mejor posición reconstruida para este evento fue R.A., Dec = $316.05_{-1.95}^{+2.58}$, $15.79_{-1.63}^{+1.29}$ J2000 [IceCube Collaboration, 2021]. Dentro de la región de error en la dirección del neutrino se encuentra una fuente de rayos γ reportada por Fermi-LAT, la 4FGL J2108.5+1434 situada en R.A., Dec = 317.14 , 14.58 manteniendo una separación angular de 1.61° de la posición del neutrino mejor ajustada. Esta fuente está asociada con el FSRQ OX 110 situado en R.A., Dec = 317.17 , 14.50 (J2000) [Fey et al., 2004].

Se desplegó una campaña multifrecuencia al momento de la detección del neutrino para encontrar una posible contrapartida electromagnética transitoria al evento neutrino. El satélite Integral apuntó sus instrumentos, SPI/ACS, IBIS/Veto, e IBIS, a la posición del neutrino. Ninguno de sus instrumentos encontró evidencia de una posible contraparte con una significancia estadística superior a 5σ . Se estableció un límite superior de 3σ en la fluencia en el intervalo de energía 75-2000 keV de $3.9 \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2}$ asumiendo el espectro de un GRB corto típico con una duración de un segundo con una forma espectral de una ley de potencia de corte exponencial con $\alpha=-0,5$ y $E_p=600$ keV dentro de los primeros 300 segundos de exposición al tiempo de *trigger* del neutrino. Asumiendo el espectro de un GRB largo típico asumiendo una función de Band con $\alpha=-1$, $\beta=-2,5$, y $E_p=300$ keV y asumiendo

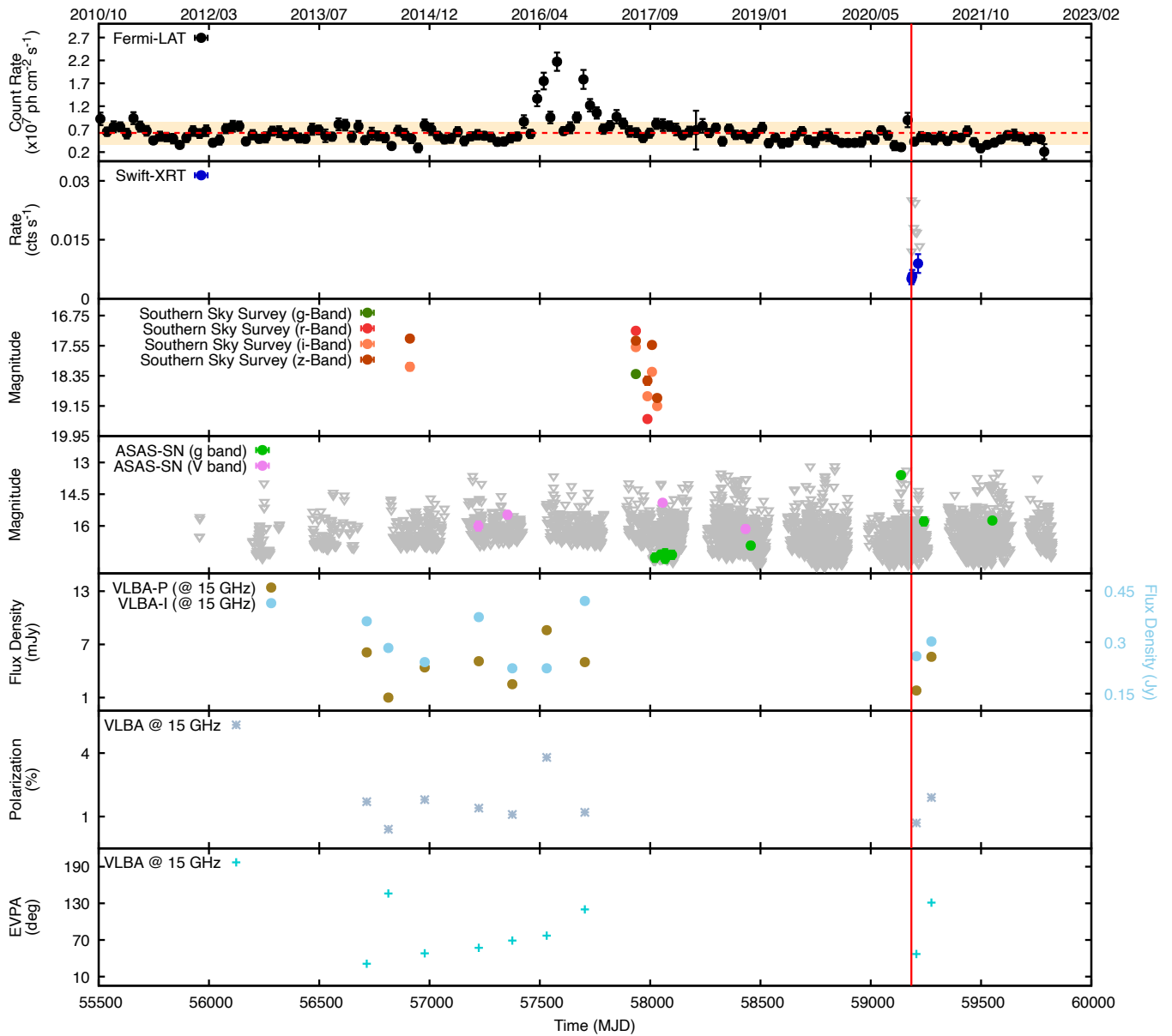


Figura 3.9: La curva de luz a largo plazo de PMN J0206-1150 se detectó en varias longitudes de onda. En la parte superior se observa la tasa de fotones detectados por Fermi-LAT en el intervalo de energía de 100 MeV a 200 GeV de esta fuente. La media de la tasa se muestra como una línea discontinua roja, rodeada de una banda naranja que representa 1σ de la emisión media, seguida de la detección Swift-XRT (puntos azules) de esta fuente en el momento de llegada del neutrino. Los dos paneles siguientes corresponden a la banda óptica, el Southern Sky Survey en las bandas g (verde bosque), r (rojo), i (naranja) y z (marrón), y los datos de ASAS-SN en las bandas g (verde) y V (violeta). Los tres últimos paneles corresponden a los datos del flujo en radio tomados de VLBA, seguidos de los datos de polarización y EVPA. Los triángulos grises abiertos en todos los paneles representan los límites superiores.

una duración de un segundo y tres segundos, se estableció un límite superior de la fluencia en el intervalo de energía 75-2000 keV de $3.9 \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2}$ y de $1.2 \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2}$ respectivamente en la región de error de la posición del neutrino [Savchenko et al., 2021].

El consorcio MASTER apuntó a la región de detección de neutrinos con el telescopio MASTER-Kislovodsk a la región de interés con una exposición de 27507 segundos después del tiempo de disparo, colocando un límite superior de 16.6 mag [Lipunov et al., 2021a]. Mientras tanto, el telescopio robótico MASTER-Kislovodsk apunta a la región de neutrinos 202 después del tiempo de disparo, colocando un límite superior al flujo de 16.3 mag [Lipunov et al., 2021b].

El campo de visión del GBM coincidió con la posición del neutrino, donde no se disparó el *trigger* del instrumento al momento de la llegada del neutrino, y no se encontró evidencia de una contrapartida electromagnética al evento neutrino. El instrumento GBM colocó un conjunto de límites superiores en tres ventanas temporales diferentes. Asumiendo tres índices espectrales en plantillas de estallidos de rayos gamma. Suponiendo un espectro suave de los límites superiores al flujo fueron establecidos a $(7.9; 2.1; 0.6) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos respectivamente, de esta manera, suponiendo un espectro típico los límites superiores fueron $(14.0; 4.1; 1.2) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos y, por último, considerando un espectro duro, los límites superiores fueron $(23.0; 9.3; 2.3) \times 10^{-7} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 0.12; 1.02; 8.19 segundos [Wood and Fermi-GBM Team, 2021]. El instrumento LAT escaneó la región de detección de neutrinos en la escala temporal de un mes previo a la detección del neutrino, sin encontrar evidencia de actividad de rayos γ en esta escala temporal, poniendo un límite superior al flujo de $4.2 \times 10^{-9} \text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. El equipo de LAT buscó una posible contraparte electromagnética transitoria en escalas temporales de meses a años. No se encontró ningún nuevo exceso significativo superior a 5σ dentro de la localización de confianza IC211216A 90% y se fijó un límite superior al flujo en $6.3 \times 10^{-10} \text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ desde 2008-08-04 hasta 2021-12-16 con energías $>100 \text{ MeV}$ [Garrappa et al., 2021].

En el régimen de rayos gamma de alta energía, el telescopio HAWC buscó un posible progenitor asumiendo dos tipos de comportamiento de la contraparte. Asumiendo una contraparte estable, se realizó una búsqueda histórica en los datos de HAWC que abarcó un periodo de tiempo desde noviembre de 2014 hasta junio de 2019 en la posición del neutrino; el valor de máxima significancia encontrado fue de 2.5×10^{-3} (1.5×10^{-1} post-trials) en R.A., Dec = $316.27^\circ, +15.33^\circ$ (J2000) situando un límite superior al flujo en esta posición de $1.33 \times 10^{-13} (\text{E/TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Asumiendo una contraparte transitoria, HAWC realizó una búsqueda en el tránsito anterior y posterior debido a que el evento estaba fuera del campo de visión de HAWC. El valor de máxima significancia encontrado fue de 9.7×10^{-4} (6.3×10^{-2} post-trials) localizado en R.A., Dec = $318.38^\circ, +16.57^\circ$ (J2000) situando un límite superior al flujo en $2.16 \times 10^{-11} (\text{E/TeV})^{-0.3} \text{TeV cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la posición de máxima significancia [Ayala and HAWC Collaboration, 2021].

La figura 3.10 muestra la curva de luz de FSRQ OX 110 a lo largo de una década. En el panel superior se muestra la curva de luz de rayos γ con energías $>100 \text{ MeV}$ detectada por Fermi-LAT. La línea roja horizontal discontinua representa la emisión media detectada por el Fermi-LAT rodeada por una franja naranja que representa el 1σ del flujo medio de fotones. El panel inferior muestra la curva de luz en óptico detectada por el telescopio ASAS-SN. Una línea roja vertical representa el tiempo de llegada del neutrino a IceCube. Al momento del disparo, la curva de luz en rayos γ mantiene un

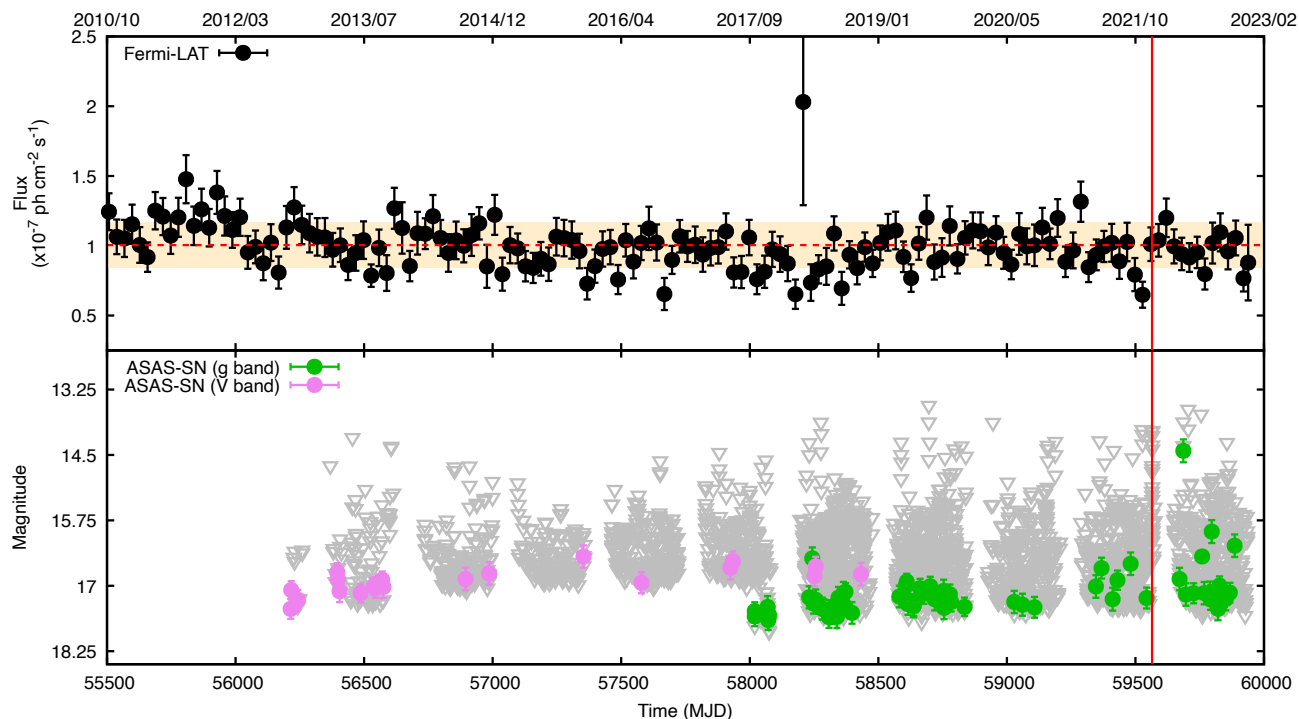


Figura 3.10: Curva de luz de OX 110 detectada en (panel superior) rayos γ detectados por Fermi-LAT en el rango de energía de 100 MeV a 200 GeV en puntos negros. La línea horizontal roja discontinua es la tasa de recuento media detectada por Fermi-LAT en dirección al cuásar, mientras que la franja naranja es el 1σ de la tasa media del rate. Los datos en la banda del óptico (panel inferior) detectados en la banda g (puntos verdes) y V (puntos violetas) detectados por ASAS-SN muestran un aumento del flujo tras la detección del neutrino por IceCube representado como una línea roja vertical. Los límites superiores se representan como triángulos grises abiertos.

comportamiento por debajo de 1σ sobre la emisión histórica. Mientras tanto, la curva de luz óptica muestra un incremento tras la detección del neutrino.

4 Modelo

En el modelo de emisión de una zona, se supone que la región emisora es una burbuja esférica y homogénea con radio R [Frajia and Marinelli, 2016]. Esta burbuja se mueve de forma relativista con un factor de Lorentz Γ , entonces el factor Doppler respectivo es $\delta_D = [\Gamma(1 - \beta \cos \theta_{\text{obs}})]^{-1}$, donde θ_{obs} es el ángulo de visión. Para el caso del blazar, el chorro se alinea cerca de la línea de visión $\lesssim 15^\circ$ [Blandford and Königl, 1979] y en el caso sobre el eje cuando el ángulo de visión $\theta_{\text{obs}} \lesssim 1/\Gamma$ podemos suponer $\delta_D \simeq \Gamma$.

En este trabajo definimos tres marcos de referencia: el de la burbuja, el del AGN y el del observador. Aquí, denotamos con letra mayúscula latina y el superíndice “ob” para las cantidades observadas. Al mismo tiempo, el marco AGN también se denotará con la letra mayúscula latina pero sin el superíndice. Las cantidades del marco de la burbuja se marcan con letras minúsculas griegas de primer orden. Por ejemplo, la energía observada se escribe como E^{ob} , mientras que la energía medida en el marco comoving del AGN es simplemente E , y en el marco blob se etiqueta como ε' .

En el interior de la burbuja, tanto los electrones como los protones se aceleran hasta el régimen ultrarelativista, lo que debe producir la radiación observada. Los electrones se suponen con una distribución homogénea e isotropa dada por una función de ley de potencia por partes [Frajia et al., 2017b]:

$$N'_e(\gamma'_e) = K'_e \begin{cases} \gamma_e'^{-\alpha_{e,1}}, & \gamma_{e,\text{min}}' \leq \gamma'_e \leq \gamma_{e,\text{br}}' \\ \gamma_{e,\text{br}}'^{\alpha_{e,2}-\alpha_{e,1}} \gamma_e'^{-\alpha_{e,2}}, & \gamma_{e,\text{br}}' \leq \gamma'_e \leq \gamma_{e,\text{max}}' \end{cases} \quad (4.1)$$

donde $\gamma_{e,\text{min}}'$, $\gamma_{e,\text{br}}'$, $\gamma_{e,\text{max}}'$ son el factor de Lorentz mínimo, de quiebre y máximo de los electrones ultra relativistas, respectivamente, y K'_e es la constante de normalización. Por otro lado, suponemos que los protones se distribuyen homogénea e isotrópicamente durante la etapa de equilibrio, dada por:

$$N'_p(\varepsilon'_p) = K'_p \left(\frac{\varepsilon'_p}{m_p c^2} \right)^{-\alpha_p} \quad \varepsilon_{p,\text{min}}' \leq \varepsilon'_p \leq \varepsilon_{p,\text{max}}' \quad (4.2)$$

donde K'_p es la constante de normalización, α_p es el índice espectral del protón y $\varepsilon_{p,\text{min}}'$ y $\varepsilon_{p,\text{max}}'$ corresponden a la energía mínima y máxima en el marco móvil, respectivamente.

4.1. Radiación de Sincrotrón

En presencia de un campo magnético (B), las partículas cargadas relativistas se mueven a lo largo de él mientras pierden su energía por radiación sincrotrón. La energía radiada por una distribución de electrones es [Blumenthal and Gould, 1970, Finke et al., 2008, Saugé and Henri, 2004].

$$J'_s(\varepsilon'_s) = \frac{\sqrt{3}e^3 B'}{2\pi\hbar m_e c^2} \int_{\gamma'_{e,\min}}^{\gamma'_{e,\max}} d\gamma'_e N'_e(\gamma'_e) R_{\text{syn}}(x), \quad (4.3)$$

donde \hbar es la constante reducida de Planck e es la carga del electrón, $x = \varepsilon'_s/\varepsilon'_{\text{ch}}$, la energía característica viene dada por $\varepsilon'_{\text{ch}} = \frac{3eB'\hbar}{2m_e c} \gamma_e'^2 \sin\theta$ y $\sin\theta$ es el ángulo de inclinación, la función R_{syn} está definida en [Finke et al., 2008].

4.2. Dispersión Compton Inversa

Un electrón que se mueve dentro de un campo de radiación produce dispersión Compton. Además, la pérdida de energía de los electrones de sincrotrón en cada colisión produce fotones de alta energía. El coeficiente de emisividad total producido por una población de electrones isótropa es [Blumenthal and Gould, 1970]:

$$J'_{ic}(\varepsilon'_c) = \frac{3}{4} c \sigma_T \varepsilon'_c \int_{\frac{\varepsilon'_c}{m_e c^2}} d\gamma'_e \frac{N'_e(\gamma'_e)}{\gamma_e'^2} \int d\varepsilon' \frac{n'_{\text{ph}}(\varepsilon')}{\varepsilon'} F_c(q, \Gamma_e). \quad (4.4)$$

Por último, se calcula la radiación Compton inversa utilizando la ecuación anterior pero un espectro de fotones diferente para la emisión SSC y EIC. La distribución total de fotones de la semilla es:

$$n'_{\text{ph}}(\varepsilon') \simeq \frac{J'_s(\varepsilon')}{4\pi R'^2 c \varepsilon'} + \delta_D (n_{\text{BLR}}(\varepsilon') + n_{\text{DT}}(\varepsilon')) \quad (4.5)$$

4.3. Proceso fotopión

En el sitio de aceleración de partículas, la materia puede interactuar con radiación de fondo, produciendo hadrones, fotones y neutrinos secundarios. De tal manera que es natural esperar un espectro interrelacionado entre estos mensajeros. En el caso particular en donde protones relativistas interactúan con fotones, se producen piones que decaen de la siguiente manera [Ahlers and Halzen, 2017];



en el escenario donde el producto secundario resultante es un pión neutro como lo muestra la ecuación 4.6, el pión decae rápidamente en dos fotones debido a interacciones electromagnéticas. Por otro lado, si el producto secundario es un pión cargado como está reflejado en la ecuación 4.7;

$$\begin{aligned}
p + \gamma &\rightarrow \pi^+ + \mathcal{X} \\
&\quad \swarrow \\
&\quad \mu^+ \nu_\mu \\
&\quad \searrow \\
&\quad e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu
\end{aligned} \tag{4.7}$$

el pión cargado decae debido a interacciones débiles; $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ y $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ donde los muones decaen a través del intercambio de un bosón W en: $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ y en $\nu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$.

El umbral de energía del protón para la producción de foto-piones viene dado por la condición para producir un único pión de masa en reposo; considerando los fotones de la semilla en el marco de la burbuja obtenemos:

$$\varepsilon'_{p,\text{th}} = \frac{m_\pi^2 + 2m_\pi m_p}{4\varepsilon'} \approx 70 \text{ PeV} \left(\frac{\varepsilon'}{\text{eV}} \right)^{-1}. \tag{4.8}$$

La tasa de producción de partículas estables viene dada por [Kelner and Aharonian, 2008]:

$$Q'_i{}^{p\pi}(\varepsilon'_i) = \int \frac{d\varepsilon'_p}{\varepsilon'_p} N'_p(\varepsilon'_p) \int d\varepsilon' n'_{\text{ph}}(\varepsilon') \Phi_i(\eta, x), \tag{4.9}$$

donde la etiqueta i representa las partículas $\gamma, \nu, \bar{\nu}, e^-, e^+$, la función Φ_i está parametrizada por los autores, y definen los parámetros $\eta = \frac{4\varepsilon'_p \varepsilon'}{m_p^2 c^4} > 0.303$ y $x = \frac{\varepsilon'_i}{\varepsilon'_p}$.

Finalmente, la luminosidad del jet puede obtenerse como la contribución de las luminosidades del electrón, protón y campo magnético [Celotti and Ghisellini, 2008];

$$L_j = \sum_{i=e,p,B} L_i, \tag{4.10}$$

donde $L_i \simeq \pi r_d^2 \Gamma^2 U_i$ donde r_d es el tamaño de la región de emisión definida como $r_d = \delta_D \tau_{v,\text{min}} / (1+z)$ con $t_{\text{var},\text{min}}$ como el tiempo mínimo de variabilidad. Como se trata de blazares, se supone que $\delta_D \approx \Gamma$. Entonces, $U_e = m_e N_e \langle \gamma_e \rangle = m_e \int_{\gamma_{\text{min}}}^{\gamma_{\text{max}}} \frac{dn_e}{d\gamma_e} d\gamma_e$, $U_p = N_p m_p$ and $U_B = B'^2 / (8\pi)$ son las densidades del electrón, del protón y del campo magnético, respectivamente.

5 Distribución Espectral de Energía

El método de ajuste elegido es la técnica Monte Carlo Markov Chain (MCMC) implementada en el paquete de `python` [Van Rossum and Drake Jr, 1995] `emcee` [Foreman-Mackey et al., 2013]. Para obtener un conjunto adecuado de parámetros a priori para cada fuente listada en la tabla 3.1 se realizó un ajuste previo con el `LMFIT` [Newville et al., 2014] paquete `python`. Una vez obtenidos los parámetros posteriores, se construyó un muestreador MCMC utilizando 512 caminantes con una longitud de 12.000 pasos. Los parámetros involucrados en el proceso MCMC fueron los parámetros para el modelo leptónico, como el campo magnético (B), el factor Doppler (δ_D), el mínimo, ruptura y máximo factor de Lorentz de la población de electrones (γ'_{\min} , γ'_{break} y γ'_{\max} respectivamente) con una forma de población de ley de potencia quebrada con pendiente p y constante de normalización K'_e . Para la componente hadrónica, el índice de ley de potencia de la distribución de protones se fijó en 2, y los fotones objetivo considerados fueron el CMB, el infrarrojo y el óptico, por lo que la temperatura para cada temperatura semilla (T) también se fijó en 2,7, 58,73 y 18509.20 K respectivamente en la distribución de fotones semilla, dejando libre la constante de normalización K_p .

Debido a la falta de observaciones simultáneas multi-longitud de onda en algunos Cuásares, en el momento de llegada del neutrino como en el caso de la fuente PKS B2224+006, el modelado de la SED se tomó en consideración la emisión histórica de cada fuente, con el propósito de restringir el modelo, principalmente en la emisión leptónica.

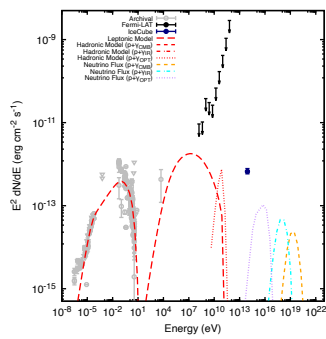
Los valores de los parámetros mejor ajustados se listan en la Tabla 5.2, y los espectros ajustados para cada fuente se muestran en las Figuras 5.1 y 5.2. Cada fila de esas figuras es la SED de cada fuente listada en la Tabla 3.1, y cada columna de esas figuras es una ventana temporal diferente para el análisis de Fermi-LAT, las cuales son: semanal, mensual y anual distribuidas de izquierda a derecha a lo largo de cada renglón correspondiente. Para cada SED, los puntos de datos en gris son datos de archivo obtenidos de NED y del portal CDS. [Abdollahi et al., 2020], mientras que los puntos negros son los espectros derivados en este trabajo. Cabe destacar que los límites superiores al flujo están representados por flechas negras. La componente leptónica (roja) se muestra en líneas discontinuas largas, mientras que la componente hadrónica se muestra en la línea discontinua. En el caso de la componente de alta energía, el flujo se atenuó debido a *EBL* en un factor $\exp(-\tau(E, z))$ con el factor τ proporcionado por [Franceschini et al., 2008].

En las figuras 5.3 - 5.11 se muestran los gráficos de esquina obtenidos por `emcee`. La línea roja vertical muestra el valor central de la distribución final para cada parámetro, mientras que la línea negra vertical punteada representa el cuantil de 2σ de cada parámetro.

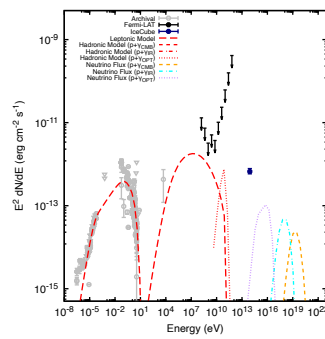
Debido a la pobre estadística obtenida en las ventanas de tiempo semanal y mensual, se ha restringido la SED para todas las fuentes con la ventana de tiempo anual y están reportados en la tabla 5.2, a excepción de la fuente 4FGL J1504.4+1029 cuyos parámetros obtenidos están reportados en la tabla 5.1 la cuál muestra los valores obtenidos para una ventana mensual para esta fuente. Los valores que aparecen en las tablas 5.1 y 5.2 como consecuencia del método MCMC están en el rango de los reportados en la literatura [Finke et al., 2008]. Por ejemplo, el factor Doppler se encuentra en $74 \leq \delta_D \leq 288$ y el volumen de la región de emisión se encuentra en valores de $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ que corresponde un tiempo de variabilidad mínimo de 0.98 días [Abdo et al., 2011b, Abdo et al., 2011a, Fraija et al., 2017a, Fraija et al., 2019], que es inferior al registrado con campañas de observación en otras fuentes [Kataoka et al., 2001, Abdo et al., 2011b, Dunlop et al., 2003]. Cuando se compara con la luminosidad Eddington predicha $L_{\text{Edd}} \sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, basada en la evaluación de los agujeros negros supermasivos con masa $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$ [Wagner, 2008, McLure and Dunlop, 2004], la luminosidad de protones calculada (L_p) es proporcional a una pequeña cantidad. Analizando el campo magnético, las densidades de electrones y protones, y sus respectivas relaciones U_i/U_j derivadas y enumeradas en la Tabla 5.2, podemos observar que se puede inferir la existencia potencial del principio de equipartición.

Tabla 5.1: Valores obtenidos del Monte Carlo Markov Chain para los ajustes de la SED en ventanas de tiempo mensuales. En la parte inferior de la tabla, se reportan los valores derivados tales como la densidad de energía de electrones, protones y campo magnético, y luminosidades inferidas de los valores obtenidos al ajuste.

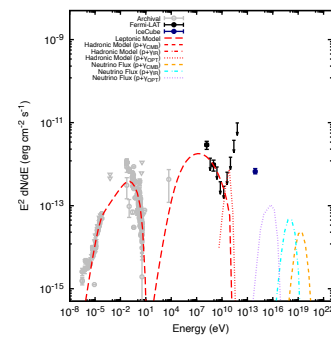
Parámetros	J1504.4+1029
Cantidades obtenidas	
$\log_{10}(\text{B/mG})$	$1.04^{+1.07}_{-1.00}$
$\log_{10}(\delta_D)$	$2.13^{+0.95}_{-0.95}$
$\log_{10}(K_e)$	$44.94^{+1.04}_{-0.95}$
p	$2.55^{+1.03}_{-1.08}$
$\log_{10}(\gamma'_{\min})$	$1.67^{+1.10}_{-0.97}$
$\log_{10}(\gamma'_b)$	$4.08^{+0.93}_{-0.93}$
$\log_{10}(\gamma'_{\max})$	$4.38^{+1.06}_{-0.88}$
$\tau_{v,\min} (\times 10^4 \text{ s})$	0.864
Cantidades derivadas	
α	2.0
$\log_{10}(E_b)(\text{GeV})$	11.0
$\log_{10}(K_p)$	26.079
Cantidades derivadas	
$U_B 10^{-3} (\text{erg/cm}^3)$	25.11
$U_e 10^{-3} (\text{erg/cm}^3)$	17.19
$U_p 10^{-3} (\text{erg/cm}^3)$	15.27
$U_B/(U_e + U_p)$	0.77
$L_B 10^{45} (\text{erg/s})$	2.40
$L_e 10^{45} (\text{erg/s})$	1.65
$L_p 10^{45} (\text{erg/s})$	1.46
$L_{\text{jet}} 10^{45} (\text{erg/s})$	5.51



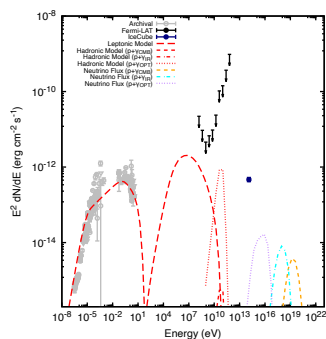
(a) 4FGL J2226.8+0051
Ventana de tiempo semanal.



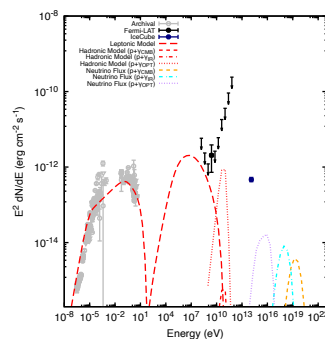
(b) 4FGL J2226.8+0051
Ventana de tiempo mensual.



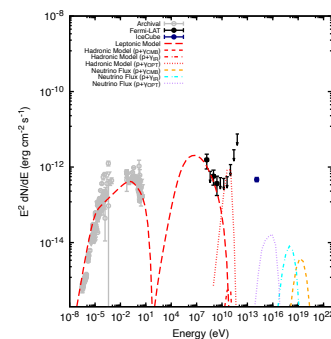
(c) 4FGL J2226.8+0051
Ventana de tiempo anual.



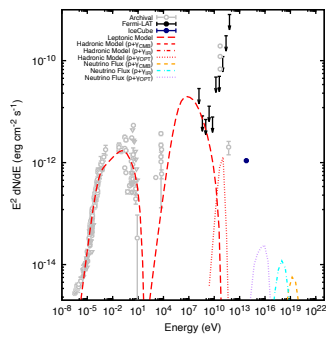
(d) 4FGL J1557.9-0001
Ventana de tiempo semanal.



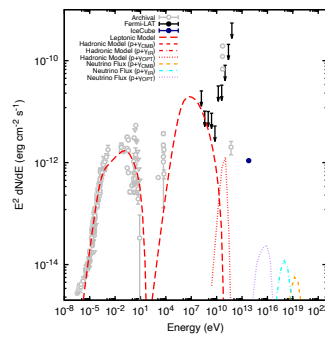
(e) 4FGL J1557.9-0001
Ventana de tiempo mensual.



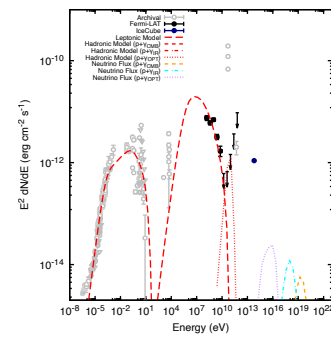
(f) 4FGL J1557.9-0001
Ventana de tiempo anual.



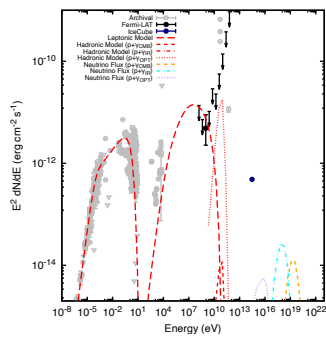
(g) 4FGL J1457.4-3539
Ventana de tiempo semanal.



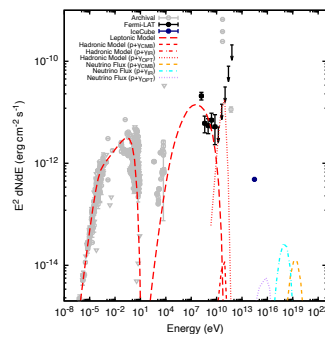
(h) 4FGL J1457.4-3539
Ventana de tiempo mensual.



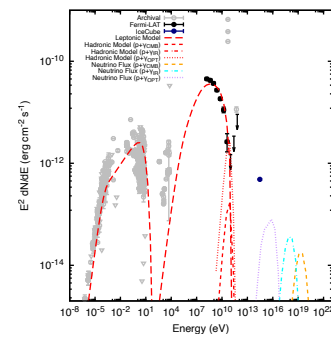
(i) 4FGL J1457.4-3539
Ventana de tiempo anual.



(j) 4FGL J1504.4+1029
Ventana de tiempo semanal.

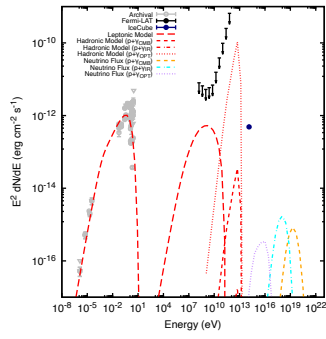


(k) 4FGL J1504.4+1029
Ventana de tiempo mensual.

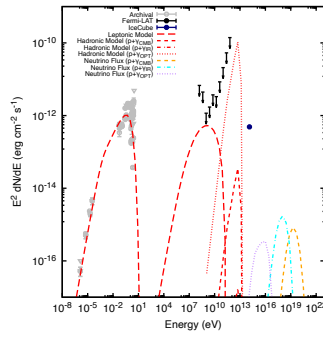


(l) 4FGL J1504.4+1029
Ventana de tiempo anual.

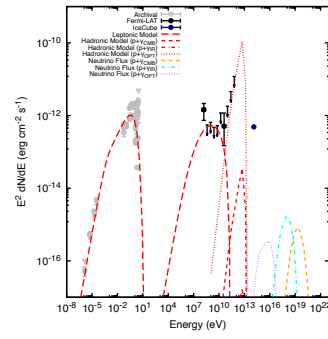
Figura 5.1: Distribución Espectral de Energía de 4FGLJ2226.8+0051, 4FGLJ1557.9-0001, 4FGLJ1457.4-3539 and 4FGLJ1504.4+1029 para ventanas de tiempo semanales, mensuales y anuales.



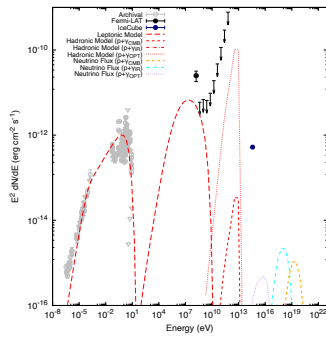
(a) 4FGL J1858.7+5708
Ventana de tiempo semanal.



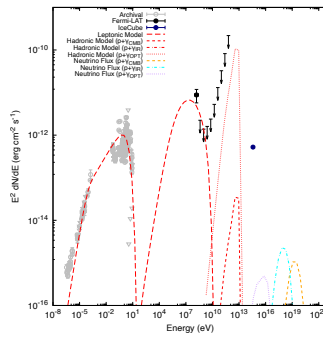
(b) 4FGL J1858.7+5708
Ventana de tiempo mensual.



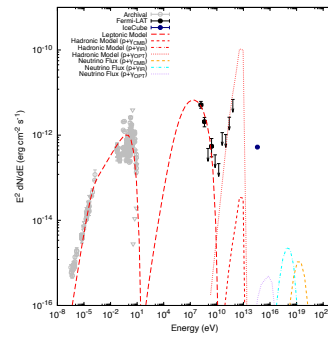
(c) 4FGL J1858.7+5708
Ventana de tiempo anual.



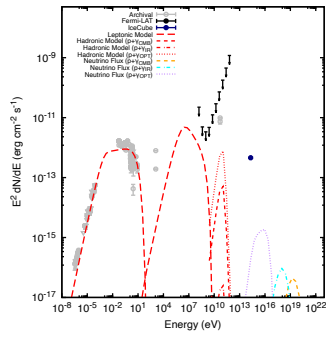
(d) 4FGL J1103.0+1157
Ventana de tiempo semanal.



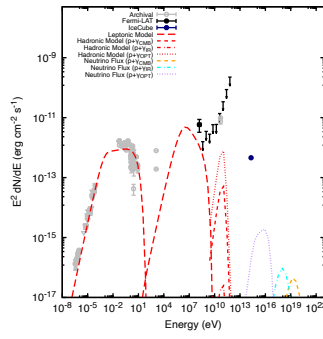
(e) 4FGL J1103.0+1157
Ventana de tiempo mensual.



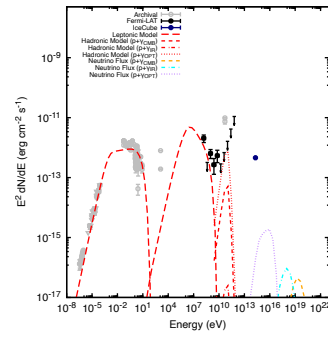
(f) 4FGL J1103.0+1157
Ventana de tiempo anual.



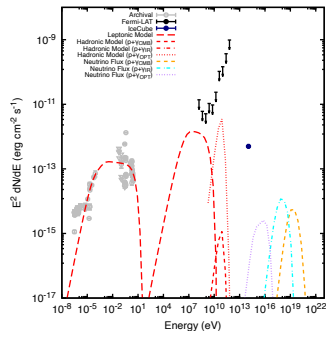
(g) 4FGL J0206.4-1151
Ventana de tiempo semanal.



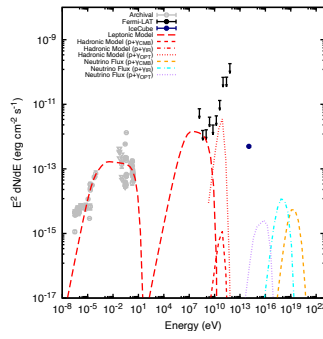
(h) 4FGL J0206.4-1151
Ventana de tiempo mensual.



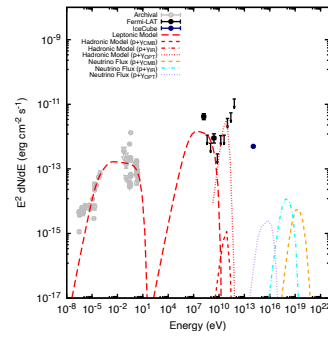
(i) 4FGL J0206.4-1151
Ventana de tiempo anual.



(j) 4FGL J2108.5+1434
Ventana de tiempo semanal.



(k) 4FGL J2108.5+1434
Ventana de tiempo mensual.



(l) 4FGL J2108.5+1434
Ventana de tiempo anual.

Figura 5.2: Igual que la Figura 5.1, pero para 4FGLJ1103.0+1157, 4FGLJ1858.7+5708, 4FGLJ0206.4-1151 y 4FGLJ2108.5+1434.

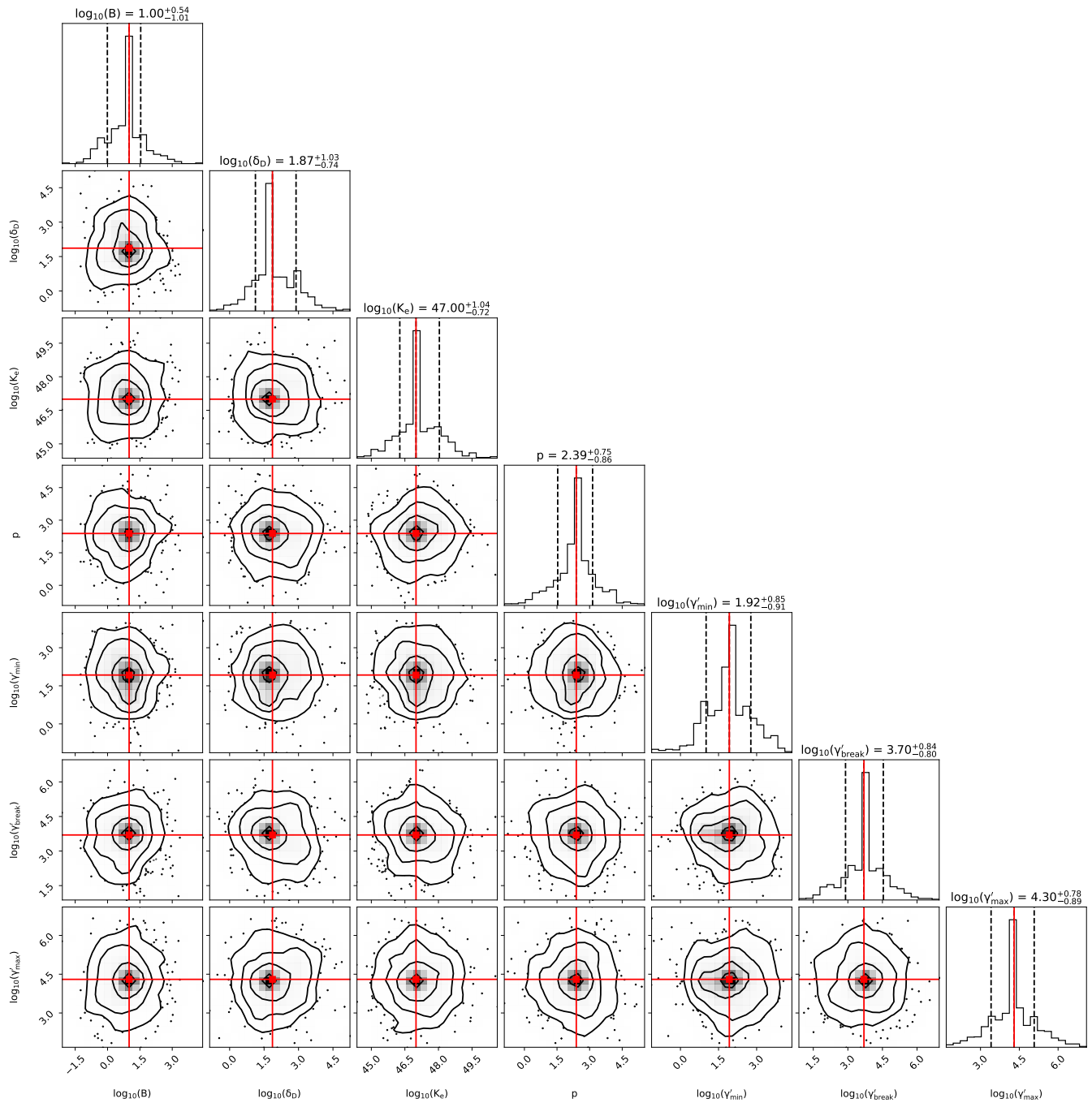


Figura 5.3: Corner plot del Monte-Carlo Markov Chain para 4FGL J2226.8+0051. Los histogramas de la diagonal muestran las densidades posteriores marginadas para cada parámetro y los valores medios se muestran con líneas rojas.

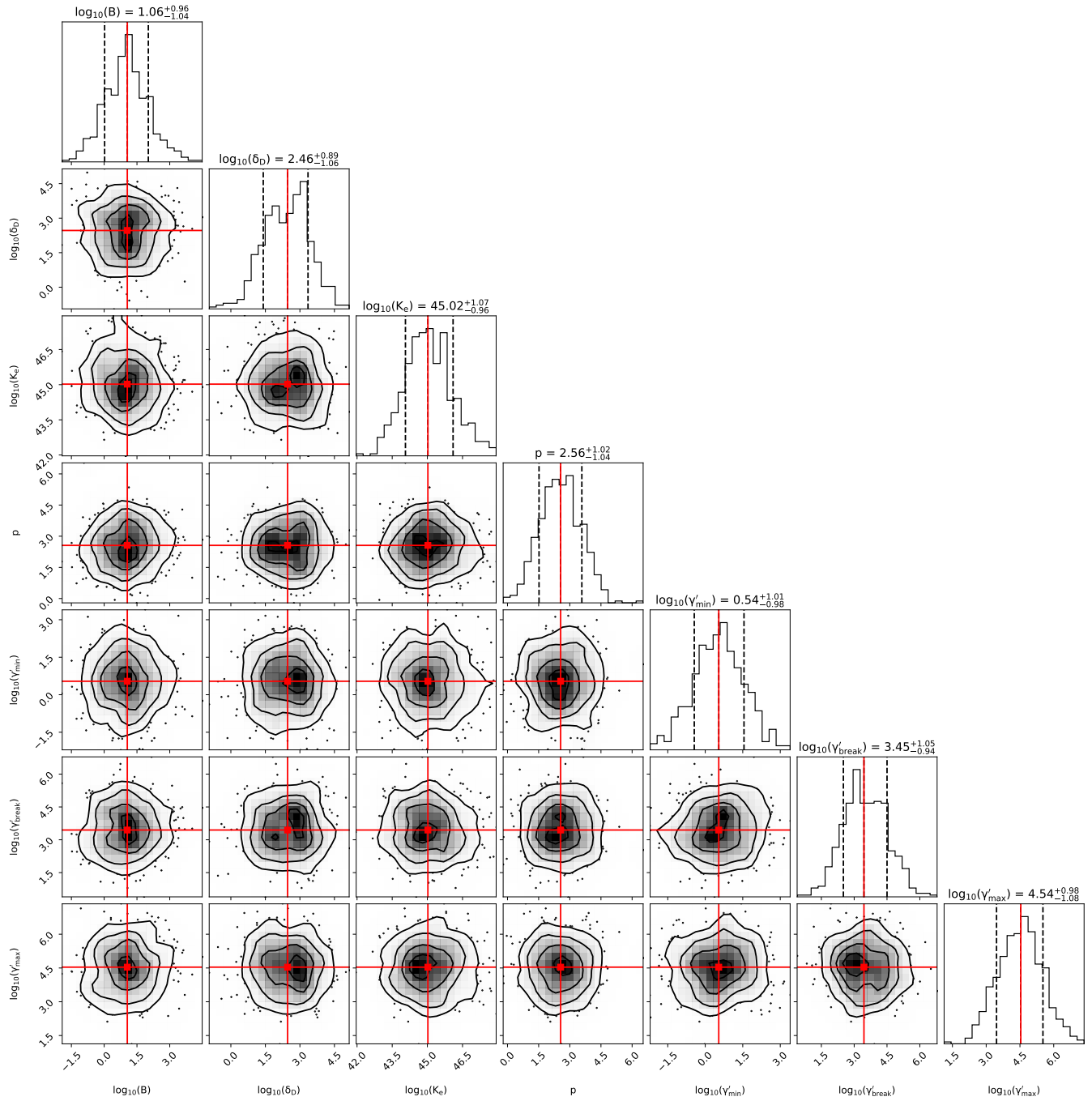


Figura 5.4: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J1557.9-0001.

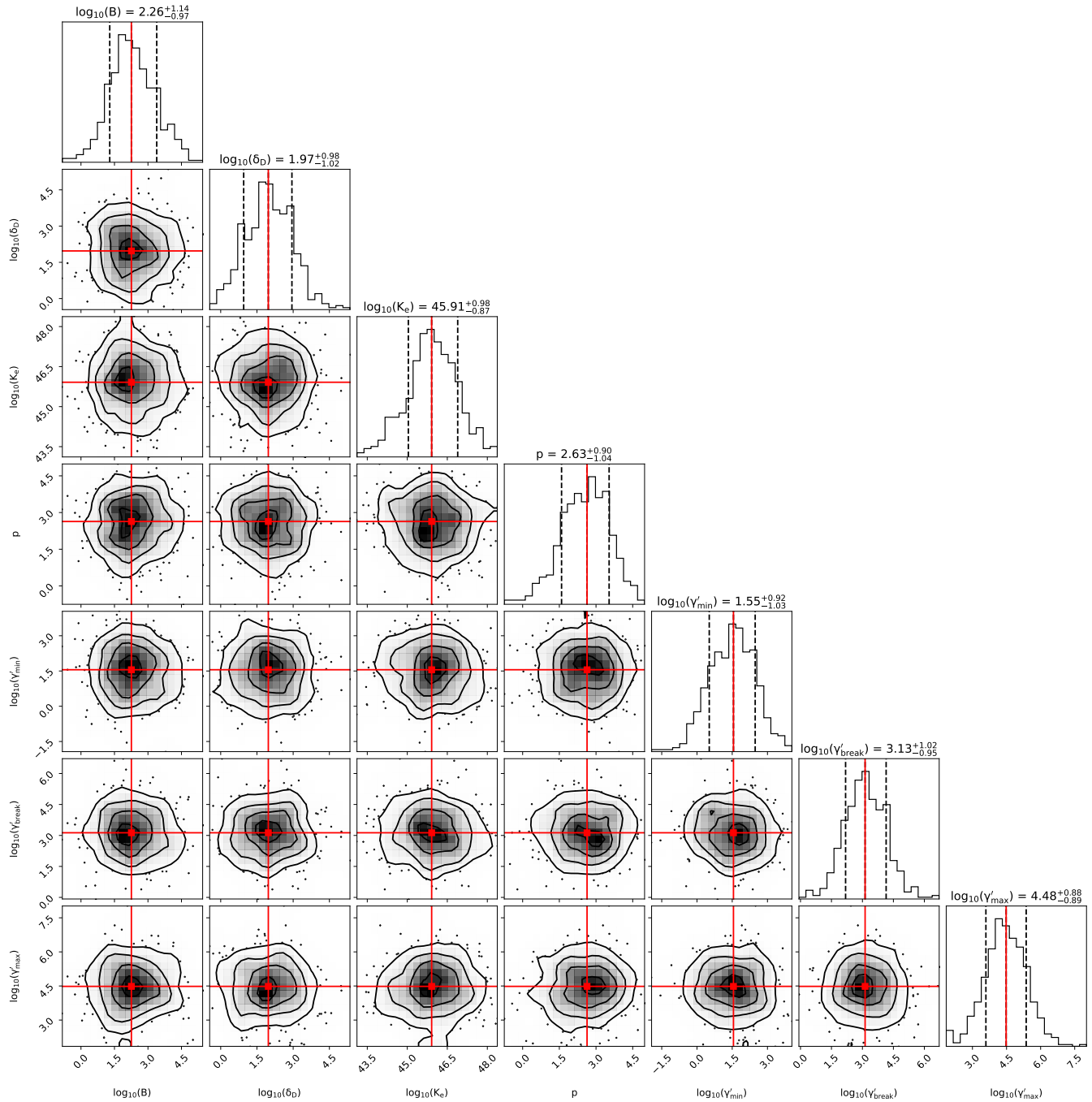


Figura 5.5: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J1457.4-3539.

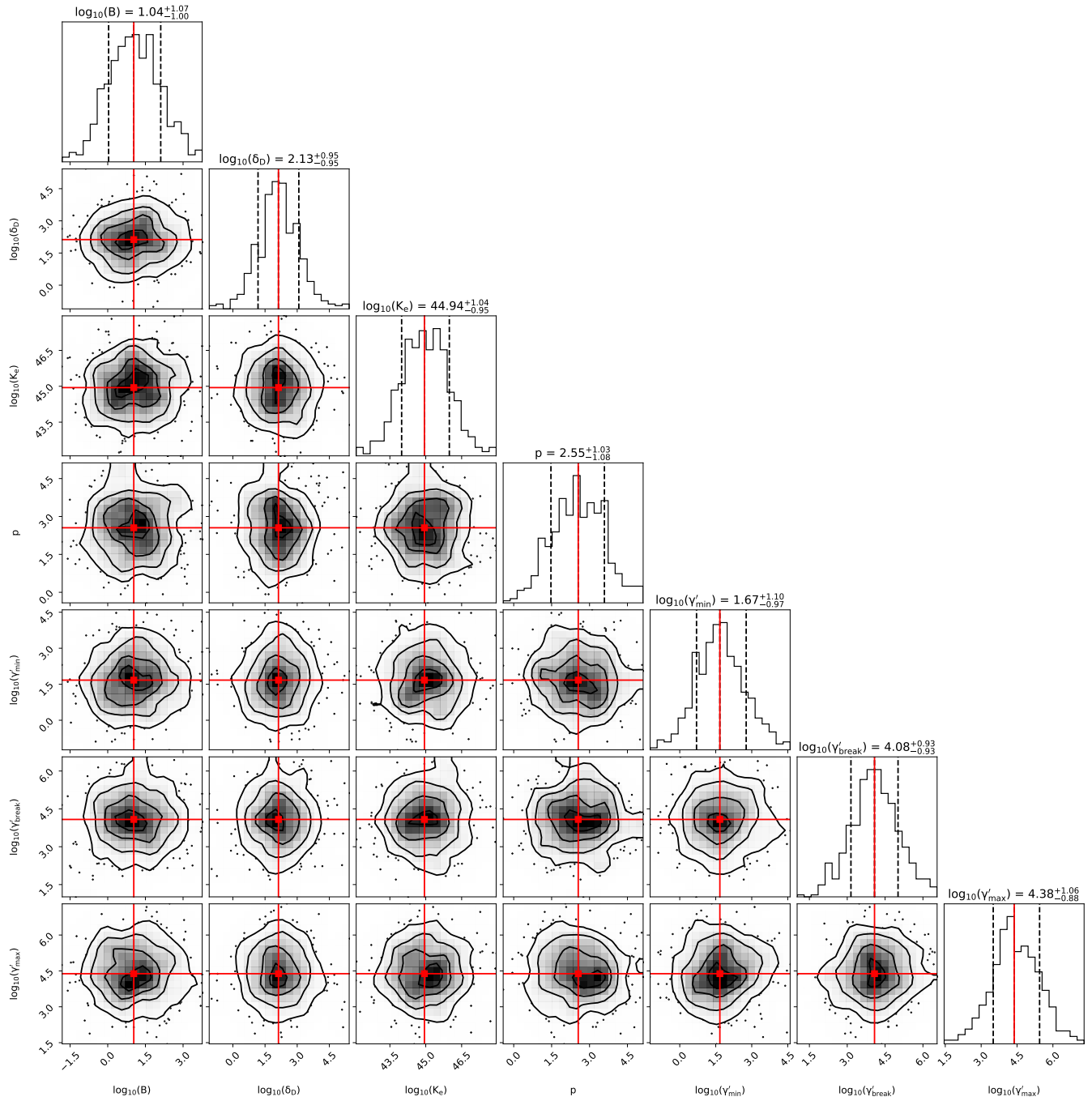


Figura 5.6: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J1557.9-0001 y una ventana de tiempo mensual.

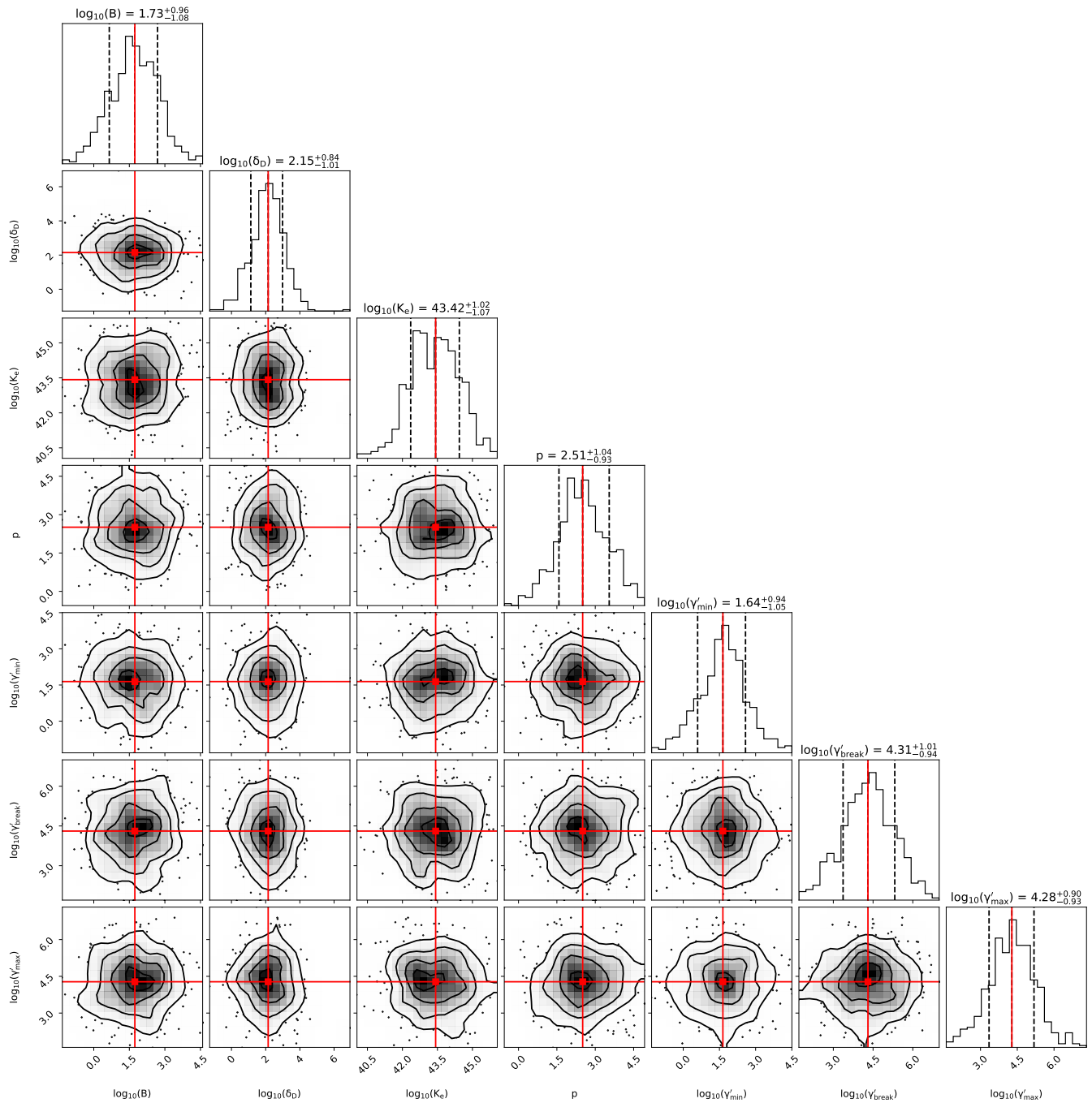


Figura 5.7: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGLJ1504.4+1029 y una venta de tiempo anual.

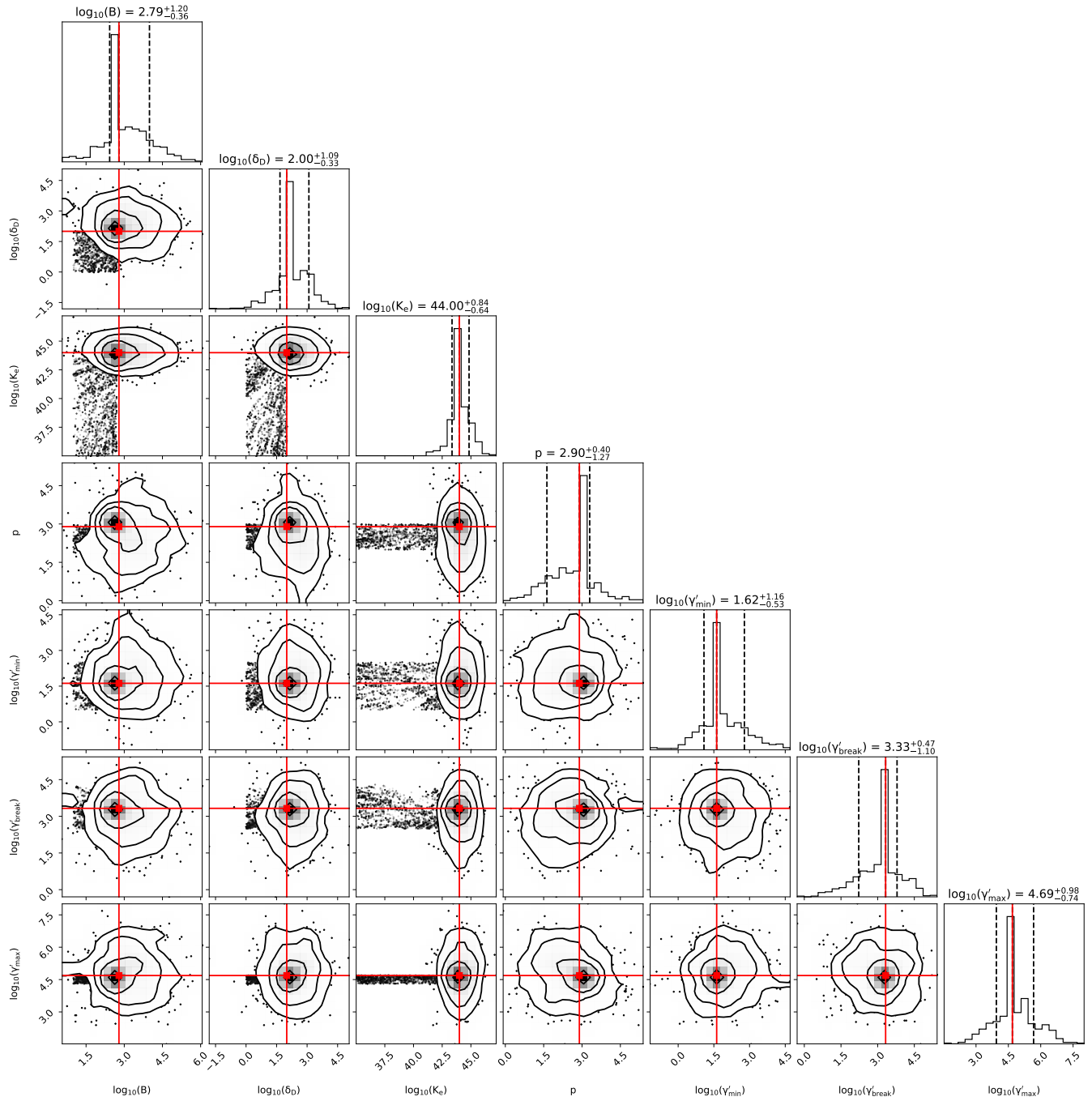


Figura 5.8: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J0206.4-1151.

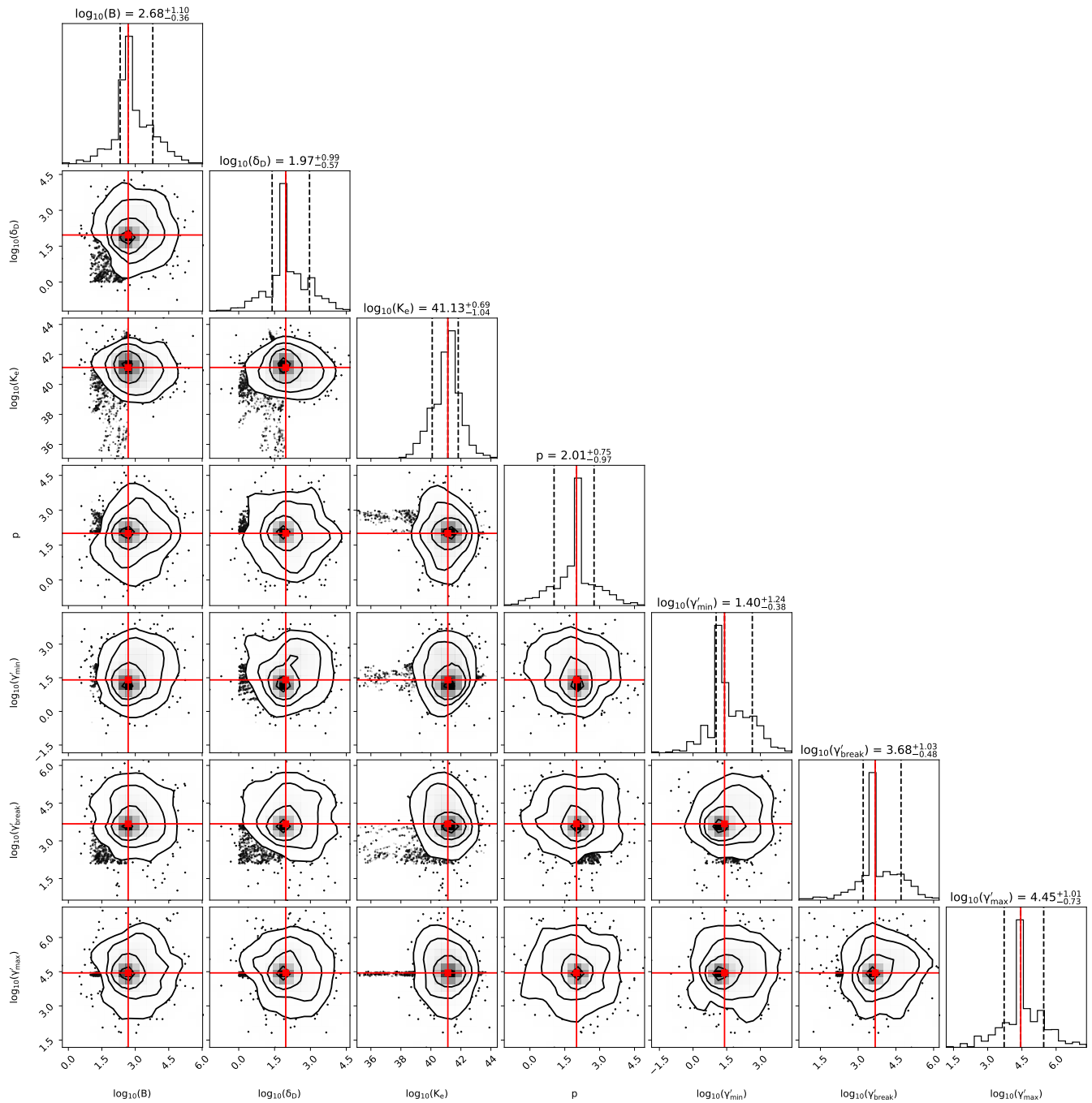


Figura 5.9: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J1858.7+5708.

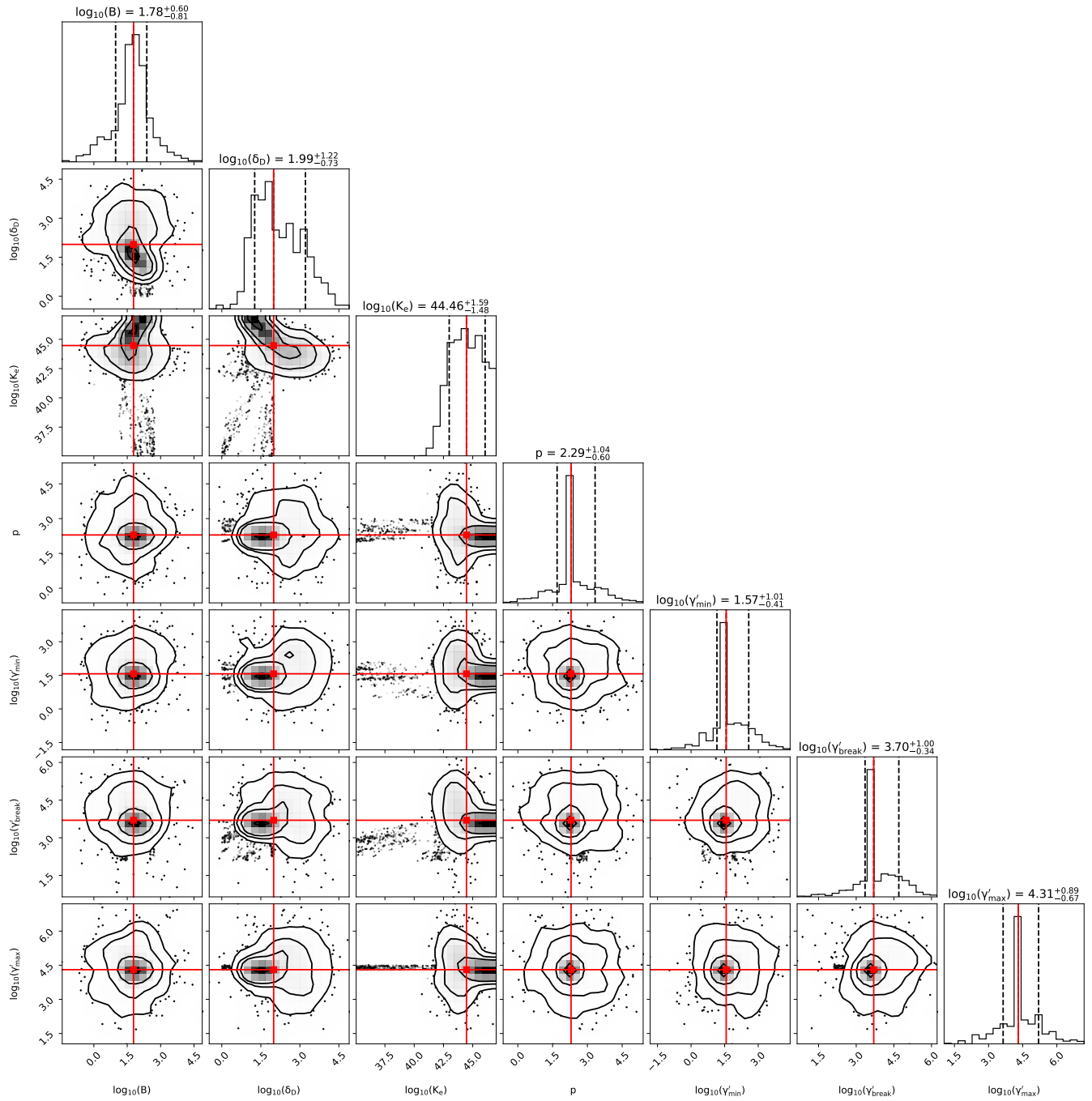


Figura 5.10: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J1103.0+1157.

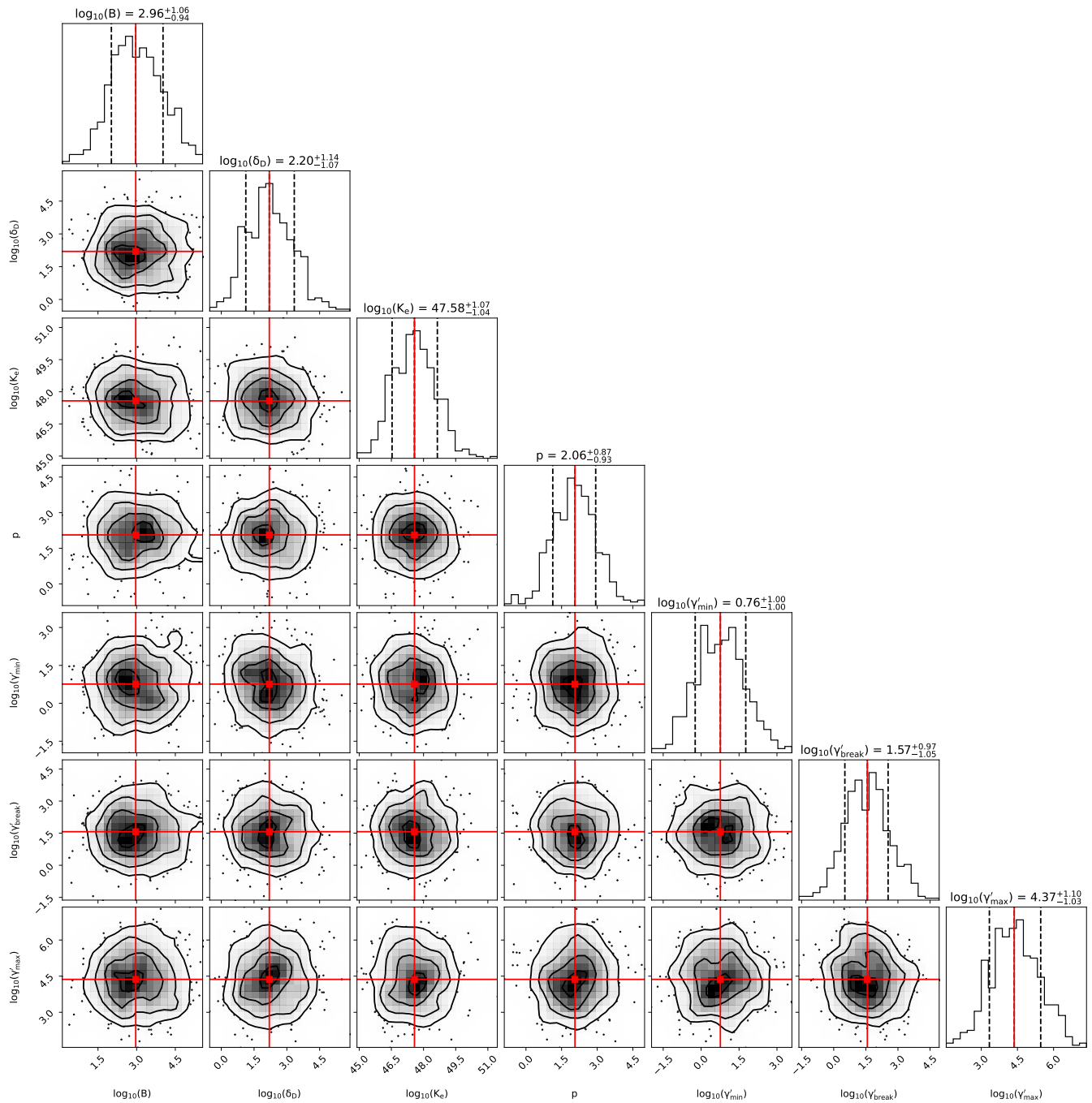


Figura 5.11: Igual que la Figura 5.3, pero para 4FGL J2108.5+1434.

Tabla 5.2: Valores obtenidos del Monte Carlo Markov Chain para los ajustes de la SED en ventanas de tiempo anuales. En la parte inferior de la tabla se muestran los valores derivados tales como la densidad de energía de electrones, protones y campo magnético, y luminosidades inferidas de los valores obtenidos al ajuste.

Parámetro	J2226.8+0051	J1557.9-0001	J1457.4-3539	J1504.4+1029	J1858.7+5708	J1103.0+1157	J0206.4-1151	J2108.5+1434
Cantidades obtenidas								
$\log_{10}(B/\text{mG})$	$1.00^{+0.54}_{-1.01}$	$1.06^{+0.96}_{-1.04}$	$2.26^{+1.14}_{-0.97}$	$1.73^{+0.96}_{-1.08}$	$2.68^{+1.10}_{-0.36}$	$1.78^{+0.60}_{-0.81}$	$2.79^{+1.20}_{-0.36}$	$2.96^{+1.06}_{-0.94}$
$\log_{10}(\delta_D)$	$1.87^{+1.03}_{-0.74}$	$2.46^{+0.89}_{-1.06}$	$1.97^{+0.98}_{-1.02}$	$2.15^{+0.84}_{-1.01}$	$1.97^{+0.99}_{-0.57}$	$1.99^{+1.22}_{-0.73}$	$2.00^{+1.09}_{-0.33}$	$2.20^{+1.14}_{-1.07}$
$\log_{10}(K_e)$	$47.00^{+1.04}_{-0.72}$	$45.02^{+1.07}_{-0.96}$	$45.91^{+0.98}_{-0.87}$	$43.42^{+1.02}_{-1.07}$	$41.13^{+0.69}_{-1.04}$	$44.46^{+1.59}_{-1.48}$	$44.00^{+0.84}_{-0.64}$	$47.58^{+1.07}_{-1.04}$
p	$2.39^{+0.75}_{-0.86}$	$2.56^{+1.02}_{-1.04}$	$2.63^{+0.90}_{-1.04}$	$2.51^{+1.04}_{-0.93}$	$2.01^{+0.75}_{-0.97}$	$2.29^{+1.04}_{-0.60}$	$2.90^{+0.40}_{-1.27}$	$2.06^{+0.87}_{-0.93}$
$\log_{10}(\gamma'_{\min})$	$1.92^{+0.85}_{-0.91}$	$0.54^{+1.01}_{-0.98}$	$1.55^{+0.92}_{-1.03}$	$1.64^{+0.94}_{-1.05}$	$1.40^{+1.24}_{-0.38}$	$1.57^{+1.01}_{-0.41}$	$1.62^{+1.16}_{-0.53}$	$0.76^{+1.00}_{-1.00}$
$\log_{10}(\gamma'_b)$	$3.70^{+0.84}_{-0.80}$	$3.45^{+1.05}_{-0.94}$	$3.13^{+1.02}_{-0.95}$	$4.31^{+1.01}_{-0.94}$	$3.68^{+1.03}_{-0.48}$	$3.70^{+1.00}_{-0.34}$	$3.33^{+0.47}_{-1.10}$	$1.57^{+0.97}_{-1.05}$
$\log_{10}(\gamma'_{\max})$	$4.30^{+0.78}_{-0.89}$	$4.54^{+0.98}_{-1.08}$	$4.48^{+0.88}_{-0.89}$	$4.28^{+0.90}_{-0.93}$	$4.45^{+1.01}_{-0.73}$	$4.31^{+0.89}_{-0.67}$	$4.69^{+0.98}_{-0.74}$	$4.37^{+1.10}_{-1.03}$
$\tau_{v,\min} (\times 10^4 \text{ s})$	8.25	5.93	16.38	8.32	5.57	22.49	17.34	5.75
α	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$\log_{10}(E_b)(\text{GeV})$	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
$\log_{10}(K_p)$	24.34	38.77	42.54	27.17	26.07	27.50	30.87	46.54
Cantidades derivadas								
$U_B 10^{-3} (\text{erg}/\text{cm}^3)$	0.04	0.01	0.52	0.11	0.09	0.57	15.13	33.10
$U_e 10^{-3} (\text{erg}/\text{cm}^3)$	0.01	0.02	0.73	0.24	0.08	0.27	11.02	29.77
$U_p 10^{-3} (\text{erg}/\text{cm}^3)$	0.01	0.01	0.33	0.13	0.18	0.29	11.89	11.30
$U_B/(U_e + U_p)$	2.02	0.15	0.50	0.31	0.33	0.99	0.66	0.81
$L_B 10^{45} (\text{erg}/\text{s})$	0.09	1.41	15.43	4.58	1.57	67.50	54.19	64.72
$L_e 10^{45} (\text{erg}/\text{s})$	0.02	5.42	21.40	9.64	1.41	32.65	39.42	57.16
$L_p 10^{45} (\text{erg}/\text{s})$	0.03	4.00	9.64	5.25	3.24	34.97	427.78	219.05
$L_{\text{jet}} 10^{45} (\text{erg}/\text{s})$	0.13	10.83	46.48	19.47	6.22	135.13	521.39	340.93

6 Resultados y conclusiones

Nuestra muestra consistió en 13 años de datos recogidos por IceCube y fuentes puntuales emisoras de rayos γ detectados por Fermi-LAT durante 10 años y reportados en su catálogo 4FGL-DR2 [Abdollahi et al., 2020, Ballet et al., 2020]. Considerando las fuentes de rayos γ y la posición del neutrino mejor ajustada con una separación angular inferior a 2° , encontramos 27 coincidencias espaciales entre fuentes puntuales de rayos γ reportadas en 4LAC-DR2 y neutrinos detectados por IceCube. Cabe destacar que sólo 8 Cuásares estaban asociados con estas 27 fuentes de rayos γ . Motivados por el *flare* de neutrinos y el evento IceCube-170922A observados en TXS 0506+056 [IceCube Collaboration et al., 2018b, IceCube Collaboration et al., 2018a], analizamos las observaciones multi-frecuencia para cada Cuásar en tres ventanas temporales; semanal (\pm una semana después del momento de disparo), mensual (\pm un mes después del momento de disparo) y anual (\pm un año después del momento de disparo).

Fermi-LAT detectó la fuente 4FGL J2226.8+0051 con una significancia estadística media de 5.45σ a lo largo de 10 años de observaciones. En una ventana temporal semanal, mensual y anual centrada en el tiempo de disparo, esta fuente presenta una significancia estadística de 1.635σ , 4.664σ y 4.902σ , respectivamente. La significancia obtenida al considerar una ventana temporal semanal es baja en comparación con la media estadística reportada. Por su parte, la significancia estadística para una ventana temporal mensual y anual es similar a la comunicada por Fermi-LAT.

La primera fila de la figura 5.1 corresponde a la SED obtenida para esta fuente. Los paneles 5.1a y 5.1b muestran la SED en ventanas temporales semanales y mensuales, que consisten principalmente en límites superiores derivados en el rango de energía de $0.1 - 10^3$ GeV. Finalmente, el panel 5.1c muestra la ventana temporal anual. Los datos derivados para esta SED, con los datos históricos, nos permiten ajustar el llamado segundo bache con una componente leptónica (línea roja discontinua); mientras tanto, los límites superiores al flujo restringen la emisión hadrónica a partir de un proceso foto-hadrónico (línea roja discontinua). También se muestra el flujo de neutrinos esperado estimado a partir de esta fuente. El flujo de neutrinos se crea por la interacción de protones relativistas con fotones del CMB (línea naranja discontinua), infrarrojos (línea cian discontinua) y ópticos (línea púrpura discontinua). Para comparar el comportamiento de la SED en diferentes escalas de tiempo y restringir la emisión de esta fuente. Las curvas obtenidas con este conjunto de parámetros se trazaron en las ventanas temporales anteriores. El valor de mejor ajuste para la ventana temporal anual se muestra en la primera fila de la tabla. Considerando un periodo completo de 13 años, el flujo de neutrinos estimado para este suceso es de 8.39×10^{-12} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ que se muestra como un punto azul marino en los paneles mencionados anteriormente.

Fermi-LAT detectó la fuente emisora de rayos γ 4FGL J1457.4-3539 con una significancia estadís-

tica media de 64.84σ en el conjunto de diez años de observaciones. Aunque esta fuente muestra una significancia estadística de 4.75σ en una ventana de tiempo semanal, esto no es suficiente para afirmar la actividad de rayos γ cerca de la detección del neutrino. La figura 5.1g muestra la SED para una ventana de tiempo semanal, que consiste principalmente en límites superiores derivados en el rango de energía de $0,1 - 10^3$ GeV. En una escala temporal mensual, la fuente se detectó con una significancia estadística de 2.07σ , que disminuye en comparación con una escala temporal semanal. Finalmente, en una escala temporal anual, encontramos el caso más restrictivo para restringir la emisión leptónica. Los límites superiores restringen la emisión hadrónica. El flujo de neutrinos para este suceso corresponde a 1.37×10^{-11} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$. Las SED en estas dos últimas ventanas se aprecian en los paneles 5.1h y 5.1i.

La fuente de rayos gamma 4FGL J1504.4+1029 presenta la significancia estadística media más alta de nuestra muestra, alrededor de 230.28σ . En una ventana temporal de semanas centrada en el tiempo de detección del neutrino, esta fuente muestra una significancia estadística de 5.12σ . La figura 5.1j muestra la SED para una ventana de tiempo semanal, que consiste principalmente en límites superiores derivados en el rango de energía de $0.1 - 10^3$ GeV. En una ventana temporal de meses centrada en el tiempo de *trigger*, la fuente se detecta con una significancia estadística de 9.42σ . La figura 5.1k muestra la SED de esta ventana temporal mensual. La figura 5.1l muestra la SED de J1504.4+1029 en una escala temporal de años centrada en el tiempo de disparo. Esta fuente tiene una significancia estadística de $146,12\sigma$. Los valores para este ajuste usando un modelo leptónico y hadrónico se muestran en la Tabla 5.1. El flujo de neutrinos calculado para esta fuente es de 6.07×10^{-12} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

La fuente de rayos gamma 4FGL J1858.7+5708 es la más cercana de nuestra muestra, con un desplazamiento al rojo de $z=0.077$. A pesar de ello, esta fuente tiene una modesta significancia estadística media de 8.01σ en diez años de observaciones Fermi-LAT. En el rango de energía de $0.1 - 10^3$ GeV, las SED de esta fuente se muestran en las Figuras 5.2a, 5.2b y 5.2c para ventanas de tiempo semanales, mensuales y anuales, respectivamente. Las ventanas temporales semanal, mensual y anual presentan significancias estadísticas de 3.60 , 3.3 y 6.28σ , respectivamente. La emisión de alta energía apenas está limitada por la ventana temporal anual, compuesta principalmente por límites superiores. El flujo de neutrinos para este suceso es de 6.12×10^{-12} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

La fuente de rayos γ 4FGL J1103.0+1157 se detectó con una significancia estadística media de 38.03σ durante los diez años de observación del Fermi-LAT. En las ventanas temporales semanal, mensual y anual, las SED de la fuente emisora de rayos γ de J1103.0+1157 se muestran en las Figuras 5.2d, 5.2e y 5.2f, respectivamente. En estas ventanas temporales, J1103.0+1157 se detecta con significancias estadísticas de 0.00 , 1.26 y 6.28σ , respectivamente. En el rango de energía de $0.1 - 10^3$ GeV, la SED de esta fuente se compone principalmente de límites superiores. El flujo de neutrinos observado en este suceso fue de 6.57×10^{-12} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

En el caso de 4FGL J0206.4-1151, Fermi-LAT detecta esta fuente de rayos γ con una significancia estadística media de 34.14σ . En la ventana de tiempo semanal, mensual y anual, esta fuente muestra significancias estadísticas de 4.66 , 2.05 y 4.79σ , respectivamente. Las figuras 5.2g, 5.2h y 5.2i muestran las SED de esta fuente en las ventanas temporales semanal, mensual y anual, respectivamente. En las escalas de tiempo semanal y mensual, las SEDs se componen enteramente de límites superiores en el rango de energía de $0.1 - 10^3$ GeV. La SED de una ventana temporal anual se compone de

puntos de datos que restringen la emisión de SSC. El flujo de neutrinos obtenido de este evento fue de $5.74 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Finalmente, la fuente 4FGL J2108.5+1434 fue detectada por Fermi-LAT con una significancia estadística media de 11.19σ . Esta fuente se detectó con una significación estadística de 0.0σ , 0.28σ y 4.69σ en las escalas temporales de semanas, meses y años centradas en el tiempo de disparo de la llegada del neutrino, respectivamente. Esta actividad se refleja en la SED compuesta principalmente por límites superiores, como se observa en las figuras 5.2j, 5.2k, y 5.2l, respectivamente, para las ventanas temporales mencionadas anteriormente. El flujo de neutrinos registrado para este evento fue de $6.26 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Las SED se analizaron mediante el modelo lepto-hadrónico de una zona considerando una distribución de electrones y protones acelerados en el jet. El conjunto completo de parámetros derivados del uso de las SEDs es el campo magnético $(10 - 900) \times 10^{-3} \text{ G}$, el radio de la región de emisión $(0.1 - 3.4) \times 10^{17} \text{ cm}$. Estos valores son consistentes con los proporcionados por [Finke et al., 2008]. La escala de tiempo de variabilidad mínima se sitúa en valores del orden de $0.98 \leq \tau_{\nu, \text{min}} \leq 2.60$ días. Las luminosidades de protones calculadas caen dentro de un rango de $L_p \simeq (0.03 - 427) \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ que están por debajo del límite de Eddington. Las luminosidades de los electrones y del campo magnético se estiman dentro de los rangos de $L_e \simeq (0.02 - 57.7) \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ y $L_B \simeq (0.09 - 64.7) \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$, respectivamente. El modelo sugiere la presencia de un principio de equipartición con valores en el rango de $10^{-2} - 0.13$.

El flujo de neutrinos predicho procede de tres poblaciones diferentes de semillas de fotones en las que se producen las interacciones foto-hadrónicas. Cabe destacar que el flujo de neutrinos predicho a partir del modelo teórico es inferior en al menos un orden de magnitud al flujo de neutrinos observado por el observatorio IceCube. Este escenario desfavorece a las FSRQ como progenitoras de neutrinos con el modelo descrito anteriormente, y es necesario considerar otros modelos robustos.

A Publicación de trabajos en revistas científicas arbitradas en pares.

Trabajos en revisión

El trabajo realizado dentro de esta tesis se ha enviado a la revista *New Astronomy* y se encuentra actualmente en estado de revisión. Esta publicación ha sido el producto del liderazgo del autor en el trabajo realizado. Las acciones realizadas en esta publicación son;

- Modelo teórico.
- Recolección de datos históricos para la SED
- Reducción de datos en rayos- γ de Fermi-LAT para las ventanas de tiempo semanales, mensuales y anuales.
- Implementación en `python` de los modelos radiativos que describen la SED propuestos por [Finke et al., 2008] que describe la componente leptónica del modelo y la parametrización del código Monte-Carlo `SOPHIA` desarrollado por [Mücke et al., 2000] propuesta por [Kelner and Aharonian, 2008] para calcular la componente hadrónica y calcular el flujo de rayos gamma y de neutrinos.
- Implementación de una herramienta Monte-Carlo con el paquete `EMCEE` [Foreman-Mackey et al., 2013] para ajustar el espectro del modelo lepto-hadrónico y obtener los mejores valores al ajuste. La implementación de estas herramientas permitieron colaborar en otros trabajos publicados.

La página 76 muestra la primera página de este trabajo. La elaboración de este trabajo fue el resultado de la línea de investigación principal en el doctorado.

Testing FSRQ observed by Fermi-LAT as the counterpart of high-energy neutrinos detected by IceCube.

Antonio Galván^a, Nissim Fraija^a, Edilberto Aguilar-Ruiz^a, Jose Antonio de Diego Onsurbe^a, Maria G. Dainotti^{b,c,d}

^a*Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, C.U., México City, 04510, México, México*

^b*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, 181-0015, Tokyo, Japan*

^c*Space Science Institute, 4765 Walnut St, Suite B, Boulder, 80301, Colorado, U.S.A.*

^d*The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Shonan Village, Hayama, 240-0193, Kanagawa, Japan*

Abstract

The detection of the IceCube neutrino IC170922A in the direction of the blazar TXS 0506+056 in flaring state, the steady neutrino emitter NGC 1068 are evidence of neutrino point-like progenitors. Recently, a diffuse neutrino flux has been detected in the Milky Way, which rejects the background-only hypothesis at 4.5σ . Neutrinos can be produced when relativistic protons interact with radiation or matter. When the protons interact with radiation, in the $p\gamma$ scenario, a high energy neutrino flux and a γ -ray flux are expected due to the decay of charged and neutral pions, respectively. IceCube has a real-time system alert that distributes an alert to multiwavelength observatories to find a transient flux decay responsible for the neutrino detected. This work analyzes γ -ray Quasars detected by Fermi-LAT enclosed in the uncertainty regions on the neutrino best-fit best position reconstructed. We derive the Fermi-LAT spectrum for eight Quasars and search for γ -ray emission on time windows of scales of weeks, months, and years around the neutrino detection. Using the multiwavelength observations, we model the broadband spectral energy distributions via a one-zone leptohadronic model and estimate the expected neutrino flux. Although these Quasars are in spatial coincidence with the neutrino events, the expected neutrino flux is lower by at least one magnitude order than the neutrino flux reported by IceCube.

Keywords: quasars: general, radiation mechanisms: non-thermal, neutrinos

1. Introduction

Victor Hess discovered high-energy Cosmic Rays (UHE-CRs) over a century ago, but their origin is still a mystery. The interaction between cosmic rays (CRs) and magnetic fields makes it impossible to determine where a CR was created (Gaisser et al., 2013). Interactions between γ -ray photons and Cosmic Microwave Background (CMB) photons can reduce the intensity of the γ -rays by a factor that depends on both the redshift and the energy of the γ -rays (e.g. Gilmore et al., 2012; Franceschini and Rodighiero, 2017). Since neutrinos have no net electric charge, they pass through magnetic fields unimpeded from their point of origin toward Earth. Because of their weak force and gravitational interactions with matter, neutrinos are not attenuated as they travel across the universe. The presence of high-energy neutrinos can disguise the search for astronomical UHCR accelerators (Halzen and Hooper, 2002).

So far, just one steady neutrino source has been identified, the Active Nuclei Galaxy (AGN) Seyfert type 2 NGC 1068, which is consistent with a neutrino cluster with a significance of 4.2σ (IceCube Collaboration et al., 2022). Furthermore, on September 22, 2017, IceCube detected the neutrino IceCube-170922A with an energy above 0.1 PeV. The blazar TXS 0506+056 is located inside the uncertainty of the neutrino arrival position; it was in a flare state at the time of the

detection. The probability of this happening is $\sim 3\sigma$ (IceCube Collaboration et al., 2018a). IceCube searched 9.5 years of data in the direction of TXS 0506+056 and found excess respect to the expected neutrino background spanning from September 2014 to March 2015. This variable flux represents evidence of 3.5σ of the neutrino emission from this blazar (IceCube Collaboration et al., 2018b) without an increase in its electromagnetic counterpart.

IceCube does not observe neutrinos directly but rather detects with their 5160 digital optical modules (DOMs) (IceCube Collaboration, 2013) the Cherenkov light produced by secondary particles created by the interaction of the neutrino-nucleon interactions. Neutrinos produce charged-current (CC) interactions with nuclei. The nucleus is broken apart, releasing a shower of hadrons, and a percentage (80%) of the energy is transferred to the charged lepton created. For the case of the ν_μ (as well $\bar{\nu}_\mu$), secondary muons are created along the hadronic shower; those muons can travel several kilometers before decay. Due to this, the light deposited in the detector has a track-like signature. Meanwhile, when a ν_e (also $\bar{\nu}_e$) electron (positron) produces an electromagnetic cascade immediately. This shower overlaps the hadronic shower generated at the vertex point. In the detector, this topology has a spherical shape. With the light deposited in the DOMs, the neutrino's arrival position and energy can be reconstructed. In the case of CC- ν_μ , the long light paths allow for a better reconstruction

Trabajos aceptados y publicados

Durante en el doctorado, se han realizado dos trabajos de segundo autor. El primero de ellos, el trabajo titulado *Modeling Gamma-Ray Burst Afterglow Observations with an Off-axis Jet Emission* [Fraija et al., 2022] publicado en la revista *The Astrophysical Journal*. En este trabajo se modeló analíticamente el Afterflow de un conjunto de 9 GRBs y de 4 alertas de fusiones de objetos compactos NS-BH (Estrella de neutrones y Agujero Negro) y NS-NS (Estrellas de Neutrones) reportadas por las colaboraciones Ligo¹-Virgo². En el modelo se asumió que la emisión electromagnética era producida por radiación de sincrotrón, probando geometrías donde la propagación del jet se encuentra en la línea de visión del observador (*on-axis*) y en donde se encuentra fuera de la línea de visión del observador (*off-axis*) probando distintos perfiles del medio interestelar. En este trabajo se comparó el modelo analítico propuesto con el modelo numérico de un jet tipo *top-hat* propuesto por [Huang et al., 2000].

En este trabajo se colaboró con:

- Evolución numérica del sistema de ecuaciones acopladas propuesto por [Huang et al., 2000], en donde se da seguimiento de la evolución hidrodinámica del jet y se muestra la evolución de; el radio del jet, ángulo de apertura del jet, factor Lorentz del material emitido, y la cantidad de materia barrida por el jet.
- Calcular el flujo producido por radiación de sincrotrón a partir de la evolución hidrodinámica de la evolución de un jet *top-hat*.
- Recolección de datos en multi-frecuencia, tanto de las curvas de luz así como el espectro de los GRBs seleccionados y de las alertas de Ligo-Virgo para aplicar el modelo propuesto.
- Para el modelado de las observaciones obtenidas de GRBs y alertas de Ligo-Virgo con con el flujo teórico esperado, se implementó el modelo teórico en `python` y se desarrolló una herramienta Monte-Carlo con el paquete `EMCEE` [Foreman-Mackey et al., 2013] para obtener el mejor conjunto de parámetros que describen a los destellos. En el caso donde las observaciones consisten de cotas superiores al flujo, se restringe el modelo con los parámetros obtenidos.

En la página 79 se muestra la primer página de este trabajo.

En la línea de investigación de neutrinos, se colaboró en una segunda publicación que ha sido sometida a la revista *Galaxies* y se encuentra en proceso de arbitraje. Este trabajo es liderado por Edilberto Aguilar Ruíz, compañero del posgrado en astrofísica. En este manuscrito se explora la posible emisión de neutrinos de altas energías producidos en BL Lacs de tipo espectral EHSP, asumiendo dos regiones de emisión para la descripción electromagnética y la emisión de neutrinos de 3 EHSP en coincidencia espacial con neutrinos detectados por IceCube.

En este trabajo se contribuyó con;

- Correlación entre fuentes EHSP y neutrinos de altas energías detectados por IceCube.

¹LIGO Scientific Collaboration: LSC

²The Virgo Collaboration

- Datos históricos de la SED de las fuentes seleccionadas, así como la curva de luz en rayos- γ de los posibles progenitores de neutrinos.
- Derivación de la emisión en rayos- γ de las fuentes estudiadas en el rango de 100 MeV a 1 TeV en ventanas de tiempo semanales, mensuales y anuales centradas a la detección del neutrino por IceCube.
- Ajuste del modelo a las observaciones por medio de la técnica χ^2 .

La primera página de este trabajo se muestra en la página 80



Modeling Gamma-Ray Burst Afterglow Observations with an Off-axis Jet Emission

N. Fraija¹, A. Galvan-Gamez¹, B. Betancourt Kamenetskaia^{2,3}, M. G. Dainotti^{4,5}, S. Dichiara^{6,7}, P. Veres⁸,
R. L. Becerra⁹, and A. C. Caligula do E. S. Pedreira¹

¹ Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, C.U., A. Postal 70-264, 04510 Cd. de México, Mexico
nifraija@astro.unam.mx

² TUM Physics Department, Technical University of Munich, James-Franck-Str, D-85748 Garching, Germany

³ Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut), Föhringer Ring 6, 80805 Munich, Germany

⁴ National Astronomical Observatory of Japan, Division of Science, Mitaka, 2-chome, Japan

⁵ Space Science Institute, Boulder, CO, USA

⁶ Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742-4111, USA

⁷ Astrophysics Science Division, NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Road, Greenbelt, MD 20771, USA

⁸ Center for Space Plasma and Aeronomic Research (CSPAR), University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA

⁹ Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-264, 04510 México, CDMX, Mexico

Received 2022 January 19; revised 2022 April 8; accepted 2022 April 19; published 2022 December 6

Abstract

Gamma-ray bursts (GRBs) are fascinating extragalactic objects. They represent a fantastic opportunity to investigate unique properties not exhibited in other sources. Multiwavelength afterglow observations from some short- and long-duration GRBs reveal an atypical long-lasting emission that evolves differently from the canonical afterglow light curves favoring the off-axis emission. We present an analytical synchrotron afterglow scenario and the hydrodynamical evolution of an off-axis top-hat jet decelerated in a stratified surrounding environment. The analytical synchrotron afterglow model is shown during the coasting, deceleration (off- and on-axis emission), and post-jet break decay phases, and the hydrodynamical evolution is computed by numerical simulations showing the time evolution of the Doppler factor, the half-opening angle, the bulk Lorentz factor, and the deceleration radius. We show that numerical simulations are in good agreement with those derived with our analytical approach. We apply the current synchrotron model and successfully describe the delayed nonthermal emission observed in a sample of long and short GRBs with evidence of off-axis emission. Furthermore, we provide constraints on the possible afterglow emission by requiring the multiwavelength upper limits derived for the closest Swift-detected GRBs and promising gravitational-wave events.


Unified Astronomy Thesaurus concepts: [Gamma-ray bursts \(629\)](#); [Non-thermal radiation sources \(1119\)](#); [Interstellar medium \(847\)](#)

1. Introduction

Gamma-ray bursts (GRBs) are among the most powerful transient events in the universe. These events are detected as brief, nonrepeating flashes in the gamma-ray bands. Depending on the burst duration (from milliseconds to thousands of seconds), GRBs are commonly classified as short (sGRBs) and long (lGRBs) GRBs (Kouveliotou et al. 1993). An lGRB is associated with the core collapse (CC) of a dying massive star (Woosley 1993; Galama et al. 1998) that leads to a supernova (SN; Bloom et al. 1999; Woosley & Bloom 2006). At the same time, an sGRB is linked with the merger of a neutron star (NS) with a black hole (BH; Narayan et al. 1992) or two NSs (Duncan & Thompson 1992; Usov 1992; Thompson 1994; Metzger et al. 2011), as demonstrated by the historical gravitational-wave (GW) and electromagnetic detections of the GW170817 event (Abbott et al. 2017a).

On 2017 August 17, the joint detection of two messengers of the fusion of two NSs was achieved for the first time: the GW event (GW170817) by the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) and VIRGO (Abbott et al. 2017a; von Kienlin et al. 2017) and the associated low-luminosity burst, GRB 170817A, by the Fermi Gamma-ray Space

Telescope (von Kienlin et al. 2017) and The International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL; Savchenko et al. 2017). The results of this joint observation confirmed that NS fusion is a progenitor of sGRBs (Abbott et al. 2017). The association of GW170817A with the near host galaxy NGC 4993, located at a redshift of $z \simeq 0.01$ (Coulter et al. 2017; Margutti et al. 2017b), suggested the presence of a local population of low-luminosity bursts following the merger of two NSs (Abbott et al. 2017). Immediately, GRB 170817A was followed up by large observational campaigns covering the X-ray (Troja et al. 2017; Margutti et al. 2017a; Alexander et al. 2018; D’Avanzo et al. 2018; Haggard et al. 2018; Margutti et al. 2018), optical (Lyman et al. 2018; Margutti et al. 2018), and radio (Troja et al. 2017; Abbott et al. 2017b; Dobie et al. 2018; Mooley et al. 2018) bands, among others. In order to describe the delayed multiwavelength observations in timescales of days, synchrotron external-shock models radiated from off-axis top-hat jets (Alexander et al. 2017; Troja et al. 2017; Margutti et al. 2017b; Ioka & Nakamura 2018; Fraija et al. 2019a; Fraija et al. 2019b), radially stratified ejecta (Hotokezaka et al. 2018; Mooley et al. 2018; Fraija et al. 2019c), and structured jets (Kasliwal et al. 2017; Lazzati et al. 2018) were proposed. Later, analyses performed by Burns et al. (2018) and other authors (Fong et al. 2016; Burns et al. 2018; Troja et al. 2018) showed that GRB 150101B exhibits characteristics similar to GRB 170817A, in terms of its two-component structure and an undetected afterglow in a timescale

 Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](#). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.



Article

Testing a Lepto-Hadronic Two-Zone Model with Extreme High-Synchrotron Peaked BL Lacs and Track-Like High-Energy Neutrinos

Edilberto Aguilar-Ruiz *, Antonio Galván-Gómez and Nissim Fraija

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

* Correspondence: eaguilar@astro.unam.mx

Abstract: Numerous studies suggest that high-energy (HE) neutrinos and ultra-high-energy (UHE) cosmic rays could originate from extremely high-synchrotron peaked (EHSP) BL Lacs, which have been identified as effective particle accelerators. Due to the discovery of HE-neutrinos by the IceCube telescope, these hypotheses may shortly have the opportunity to be tested. In this work, we use a two-zone leptohadronic model to explain the spatial coincidence of three EHSP BL Lac: 1RXS J09462.5+010459, 1ES 1101-232, and 3HSP J095507.9+355101 with the arrival of track-like neutrinos. Our results for 1RXS J09462.5+010459 and 1ES 1101-232 indicate that the model accurately describes the electromagnetic emission and neutrino events without increasing the fluxes in the measured bands. In addition, the X-ray flaring state of 3HSP J095507.9+355101 can be explained by our model, but the measured ultraviolet flux during the neutrino arrival time window cannot be explained. For all cases, the broadband emission and neutrino arrival are better described by hard proton distributions ≈ 1.5 . Finally, the proton luminosity required to explain the neutrino fluxes is slightly higher than the Eddington limit with a photopion efficiency of ≈ 0.1 for non-flaring state cases. On the other hand, for the flaring state of 3HSP J095507.9+355101, the proton luminosity must be higher than the Eddington limit at least by one order of magnitude, even if the photopion efficiency reaches unity.



Citation: Aguilar-Ruiz, E.; Galván-Gómez, A.; Fraija, N. Testing a Lepto-Hadronic Two-Zone Model with Extreme High-Synchrotron Peaked BL Lacs and Track-Like High-Energy Neutrinos. *Galaxies* **2023**, *1*, 0. <https://doi.org/>

Received:

Revised:

Accepted:

Published:



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

A subset of Active galactic nuclei (AGN) known as blazars have relativistic jets that point to our direction of sight [1]. They are divided into the Flat-spectrum radio quasars (FSRQ) and BL Lac objects sub-classes [2–4]. These sources include those for which neutrinos have been observed [5,6]. When one of the two jets is aligned with our line of sight, its emission is strongly beamed and Doppler boosted, making it visible from radio up to very-high-energy (VHE) gamma-ray wavelengths [7,8] and exhibiting a wide range of variability. In both their quiescent and flaring phases, these objects display striking differences in distinct bands across the electromagnetic spectrum.

Two peaks can be seen in the spectral energy distribution (SED) of blazars, each one at a different frequency [9–11]. The first peak is typically well-fit assuming synchrotron emission, and is used to classify blazars as low-synchrotron peaked (LSP), intermediate-synchrotron peaked (ISP), or high-synchrotron peaked (HSP). Using these criteria, FSRQ objects are categorized as LSP blazars since the broadband SED shows a peak at infrared wavelengths. While BL Lac sources can be classified as LSP, ISP, or HSP [12]. The synchrotron peak is detected in LSP blazars at frequencies of $\log(\nu_{\text{peak}}) < 14$; in ISP blazars, this occurs at frequencies between $14 < \log(\nu_{\text{peak}}) < 15$; and in HSP blazars, this occurs at frequencies of $\log(\nu_{\text{peak}}) > 15$.

Furthermore, BL Lacs with a synchrotron peak at $\log(\nu_{\text{peak}}) > 17$, are often referred to as extreme high-synchrotron peaked (EHSP) [13]. Moreover, [14,15] have identified a novel category of BL Lacs, depending on the location of the second peak with a HE peak at $E_{\text{peak}} > 1$ TeV; these objects are known as hard-TeV BL Lacs (TBL) or extreme-TeV BL

Publicaciones de tercer autor

Se ha colaborado en múltiples trabajos de tercer autor en adelante a lo largo de la estancia del doctorado. En ellos se ha colaborado en menor medida que en los trabajos anteriormente mencionados, entre los aportes a destacar es:

- Recolección de datos de los fenómenos a estudiar.
- Ajuste de los modelos mediante técnicas como χ^2 o Monte Carlo.
- Implementación de códigos `python` para describir los modelos.
- Reducción de datos en rayos- γ obtenidos por el instrumento LAT.
- Producción y reducción de curvas de luz de GRBs en rayos X de datos obtenidos por los instrumentos BAT y XRT.

Una selección corta de estos trabajos se pueden apreciar en las página 82, página 83, página 84 y página 85 de este apéndice.

Electron–positron pair plasma in TXS 0506+056 and the ‘neutrino flare’ in 2014–2015

N. Fraija,^{*} E. Aguilar-Ruiz and A. Galván-Gómez

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, C.U., A. Postal 70-264, 04510 Mexico City, Mexico

Accepted 2020 July 20. Received 2020 July 18; in original form 2020 April 21

ABSTRACT

The detection of a prolonged flaring activity from blazar TXS 0506+056 in temporal and spatial coincidence with the energetic neutrino IceCube-170922A provided evidence about the photohadronic interactions in this source. However, analysis of the archival neutrino and multiwavelength data from the direction of this blazar between 2014 September and 2015 March revealed a ‘neutrino flare’ without observing quasi-simultaneous activity in the gamma-ray bands, posing challenges to established models. Electron–positron (e^\pm) pairs generated from the accretion discs have been amply proposed as a mechanism of bulk acceleration of sub-relativistic and relativistic jets. These pairs annihilate inside the source producing a line around the electron mass, which is blueshifted in the observed frame (on Earth) and redshifted in the frame of the dissipation region of the jet. The redshifted photons in the dissipation region interact with accelerated protons, producing high-energy neutrinos that contribute significantly to the diffuse neutrino flux in the ~ 10 –20 TeV energy range in connection with gamma-rays from the photopion process, which can be detected by future MeV orbiting satellites. Based on this phenomenological model, we can explain the ‘neutrino flare’ reported in 2014–2015.

Key words: Physical data and processes: acceleration of particles – Neutrinos – radiation mechanisms: non-thermal – Galaxies: active – Galaxies: individual: TXS0506+056.

1 INTRODUCTION

The discovery of a diffuse neutrino flux in the energy range from TeV to PeV by the IceCube telescope has opened a new window in astrophysics at very high energies (VHEs; IceCube Collaboration 2013; Aartsen et al. 2014; The IceCube Collaboration 2015; Kopper & IceCube Collaboration 2017). Because of distinct configurations and strengths of magnetic fields among sources and Earth, cosmic rays (CRs) themselves cannot supply accurate information where these were accelerated (e.g. Pierre Auger Collaboration 2007). A similar situation due to extragalactic background light (EBL) occurs when TeV photons are emitted from sources at high redshifts (e.g. Franceschini, Rodighiero & Vaccari 2008). Whereas magnetic fields deviate CRs, and EBL absorbs TeV photons, high-energy neutrinos can largely travel and reach Earth, giving reliable spatial information about sources.

The IceCube Collaboration reported on 2017 September 22 at 20:54:30.43 UTC the detection of a neutrino-induced muon-track event called IceCube-170922A, which had an energy of ~ 290 TeV (IceCube Collaboration 2018b). The reconstructed direction of this event from statistical and systematic effects was $R.A. = 77^\circ.43_{-0.65}^{+0.95}$ and $Dec = +5^\circ.72_{-0.30}^{+0.50}$ (J2000.0), which was consistent with the location of blazar TXS 0506+056 when it exhibited very high activity in gamma-rays, X-rays, optical, and radio bands. Shortly after the detection, IceCube analysed the archival muon-neutrino data collected over 9.5 yr in the direction of this blazar. This

collaboration reported an excess of high-energy neutrinos over the atmospheric background between 2014 September and 2015 March (IceCube Collaboration 2018a). This excess was associated with a large number of neutrinos (13 ± 5) called ‘neutrino flare’, which had energies in the range of ~ 10 –20 TeV (Rodrigues et al. 2019). Surprisingly, this ‘neutrino flare’ was detected without significant activity in the electromagnetic bands. This blazar was associated with a redshift of $z = 0.3365 \pm 0.0010$ (Paiano et al. 2018), after the identification of three weak emission lines ([O II] 327.7 nm, [O III] 500.7 nm, and [N II] 658.3 nm).

Several interpretations about the IceCube-170922A event and the ‘neutrino flare’ with and without quasi-simultaneous gamma-ray activity have been suggested. Taking into account the Fermi data, Padovani et al. (2018) claimed that during the period associated with the ‘neutrino flare’, the broad-band spectral energy distribution (SED) of this blazar could have been hardened above 2 GeV. However, Fermi-LAT Collaboration (2019) argued that this atypical behaviour might not be relevant. Murase, Oikonomou & Petropoulou (2018) studied the IceCube-170922A event and the ‘neutrino flare’ from TXS 0506+056 and concluded that a two-zone synchrotron self-Compton (SSC) model could naturally explain both detections in the framework of the photomeson or the hadronuclear processes. Reimer, Böttcher & Buson (2019) reconstructed the minimum target photon spectrum to explain the ‘neutrino flare’, and the electromagnetic emission of the secondary particles. They concluded that the same process could not have originated neutrinos and gamma-rays. Gao et al. (2019) demonstrated that the IceCube-170922A event could be explained with a moderate increase in the CRs during the flaring activity. Rodrigues et al. (2019) investigated whether the

^{*} E-mail: nifraija@astro.unam.mx

A two-zone model as origin of hard TeV spectrum in extreme BL lacs

E. Aguilar-Ruiz,^{*} N. Fraija,^{*} A. Galván-Gómez and E. Benítez[®]

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, AP 70-264, CDMX 04510, Mexico

Accepted 2022 February 27. Received 2022 January 26; in original form 2021 November 17

ABSTRACT

The emission of the so-called extreme BL Lacs poses challenges to the particle acceleration models. The hardness of their spectrum, $\lesssim 2$, in the high-energy band demands unusual parameters using the standard one-zone synchrotron self-Compton (SSC) model with a deficient magnetized plasma. Some authors use either two-zone or hadronic/lepto-hadronic models to relax these atypical values. In this work, we present a lepto-hadronic two-zone model to explain the multi-wavelength observations of the six best-known *extreme* BL Lacs. The very-high-energy gamma-ray observations are described by the photo-hadronic processes in a blob close to the AGN core and by SSC and external inverse Compton-processes in an outer blob. The photo-hadronic interactions occur when accelerated protons in the inner blob interact with annihilation line photons from a sub-relativistic pair plasma. The X-ray observations are described by synchrotron radiation from the outer blob. The parameter values found from the description of the spectral energy distribution for each object with our phenomenological model are similar to each other, and lie in the typical range reported in BL Lacs.

Key words: astroparticle physics – BL Lacertae objects: general – BL Lacertae objects: individual: 1ES 0229 + 200 – radiation mechanisms: non-thermal – relativistic process – gamma-rays: galaxies.

1 INTRODUCTION

Blazars are a class of active galactic nuclei (AGN) that present a relativistic jet pointing close to the line of sight (Urry & Padovani 1995). Due to this particular orientation, blazar emission is dominated by relativistic aberration and boosting effects produced in the jet (Blandford & Königl 1979). They are multi-wavelength emitters from the radio to the gamma-ray bands and found to be the most numerous extragalactic gamma-ray sources (Ackermann et al. 2015). The spectral energy distribution (SED) of blazars shows two low- and high-energy peaked humps. The low-energy hump peaks in the sub-mm to X-rays energy band, and the high energy at the MeV-TeV energies. Based on optical spectroscopy, blazars are usually divided into two classes: Flat Spectrum Radio Quasars (FSRQs) and BL Lac objects (BL Lacs) (e.g. Angel & Stockman 1980; Padovani et al. 2017). The FSRQs present strong emission lines, whereas BL Lac objects have weak (i.e. equivalent width (EW) $< 5 \text{ \AA}$) or absent emission lines (Marcha et al. 1996). In particular, the BL Lac class is further classified depending on the location of the low-energy peak in the SED, which is well fitted with synchrotron emission. Therefore, low-synchrotron peak (LSP) BL Lacs have peaks at $\nu_p^S < 10^{14} \text{ Hz}$; intermediate-synchrotron peak (ISP) at $10^{14} < \nu_p^S < 10^{15} \text{ Hz}$, and high-synchrotron peak (HSP) at $\nu_p^S > 10^{15} \text{ Hz}$ (Abdo et al. 2010).

The existence of diversity in the positions of the synchrotron peak and the jet power hints at a possible correlation between them. Fossati et al. (1998) proposed the existence of the so-called blazar sequence where the LSP BL Lacs and FRSQ are found to be the most powerful sources, while the HSP BL Lacs appeared as the less powerful ones. Also, a new type of HSP BL Lacs has an intrinsic

very-high-energy (VHE) spectrum ($\Gamma \leq 1.5\text{--}1.9$) with their peak located above $> 2\text{--}10 \text{ TeV}$. These are the so-called *extreme*-TeV BL Lacs (TBLs; Tavecchio et al. 2011; Costamante et al. 2018). Regarding the synchrotron peak, most have a high peak above 1 keV ($> 10^{17} \text{ Hz}$). Due to the extreme or high position of their synchrotron peak, Costamante et al. (2001) named them as *Extreme*-HSP (EHSP).

A blazar can be an EHSP and a TBL simultaneously, but there are no pieces of evidence that support the necessary co-existence of the two conditions. On the other hand, during its lifetime, a blazar can show only EHSP or TBL behaviour, suggesting the extreme condition is a transient stage, e.g. (Ahnen et al. 2018). Furthermore, Foffano et al. (2019) proposed that the EHSP objects are not a homogeneous class because they show different spectral properties in the TeV-band.

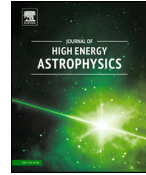
Modeling the low-energy peak of EHSP objects with synchrotron emission from an electron population does not represent a problem by the standard shock acceleration mechanisms considering one-zone geometry (e.g. Aharonian 2004; Tavecchio et al. 2010; Fraija et al. 2017a,c). However, when using the standard one-zone synchrotron self-Compton (SSC) model, there appear many problems when modeling the high-energy TeV peak (see Biteau et al. 2020, for a recent review). In the case of TBLs, these models demand parameters with exceptional values (e.g. see Costamante et al. 2018; Cerruti et al. 2015, and references therein). One of the main problems is that TBL sources operate in the Klein-Nishina (KN) regime, for which the flux is expected to be suppressed, thus making the formation of a hard-spectrum difficult (Tavecchio et al. 2009). Another issue is that the SSC model demands a weakly magnetized plasma with an equipartition value much less than the unity ($U_B/U_e \ll 1$), which contradicts the observations (Nemmen et al. 2012). Moreover, SSC model in TBL requires a high Doppler boosting factor (e.g. $\mathcal{D} \geq 40$) and minimum electron Lorentz factors as great as $\gamma_{e,\min} \gtrsim 10^3$ (e.g.

^{*} E-mail: eaguilar@astro.unam.mx (ER); nifraija@astro.unam.mx (NF)



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of High Energy Astrophysics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jheap

High-energy neutrino fluxes from hard-TeV BL Lacs

E. Aguilar-Ruiz*, N. Fraija, A. Galván-Gámez

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, C.U., A. Postal 70-264, 04510 Ciudad de México, Mexico



ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 October 2022

Received in revised form 13 February 2023

Accepted 21 February 2023

ABSTRACT

Blazars have been pointed out as promising high-energy (HE) neutrinos sources, although the mechanism is still under debate. The blazars with a hard-TeV spectrum, which leptonic models can hardly explain, can be successfully interpreted in the hadronic scenarios. Recently, Aguilar et al. proposed a leptohadronic two-zone model to explain the multi-wavelength observations of the six best-known extreme BL Lacs and showed that the hadronic component could mainly interpret very-high-energy (VHE) emission. In this work, we apply this hadronic model to describe the VHE gamma-ray fluxes of 14 extreme BL Lacs and estimate the respective HE neutrino flux from charge-pion decay products. Finally, we compare our result with the diffuse flux observed by the IceCube telescope, showing that the neutrino fluxes from these objects are negligible.

© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The so-called *extreme* BL Lacs are interesting astrophysical objects to study efficient particle accelerators, which could be linked to the ultra-high-energy cosmic ray (UHECR) and the high-energy (HE) neutrino observations (Biteau et al., 2020). There are two ways the extreme behavior in these sources is manifest: as extreme synchrotron peak (EHSPs; Costamante et al., 2001) or/and extreme (hard)-TeV BL Lacs (TBLs; Tavecchio et al., 2011; Costamante et al., 2018). Both conditions are characterized by having an extreme shift of the hump's peak on its spectral energy distribution (SED), where for the synchrotron hump, the spectral break is above $\gtrsim 2.4 \times 10^{17}$ Hz, and for the HE hump, the energy spectral break is above $\gtrsim 2$ TeV with spectral index characterizing a hard spectrum ($\gamma_{\text{VHE}}^{\text{intr}} \lesssim 2$). An interesting feature is that some EHSP exhibit TBL behavior only during flares activities, suggesting the hard gamma-ray spectrum is not a permanent stage of EHSP (e.g., Ahnen et al., 2018; Aharonian et al., 1999; Aleksić et al., 2014).

Leptonic models (e.g., electron synchrotron process) successfully describe the low-energy hump of the EHSP and TBL objects without presenting big problems for the standard shock acceleration mechanism with one-zone geometry (e.g., see Aharonian, 2004; Tavecchio et al., 2010; Fraija et al., 2017a,b). However, considering the standard one-zone synchrotron self-Compton (SSC) model, there are a lot of issues trying to model the HE hump of TBLs (see ref. Biteau et al., 2020, for a recent review), mainly because it demands parameters with exceptional and atypical values (Costa-

mante et al., 2018; Kaufmann et al., 2011; Tavecchio et al., 2009; Katarzyński et al., 2006; Lefa et al., 2011). Different leptonic models have been proposed as solutions to the issues of the SSC model, for instance, an external radiation field, a Maxwellian-like Lefa et al. (2011), and an anisotropic electron distribution Tavecchio and Sobacchi (2020). On the other hand, either hadronic or leptohadronic models promise to relax the atypical parameter values demanded by the SSC model for TBLs (Cerruti et al., 2015; Tavecchio et al., 2014; Zheng et al., 2016).

The key to discriminating between the models with one or more hadronic components is the neutrino association with TBL, which could be tested with IceCube Observatory at TeV-PeV energies. A total of 102 HE-neutrino events has been reported by IceCube collaboration to the so-called High-Energy Starting Events (HESE) catalog (Aartsen et al., 2013a,b, 2017, 2020; Abbasi et al., 2021). Meanwhile, 36 events are reported to the so-called Extremely High Energy (EHE) catalog (Aartsen et al., 2016; Haack and Wiebusch, 2017; Stettner, 2019).

The measured neutrino fluxes using both catalogs show consistent values with single power-law functions, with spectral indexes of $\gamma_{\nu, \text{HESE}} = -2.87^{+0.20}_{-0.19}$ and $\gamma_{\nu, \text{EHE}} = -2.28^{+0.08}_{-0.09}$ for HESE and EHE, respectively. On the other hand, when only cascade data for electron and tau neutrinos are considered, the measured flux shows a spectrum with a spectral index of $\gamma_{\nu, \text{bkg}} = -2.53 \pm 0.07$ and normalization constant at 100 TeV of $\phi_{\nu, \text{bkg}} = 1.66^{+0.25}_{-0.27} C_0$ with $C_0 = 3 \times 10^{-18} \text{ GeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ (Aartsen et al., 2020). Although many astrophysical objects have been proposed as potential sources (for a review see Becker, 2008; Ahlers and Halzen, 2015), the only HE-neutrino source identified up to date is the BL Lac TXS 0506 +056 Aartsen et al. (2018a,b). However, the mechanism

* Corresponding author.

E-mail address: eaguilar@astro.unam.mx (E. Aguilar-Ruiz).



GRB Afterglow of the Sub-relativistic Materials with Energy Injection

N. Fraija¹, B. Betancourt Kamenetskaia^{1,2,3}, A. Galvan-Gamez¹, M. G. Dainotti^{4,5}, R. L. Becerra⁶, S. Dichiaro^{7,8},
P. Veres⁹, and A. C. Caligula do E. S. Pedreira¹

¹ Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, C.U., A. Postal 70-264, 04510 México City, México
nifraija@astro.unam.mx

² TUM Physics Department, Technical University of Munich, James-Frank-Strasse, D-85748 Garching, Germany

³ Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut), Föhringer Ring 6, 80805 Munich, Germany

⁴ National Astronomical Observatory of Japan, Division of Science, Mitaka, 2-chome, Japan

⁵ Space Science Institute, Boulder, CO, USA

⁶ Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-264, 04510 México, CDMX, Mexico

⁷ Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742-4111, USA

⁸ Astrophysics Science Division, NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Road, Greenbelt, MD 20771, USA

⁹ Center for Space Plasma and Aeronomic Research (CSPAR), University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA

Received 2022 January 18; revised 2022 April 24; accepted 2022 May 17; published 2022 July 19

Abstract

Sub-relativistic materials launched during the merger of binary compact objects and the core collapse of massive stars acquire velocity structures when expanding in a stratified environment. The remnant (either a spinning magnetized neutron star (NS) or a central black hole) from the compact object or core collapse could additionally inject energy into the afterglow via spin-down luminosity or/and by accreting fallback material, producing a refreshed shock, modifying the dynamics, and leading to rich radiation signatures at distinct timescales and energy bands with contrasting intensities. We derive the synchrotron light curves evolving in a stratified environment when a power-law velocity distribution parameterizes the energy of the shock, and the remnant continuously injects energy into the blast wave. As the most relevant case, we describe the latest multiwavelength afterglow observations ($\gtrsim 900$ days) of the GW170817/GRB 170817A event via a synchrotron afterglow model with energy injection of a sub-relativistic material. The features of the remnant and the synchrotron emission of the sub-relativistic material are consistent with a spinning magnetized NS and the faster *blue* kilonova afterglow, respectively. Using the multiband observations of some short bursts with evidence of kilonovae, we provide constraints on the expected afterglow emission.

Unified Astronomy Thesaurus concepts: [Gamma-ray bursts \(629\)](#); [Non-thermal radiation sources \(1119\)](#)

1. Introduction

Gamma-ray bursts (GRBs) are among the most powerful gamma-ray sources in the universe. They could be generated from the merger of binary compact objects (BCOs; Duncan & Thompson 1992; Usov 1992; Thompson 1994; Metzger et al. 2011) or the death of massive stars (Woosley 1993; Paczyński 1998; Woosley & Bloom 2006a). The merger of BCOs; a black hole (BH)—a neutron star (NS) or NS–NS, leading to kilonovae (KNe), is correlated with short-duration gamma-ray bursts (sGRBs; $T_{90}^{10} \lesssim 2$ s; Li & Paczyński 1998; Rosswog 2005; Metzger et al. 2010; Kasen et al. 2013; Metzger 2017). On the other hand, long-duration gamma-ray bursts (lGRBs; $T_{90} \gtrsim 2$ s; Kouveliotou et al. 1993) are associated with the core collapse (CC) of dying massive stars (Woosley 1993; Galama et al. 1998) leading to supernovae (SNe; Bloom et al. 1999; Woosley & Bloom 2006b). It is believed that in both scenarios large quantities of materials with a wide range of velocities are ejected. In the framework of CC–SNe (depending on the type of SN association), several materials ejected with sub-relativistic

velocities less than $\beta \lesssim 0.4^{11}$ have been reported (see, e.g., Kulkarni et al. 1998; Bloom et al. 1999; Woosley & Bloom 2006b; Valenti et al. 2008; Gal-Yam 2017; Izzo et al. 2019, 2020; Modjaz et al. 2020; Nicholl et al. 2020). Regarding the merger of two NSs, sub-relativistic materials such as the cocoon, the shock breakout, and the dynamical and wind ejecta are launched with velocities in the range $0.03 \lesssim \beta \lesssim 0.8^{12}$ (see, e.g., Dessart et al. 2009; Metzger & Fernández 2014; Fernández et al. 2015; Kyutoku et al. 2014; Metzger et al. 2015; Nagakura et al. 2014; Murguia-Berthier et al. 2014; Lazzati et al. 2017, 2018; Gorieli et al. 2011; Hotokezaka et al. 2013; Bauswein et al. 2013; Wanajo et al. 2014). While the mass and velocity inferred for the first GRB/KN association¹³ were $M_{\text{ej}} \approx (10^{-4} - 10^{-2})M_{\odot}$ and $\beta \approx (0.1 - 0.3)$, respectively (Coulter et al. 2017; Arcavi et al. 2017; Cowperthwaite et al. 2017; Nicholl et al. 2017; Metzger 2019), the mass and velocity inferred for the first GRB/SN association¹⁴ was $M_{\text{ej}} \approx 10^{-5}M_{\odot}$ and $\beta \approx (0.2 - 0.3)$, respectively (Kulkarni et al. 1998).

In the sub-relativistic regime, the interaction of the decelerated material with the surrounding circumburst medium has been explored to interpret the multiwavelength observations in timescales from days to several years as synchrotron

¹⁰ T_{90} is defined as the time during which the cumulative number of collected counts above background rises from 5% to 95%.

¹¹ Hereafter, we adopt natural units $c = \hbar = 1$.

¹² Some authors have considered the shock breakout material in the sub-, trans-, and ultra-relativistic regimes (see, e.g., Kyutoku et al. 2014; Metzger et al. 2015; Fraija et al. 2019c).

¹³ GRB 170817A/AT 2017gfo.

¹⁴ GRB 980425/SN1998bw.

Bibliografía

- [Aartsen et al., 2013] Aartsen, M. G., Abbasi, R., Abdou, Y., et al. (2013). First observation of pev-energy neutrinos with icecube. *Phys. Rev. Lett.*, 111:021103.
- [Aartsen et al., 2016] Aartsen, M. G., Abraham, K., Ackermann, M., et al. (2016). Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data. *ApJ*, 833(1):3.
- [Aartsen et al., 2014] Aartsen, M. G., Ackermann, M., Adams, J., et al. (2014). Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data. *Physical Review Letters*, 113(10):101101.
- [Aartsen et al., 2017] Aartsen, M. G., Ackermann, M., Adams, J., et al. (2017). The IceCube realtime alert system. *Astroparticle Physics*, 92:30–41.
- [Abbasi et al., 2023] Abbasi, R., Ackermann, M., Adams, J., et al. (2023). IceCat-1: the IceCube Event Catalog of Alert Tracks. *arXiv e-prints*, page arXiv:2304.01174.
- [Abdo et al., 2010] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. (2010). Fermi Large Area Telescope First Source Catalog. *ApJS*, 188(2):405–436.
- [Abdo et al., 2011a] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. (2011a). Fermi Large Area Telescope Observations of Markarian 421: The Missing Piece of its Spectral Energy Distribution. *ApJ*, 736(2):131.
- [Abdo et al., 2011b] Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. (2011b). Insights into the High-energy γ -ray Emission of Markarian 501 from Extensive Multifrequency Observations in the Fermi Era. *ApJ*, 727(2):129.
- [Abdollahi et al., 2020] Abdollahi, S., Acero, F., Ackermann, M., et al. (2020). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *ApJS*, 247(1):33.
- [Abdollahi et al., 2022] Abdollahi, S., Acero, F., Baldini, L., et al. (2022). Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *ApJS*, 260(2):53.
- [Acero et al., 2015] Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., et al. (2015). Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog. *ApJS*, 218(2):23.
- [Ahlers and Halzen, 2017] Ahlers, M. and Halzen, F. (2017). IceCube: Neutrinos and multimessenger astronomy. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2017(12):12A105.

- [Ajello et al., 2020] Ajello, M., Angioni, R., Axelsson, M., et al. (2020). The Fourth Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope. *ApJ*, 892(2):105.
- [Ajello et al., 2022] Ajello, M., Baldini, L., Ballet, J., et al. (2022). The Fourth Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope: Data Release 3. *ApJS*, 263(2):24.
- [Albareti et al., 2017] Albareti, F. D., Allende Prieto, C., Almeida, A., et al. (2017). The 13th Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-IV Survey Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJS*, 233(2):25.
- [Atwood et al., 2009] Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al. (2009). The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *ApJ*, 697(2):1071–1102.
- [Ayala and HAWC Collaboration, 2020a] Ayala, H. and HAWC Collaboration (2020a). IceCube 200109A: No significant detection in HAWC. *GRB Coordinates Network*, 26709:1.
- [Ayala and HAWC Collaboration, 2020b] Ayala, H. and HAWC Collaboration (2020b). IceCube-201130A: No significant detection in HAWC. *GRB Coordinates Network*, 28984:1.
- [Ayala and HAWC Collaboration, 2021] Ayala, H. and HAWC Collaboration (2021). IceCube-211216A: No significant detection in HAWC. *GRB Coordinates Network*, 31271:1.
- [Ballet et al., 2020] Ballet, J., Burnett, T. H., Digel, S. W., et al. (2020). Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 2. *arXiv e-prints*, page arXiv:2005.11208.
- [Blandford and Königl, 1979] Blandford, R. D. and Königl, A. (1979). Relativistic jets as compact radio sources. *ApJ*, 232:34–48.
- [Blaufuss et al., 2019] Blaufuss, E., Kintscher, T., Lu, L., et al. (2019). The Next Generation of IceCube Real-time Neutrino Alerts. In *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, volume 36 of *International Cosmic Ray Conference*, page 1021.
- [Blumenthal and Gould, 1970] Blumenthal, G. R. and Gould, R. J. (1970). Bremsstrahlung, synchrotron radiation, and compton scattering of high-energy electrons traversing dilute gases. *Rev. Mod. Phys.*, 42:237–270.
- [Bose and Rakshit, 2021] Bose, D. and Rakshit, S. (2021). *High Energy Astrophysical Neutrinos*. SpringerBriefs in Astronomy. Springer International Publishing.
- [Bose and Rakshit, 2021] Bose, D. and Rakshit, S. (2021). *High Energy Astrophysical Neutrinos*. Springer Cham.
- [Celotti and Ghisellini, 2008] Celotti, A. and Ghisellini, G. (2008). The power of blazar jets. *MNRAS*, 385(1):283–300.
- [Condon et al., 1998] Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al. (1998). The NRAO VLA Sky Survey. *AJ*, 115(5):1693–1716.
- [D’Abrusco et al., 2014] D’Abrusco, R., Massaro, F., Paggi, A., et al. (2014). The WISE Blazar-like Radio-loud Sources: An All-sky Catalog of Candidate γ -ray Blazars. *ApJS*, 215(1):14.

- [Dermer et al., 2014] Dermer, C. D., Murase, K., and Inoue, Y. (2014). Photopion production in black-hole jets and flat-spectrum radio quasars as PeV neutrino sources. *Journal of High Energy Astrophysics*, 3:29–40.
- [Dunlop et al., 2003] Dunlop, J. S., McLure, R. J., Kukula, M. J., et al. (2003). Quasars, their host galaxies and their central black holes. *MNRAS*, 340(4):1095–1135.
- [Evans et al., 2020] Evans, P. A., Keivani, A., Kennea, J. A., et al. (2020). IceCube-200109A: Swift-XRT and UVoT Follow-up Observations. *GRB Coordinates Network*, 26700:1.
- [Fermi Science Support Development Team, 2019] Fermi Science Support Development Team (2019). Fermitools: Fermi Science Tools. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1905.011.
- [Ferrigno et al., 2019] Ferrigno, C., Savchenko, V., Doyle, M., et al. (2019). IceCube 190730A: one weakly associated counterpart candidates in INTEGRAL SPI-ACS, and IBIS prompt observation. *GRB Coordinates Network*, 25232:1.
- [Fey et al., 2004] Fey, A. L., Ma, C., Arias, E. F., et al. (2004). The Second Extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-EXT.1. *AJ*, 127(6):3587–3608.
- [Fey et al., 2006] Fey, A. L., Ojha, R., Quick, J. F. H., et al. (2006). Milliarcsecond-Accurate Astrometry of 34 Southern Hemisphere Radio Sources. *AJ*, 132(5):1944–1949.
- [Finke et al., 2008] Finke, J. D., Dermer, C. D., and Böttcher, M. (2008). Synchrotron Self-Compton Analysis of TeV X-Ray-Selected BL Lacertae Objects. *ApJ*, 686(1):181–194.
- [Foreman-Mackey et al., 2013] Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., et al. (2013). emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925):306.
- [Fraija et al., 2017a] Fraija, N., Benítez, E., Hiriart, D., et al. (2017a). Long-term Optical Polarization Variability and Multiwavelength Analysis of Blazar Mrk 421. *ApJS*, 232(1):7.
- [Fraija et al., 2019] Fraija, N., Benítez, E., Hiriart, D., et al. (2019). Optical Polarimetric and Multiwavelength Flaring Activity of Blazar 3C 279. *ApJS*, 245(1):18.
- [Fraija et al., 2022] Fraija, N., Galvan-Gamez, A., Betancourt Kamenetskaia, B., Dainotti, M. G., Dichiara, S., Veres, P., Becerra, R. L., and do E. S. Pedreira, A. C. C. (2022). Modeling Gamma-Ray Burst Afterglow Observations with an Off-axis Jet Emission. *ApJ*, 940(2):189.
- [Fraija and Marinelli, 2016] Fraija, N. and Marinelli, A. (2016). Neutrino, γ -Ray, and Cosmic-Ray Fluxes from the Core of the Closest Radio Galaxies. *ApJ*, 830(2):81.
- [Fraija et al., 2017b] Fraija, N., Marinelli, A., Galván-Gómez, A., et al. (2017b). Modeling the spectral energy distribution of the radio galaxy IC310. *Astroparticle Physics*, 89:14–22.
- [Franceschini and Rodighiero, 2017] Franceschini, A. and Rodighiero, G. (2017). The extragalactic background light revisited and the cosmic photon-photon opacity. *A&A*, 603:A34.

- [Franceschini et al., 2008] Franceschini, A., Rodighiero, G., and Vaccari, M. (2008). Extragalactic optical-infrared background radiation, its time evolution and the cosmic photon-photon opacity. *A&A*, 487(3):837–852.
- [Gaisser et al., 2013] Gaisser, T. K., Stanev, T., and Tilav, S. (2013). Cosmic ray energy spectrum from measurements of air showers. *Frontiers of Physics*, 8(6):748–758.
- [Galván et al., 2019] Galván, A., Martínez-Castellanos, I., García-Gonzalez, J. A., et al. (2019). IceCube-190730A - HAWC follow-up. *GRB Coordinates Network*, 25238:1.
- [Garrappa et al., 2019] Garrappa, S., Buson, S., and Fermi-LAT Collaboration (2019). Fermi-LAT Gamma-ray Observations of IceCube-191215A. *GRB Coordinates Network*, 26459:1.
- [Garrappa et al., 2020] Garrappa, S., Buson, S., Kadler, M., et al. (2020). Fermi-LAT Gamma-ray Observations of IceCube-201130A. *GRB Coordinates Network*, 28978:1.
- [Garrappa et al., 2021] Garrappa, S., Buson, S., Sinapius, J., et al. (2021). Fermi-LAT Gamma-ray Observations of IceCube-211216A. *GRB Coordinates Network*, 31257:1.
- [Gattano et al., 2018] Gattano, C., Lambert, S. B., and Le Bail, K. (2018). Extragalactic radio source stability and VLBI celestial reference frame: insights from the Allan standard deviation. *A&A*, 618:A80.
- [Gilmore et al., 2012] Gilmore, R. C., Somerville, R. S., Primack, J. R., et al. (2012). Semi-analytic modelling of the extragalactic background light and consequences for extragalactic gamma-ray spectra. *MNRAS*, 422(4):3189–3207.
- [Gotz et al., 2019] Gotz, D., Lutovinov, A., Savchenko, V., et al. (2019). IceCube-191215A: No counterpart candidates in INTEGRAL SPI-ACS prompt observation. *GRB Coordinates Network*, 26436:1.
- [Gregoire et al., 2020] Gregoire, T., D’Ammando, F., Fox, D. B., et al. (2020). Swift observations of the Fermi-LAT source 4FGL J0206.4-1151 in the error region of IceCube-201130A. *GRB Coordinates Network*, 28979:1.
- [Haack et al., 2017] Haack, C., Wiebusch, C., and IceCube Collaboration (2017). A measurement of the diffuse astrophysical muon neutrino flux using eight years of IceCube data. In *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, volume 301 of *International Cosmic Ray Conference*, page 1005.
- [Halzen and Hooper, 2002] Halzen, F. and Hooper, D. (2002). High-energy neutrino astronomy: the cosmic ray connection. *Reports on Progress in Physics*, 65(7):1025–1078.
- [Healey et al., 2008] Healey, S. E., Romani, R. W., Cotter, G., et al. (2008). CGRaBS: An All-Sky Survey of Gamma-Ray Blazar Candidates. *ApJS*, 175(1):97–104.
- [Healey et al., 2007] Healey, S. E., Romani, R. W., Taylor, G. B., et al. (2007). CRATES: An All-Sky Survey of Flat-Spectrum Radio Sources. *ApJS*, 171(1):61–71.

- [Hovatta et al., 2021] Hovatta, T., Lindfors, E., Kiehlmann, S., et al. (2021). Association of IceCube neutrinos with radio sources observed at Owens Valley and Metsähovi Radio Observatories. *A&A*, 650:A83.
- [Huang et al., 2000] Huang, Y. F., Gou, L. J., Dai, Z. G., and Lu, T. (2000). Overall Evolution of Jetted Gamma-Ray Burst Ejecta. *ApJ*, 543(1):90–96.
- [IceCube Collaboration, 2013] IceCube Collaboration (2013). Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. *Science*, 342(6161):1242856.
- [IceCube Collaboration, 2018] IceCube Collaboration (2018). IceCube-181014A - IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. *GRB Coordinates Network*, 23338:1.
- [IceCube Collaboration, 2019a] IceCube Collaboration (2019a). IceCube-190730A - IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. *GRB Coordinates Network*, 25225:1.
- [IceCube Collaboration, 2019b] IceCube Collaboration (2019b). IceCube-191215A - IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. *GRB Coordinates Network*, 26435:1.
- [IceCube Collaboration, 2020a] IceCube Collaboration (2020a). IceCube-200109A: IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. *GRB Coordinates Network*, 26696:1.
- [IceCube Collaboration, 2020b] IceCube Collaboration (2020b). IceCube-201130A: IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. *GRB Coordinates Network*, 28969:1.
- [IceCube Collaboration, 2021] IceCube Collaboration (2021). IceCube-211216A - IceCube observation of a high-energy neutrino candidate track-like event. *GRB Coordinates Network*, 31241:1.
- [IceCube Collaboration et al., 2018a] IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. (2018a). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science*, 361(6398):eaat1378.
- [IceCube Collaboration et al., 2018b] IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Ackermann, M., et al. (2018b). Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science*, 361(6398):147–151.
- [IceCube Collaboration et al., 2022] IceCube Collaboration, Abbasi, R., Ackermann, M., et al. (2022). Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. *Science*, 378(6619):538–543.
- [Johnston et al., 1995] Johnston, K. J., Fey, A. L., Zacharias, N., et al. (1995). A Radio Reference Frame. *AJ*, 110:880.
- [Kadler et al., 2016] Kadler, M., Krauß, F., Mannheim, K., et al. (2016). Coincidence of a high-fluence blazar outburst with a PeV-energy neutrino event. *Nature Physics*, 12(8):807–814.
- [Kataoka et al., 2001] Kataoka, J., Takahashi, T., Wagner, S. J., et al. (2001). Characteristic X-Ray Variability of TeV Blazars: Probing the Link between the Jet and the Central Engine. *ApJ*, 560(2):659–674.

- [Kelner and Aharonian, 2008] Kelner, S. R. and Aharonian, F. A. (2008). Energy spectra of gamma rays, electrons, and neutrinos produced at interactions of relativistic protons with low energy radiation. *Physical Review D*, 78(3):034013.
- [Kopper et al., 2015] Kopper, C., Giang, W., and Kurahashi, N. (2015). Observation of Astrophysical Neutrinos in Four Years of IceCube Data. In *34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015)*, volume 34 of *International Cosmic Ray Conference*, page 1081.
- [Kopper and IceCube Collaboration, 2017] Kopper, C. and IceCube Collaboration (2017). Observation of Astrophysical Neutrinos in Six Years of IceCube Data. In *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, volume 301 of *International Cosmic Ray Conference*, page 981.
- [Lipunov et al., 2019a] Lipunov, V., Gorbovskoy, E., Kornilov, V., et al. (2019a). IceCube-190730A: MASTER optical observation. *GRB Coordinates Network*, 25231:1.
- [Lipunov et al., 2019b] Lipunov, V., Gorbovskoy, E., Kornilov, V., et al. (2019b). IceCube Alert 191215.47: Global MASTER-Net observations report. *GRB Coordinates Network*, 26434:1.
- [Lipunov et al., 2020a] Lipunov, V., Gorbovskoy, E., Kornilov, V., et al. (2020a). IceCube Alert 200109.99: Global MASTER-Net observations report. *GRB Coordinates Network*, 26694:1.
- [Lipunov et al., 2020b] Lipunov, V., Gorbovskoy, E., Kornilov, V., et al. (2020b). IceCube Alert 201130.85: Global MASTER-Net observations report. *GRB Coordinates Network*, 28968:1.
- [Lipunov et al., 2021a] Lipunov, V., Kornilov, V., Gorbovskoy, E., et al. (2021a). IceCube Alert 211216.30: Global MASTER-Net observations report. *GRB Coordinates Network*, 31245:1.
- [Lipunov et al., 2021b] Lipunov, V., Kornilov, V., Gorbovskoy, E., et al. (2021b). IceCube Alert 211216.99: Global MASTER-Net observations report. *GRB Coordinates Network*, 31248:1.
- [Lott et al., 2020] Lott, B., Gasparrini, D., and Ciprini, S. (2020). The Fourth Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope – Data Release 2. *arXiv e-prints*, page arXiv:2010.08406.
- [McLure and Dunlop, 2004] McLure, R. J. and Dunlop, J. S. (2004). The cosmological evolution of quasar black hole masses. *MNRAS*, 352(4):1390–1404.
- [Mücke et al., 2000] Mücke, A., Engel, R., Rachen, J. P., Protheroe, R. J., and Stanev, T. (2000). Monte Carlo simulations of photohadronic processes in astrophysics. *Computer Physics Communications*, 124(2-3):290–314.
- [Murase et al., 2014] Murase, K., Inoue, Y., and Dermer, C. D. (2014). Diffuse neutrino intensity from the inner jets of active galactic nuclei: Impacts of external photon fields and the blazar sequence. *Physical Review D*, 90(2):023007.
- [Nanci et al., 2022] Nanci, C., Giroletti, M., Orienti, M., et al. (2022). Observing the inner parsec-scale region of candidate neutrino-emitting blazars. *A&A*, 663:A129.
- [Newville et al., 2014] Newville, M., Stensitzki, T., Allen, D. B., et al. (2014). LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python.

- [Nolan et al., 2012] Nolan, P. L., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al. (2012). Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog. *ApJS*, 199(2):31.
- [Padovani et al., 2019] Padovani, P., Oikonomou, F., Petropoulou, M., et al. (2019). TXS 0506+056, the first cosmic neutrino source, is not a BL Lac. *MNRAS*, 484(1):L104–L108.
- [Petrov et al., 2005] Petrov, L., Kovalev, Y. Y., Fomalont, E., et al. (2005). The Third VLBA Calibrator Survey: VCS3. *AJ*, 129(2):1163–1170.
- [Razzaque, 2013] Razzaque, S. (2013). Galactic Center origin of a subset of IceCube neutrino events. *Physical Review D*, 88(8):081302.
- [Righi et al., 2020] Righi, C., Palladino, A., Tavecchio, F., et al. (2020). EeV astrophysical neutrinos from flat spectrum radio quasars. *A&A*, 642:A92.
- [Santander et al., 2019] Santander, M., Keivani, A., and Tohuvavohu, A. (2019). IceCube-190730A: Swift XRT and UVOT Follow-up and prompt BAT Observations. *The Astronomer’s Telegram*, 12985:1.
- [Saugé and Henri, 2004] Saugé, L. and Henri, G. (2004). TeV Blazar Gamma-Ray Emission Produced by a Cooling Pileup Particle Energy Distribution Function. *ApJ*, 616(1):136–146.
- [Savchenko et al., 2021] Savchenko, V., Ferrigno, C., Rodi, J., et al. (2021). IceCube-211216A: No counterpart candidates in INTEGRAL SPI-ACS and IBIS prompt observation. *GRB Coordinates Network*, 31243:1.
- [Steeghs et al., 2019] Steeghs, D., Mong, Y. L., Ramsay, G., et al. (2019). IceCube 190730A: No counterpart candidates or blazar activity in GOTO observations. *GRB Coordinates Network*, 25255:1.
- [Tanaka et al., 2017] Tanaka, Y. T., Buson, S., and Kocevski, D. (2017). Fermi-LAT detection of increased gamma-ray activity of TXS 0506+056, located inside the IceCube-170922A error region. *The Astronomer’s Telegram*, 10791:1.
- [Van Rossum and Drake Jr, 1995] Van Rossum, G. and Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- [Venters et al., 2018] Venters, T., Garrappa, S., Buson, S., et al. (2018). Fermi-LAT Gamma-ray Observations of IceCube-181014A. *GRB Coordinates Network*, 23339:1.
- [Wagner, 2008] Wagner, R. M. (2008). Synoptic studies of 17 blazars detected in very high-energy γ -rays. *MNRAS*, 385(1):119–135.
- [Wood and Fermi-GBM Team, 2020] Wood, J. and Fermi-GBM Team (2020). IceCube-200109A: Upper limits from Fermi-GBM Observations. *GRB Coordinates Network*, 26697:1.
- [Wood and Fermi-GBM Team, 2021] Wood, J. and Fermi-GBM Team (2021). IceCube-211216A: Upper limits from Fermi-GBM Observations. *GRB Coordinates Network*, 31255:1.

[Wood et al., 2017] Wood, M., Caputo, R., Charles, E., et al. (2017). Fermipy: An open-source Python package for analysis of Fermi-LAT Data. In *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, volume 301 of *International Cosmic Ray Conference*, page 824.

Glosario

Afterflow El *afterglow* es la emisión tardía presente en los destellos de rayos gamma que precede la emisión principal conocida como *prompt emission*. Esta emisión es producida por la interacción del jet con el medio interestelar emitiendo radiación electromagnética desde el radio hasta los rayos- γ . 77

BL Lacs Núcleos Activos de Galaxía de tipo blázar. Estos objetos presentan una alta luminosidad, polarización y variabilidad. Se cree que el jet apunta en dirección del observador y sus propiedades son producto del efecto relativista de su jet. Estos objetos están caracterizados por una ausencia de líneas de emisión y son intrínsecamente menos lúminosos que los cuasares. 20, 25, 77

CSS Compact Steep Spectrum radio source. Son fuentes compactas cuyo pico espectral está bien definido en la banda de radio a 100 MHz. 20

EHE Extremely High Energy. 21

EHSP Extreme High Synchrotron Peak. Estas fuentes presentan su pico de sincrotrón (ν_{peak}) a frecuencias $10^{15} \ll \nu_{\text{peak}}$. 77

Flare Estado de actividad por encima del flujo promedio. 15, 17

FSRQ Núcleos Activos de Galaxía de tipo blázar. Estos objetos presentan una alta luminosidad, polarización y variabilidad. Se cree que el jet apunta en dirección del observador y sus propiedades son producto del efecto relativista de su jet. Estos objetos presentan líneas de emisión y son más lúminosos intrínsecamente que los blázares de tipo BL Lac.. 9, 13, 20, 25, 31, 32, 36, 37, 41, 44, 46, 48

GRB Acrónimo en inglés de *GRB*, traducido como Destello de Rayos Gamma. Estos eventos se caracterizan por ser eventos transientes con una distribución bi-modal en la duración de emisión, el primer pico se encuentra en ~ 2 segundos a los que se les conoce como GRBs cortos. El segundo pico de la distribución se encuentra localizado en ~ 100 segundos a los que se les conoce como GRBs largos.. 77, 81

HESE High Energy Starting Event. 21, 24

HSP High Synchrotron Peak. Estas fuentes presentan su pico de sincrotrón (ν_{peak}) a frecuencias $10^{15} < \nu_{\text{peak}}$. 20, 25

- ISP** Intermedium Synchrotron Peak. Estas fuentes presentan su pico de sincrotrón (ν_{peak}) a frecuencias $10^{14} < \nu_{\text{peak}} < 10^{15}$. 20, 25
- LAT** Large Area Telescope. Instrumento a bordo del satélite Fermi que opera en el régimen de los rayos- γ . Este instrumento escanea todo el cielo en un intervalo de 2 horas. 19, 31, 36, 44, 45, 81
- likelihood** Es la probabilidad de que un evento dado pueda ocurrir. 19, 29
- LSP** Low Synchrotron Peak. Estas fuentes presentan su pico de sincrotrón (ν_{peak}) a frecuencias $\nu_{\text{peak}} < 10^{14}$ Hz. 20, 25
- NLSy1** Narrow Line Seyfert 1. Galaxias tipo Seyfert con presencia de líneas de emisión anchas y estrechas. Presentan líneas de absorción debido a la galaxia anfitriona del AGN. 20
- PSF** Point Spread Function. Es la función de dispersión de puntos (PSF) del telescopio. Determina la capacidad de resolver fuentes por el telescopio. 29
- RG** Una radio galaxia es una galaxia con regiones lobulares gigantes de emisión en radio que se extienden mucho más allá de su estructura visible. 20
- SED** Acrónimo en inglés de Distribución espectral de Energía. 56, 75, 78
- SEY** Seyfert. Son galaxias de núcleo activo con un brillo superficial central alto. 20
- SSRQ** Compact Steep Spectrum Radio Quásar. Quasares que presentan un espectro plano.. 20

Siglas

AGN Núcleo Activo de Galaxia. 17, 20, 25, 43

CC Corriente Cargadas. 17

CN Corriente Neutras. 17, 19

CRs Cosmic rays. 17

Dec Declinación. 25

DOM Modulo Digital Óptico. 17

GCN The Gamma-ray Coordinates Network. 21, 24, 25

RA Ascención Recta. 25