
Facultad de Ciencias

MÁSTER EN ASTROFÍSICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Investigating the evolution
of the energetic budget during
gamma-ray flares in blazars**

Presentado por:

Luis Barrios Jiménez

Directora: Josefa Becerra González

Curso Académico 2021/2022

Abstract

γ -rays are the key tool to understand the most violent and energetic processes in the Universe. They are produced in both galactic and extragalactic sources, such as pulsars, X-ray binaries, supernova remnants, relativistic jets in active galactic nuclei (AGN), γ -ray burst or starburst galaxies. Blazars dominate the extragalactic γ -ray sky, accounting for 94% and 91% of the known γ -ray emitters in high and very high energy. Blazars are a type of AGN in which the relativistic jet is pointing towards the observer. Their Spectral Energy Distribution (SED) presents a double peak structure. According to their SED and the presence of broad emission lines in their optical spectrum, blazars can be classified as Flat Spectrum Radio Quasars (FSRQ) and BL Lac objects (BLL). Depending on the energy of the SED peaks, BL Lacs are subdivided in Low Frequency Peaked (LBL), Intermediate Frequency Peaked (IBL) and Hard Frequency Peaked (HBL). Blazars show a great variability in flux in all wavelengths. Their flux could change in timescales from minutes to years. The periods in which the source increases its flux significantly are called flares. The flares could occur simultaneously at different energy bands, with a certain delay between bands, or in one single band. One of the highest flux variability is shown for γ -rays. These photons come from the relativistic jet, but the location and size of the emission region is still unknown. A rapid flux variability suggests that the emission comes from regions close to the black hole, and/or a small size emission region. However, some studies suggest that this emission comes from outer regions. Once they are produced, γ -rays do not travel uninterrupted by the intergalactic medium. They interact via e^-e^+ pair production with the ultraviolet, optical and infrared photons emitted in galaxy evolution processes, star evolution and by heated dust. Such photons emitted during the whole Universe history are known as the Extragalactic Background Light (EBL).

Since the Earth's atmosphere is opaque to γ radiation, this spectral range cannot be observed directly from ground-based telescopes. For high energies (HE, $E > 100$ MeV), it is possible to detect γ -rays using space telescopes such as the Large Area Telescope onboard the *Fermi* satellite. However, as the number of γ -ray photons reaching the Earth decreases significantly with energy, detectors with large collection areas are needed to access the very high energy (VHE, $E > 100$ GeV) band. This makes unavailable the option of observing directly VHE photons from the space, therefore, indirect methods are needed. When γ -rays reach the atmosphere, they interact producing subatomic particle showers. As these particles travel faster than the light in the air, Cherenkov light flashes are produced. This phenomena can be used to indirectly detect γ -rays with ground Cherenkov telescopes such as MAGIC, HESS and VERITAS. The current generation of Cherenkov telescopes typically work from energies above 100 GeV. The Cherenkov Telescope Array (CTA) will be the first VHE γ -ray open observatory. CTA is divided in two emplacements, CTA North is being constructed in La Palma, and it would work from energies above 30 GeV, reducing the gap between Earth and space detectors. *Fermi*-LAT monitorizes the entire sky each 3 hours while Cherenkov telescopes have a narrower field of view, using LAT data is crucial as trigger for Cherenkov observations.

Within this context, the main objective of this work is to study the relationship between the times of arrival of the VHE photons and the lightcurve at high energy using *Fermi*-LAT available data, in order to optimize the observation strategy for CTA and current Cherenkov telescopes. To do that, we have studied a sample of all the 75 blazars from the TeVCat catalog. This catalog contains all sources detected in VHE using Cherenkov telescopes. To see if the features observed for the VHE detected blazars are common for the rest of the γ -ray blazars, we have compared the results obtained with a sample of the Fourth *Fermi* Gamma-ray LAT Catalog (4FGL). This comparison sample contains 1915 blazars. Another goal of this work is to study the homogeneity and the optical depth (τ) of the EBL. To do this study we have selected those sources whose redshift, z , is known. The sources selected are also at high galactic latitudes ($|b| > 10^\circ$). The z data is obtained from the Fourth LAT AGN Catalog (4LAC). For these sources, we have computed the optical depth, τ , for their most energetic photons detected. The optical depth has been computed using the EBL models found in the bibliography, including Dominguez et al. 2011, using a python function. This python function gives the optical depth of a photon given the redshift and the energy.

For the analysis of the *Fermi*-LAT data, we have used the package *Fermitools* developed by the *Fermi* Science Support Centre and the teams in charge of the instruments onboard *Fermi*. We have used photons with energies greater than 30 GeV (coincident with the CTA North energy threshold) for a 3° ROI around each source. The timeframe studied consists of 13 years, between 04/08/2008 and 05/11/2021.

We have obtained that for the 28% of the FSRQ, 63% of the LBL, 78% of the IBL and the 92% of the HBL LAT has detected photons of $E > 30$ GeV. In addition, BL Lac objects emit a greater number of photons at these energies than FSRQ. Also, the detected energies are greater. Within BL Lacs, the highest energies and the most of the photons are detected for HBL, followed by IBL. But the highest energy of the sample has been detected with LAT from an IBL with an energy of 1,97 TeV. This source is 4FGL J1558.9-6432, $z=0,0796$. The intrinsic spectra between 20 and 50 GeV of the BL Lacs follows a Power Law (PL) with spectral index, $\alpha = 1,85$. While FSRQ follow a PL with $\alpha = 1,62$. For higher energies, the number of intrinsic photons in FSRQ decreases faster with energy. For the sources with public lightcurves available, we have not observed flares with 5σ criteria but detected photons with $E > 30$ GeV for the 16% of the FSRQ, 63% of the LBL, 79% of the IBL and the 90% of the HBL. For the TeVCat sample, we have not found flares for 2 LBL, 4 IBL and 30 HBL. There is a general trend indicating higher energy photons are emitted when the relative flux, referred to the mean flux of the source, is smaller than for the less energetic ones. For FSRQ, we have seen higher relative fluxes when photons with $E > 30$ GeV are emitted than for the rest of the sample. In addition, for FSRQ, these photons are emitted at times closer to flares. We have also studied the clustering of emitted photons with $E > 30$ GeV for the TeVCat FSRQ, obtaining photons emitted with time differences shorter than 3 and 7 days.

Finally, studying the EBL we have observed 3 sources at $\tau > 4$: 4FGL J0035.2+1514 ($\tau = 4.68^{+0.18}_{-0.3}$, $z=1,09$), 4FGL J1224.1+2239 ($\tau = 5.3^{+0.3}_{-0.5}$, $z=0,48$) and 4FGL J1522.1+3144 ($\tau = 8.23^{+0.03}_{-0.3}$, $z=1,49$). However, a more detailed study would be needed for the photon that produced the value $\tau = 8.23^{+0.03}_{-0.3}$. Our results are also compatible with an homogeneous EBL as tested for γ -ray blazars located at $|b| > 10^\circ$.

Índice

1	Introducción	4
1.1	Mecanismos de emisión y absorción de rayos γ	5
1.2	El cielo a altas energías	5
1.3	Núcleos Activos de Galaxias	7
1.4	Blázares	8
1.4.1	Clasificación de blázares	8
1.4.2	Mecanismos de emisión	8
1.5	Luz extragaláctica de fondo	10
2	Objetivos	11
3	Metodología y datos observacionales	12
3.1	Instrumentación	12
3.1.1	<i>Fermi</i> -LAT	12
3.1.2	Cherenkov Telescope Array	13
3.2	Muestra y datos observacionales	15
3.2.1	Selección de la muestra	15
3.2.2	Catálogos	15
3.3	Metodología	16
3.3.1	Análisis de los datos de <i>Fermi</i> -LAT	16
3.3.2	Definición de flare	17
3.3.3	Análisis temporal	18
3.3.4	Estudio del EBL	19
4	Resultados	19
4.1	Caracterización general	19
4.2	Estudio temporal	22
4.2.1	Análisis general	22
4.2.2	Markarian 421	26
4.2.3	Análisis de los FSRQ	28
4.3	Estudio del EBL	32
5	Resumen y conclusiones	35
6	Apéndice	37
6.1	Modelos de EBL	37
	Referencias	39

1 Introducción

Los rayos gamma representan la parte más energética del espectro electromagnético ($E > 100$ KeV) y dan cuenta de los fenómenos más violentos y extremos del Universo. No obstante, dado que la atmósfera terrestre es opaca a este tipo de radiación [1], la detección directa de rayos γ en astronomía sólo es posible desde el espacio. A este problema para la detección de rayos γ se suma el hecho de que el número de fotones que alcanzan la Tierra decrece drásticamente con la energía siguiendo una ley de potencias (PL) como en la ecuación 1.1.

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

donde $\alpha \sim 2 - 3$ es el índice espectral.

De esta forma, al observar desde satélite sólo es posible detectar hasta fotones de alta energía (HE, $E > 100$ MeV). A energías mayores, dado que el número de fotones de esa energía que alcanzan la Tierra es muy bajo, se necesitan áreas colectoras muy grandes para poder tener una estadística significativa en las detecciones. Esto hace que cuando se quieren observar fotones de muy altas energías (VHE, $E > 100$ GeV) sea imposible hacerlo desde el espacio. La solución a este problema llegó con el desarrollo de los telescopios Cherenkov atmosféricos (IACTs). Estos telescopios utilizan la radiación Cherenkov producida en la atmósfera cuando un fotón γ interactúa con ella [2]. Cuando los rayos γ alcanzan la atmósfera terrestre, éstos interactúan con ella produciendo cascadas de partículas subatómicas cargadas [2]. Estas partículas ultraenergéticas pueden viajar más rápido que la velocidad de la luz en el aire, dando lugar a un destello de luz Cherenkov. De esta forma, la propia atmósfera terrestre actúa como parte del detector de rayos γ . Los telescopios Cherenkov actuales, como MAGIC, VERITAS y HESS, operan a partir de 100 GeV. La nueva generación de telescopios Cherenkov, 'Cherenkov Telescope Array' (CTA), permitirá ampliar el espectro a VHE observado desde tierra, llegando a detectar fotones desde 30 GeV. Esto permitirá reducir la diferencia existente entre la astronomía de rayos γ desde satélite y tierra.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar las relaciones entre los tiempos de llegada de los fotones de energías a partir de 30 GeV con las curvas de luz a altas energías, basándose en los 13 años de datos del telescopio 'Large Area Telescope' (LAT) a bordo del satélite *Fermi*. Esto permitirá saber si es posible optimizar la estrategia de observación de los telescopios Cherenkov actuales y de CTA.

En esta sección se presenta una breve introducción a la astrofísica de rayos γ , centrándose en las fuentes extragalácticas que los producen y su interacción con el medio intergaláctico. En la sección 1.1 se presentan los diferentes mecanismos de emisión y absorción de rayos γ . En la sección 1.2 se presenta el cielo a altas energías y las principales fuentes emisoras. En la sección 1.3 se describen los núcleos activos de galaxias (AGN) como principal fuente de emisión de rayos γ extragalácticos. La sección 1.4 se centra en la emisión y clasificación de los blázares, por ser el tipo mayoritario de AGN que se ha observado a VHE. Por último, en la sección 1.5 se habla de la interacción de estos fotones con la luz extragaláctica de fondo (EBL) con el medio intergaláctico.

1.1 Mecanismos de emisión y absorción de rayos γ

Los mecanismos de emisión en este rango espectral involucran partículas subatómicas, leptones o hadrones, que son aceleradas a grandes velocidades en objetos astrofísicos extremos [3]. Los principales procesos de emisión de rayos γ se enumeran a continuación.

- **Dispersión Compton inversa:** un fotón de baja energía colisiona con un electrón ultrarrelativista, el cual cede energía al fotón.
- **Radiación Síncrotrón:** partículas cargadas de muy alta energía girando en presencia de un campo magnético intenso perpendicular a su trayectoria.
- **Radiación de curvatura:** electrones de muy alta energía acelerados por un campo magnético curvo.
- **Bremsstrahlung:** un electrón se desacelera al interactuar con el campo eléctrico de un núcleo atómico.
- **Decaimiento de piones neutros:** cuando un protón colisiona con otro protón o un fotón, pueden producirse piones neutros o cargados a partes iguales. Los piones cargados se desintegran produciendo un muón y un neutrino, mientras que los piones neutros decaen emitiendo dos fotones.

Este tipo de procesos se dan en diversos tipos de fuentes [3]. Estas pueden ser galácticas, como púlsares, binarias de rayos X o remanentes de supernova; o extragalácticas, como chorros o jets relativistas de núcleos activos de galaxias, galaxias con brotes de formación estelar o estallidos de rayos gamma. El presente trabajo se centrará en los jets de núcleos activos de galaxias.

Los principales procesos de absorción o atenuación en este rango espectral son los siguientes.

- **Dispersión Compton:** un fotón de alta energía choca con un electrón libre y pierde energía.
- **Creación de pares:** al colisionar dos fotones cuya energía combinada sea igual o superior a la masa en reposo de un electrón y un positrón (1,022 MeV) pueden producir este par partícula-antipartícula.

Estas interacciones entre rayos γ (especialmente fotones de VHE) y electrones o fotones de baja energía se dan, principalmente, en las nubes de gas y polvo que se encuentran en los núcleos activos de galaxias, en el medio intergaláctico y en la propia atmósfera terrestre.

1.2 El cielo a altas energías

El cielo en altas energías presenta muy pocas fuentes en comparación con otras longitudes de onda menores. La Figura 1 muestra el mapa del cielo a $E > 1$ GeV basado en 12 años de observación del telescopio *Fermi*-LAT. En ella se observa que la mayoría de la emisión en este rango energético proviene de la propia Vía Láctea, siendo especialmente

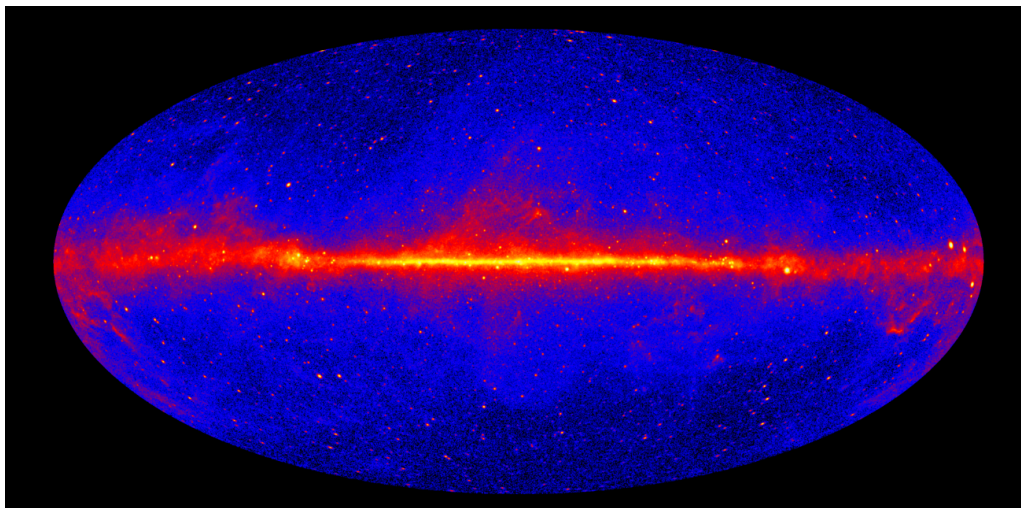


Figura 1: Mapa del cielo en coordenadas galácticas a energías mayores que 1 GeV basado en 12 años de datos del telescopio espacial *Fermi*-LAT. Imagen obtenida de <https://www.nasa.gov/content/fermi/overview>.

intensa en el centro de la misma. Fuera del plano galáctico, la emisión está dominada por fuentes puntuales. Los blázares constituyen el tipo de fuente extragaláctica más numeroso detectado por *Fermi*-LAT. Suponen el 94% de las fuentes extragalácticas y el 56% del total de fuentes observadas [4].

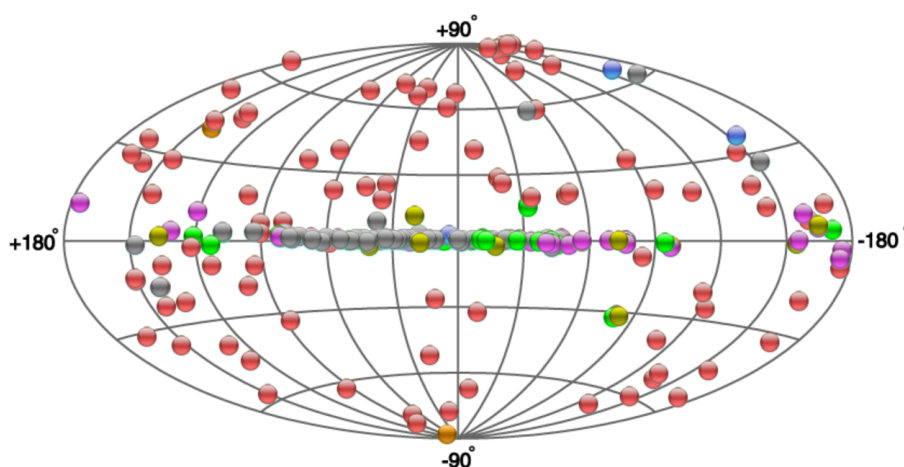


Figura 2: Mapa del cielo en coordenadas galácticas a energías mayores que 100 GeV. Imagen obtenida de <http://tevcat.uchicago.edu/>.

Conforme se observa el cielo a energías mayores, el número de fuentes decrece todavía más, por encima de 100 GeV, sólo se han detectado alrededor de 250 fuentes (ver Figura 2). Además, algunas de estas fuentes sólo se detectan en determinados periodos de tiempo en los que su brillo es especialmente intenso. Esto hace que la astronomía a VHE sea especialmente compleja, por lo que es crucial utilizar la información disponible a más baja energía de cara a optimizar la estrategia de observación a VHE. La gran mayoría (91%) de fuentes extragalácticas detectadas en VHE por telescopios Cherenkov se compone de blázares, con un total de 75 fuentes.

1.3 Núcleos Activos de Galaxias

Un Núcleo Activo de Galaxia (AGN por sus siglas en inglés) es una región compacta situada en el centro de una galaxia de la cual se observa una emisión significativamente mayor que la del resto de la galaxia [5]. Los AGNs pueden emitir en todo el espectro electromagnético, desde radio a rayos γ . Esta emisión está asociada a la acreción de materia de la galaxia anfitriona al agujero negro supermasivo ubicado en su centro.

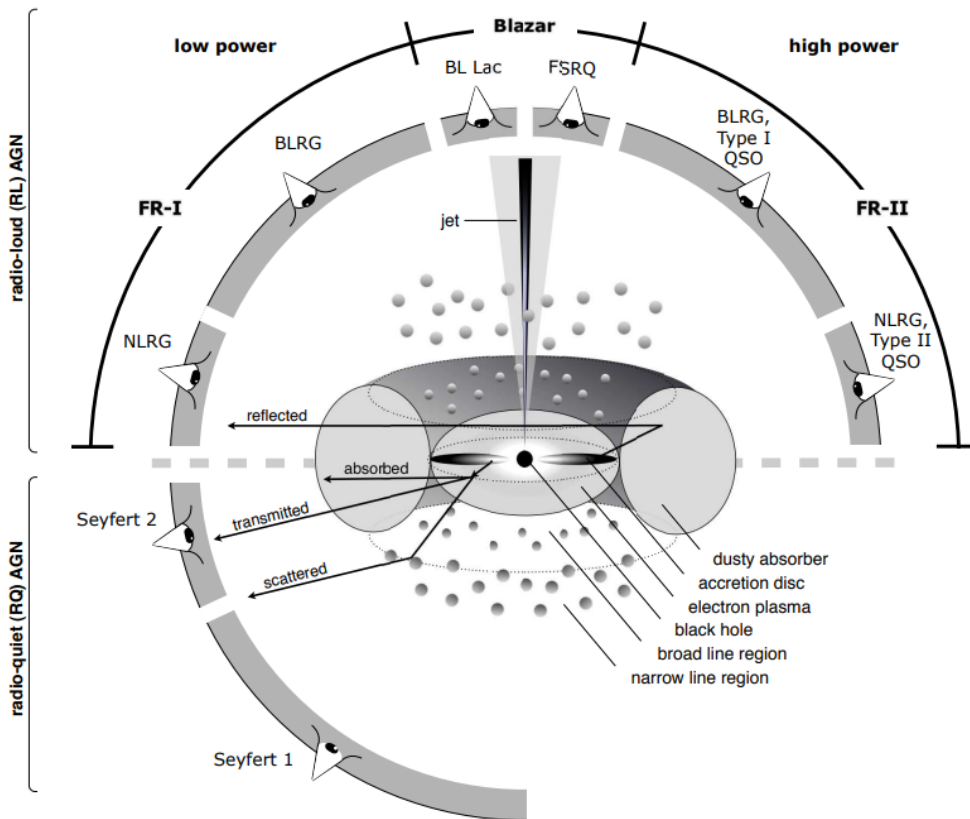


Figura 3: Esquema general de la estructura de un AGN. Imagen obtenida de [6].

La Figura 3 muestra un esquema general de la estructura de un AGN. En ella se puede ver el agujero negro central rodeado por el disco de acreción, formado por la materia cayendo al agujero negro. Alrededor del disco de acreción se encuentran nubes de gas que se mueven rápidamente, formando la 'Broad Line Region' (BLR), la cual está rodeada por un toroide de polvo. En las zonas más externas del AGN, se encuentran nubes de gas que constituyen la 'Narrow Line Region' (NLR). Por último, en algunos casos se observa el jet relativista, que nace de las cercanías del agujero negro central [7].

Cada una de las componentes del AGN emite en diferentes longitudes de onda [8]. El disco de acreción, la BLR y la NLR emiten en el óptico/ultravioleta, el toroide de polvo en el infrarrojo, la corona, la cual se forma sobre el disco de acreción, en rayos X y el jet relativista emite en todo el espectro electromagnético, siendo la única componente que emite en rayos γ .

Los jets de los AGNs pueden producirse en escalas comparables con el Sistema Solar (1 AU) hasta distancias entre galaxias ($\gtrsim 1$ Mpc). Los rayos γ en los AGNs son producidos únicamente en el jet, aunque la ubicación de la zona de emisión en el jet no está bien

determinada [7].

Dependiendo de la orientación, los AGNs pueden clasificarse en radiogalaxias, quasars, blázares y galaxias Seyfert [9] como se indica en la Figura 3. La emisión de rayos γ se ha observado mayoritariamente para los blázares [3]. En los blázares, la dirección de los jets forma un ángulo pequeño con respecto a la línea de visión.

El objetivo de este trabajo es estudiar los jets relativistas de los AGNs, concretamente, en los blázares, para ello se centrará en estudiar la relación entre los fotones de VHE con la curva de luz de HE.

1.4 Blázares

Como se ha mencionado en la sección 1.2, los blázares son la fuente extragaláctica de fotones de VHE más numerosa. En los blázares el jet apunta en la dirección del observador.

1.4.1 Clasificación de blázares

La presencia o no de líneas anchas de emisión en el espectro visible permite clasificar los blázares en dos grupos, los 'Flat Spectrum Radio Quasars' (FSRQ), donde la anchura equivalente (EW) cumple $|EW| > 5\text{\AA}$, y los 'BL Lac' (BLL), para los que $|EW| < 5\text{\AA}$ o no presentan dichas líneas [10]. Estas líneas anchas pueden ser producidas en la BLR [7]. La presencia o no de líneas de emisión en el espectro visible de los blázares sugiere entonces la existencia de la BLR o que esta sea más o menos intensa.

La distribución espectral de energía, SED, de los blázares presenta una estructura de doble pico de radiación no térmica como se muestra en la Figura 4. El primer pico cae en el intervalo de longitudes de onda entre radio y ultravioleta o rayos X, mientras que el segundo está dominado por rayos γ . Atendiendo a la SED, también es posible clasificar los blázares según la frecuencia a la que se producen los picos y la diferencia entre las intensidades de ambos, a esta diferencia se le denomina 'Compton Dominance' (CD). De esta forma, los FSRQ son los que presentan ambos picos a frecuencias menores. Además, el segundo pico es más intenso que el primero, siendo la diferencia entre ambos más alta que para los BL Lacs. Dentro de los BLL, estos picos no se producen a la misma energía para todos, estableciéndose así una subclasificación entre Low Frequency Peaked (LBL, línea morada), Intermediate Frequency Peaked (IBL, línea verde) y High Frequency Peaked (HBL, línea azul claro). La línea azul oscuro representa un tipo extremo de HBL, conocidos como Extreme HBL (EHBL). En cuanto a la comparación entre picos, los BLL presentan intensidades similares entre ambos, siendo los LBL los que presentan mayor Compton Dominance. Para los HBL, esta diferencia es la menor entre todos los tipos. A esta clasificación entre FSRQ, LBL, IBL y HBL se le denomina 'Blazar Sequence'.

1.4.2 Mecanismos de emisión

Actualmente, se cree que el origen del primer pico de la SED se debe principalmente a emisión sincrotrón procedente de electrones relativistas situados en la zona de emisión del jet [11]. Mientras que el origen del segundo pico puede ser hadrónico o leptónico. Dentro de los modelos leptónicos, la dispersión Compton inversa (IC) es el proceso responsable de esta emisión. Para los BLL, los electrones acelerados en el jet producen la

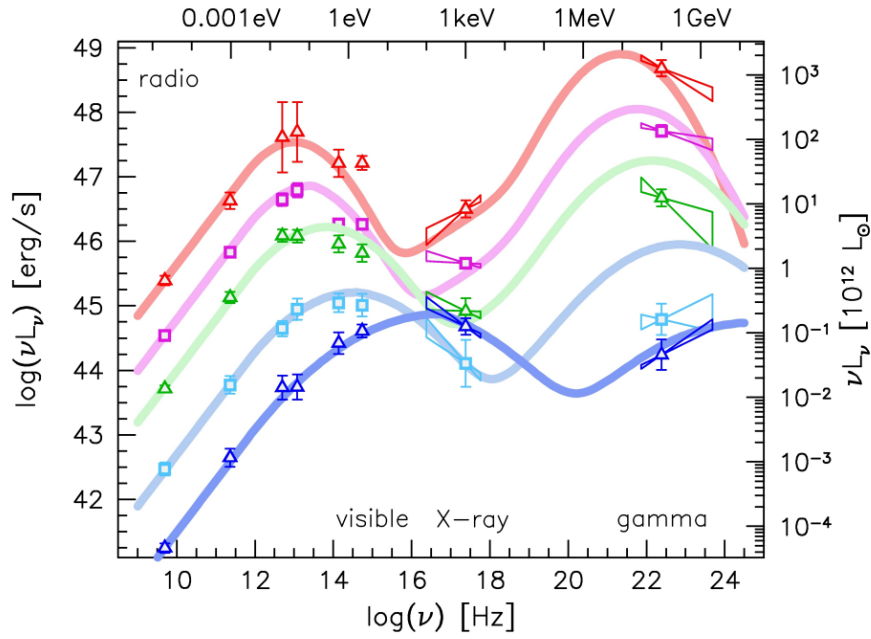


Figura 4: SED para distintos tipos de blázares. De rojo a azul se representan las SED de los FSRQ, LBL, IBL, HBL y HBL extremos. Las líneas representan los modelos y los puntos los datos observacionales para cada uno de los distintos tipos. Imagen obtenida de [7].

emisión observada via IC con los propios fotones emitidos como radiación sincrotrón en el jet [12]. A este modelo se le denomina 'synchrotron self Compton' (SSC). Para los FSRQ, dado que el segundo pico es considerablemente más intenso que el primero, los propios fotones emitidos por emisión sincrotrón no son suficientes para producir la radiación observada. En este caso, la emisión que produce el segundo pico se debe, además, a la interacción IC entre los electrones acelerados en el jet y fotones visibles/ultravioletas e infrarrojos emitidos por la BLR y el toroide de polvo, respectivamente [12]. A estos modelos se les conoce como radiación Compton externa (EC por sus siglas en inglés). Para los modelos leptonicos en los que el origen de la radiación es la dispersión Compton inversa, el espectro de los fotones emitidos sigue una ley de potencias [13]. No obstante, la absorción de la BLR a partir de energías en torno a 20 GeV puede desviar el espectro de una PL para los casos en los que esta sea especialmente intensa. Por el contrario, los modelos hadrónicos postulan que los fotones de altas energías son producidos por decaimiento de piones neutros, resultados de interacciones protón-fotón en los alrededores del jet [14] y por radiación sincrotrón de protones.

Los blázares presentan variabilidad en todas las longitudes de onda, desde minutos hasta años [15], observándose variabilidad rápida, especialmente en rayos γ [16]. Los periodos en los que la fuente aumenta significativamente su flujo en un intervalo temporal se definen como 'flares' [17]. Estos flares pueden ser simultáneos en varias longitudes de onda, presentar retrasos entre las diferentes bandas u observarse únicamente en un rango espectral.

La ubicación de la zona de emisión de rayos γ en el jet no está bien determinada [7]. La escala temporal en la que se produce la variabilidad del flujo sugiere si la región de emisión se encuentra más cerca o más lejos del agujero negro [18]. Asumiendo que la

región de emisión es la sección del jet, dada la forma cónica del jet la sección será mayor a medida que nos alejamos del agujero negro. De esta manera, una variabilidad más rápida implicaría que la región de emisión se encuentra más cercana al agujero negro que si la variabilidad fuese más lenta. En los modelos EC, la región de emisión debe estar localizada en las cercanías de la BLR o del toroide de polvo para poder contar con una fuente de fotones externa al jet [18].

Atendiendo a estas propiedades de los blázares, de encontrarse la zona de emisión de los fotones de VHE en el jet dentro de la BLR, en el caso de los FSRQ, los fotones de la BLR interactuarían con fotones de muy altas energías via creación de pares, por lo que no se deberían de observar fotones de VHE. Mientras que esto no ocurriría en los BL Lac, por lo que no habría problema en detectarlos. Sin embargo, sí se han detectado fotones de VHE procedentes de FSRQ [19]. Esto impone importantes restricciones a los modelos de emisión de los jets y de atenuación en la BLR de los AGNs.

Estudiar la variabilidad y las diferencias temporales entre los flares a diferentes longitudes de onda, aporta información valiosa sobre los procesos de aceleración/emisión, puesto que distintos tamaños o la ubicación de la o las zonas de emisión producirían diferentes patrones en las curvas de luz observadas a distintas energías.

1.5 Luz extragaláctica de fondo

Los fotones γ no viajan de forma ininterrumpida por el medio intergaláctico (IGM). Su flujo se ve atenuado debido a la producción de pares por la interacción entre los rayos γ y fotones de energía más baja de la **luz extragaláctica de fondo** (EBL, por sus siglas en inglés) [20]. Se define el EBL como la intensidad integrada de toda la luz emitida durante la historia del Universo a lo largo del rango ultravioleta, visible e infrarrojo del espectro electromagnético [21]. Esta radiación ha sido emitida, principalmente, en procesos de evolución galáctica, emisión estelar y emisión térmica del polvo calentado. El EBL constituye el segundo campo de radiación difusa más intenso del Universo, por detrás del fondo cósmico de microondas [22].

La SED del EBL no es constante, sino que presenta una estructura de doble pico (ver figura 5). Dichos picos se centran en el ultravioleta y en el infrarrojo. De esta forma, la atenuación debida al EBL no afecta por igual a todas las longitudes de onda, sino que aumenta con la energía, siendo mayor para los rayos γ de VHE. Además, conforme mayor sea la distancia entre la fuente y el observador, mayor es la probabilidad de que los rayos γ interactúen con los fotones del EBL. De esta manera, la atenuación producida por el EBL en el flujo observado de rayos gamma viene dada por la ecuación 1.2 [13].

$$\left(\frac{dF}{dE}\right)_{obs} = \left(\frac{dF}{dE}\right)_{int} e^{-\tau(E,z)} \quad (1.2)$$

donde $\left(\frac{dF}{dE}\right)_{obs}$ y $\left(\frac{dF}{dE}\right)_{int}$ hacen referencia al flujo por unidad de energía observado y el emitido por la fuente, respectivamente, $\tau(E,z)$ es la profundidad óptica de los fotones calculada según los diversos modelos de EBL en función de la energía y del corrimiento al rojo, z .

El EBL es muy difícil de medir directamente [21] debido tanto a la emisión de las fuentes extragalácticas, galácticas, a la luz dispersada por el polvo en el medio interestelar y a la emisión térmica de los propios instrumentos. Por ello es necesario desarrollar

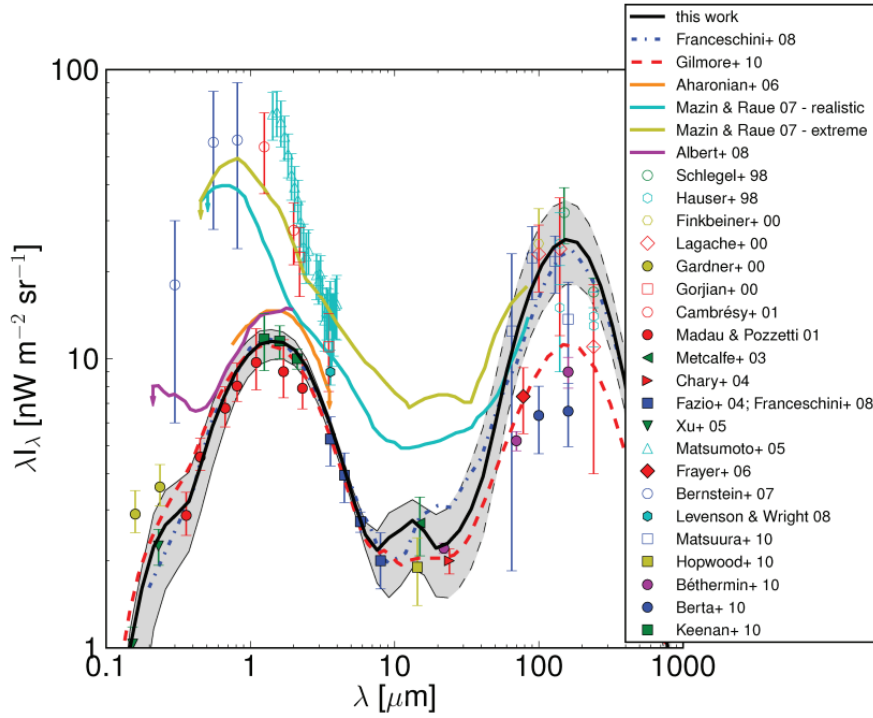


Figura 5: Distribución espectral de energía del EBL. Los distintos tipos de líneas muestran distintos modelos y los puntos muestran los datos experimentales. Imagen obtenida de [23].

modelos para calcular el EBL. Dichos modelos se basan en desarrollar la evolución del EBL desde el origen del Universo hasta hoy en día mediante modelos cosmológicos, calcular la luminosidad total del EBL a partir de la contribución a diferentes z de diferentes tipos de galaxias basándose en observaciones en múltiples longitudes de onda o utilizar la atenuación producida por el EBL en los rayos γ conocido el espectro intrínseco de la fuente [20]. En este trabajo, dado que se desconoce el espectro intrínseco de las fuentes estudiadas, simplemente se han testeado los distintos modelos de EBL encontrados en la bibliografía.

Dado que el EBL está compuesto por la luz emitida en procesos de evolución galáctica, formación estelar y por el polvo calentado a lo largo de toda la historia del Universo, se piensa que debe ser homogéneo e isótropo a grandes escalas. No obstante, algunos estudios como Martin & Bowyer 1989 [24] sugieren que los cúmulos de galaxias pueden producir anisotropías en el EBL.

2 Objetivos

Los objetivos de este trabajo se enumeran a continuación.

- Estudiar la relación entre la emisión de los fotones de $E > 30$ GeV y la curva de luz a más baja energía para una muestra de blázares usando los datos disponibles de *Fermi*-LAT.
- Ver si existen diferencias entre los comportamientos observados para una serie de

blázares detectados en VHE con telescopios Cherenkov con los de una muestra representativa de blázares que emiten en rayos γ extraída del catálogo 4FGL.

- Utilizar los resultados obtenidos con *Fermi*-LAT para ver si es posible optimizar la estrategia de observación para CTA.
- Estudiar la homogeneidad de la profundidad óptica de los fotones detectados con *Fermi*-LAT a distinto redshift según los modelos actuales de EBL.

3 Metodología y datos observacionales

En esta sección se describirán los datos utilizados en este trabajo, así como el tratamiento realizado a los mismos para la obtención de los resultados descritos en la sección 4. En la sección 3.1 se aporta información general del telescopio espacial *Fermi*-LAT y de los telescopios Cherenkov, centrándose en CTA. En la sección 3.2 se recogen las propiedades de la muestra empleada en este estudio. Finalmente en la sección 3.3 se describe el análisis realizado a los datos de *Fermi*-LAT.

3.1 Instrumentación

Como ya se ha explicado en la sección 1, dependiendo de la energía del fotón que se quiera detectar, hay que observarlo desde satélite o desde tierra. Este trabajo se centra en el análisis de los datos obtenidos por el telescopio espacial *Fermi*-LAT para optimizar la estrategia de observación en los telescopios Cherenkov desde tierra, por lo que a continuación se describe los aspectos generales de ambos instrumentos.

3.1.1 *Fermi*-LAT

El telescopio espacial de rayos gamma '*Fermi* Gamma-ray Space Telescope'¹ es un observatorio espacial internacional y multiagencia que estudia el cielo a altas energías. Fue lanzado el 11 de junio de 2008 y ha estado monitorizando el cielo desde entonces. El satélite *Fermi* tiene dos instrumentos a bordo, 'Large Area Telescope' (LAT) y 'Gamma ray Burst Monitor' (GBM).

Fermi-LAT es capaz de detectar fotones en un rango espectral desde 30 MeV hasta 2 TeV, aunque con una sensibilidad razonable hasta decenas de GeV. Tiene un campo de visión en torno a 2,4 estereorradianes con una resolución angular de 3,5° (100 MeV) y 0,15° ($> 10\text{GeV}$) [25] como se puede ver en la figura 6(a). LAT opera monitorizando el cielo cada 3 horas. El hecho de tener un campo de visión de aproximadamente el 20% del cielo lo convierte en un gran instrumento para detectar y observar fuentes cuya intensidad varía en escalas temporales pequeñas como el caso de los blázares.

En la Figura 6(b) se muestra la sensibilidad de *Fermi*-LAT en función de la energía para distintos niveles de ruido de fondo. En ella se aprecia que LAT es especialmente sensible en torno a 1 GeV. A $E > 10\text{ GeV}$ la sensibilidad no es muy buena, haciendo imposible obtener curvas de luz a partir de estas energías, ya que el número de fotones detectados es bajo. No obstante, el cubrimiento total del cielo sumado a que es capaz de

¹<https://www.nasa.gov/content/goddard/fermi-spacecraft-and-instruments>

detectar fotones de hasta 2 TeV, lo convierte en un instrumento crucial para hacer trigger de cara a observar con telescopios Cherenkov.

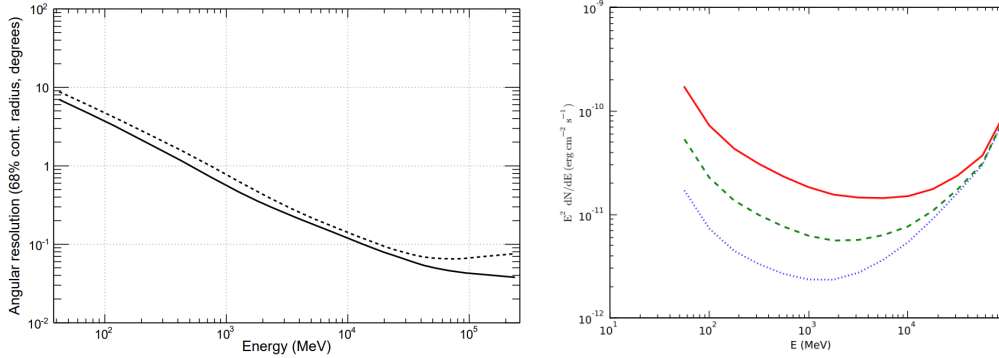


Figura 6: Resolución angular de *Fermi*-LAT (izquierda) y sensibilidad de *Fermi*-LAT para una detección de 5σ con una exposición de un año de misión (derecha). La resolución angular (izquierda) se muestra como el radio que contiene el 68 % del flujo detectado, la línea continua representa incidencia normal y la discontinua incidencia a 60° . En la figura de la derecha, el flujo integrado de fondo para energías mayores de 100 MeV es de $1,5 \cdot 10^{-5}$, $1,5 \cdot 10^{-4}$ y $1,5 \cdot 10^{-3}$ ph cm⁻² para las líneas azul, verde y roja, respectivamente. Imagen obtenida de [25].

3.1.2 Cherenkov Telescope Array

Como se ha mencionado antes, la atmósfera terrestre es opaca a los rayos γ . No obstante, cuando los rayos γ alcanzan la atmósfera terrestre, éstos interactúan con ella produciendo cascadas de partículas subatómicas cargadas [2]. Estas partículas ultraenergéticas pueden viajar más rápido que la velocidad de la luz en el aire, dando lugar a un destello de luz Cherenkov. Esta radiación es débil, emitida principalmente en la parte más azul-ultra violeta del espectro visible y en un ángulo muy pequeño ($\sim 1^\circ$) en la atmósfera [1]. Cuando llegan a tierra, estas cascadas se esparcen en un área circular de diámetro alrededor de ~ 100 m, por lo que uno o varios detectores ubicados en esta región pueden detectar indirectamente la radiación γ detectando los fotones Cherenkov. Reconstruyendo la cascada de partículas a partir de la radiación Cherenkov detectada, es posible determinar el ángulo de incidencia y la energía del fotón γ que la produjo con bastante precisión. Los detectores que utilizan esta técnica para detectar rayos γ se conocen como telescopios Cherenkov atmosféricos (IACTs por sus siglas en inglés).

Actualmente, hay experimentos de telescopios Cherenkov como 'Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov' (MAGIC) en la Palma [26], 'Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System' (VERITAS) en Arizona [27] e 'High Energy Stereoscopic System' (HESS) en Namibia [28]. Todos ellos diseñados para operar con alta sensibilidad entre ~ 100 GeV y decenas de TeV.

La red de telescopios Cherenkov, 'Cherenkov Telescope Array'² (CTA por sus siglas en inglés), será el primer observatorio abierto de rayos gamma de energías entre ~ 30 GeV y 300 TeV. Principalmente, se compone de un total de 70 telescopios pequeños (SST), 40

²<https://www.cta-observatory.org/>

telescopios medianos (MST) y 8 telescopios grandes (LST) divididos en dos observatorios situados en los hemisferios Norte y Sur. CTA Norte estará situado en la isla de La Palma, estará destinado a estudiar fuentes que emiten en VHE en el rango entre 30 GeV y 50 TeV, para ello, dispondrá de 4 telescopios LST y 9 MST, en principio. CTA Sur estará ubicado en Cerro Paranal, en Chile, y se especializará en estudiar las fuentes galácticas, para ello, dispondrá de 4 LST, 14 MST y 37 SST, en principio. Su resolución angular está entre $0,15^\circ$ (100 GeV) y $0,05^\circ$ (>1 TeV) [2], lo que supone una mejora significativa con respecto a otros telescopios Cherenkov en este rango espectral. El campo de visión de los distintos telescopios es de $2 \cdot 10^{-2}$ sr para los SST, $1,5 \cdot 10^{-2}$ sr para los MST y $5 \cdot 10^{-3}$ sr para los LST.

La Figura 7 muestra una comparativa entre la sensibilidad de CTA con la de otros instrumentos. En ella se puede ver cómo CTA con 50 horas de exposición es más sensible que *Fermi*-LAT en 10 años de exposición en un factor 10-100 para energías entre 100 GeV y 1 TeV. Comparando con los telescopios Cherenkov actuales, CTA mejora la sensibilidad de estos en un factor 2 para 100 GeV y 8 para 1 TeV.

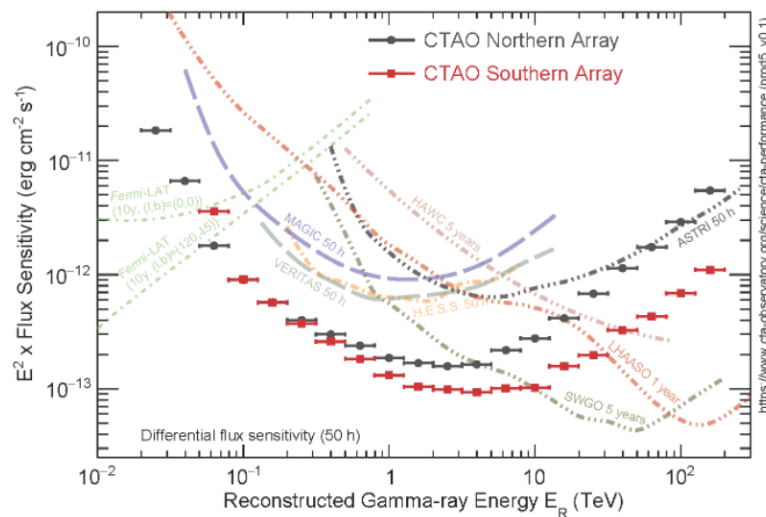


Figura 7: Comparativa entre la sensibilidad de CTA con la de otros instrumentos. Imagen obtenida de <https://www.cta-observatory.org/>.

A la vista de las características mostradas en las secciones 3.1.1 y 3.1.2 queda claro que CTA va a suponer una importante mejora en el estudio de los rayos γ , permitiendo ampliar el rango espectral disponible, reduciendo la diferencia de energía actual entre las observaciones de satélite y tierra, mejorando, además, la sensibilidad en torno a un orden de magnitud con respecto a los Cherenkov actuales. No obstante, CTA no puede cubrir simultáneamente una región amplia del cielo, por lo que es necesario optimizar los triggers a partir del monitorizado del cielo con *Fermi*-LAT.

3.2 Muestra y datos observacionales

3.2.1 Selección de la muestra

Una de las muestras empleadas para este estudio fue seleccionada del catálogo TeVCat³. Está compuesta por 9 FSRQ, 54 HBL, 10 IBL y 2 LBL, que componen todos los blázares detectados en la banda de VHE por telescopios Cherenkov. En la Figura 8 se ha representado su posición en el cielo en coordenadas galácticas. La muestra de comparación se compone de un total de 1915 fuentes extraídas del catálogo 4FGL-DR3 (ver sección 3.2.2). Esta muestra de comparación contiene también los blázares del catálogo TeVCat.

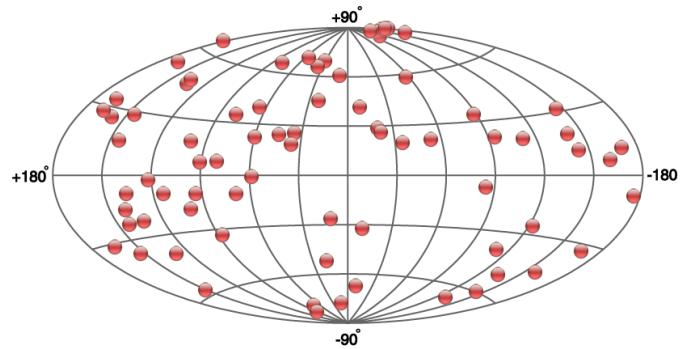


Figura 8: Cartografiado, en coordenadas galácticas, de las fuentes estudiadas del catálogo TeVCat. Estas fuentes componen el total de los blázares detectados en VHE. Imagen obtenida de <http://tevcap.uchicago.edu/>

De la muestra de 4FGL-DR3 había disponibles curvas de luz para 984 fuentes. Dichas curvas de luz han sido obtenidas del repositorio 'Fermi Light Curve Repository' [29], que contiene las curvas de luz a partir de 100 MeV para las fuentes del catálogo 4FGL-DR2 con índice de variabilidad mayor que 21,67. Contienen el flujo integrado cada 3 días, considerando sólo fotones con una significancia de detección mayor que 2σ . El índice de variabilidad da cuenta del cambio de flujo en intervalos temporales de una semana con respecto al flujo promedio [30].

Además, había disponibles medidas del desplazamiento al rojo, z , para un total de 1125 objetos. Los datos de z han sido extraídos del catálogo 4LAC (ver sección 3.2.2).

La información necesaria sobre los fotones fue extraída de 'Fermi-LAT data server'⁴. Los datos disponibles se componen de una serie de ficheros que contienen todos los eventos registrados por Fermi-LAT en una región del cielo (ficheros PH) y de un fichero que contiene la posición y la orientación, entre otros, del satélite en intervalos de 30 segundos (ficheros SC).

3.2.2 Catálogos

A continuación se detallan los catálogos usados en este trabajo.

- **'Fourth Fermi Gamma-ray LAT catalog' (4FGL):** es el cuarto catálogo de fuentes detectadas por Fermi-LAT en rayos γ [4]. En concreto, el catálogo utilizado en este

³<http://tevcap.uchicago.edu/>

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

trabajo corresponde con la segunda y la tercera versión de 4FGL, 4FGL-DR2 y 4FGL-DR3 respectivamente. 4FGL-DR2 se utilizó únicamente para el análisis de las fuentes de TeVCat, ya que 4FGL-DR3 no estaba todavía disponible. La segunda versión incluye un total de 5787 fuentes detectadas en el rango espectral entre 50 MeV y 1 TeV, en los primeros 10 años de operación de *Fermi*-LAT. La tercera versión incluye un total de 6658 fuentes detectadas en el mismo rango espectral que la anterior, en los primeros 12 años de operación de *Fermi*-LAT. Para estas fuentes, tanto 4FGL-DR2 como 4FGL-DR3 proporcionan ajustes espectrales, clasificación de las fuentes e índice de variabilidad, entre otras propiedades. Siendo los valores aportados por 4FGL-DR3 actualizaciones de los proporcionados para las fuentes incluidas en 4FGL-DR2 con 2 años más de observación, por lo que no presentan diferencias significativas.

- **'Fourth LAT AGN Catalog' (4LAC):** contiene todas las fuentes de 4FGL identificadas como AGNs fuera del plano galáctico, a latitud $|b| > 10^\circ$ [31]. Además de los datos disponibles para cada fuente en el catálogo 4FGL, gracias a las asociaciones con catálogos que contienen información de estas fuentes en otros rangos espectrales (como SDSS), está disponible también el redshift al que se encuentran los AGNs. El 98 % de las fuentes que componen este catálogo son blázares. Dispone también de la clasificación de algunos BL Lac en HBL, IBL y LBL de acuerdo a la frecuencia del pico de emisión a bajas energías o sincrotrón.

3.3 Metodología

3.3.1 Análisis de los datos de *Fermi*-LAT

El intervalo temporal estudiado en este trabajo se compone de un total de 13 años de datos tomados entre el 04/08/2008 y el 05/11/2021. Estas fechas se corresponden con los primeros datos registrados por *Fermi*-LAT y la fecha en la que se inició el análisis, respectivamente. El rango total de energías para el análisis del EBL es desde 10 GeV hasta 10 TeV, aunque no se han observado energías superiores a ~ 2 TeV. Para el análisis temporal, se ha utilizado el intervalo entre 30 GeV y 10 TeV. Se ha seleccionado este intervalo de energías para el análisis temporal, ya que este trabajo se centra en estudiar las relaciones existentes entre los fotones con energía a partir de la mínima energía que es capaz de detectar CTA ($E > 30$ GeV) y las curvas de luz disponibles en '*Fermi* Light Curve Repository'. Dado que la resolución angular de LAT en el intervalo de energías estudiado es menor que $0,15^\circ$ (ver Figura 6(a)), la ROI seleccionada para este trabajo es de 3° .

Para el análisis de los datos de *Fermi*-LAT se utilizaron las herramientas del paquete *Fermitools*⁵, desarrolladas por el FSSC y los equipos encargados de los instrumentos a bordo de *Fermi*. El primer paso consiste en hacer una selección de los datos disponibles para los fotones a partir de los criterios deseados (evclass, intervalo temporal, región a estudiar, etc.) y de la información disponible sobre el satélite en el fichero SC. Esta selección se hace con las funciones *gtselect* y *gtmktime*. Para el análisis de fuentes puntuales durante largos periodos de tiempo, el FSSC recomienda usar *evclass=128* en *gtselect*. Este parámetro da cuenta de cómo han sido reconstruidos los datos y de la probabilidad

⁵<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/>

de tratarse de un fotón. Además, con `gtmktime` se seleccionan sólo los instantes en los que LAT estaba operando de manera adecuada dentro del intervalo temporal seleccionado. Esto permite asegurar que sólo se están teniendo en cuenta fotones procedentes de la región de interés (ROI por sus siglas en inglés) en el intervalo temporal y rango de energía deseados. Además, permite asegurar que los eventos son de buena calidad.

El siguiente paso consiste en un análisis de la ROI. Para ello se crea un mapa de exposición, que consiste en la respuesta total integrada sobre toda la ROI. La respuesta de LAT depende de la inclinación con la que se observa una fuente, donde la inclinación es el ángulo entre la dirección de llegada del fotón y la normal del instrumento. El mapa de exposición se crea en dos pasos. Primero, con la herramienta `gtlcube` se crea un mapa de todo el cielo con el tiempo que cada región ha sido observada a una determinada inclinación en el intervalo temporal dado. Posteriormente, con `gtexmap` se crea el mapa de exposición a partir del mapa anterior y los eventos filtrados anteriormente. Una vez se ha elaborado el mapa de exposición, hay que crear un modelo del campo. Para crear dicho modelo se utiliza la herramienta `make4FGLxml.py`, la cual crea un mapa con la ubicación y el espectro de todas las fuentes incluidas en el catálogo 4FGL. A este modelo hay que añadir las fuentes de radiación difusa tanto galácticas, presentes en `gll_iem_v07.fits` como extragalácticas, `iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt`, ambos disponibles en la página de FSSC.

Una vez se han creado el modelo y el mapa de exposición, la herramienta `gtsrprob` calcula la probabilidad de que cada uno de los fotones detectados en la ROI provengan de cada fuente presente en el modelo.

Inicialmente, se realizaba una optimización del modelo obtenido con todas las fuentes, incluidas las de emisión difusa, para la ROI de cada una de las fuentes estudiadas. Para optimizar el modelo se realizaban una serie de ajustes likelihood adicionales descartando manualmente fuentes hasta que sólo quedasen fuentes detectadas con una significancia $\gtrsim 3\sigma$ y las fuentes de emisión difusa. Posteriormente, se comprobó que no había diferencias significativas en el cálculo de probabilidades si se optimizaba el modelo o se trabajaba con el modelo inicial, lo que permitió automatizar el análisis y reducir significativamente el tiempo de cálculo, aumentando la muestra inicial de 75 fuentes a 1915.

3.3.2 Definición de flare

En la sección 1.4 se ha introducido el concepto de flare como un instante temporal en el que aumenta significativamente el flujo de la fuente. En este trabajo se ha definido cuándo la fuente se encuentra en flare aplicando el concepto de significancia de una detección al flujo de la fuente. De esta forma, se considera que la fuente está en flare con una significancia X en un determinado instante temporal, si el flujo en ese instante menos X veces el error medido del flujo es mayor que el valor del flujo medio de la fuente (ver ecuación 3.1).

$$x\sigma \rightarrow f - x \cdot \Delta f > f_{prom} \quad (3.1)$$

El valor del flujo medio, f_{prom} , para cada fuente se ha considerado como el flujo promedio indicado en el catálogo 4FGL-DR3 para todas las fuentes, salvo para los FSRQ del catálogo TeVCat. Para estos últimos, el valor del flujo medio se ha seleccionado como el flujo promedio (excluyendo las no detecciones) en un intervalo temporal en el que la

fuente no presenta alta variabilidad. Ha sido necesario realizar esta diferenciación, ya que los FSRQ de TeVCat, al presentar un gran número de flares intensos o flares de larga duración, el flujo medio mostrado en el catálogo 4FGL es más elevado que el real.

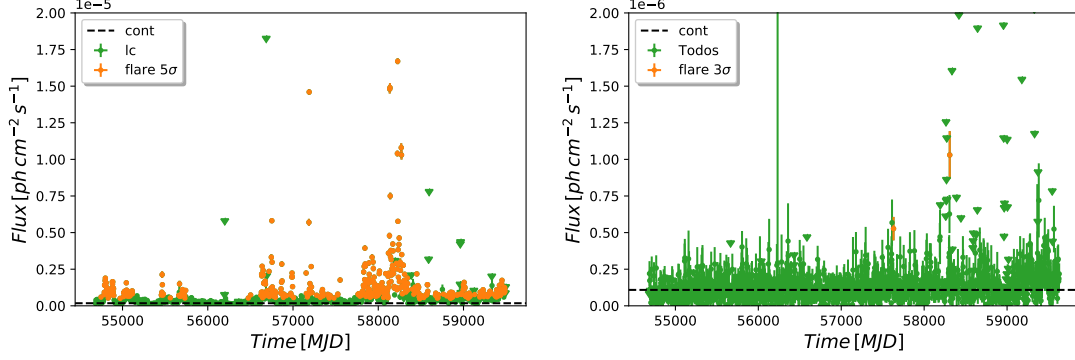


Figura 9: Curvas de luz del FSRQ 3C 279 (izquierda) y del LBL AP Librae (derecha). En naranja están representados los instantes temporales en los que la fuente se encuentra en flare con una significancia dada por la ecuación 3.1. La línea discontinua negra muestra el valor del flujo promedio. Los valores de flujo marcados con triángulos representan los flujos límite superiores para las no detecciones ($< 2\sigma$).

En la figura 9 se muestran, a modo de ejemplo, las curvas de luz para dos fuentes estudiadas en este trabajo. Para establecer los flares en la figura 9 izquierda se ha utilizado un criterio 5σ mientras que para la 9 derecha se ha utilizado 3σ . Para todas las fuentes de este trabajo se ha utilizado un criterio 5σ para considerar que la fuente se encuentra en flare. Salvo en el caso de los LBL del catálogo TeVCat, para las que al usar este criterio no se detectaban flares. Dado que sólo había dos LBL en TeVCat, se redujo el criterio a 3σ para estas dos fuentes con el objetivo de no perder estadística. Un ejemplo de la curva de luz para el LBL AP Librae puede verse en la Figura 9 (derecha), en la que pese a utilizar un criterio menos exigente sólo hay dos puntos en los que se considere que la fuente se encuentre en flare.

3.3.3 Análisis temporal

Para estudiar las diferencias temporales entre los fotones de $E > 30$ GeV y las curvas de luz disponibles en el 'Fermi Light Curve Repository' (sección 4.2) se ha elaborado un programa en python. Dicho programa selecciona para cada fuente los fotones con energía mayor que 30 GeV con una probabilidad de provenir de la fuente mayor o igual que el 90%. Para cada fotón seleccionado, se calcula la diferencia entre el tiempo en el que se detecta dicho fotón y el instante temporal más cercano de la curva de luz en el que la fuente se encuentra en flare según el criterio 5σ . Dado que las curvas de luz muestran el flujo integrado cada 3 días, mientras que los tiempos de llegada de los fotones de $E > 30$ GeV tienen una resolución temporal de $10 \mu s$, los valores del flujo mostrados en la sección 4.2 se han calculado interpolando el flujo de la curva de luz y evaluándolo en el instante en el que llega cada fotón.

3.3.4 Estudio del EBL

Para calcular la profundidad óptica de los fotones de las fuentes en la sección 4.3 se ha utilizado la librería de python `ebl.table_tau_from_model` desarrollada por Manuel Meyer⁶. Dicha librería contiene funciones que calculan la profundidad óptica de un fotón dada su energía y corrimiento al rojo, z , a partir de los distintos modelos de EBL. También permite calcular la energía que tendría que tener un fotón para tener una profundidad óptica dada en función de z .

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis de los fotones a partir de la energía mínima que detectará CTA (30 GeV) detectados con Fermi-LAT y sus relaciones con la curva de luz a más baja energía ($E > 100$ MeV). Primero se da una caracterización general de los blázares detectados en $E > 100$ GeV y de los blázares del catálogo 4FGL-DR3 atendiendo al número de fotones detectados y a la energía de los mismos (sección 4.1). Posteriormente, en la sección 4.2 se muestran las relaciones entre las curvas de luz y los tiempos de emisión de los fotones de altas energías para la muestra de blázares detectados en $E > 100$ GeV y de 4FGL-DR3, realizando un estudio más detallado para los FSRQ de TeVCat (sección 4.2.3). Finalmente, en la sección 4.3 se muestra el estudio del EBL realizado a partir de los datos disponibles para los blázares de la muestra.

4.1 Caracterización general

La muestra total estudiada se compone de 664 FSRQ y 1251 BL Lacs. Dentro de los BL Lacs, 330 son LBL, 313 IBL, 389 HBL y 219 para los que no se ha establecido una subclasificación espectral. De estas fuentes, no se han detectado fotones con $E > 30$ GeV para 477 FSRQ, 121 LBL, 70 IBL, 30 HBL y 56 BL Lacs sin clasificar, estos últimos se denotarán como BL Lac Unkown (BLU). Del total de 75 fuentes que componen la muestra del catálogo TeVCat se han detectado fotones con $E > 30$ GeV para 74 de ellas. La fuente para la que no se han detectado fotones de esta energía es 4FGL J2347.0+5141, un HBL. Su nombre en TeVCat es 1ES 2344+514 y se encuentra a $z=0,044$.

En las figuras 10(a) y 10(b) se han representado la energía máxima frente al número de fotones con energía mayor que 30 GeV detectados para cada una de las fuentes de la muestra de TeVCat y 4FGL respectivamente. Para considerar que un fotón pertenece a una fuente se ha impuesto que la probabilidad de venir de esa fuente sea mayor al 90%. En la figura 10(b) se puede ver que la energía máxima detectada por *Fermi*-LAT es de 1,966 TeV, correspondiente a un BL Lac. En el caso de los FSRQ, la energía máxima observada es de 303 GeV. Los valores de energía máxima y del número de fotones detectados para cada uno de los tipos de blázares se muestran en la tabla 1. Además, en la figura 10(b) se observa que las fuentes para las que se han detectado más de 200 fotones presentan energías máximas a partir de 300 GeV, observándose sólo 3 valores por debajo de este. Esta tendencia también se observa en la muestra de TeVCat (figura 10(a)). Los valores de energía máxima y del número de fotones detectados para cada uno de los

⁶<https://github.com/me-manu/ebltable>

tipos de blázares de TeVCat se muestran en la tabla 2. Nótese que el valor máximo del número de fotones y de la energía máxima detectada para los HBL de TeVCat recogidos en la tabla 2 no coinciden con los representados en la figura 10(a), esto es debido a que estos valores corresponden a la fuente Markarian 421, la cual se ha excluido de los análisis conjuntos de la muestra de TeVCat por el alto número de fotones que presenta. En la sección 4.2.2 se muestra el análisis individual de esta fuente.

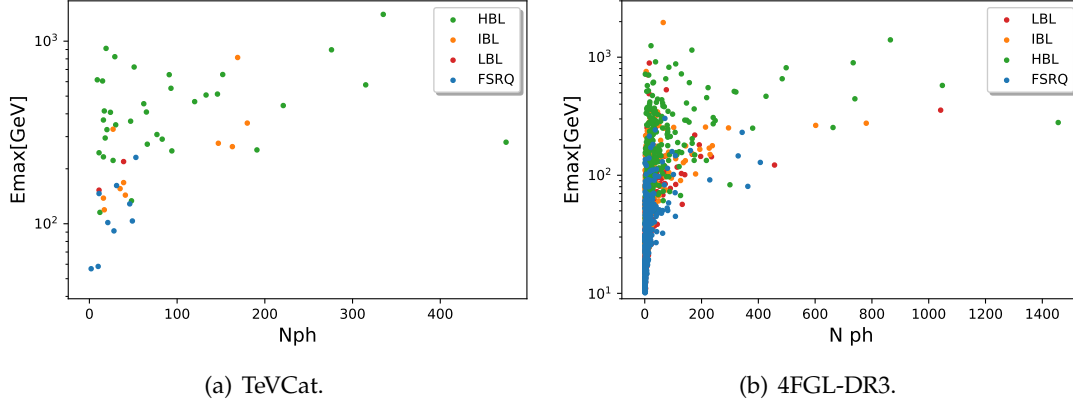


Figura 10: Energía máxima observada frente a número de fotones detectados para cada fuente para la que se dispone de fotones con $E > 30$ GeV.

	FSRQ	LBL	IBL	HBL
E_γ máxima [GeV]	303	892	1966	1727
N_γ máximo	407	1042	780	1456

Tabla 1: Cuadro resumen del máximo número de fotones detectados con $E > 30$ GeV y de la energía máxima observada para cada fuente de 4GL-DR3.

	FSRQ	LBL	IBL	HBL
E_γ máxima [GeV]	231	219	814	1727
N_γ máximo	53	39	180	1026

Tabla 2: Cuadro resumen del máximo número de fotones detectados con $E > 30$ GeV y de la energía máxima observada para cada fuente de la muestra de TeVCat.

A la vista de los resultados mostrados en las figuras 10(a) y 10(b) y en las tablas 1 y 2 es posible afirmar que los FSRQ son los que emiten a energías más bajas mientras que los HBL son para los que se detectan las energías más altas. Este comportamiento coincide con el esperado según la SED de cada tipo de blazar, ya que los HBL son los que presentan ambos picos de la SED a mayor energía y los FSRQ a menor energía. En cuanto al número de fotones con $E > 30$ GeV detectados, es mayor para los BL Lac que para los FSRQ. Dentro de los BL Lac, los HBL son los que emiten, en promedio, el mayor número de fotones por fuente, pese a que LAT no es un buen instrumento para observar HBL, ya que estos emiten a energías mayores. Tanto la diferencia energética como en el número de fotones es considerable entre los BL Lacs y los FSRQ. Además, hay una clara tendencia de que las fuentes que emiten muchos fotones, emiten también a altas energías, mientras que las que emiten pocos no tienen por qué emitir a altas energías. En

los datos disponibles de *Fermi*-LAT se ha observado un IBL en la muestra de 4FGL-DR3 para el que se han detectado fotones de hasta 1,966 TeV con LAT, pero que no aparece en el catálogo TeVCat. Dicha fuente es 4FGL J1558.9-6432 y se encuentra a $z=0,0796$. Aunque esta fuente se encuentra cerca del plano galáctico ($b = -8,64^\circ$) la probabilidad de que el fotón de 1,966 TeV provenga de la fuente es del 99,8%. Además, se han detectado con LAT un total de 6 fotones de VHE, todos ellos con probabilidades mayores del 98% de pertenecer a la fuente, aunque solo se ha detectado un fotón por encima de 1 TeV.

En la figura 11 se ha representado el número de fotones detectados en intervalos de energía intrínseca de 1 GeV. Para calcular la energía intrínseca se ha tenido en cuenta el corrimiento al rojo, z , y se ha corregido el número de fotones detectados por la atenuación del EBL, de esta forma, la energía emitida viene dada por la expresión 4.1 y el número de fotones por 4.2. Estas correcciones se han realizado para evitar efectos externos a la fuente a la hora de realizar este estudio.

$$E_{int} = E_{obs}(1 + z) \quad (4.1)$$

$$N_{\gamma int} = N_{\gamma obs} e^{\tau} \quad (4.2)$$

donde τ es la profundidad óptica de los fotones calculada según el modelo de EBL proporcionado por Dominguez et al 2011 [23].

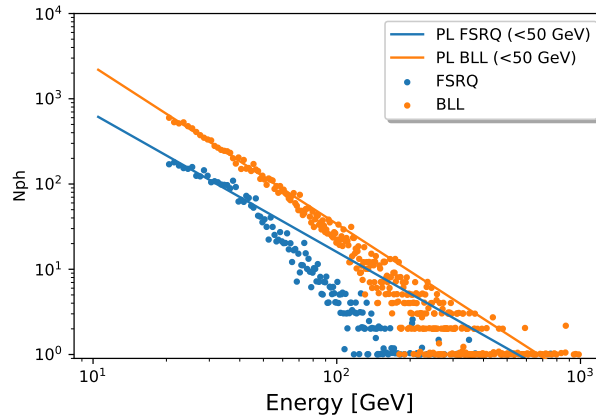


Figura 11: Número de fotones intrínsecos por energía intrínseca en escala logarítmica. La energía intrínseca ha sido calculada teniendo en cuenta el corrimiento al rojo. El número de fotones intrínsecos se ha calculado teniendo en cuenta la atenuación producida por el EBL. Se incluyen los ajustes del número de fotones detectados a energías menores que 50 GeV según una ley de potencias.

Además, en la figura 11 están representados los ajustes del número de fotones en función de la energía intrínseca para energías menores que 50 GeV siguiendo una ley de potencias según la ecuación 1.1, obteniéndose $\alpha = 1,85 \pm 0,05$ y $\alpha = 1,62 \pm 0,11$ para los índices espectrales de los BLL y de los FSRQ respectivamente. De esta forma, se aprecia que en el caso de los BLL, la tendencia dada por el ajuste se mantiene a energías mayores, mientras que en los FSRQ no ocurre lo mismo. En el caso de los FSRQ se aprecia una caída más pronunciada del número de fotones conforme aumenta la energía. Este

comportamiento evidencia que existen diferencias espectrales entre los FSRQ y los BLL a muy altas energías. Estas diferencias pueden ser explicadas mediante diferencias en los mecanismos de emisión y absorción de fotones en este rango espectral (ver sección 1.4). En los FSRQ el agujero negro se encuentra rodeado por una BLR intensa que absorbe los fotones más energéticos, mientras que en los BL Lacs no se encuentra esta región o es lo suficientemente débil para que los fotones más energéticos escapen sin problemas. Otra posible explicación sería que los mecanismos de aceleración de partículas fuesen más débiles en los FSRQ que en los BL Lacs y dentro de los BL Lacs fuesen más débiles para los LBL y más intensos para los HBL.

El hecho de que se hayan detectado algunos FSRQ en la banda de VHE con telescopios Cherenkov sólo es compatible con que la emisión se produzca fuera de la BLR. Mientras que los resultados obtenidos (figura 11) muestran preferencia por un escenario en el que la región de emisión en el jet se encuentra dentro de la BLR. Esta discrepancia podría solventarse en el caso de que la ubicación de la región de emisión en el jet pueda cambiar.

Otro comportamiento interesante es la dispersión en energías observada en la figura 11. Se aprecia que la dispersión en el intervalo de energías con el mismo número de fotones crece conforme disminuye el número de fotones detectado. Además, esta dispersión es significativamente mayor en el caso de los BLL que para los FSRQ. Esta alta dispersión en los BLL podría indicar diferencias intrínsecas en los mecanismos de producción de fotones a energías mayores que 50 GeV dentro de los propios BLL. Mientras que en el caso de los FSRQ, estas diferencias podrían ser menores o que, en el caso de deberse la desviación observada con respecto de una PL a la absorción de la BLR, esta absorción se comporte de igual forma para todos.

4.2 Estudio temporal

4.2.1 Análisis general

Del total de 951 fuentes del catálogo 4FGL-DR3 para las que se dispone de curva de luz, no se han detectado flares para 751 de ellas utilizando un criterio 5σ (ver sección 3.3.2). El número de fuentes de cada tipo para las que no se han detectado flares pero sí fotones de $E > 30$ GeV se recoge en la tabla 3.

	FSRQ	LBL	IBL	HBL	BLU
Total	503	172	111	124	41
Sin flares	346	150	101	115	39
Sin flares con fotones con $E > 30$ GeV	79	108	88	111	34

Tabla 3: Cuadro resumen del número de fuentes de 4GL-DR3 para las que no se han detectado flares pero sí fotones con $E > 30$ GeV. BLU hace referencia a los BL Lacs sin clasificar (BL Lac Unknown).

De las 75 fuentes que componen el catálogo de TeVCat, no se han encontrado flares para 36 de ellas utilizando el criterio 5σ . De ellas, 30 son HBL, 4 IBL y 2 LBL. La fuente comentada en la sección 4.1 para la que no se han detectado fotones es 4FGL J2347.0+5141, que corresponde a uno de los 30 HBL para los que no se han encontrado flares. Dado que sólo hay 2 LBL en la muestra, se ha reducido el criterio de significancia

	FSRQ	LBL	IBL	HBL
Total	9	2	10	54
Sin flares	0	2	4	30
Sin flares con fotones con $E > 30$ GeV	0	2	10	53

Tabla 4: Cuadro resumen del número de fuentes de la muestra de TeVCat para las que no se han detectado flares ni fotones con $E > 30$ GeV.

a 3σ para estas dos fuentes con el fin de poder realizar el siguiente análisis. Para el resto de fuentes se ha seguido empleando el criterio de 5σ , ya que significancias menores consideraban puntos del continuo como flares, especialmente en el caso de los FSRQ. Estos datos se encuentran resumidos en la tabla 4.

Las figuras 12(a) y 12(b) muestran el flujo observado que tiene la fuente en el instante en el que se detectan los fotones con $E > 30$ GeV en función de la energía de los mismos. Dado que los valores representados corresponden al flujo observado, los valores máximos mostrados no son representativos, ya que están afectados por la atenuación del EBL. Lo que resulta interesante de estas figuras es la comparativa entre los flujos observados para los distintos tipos de blázares. En ellas se puede ver que los FSRQ se detectan a flujos más altos que los BLL. Dentro de los BLL, se observa que para la muestra de TeVCat, se detectan flujos más altos para los IBL, seguidos de los LBL. Mientras que para la muestra de 4FGL los LBL presentan más dispersión que los IBL. Este cambio de orden puede deberse a que en TeVCat solo hay 2 LBL, mientras que en 4FGL la estadística es mayor. El hecho de que para los FSRQ se observen flujos mayores que para los BLL puede deberse a que la sensibilidad de LAT no es tan buena a las energías a las que se encuentran los picos de la SED de los BLL, por lo que conforme mayor sea la energía de dicho pico, menor es el flujo detectado por LAT. También se observa una tendencia general en ambas muestras de que los fotones más energéticos son emitidos cuando la fuente se encuentra en flujos menores que los menos energéticos.

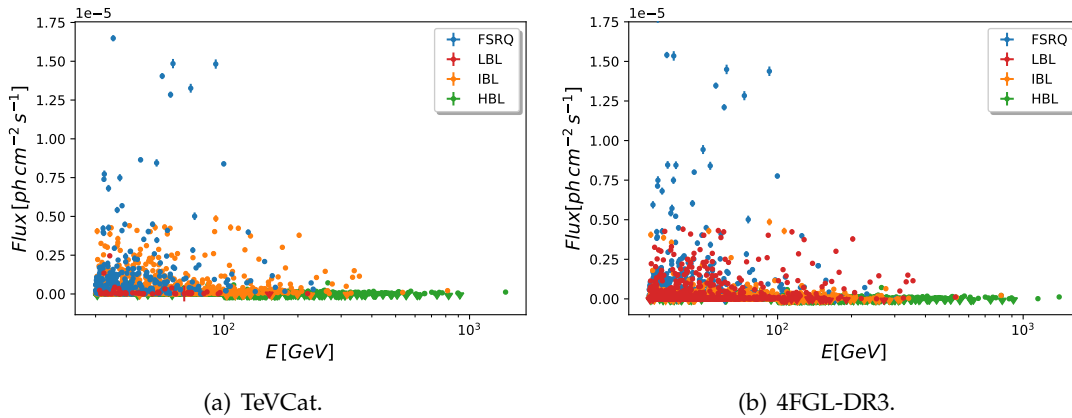


Figura 12: Flujo que tiene la fuente en el instante en el que llegan los fotones con $E > 30$ GeV frente a la energía que tienen esos fotones.

En las figuras 13(a) y 13(b) se representa el flujo al que se encuentra la fuente en el instante en el que llega un fotón con $E > 30$ GeV dividido por el flujo promedio de la fuente frente a la energía del mismo. Observando esta representación para la muestra de TeVCat (figura 13(a)) se aprecia que el flujo relativo máximo observado para esta muestra

se encuentra alrededor de 90. Además, la mayoría de fotones son emitidos cuando el flujo relativo es inferior a 20, siendo los FSRQ los que dominan la población a flujos relativos mayores. De forma general, los fotones más energéticos se emiten cuando el blazar se encuentra en un flujo relativo más bajo que los menos energéticos (ver figura 13(b)). Se observa, también, que la mayoría de fotones se emiten cuando la fuente se encuentra en flujo relativo inferior a 20. Para la muestra general, se han encontrado valores de flujo relativo de hasta 350, no obstante, con el objetivo de facilitar la comparación, en la figura 13(b) solo se han representado valores hasta 100, ya que solo hay 4 fotones por encima de este valor, uno a 350 y los otros 3 entre 150 y 200, todos ellos pertenecientes a FSRQ. Nótese también que para los FSRQ de la muestra de 4FGL se observan menos puntos para flujos relativos alrededor de 80 que para la muestra de TeVCat. Esto ocurre porque al analizar los FSRQ para la muestra de 4FGL el valor del flujo promedio empleado es el que da el catálogo, mientras que para la muestra de TeVCat el valor es seleccionado según lo comentado en la sección 3.3.2, por lo que el flujo relativo obtenido es menor en el análisis de la muestra 4FGL.

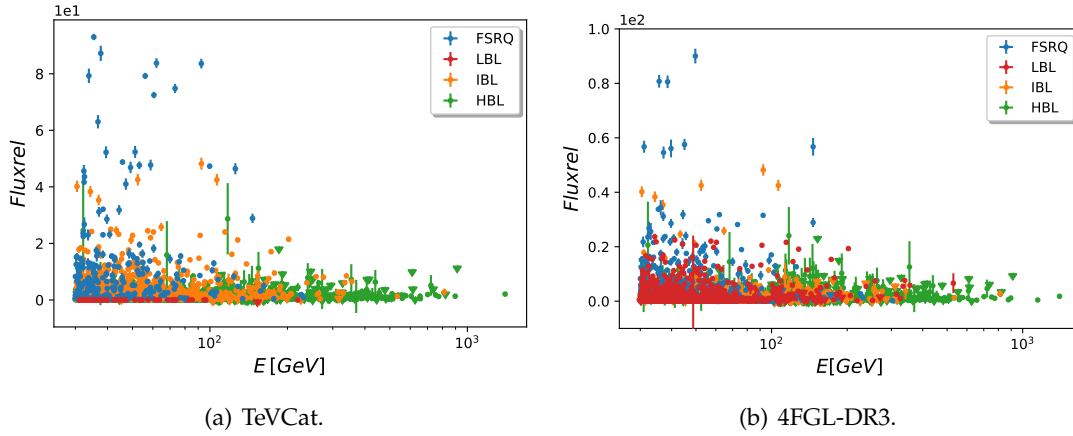


Figura 13: Flujo que tiene la fuente en el instante en el que llegan los fotones con $E > 30$ GeV dividido por el flujo promedio frente a la energía que tienen esos fotones.

Atendiendo a la clasificación espectral, se han realizado submuestras para TeVCat y 4FGL en FSRQ, LBL, IBL y HBL. Estudiando estas submuestras por separado se obtiene que, para cada una de ellas, cuanto mayor sea la energía, menor es el flujo relativo en el instante en el que se emite dicho fotón. Comparando los resultados obtenidos para cada uno de los tipos espectrales de la muestra de TeVCat (figura 13(a)) se observa que los FSRQ presentan mayor dispersión en flujo relativo que el resto de los blázares, detectándose fotones en flujos relativos de hasta 90. Los siguientes con mayor dispersión son los IBL, con flujos de hasta 40. A continuación estarían los HBL y por último, los LBL. Al comparar los valores del flujo de las fuentes de TeVCat con las del catálogo general (figura 13(b)) se obtiene que, en cuanto a las dispersiones obtenidas para cada submuestra, el orden es similar al anterior a excepción de que para la muestra de 4FGL-DR3, la dispersión obtenida para los LBL es mayor que la de los HBL. Este cambio de tendencia puede ser debido a que en el catálogo de TeVCat solo hay dos LBL, mientras que en el 4FGL-DR3 la estadística es mayor.

Con el objetivo de estudiar de forma más precisa las correlaciones entre la curva de luz a partir de 100 MeV y la emisión en VHE, se ha calculado la diferencia entre el

tiempo de llegada de un fotón de VHE y el instante temporal más cercano en el que se considera que la fuente se encuentra en flare. De esta manera, una diferencia temporal positiva indica que el fotón ha sido emitido después de que la fuente se encontrase en flare, mientras que si el valor es negativo, fue emitido antes de dicho instante.

Las figuras 14(a) y 14(b) muestran esta diferencia temporal, en días, en función de la energía para la muestra de TeVCat y la de 4FGL. En ellas se puede apreciar que la diferencia temporal máxima observada es de 4000 días, no obstante, este valor máximo no es representativo, ya que valores superiores a ~ 1 mes pueden deberse a que los fotones que se emiten con esta diferencia temporal no tienen ningún tipo de relación con los flares. Tanto para la muestra de TeVCat como en la de 4FGL se observa que los FSRQ son los que presentan diferencias temporales menores, concentrándose en torno al cero, sobre todo en la muestra de TeVCat. Además, para los FSRQ, esta diferencia temporal disminuye conforme aumenta la energía. Este último comportamiento es especialmente evidente para los FSRQ de 4FGL (figura 14(b)), donde para energías menores que 100 GeV se observan fotones con diferencias temporales de hasta 4000 días, pero a partir de esta energía sólo se observan dos fotones que se hayan emitido a más de 100 días con respecto a un flare.

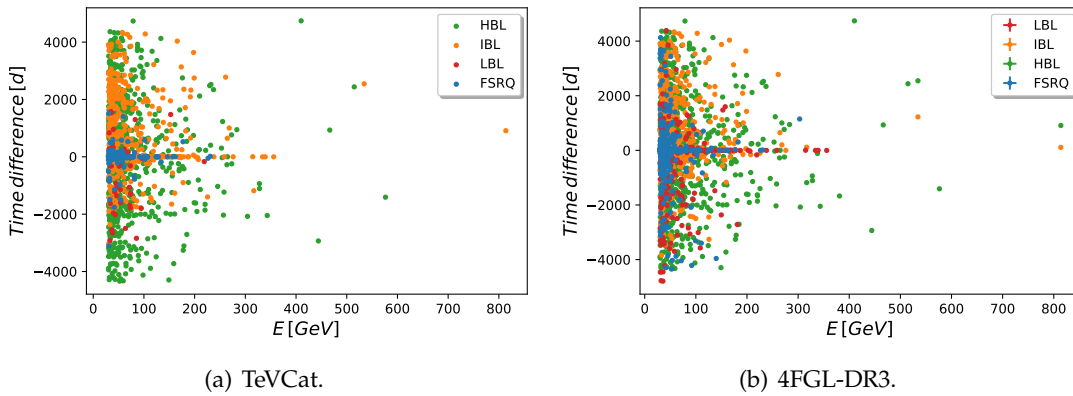


Figura 14: Diferencia temporal (en días) con respecto a los flares en función de la energía. La diferencia temporal se ha calculado como la diferencia entre los tiempos de llegada de los fotones detectados con energía mayor que 30 GeV y el instante temporal más cercano en el que la fuente se encuentra en flare.

En el caso de los IBL y de los LBL también se observa que la diferencia temporal es menor cuanto mayor sea la energía del fotón. No obstante, en la figura 14(b) se observa que, en ambos casos, sigue habiendo diferencias temporales altas a energías mayores de 100 GeV. Para los LBL, en torno a 200 GeV ya se observan la mayoría de fotones con diferencias temporales menores que 30 días, mientras que para los IBL se observan diferencias grandes a todas las energías. Este comportamiento también se observa en los IBL de TeVCat (figura 14(a)), mientras que en los LBL no. El hecho de que no se observe para los LBL puede estar relacionado con que sólo hay dos LBL y con que se ha relajado el criterio de considerarlos en flare de 5σ a 3σ . Los HBL, por su parte, muestran una dispersión muy alta en todo el rango espectral tanto para el catálogo general como el de TeVCat, encontrándose tanto diferencias temporales bajas como altas.

Los resultados obtenidos para cada uno de los distintos tipos de blázares parecen indicar que existe cierta relación entre cuándo se emiten los fotones de VHE y los ins-

tantes temporales en los que la fuente se encuentra en flare para los FSRQ, mientras que en el caso de los BL Lacs no existe ningún tipo de relación. De esta forma, en los FSRQ, los fotones de VHE se emitirían cerca de cuando la fuente se encuentra en flare, pero no necesariamente cuando la fuente se encuentra en un flujo alto, sino que se podrían emitir cuando el jet se está acelerando o desacelerando. Estos resultados sugieren que los fotones de VHE sólo se observarían en los FSRQ en determinados instantes temporales cercanos a los flares, en los que podría cambiar la región de emisión de tal forma que no se viese afectada por la absorción de la BLR o volverse más eficientes los procesos de aceleración de partículas cargadas que dan lugar a estos fotones. Por otra parte, en los BL Lacs, los fotones más energéticos escaparían sin problemas.

4.2.2 Markarian 421

Del análisis anterior se ha excluido la fuente Markarian 421. Se trata de la primera fuente extragaláctica detectada en la banda de VHE con telescopios Cherenkov [32]. Se encuentra a $z=0,0308$. Es un HBL del catálogo TeVCat para el que se han detectado un total de 1026 fotones con energía mayor que 30 GeV, lo que supone un 23 % del total de fotones detectados para los HBL de TeVCat. El motivo de realizar un análisis individual de esta fuente reside en el gran número de fotones detectados. Dividiendo el número de fotones detectados por todo el intervalo temporal estudiado, se obtiene que llegan en torno a 0,21 fotones por día, o 1 fotón cada 5 días.

En la figura 15 se muestra la curva de luz de Markarian 421. Las líneas verticales azules representan los tiempos de llegada de los fotones de VHE. En naranja se muestran los instantes temporales en los que se considera que la fuente se encuentra en flare. En ella se puede apreciar que los tiempos de llegada se distribuyen casi de manera homogénea a lo largo del tiempo, independientemente del flujo al que se encuentre la fuente.

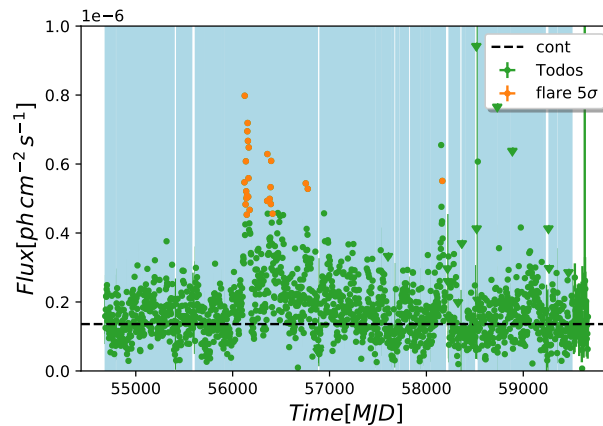


Figura 15: Curva de luz del HBL Markarian 421. Las líneas verticales azules marcan los tiempos de llegada de fotones de energía mayor que 30 GeV.

Las figuras 16(a) y 16(b) muestran el flujo en el que se encuentra la fuente cuando se emiten los fotones de $E > 30$ GeV dividido por el flujo promedio frente a la energía de los mismos para los HBL de TeVCat sin incluir a Markarian 421 e incluyéndola, respectivamente. Observando ambas figuras, no se encuentran diferencias significativas

entre el flujo relativo de los HBL de TeVCat con y sin Markarian 421. La única diferencia apreciable es que en la figura 16(b) se observan más fotones a energías mayores de 1 TeV que en la figura 16(a), lo que indica que Markarian 421 emite a energías mayores que el resto de HBL de TeVCat. Además, se observa que estos fotones son emitidos a flujos relativos por debajo de 5.

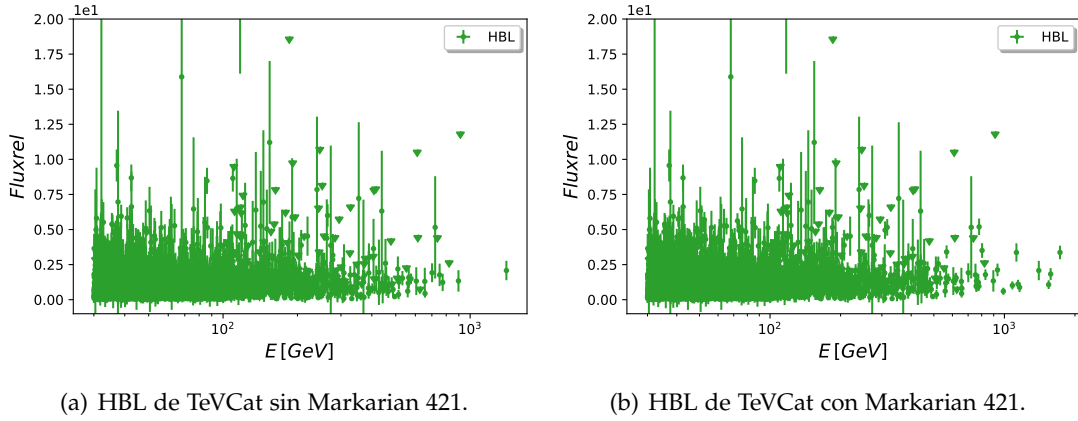


Figura 16: Flujo que tiene la fuente en el instante en el que llegan los fotones con $E > 30$ GeV dividido por el flujo promedio frente a la energía que tienen esos fotones.

En las figuras 17(a) y 17(b) se muestra la diferencia temporal entre los fotones de altas energías y los instantes temporales considerados como flares para los HBL de TeVCat sin incluir a Markarian 421 e incluyéndola, respectivamente. De esta forma, en la figura 17(a) se aprecia que la diferencia temporal disminuye en valor absoluto conforme aumenta la energía de los fotones. Este comportamiento difiere del observado en la figura 17(b), donde la dispersión de la diferencia temporal es parecida en todo el intervalo de energía. No obstante, pese a disminuir la dispersión, esta sigue siendo significativamente alta, del orden de 2000 días.

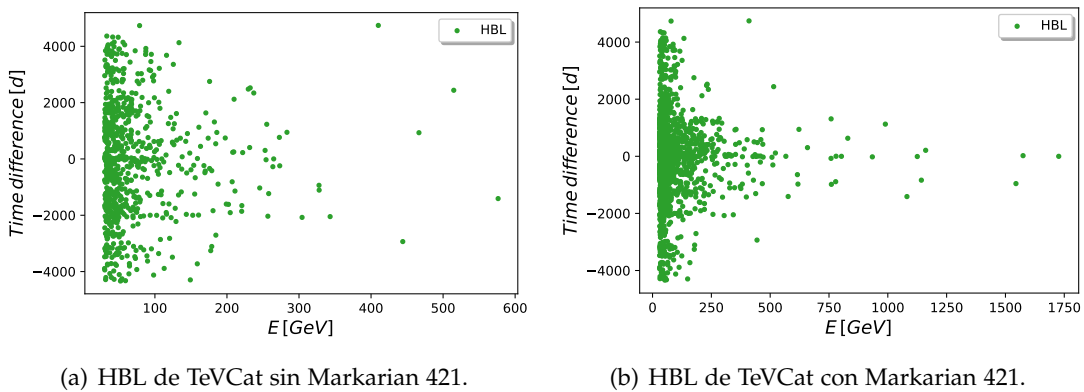


Figura 17: Diferencia temporal (en días) de los fotones de VHE con respecto a los flares en función de la energía. La diferencia temporal se ha calculado como la diferencia entre los tiempos de llegada de los fotones detectados con energía mayor que 30 GeV y el instante temporal más cercano en el que la fuente se encuentra en flare.

A modo de resumen, al incluir Markarian 421 en el análisis temporal de los blázares

del catálogo TeVCat se obtiene un comportamiento parecido al de los HBL de TeVCat sin Markarian 421 en cuanto al flujo relativo en el instante en el que se emiten los fotones de $E > 30$ GeV. Mientras que en cuanto a las diferencias temporales se obtiene un comportamiento más centrado en los flares, aunque sigue presentando una dispersión bastante alta, lo que indica que no existe relación entre cuándo se emiten los fotones de $E > 30$ GeV y los flares.

4.2.3 Análisis de los FSRQ

En la sección 4.2.1 se ha visto que parece existir cierta relación entre los fotones de VHE y los instantes en los que la fuente se encuentra en flare para los FSRQ. En esta sección se realizará una discusión más en profundidad para los FSRQ de la muestra de TeVCat. Además de estudiar los FSRQ del catálogo de VHE, se ha añadido la fuente 3C 454.3 por ser una de las fuentes más estudiadas, ya que presenta flares muy intensos de larga duración pero, sin embargo, no se ha detectado todavía en VHE con telescopios Cherenkov.

En las figuras 18 y 19 se muestran las curvas de luz para los FSRQ del catálogo de VHE y de 3C 454.3. En ellas, se han representado con líneas verticales los tiempos de llegada de los fotones con $E \in (30 \text{ GeV}, 100 \text{ GeV})$ en azul y con $E \geq 100 \text{ GeV}$ en rojo. En el caso de PKS 0736+017 (figura 18(c)) se ha representado el tiempo de llegada de un fotón con $E \geq 100 \text{ GeV}$ con una línea discontinua, ya que la probabilidad de que este fotón perteneciese a esta fuente era del 80%. Además, se ha representado en naranja los instantes temporales correspondientes a los flares con un criterio 5σ .

Lo primero que cabe resaltar de las curvas de luz de los FSRQ es la amplia variabilidad observada en los flares. Dicha variabilidad se da tanto en duración como en intensidad, encontrándose desde fuentes con muchos flares de corta duración hasta blázares con un solo flare pero de muy larga duración. Además, todos los FSRQ detectados con $E > 100 \text{ GeV}$ tienen al menos un periodo en el que se encuentran en flare. Este comportamiento podría indicar que la presencia de flares es necesaria para que un FSRQ emita fotones de VHE, aunque dado que sólo se han detectado 9 fuentes de este tipo, no hay una estadística significativa para afirmar este hecho. Dado que se han detectado FSRQ de la muestra de 4FGL con flares, pero sin fotones de VHE, la presencia de flares no es una condición suficiente. Otra propiedad que parece observarse para las fuentes de TeVCat es que cuanto mayor sea el número de flares, o mayor sea la duración de los mismos, mayor es el número de fotones detectados con $E > 30 \text{ GeV}$. Este resultado se aprecia claramente en la figura 20. Para cuantificar la relación existente entre estas dos variables se ha obtenido un coeficiente de correlación de Spearman-Rank de $r = 0.867$, lo que corrobora la tendencia observada entre el número de fotones detectados y el tiempo que la fuente está en flare. No obstante, dado que la estadística es muy baja, no es posible afirmar que exista una relación entre estos parámetros, sino que sólo se puede afirmar la tendencia observada.

Otro aspecto de interés al observar las curvas de luz, es que para fuentes como PKS 0346-27 (figura 18(b)) o 4C +21.35 (figura 18(e)) parece haber fotones de $E > 30 \text{ GeV}$ que son emitidos con poca separación temporal entre ellos. A estos grupos de fotones se les va a denominar en este trabajo como paquetes. En la tabla 5 se recoge el número de paquetes de hasta 5 fotones en un intervalo temporal de una semana y de 3 días para

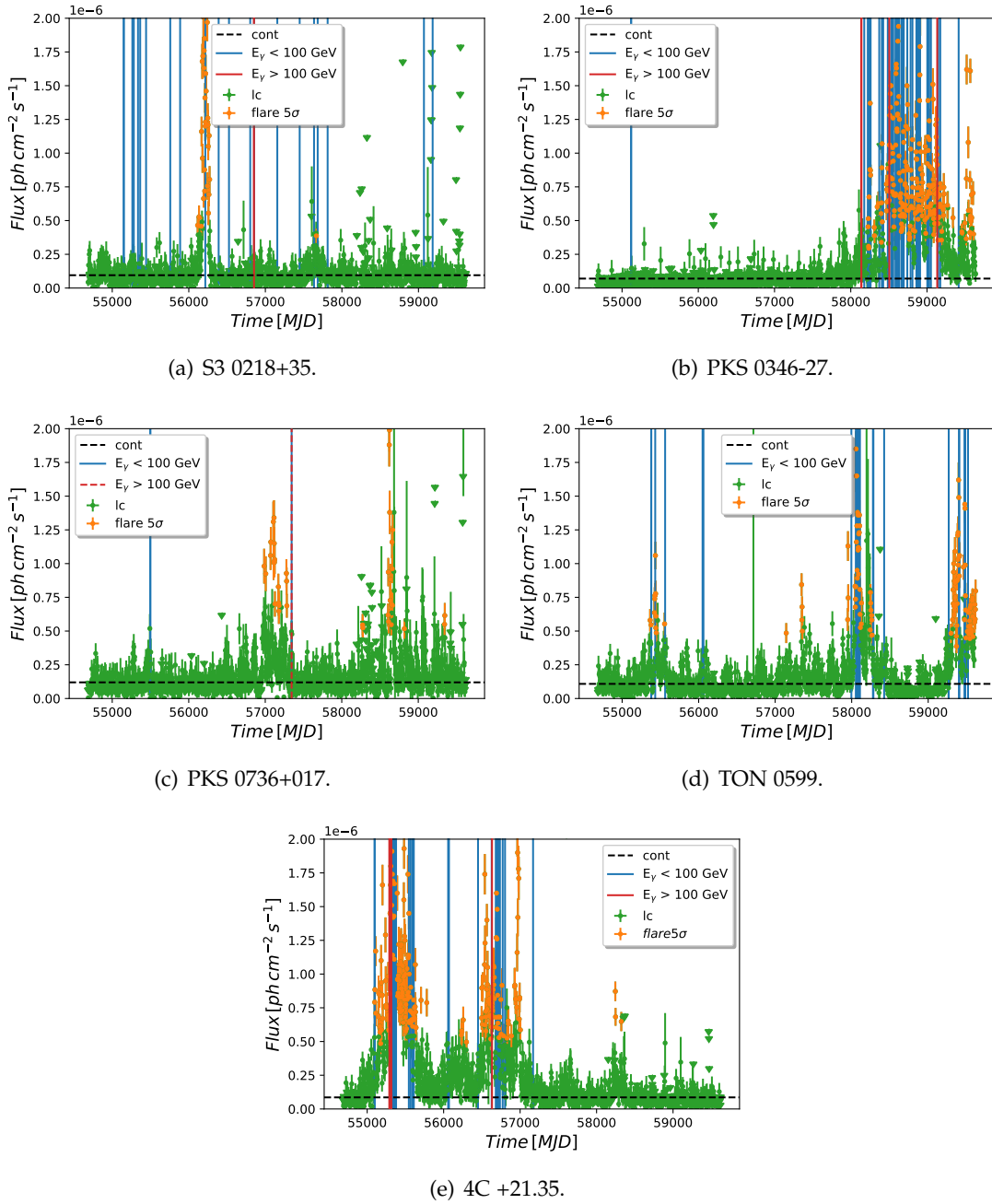


Figura 18: Curvas de luz de los FSRQ de TeVCat.

todas las fuentes. En ella se puede apreciar que la probabilidad de que una fuente emita dos fotones en este rango espectral en un intervalo de tiempo menor que una semana es relativamente baja. En las tablas 6 y 7 se recoge el número de paquetes observado por fuente. El cálculo del número de fotones que pertenecen a cada paquete se ha realizado excluyendo los fotones que ya estaban asignados a cada paquete. De esta forma, si hay paquetes de hasta X fotones, el número real de paquetes con $Y < X$ fotones es mayor que el mostrado en las tablas 6 y 7. En ellas se puede ver que se encuentra al menos un paquete de dos fotones en una semana para todos los FSRQ, salvo para PKS 0736+17, para la que sólo se ha observado un fotón con probabilidad de pertenecer a ella mayor

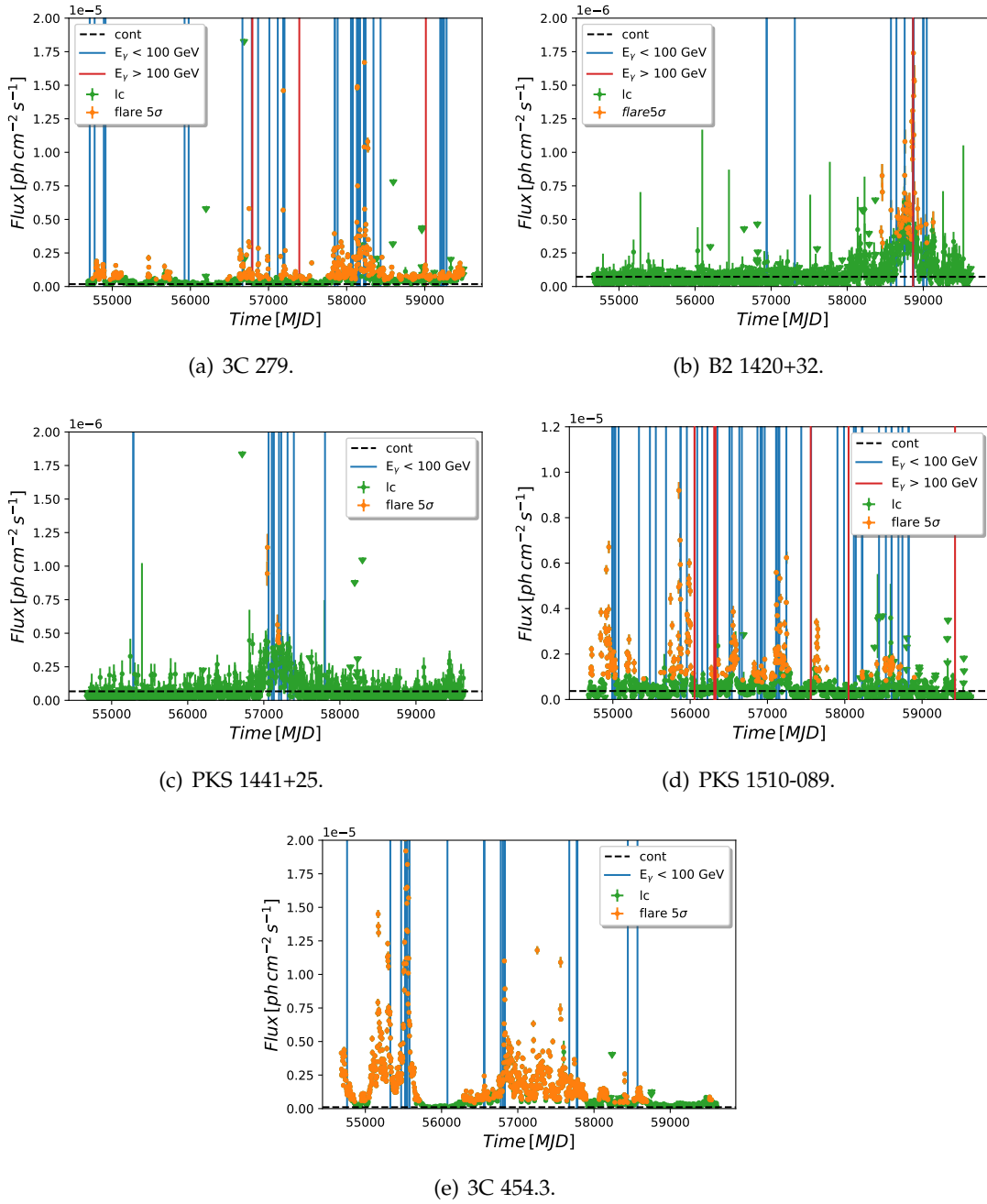


Figura 19: Curvas de luz de los FSRQ de TeVCat y de 3C 454.3.

del 90 %.

Para ver cuándo se emiten los paquetes, se ha calculado la diferencia entre la media de los tiempos a los que se emiten los fotones que los componen y el instante temporal en el que se produce un máximo relativo de flujo durante el flare. Los resultados obtenidos para los paquetes de 3 días y de una semana se muestran en las figuras 21(a) y 21(b) respectivamente. En ellas se aprecia que los paquetes de más de 2 fotones son emitidos con menos de 100 días de diferencia con respecto a un máximo de flujo durante un flare. Además, nótese que estas diferencias temporales son menores que el tiempo de duración promedio de un flare, lo que indica que, mientras que los fotones individuales no son

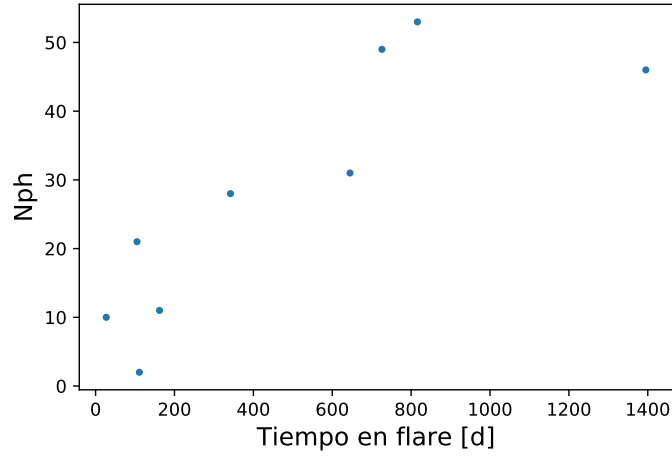


Figura 20: Representación gráfica del número de fotones detectados con $E > 30$ GeV frente al tiempo que la fuente se encuentra en flare.

N_γ	N_{3d}	N_{7d}
2	26	29
3	4	7
4	0	3
5	0	1

Tabla 5: Número de paquetes totales de hasta 5 fotones en un intervalo temporal de una semana (N_{7d}) y de 3 días (N_{3d}).

emitidos necesariamente durante un flare (ver figura 14(a)), la emisión de paquetes de más de dos fotones sí ocurre únicamente durante un flare.

Observando la curva de luz de 3C 454.3 (figura 19(e)) es posible preguntarse por qué no se han detectado fotones de VHE para esta fuente. Según lo visto en esta sección y en la sección 4.2.1, parece existir cierta relación entre la presencia de flares en los FSRQ y la emisión de este tipo de fotones. Sin embargo, para la fuente que presenta flares más intensos y de mayor duración sólo se han observado un total de 22 fotones con $E > 30$ GeV y ninguno de ellos por encima de 100 GeV. Mientras que para PKS 1441+25 (figura 19(c)) que presenta un único flare alrededor de un orden de magnitud menos intenso que 3C454.3 sí fue detectado con MAGIC [33]. Una posible explicación es que la región de emisión de 3C 454.3 se encuentre siempre dentro de la BLR, no dejando

	S3 0218+35		PKS 0346-27		PKS 0736+17		TON 0599		4C +21.35	
N_γ	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}
2	1	1	9	6	0	0	2	3	4	5
3	0	0	0	4	0	0	1	1	2	2
4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6: Número de paquetes por fuente de hasta 5 fotones en un intervalo temporal de una semana (N_{7d}) y de 3 días (N_{3d}).

	3C 279		B2 142+32		PKS 1441+25		PKS 1510-89		3C 454.3	
N_γ	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}	N_{3d}	N_{7d}
2	5	4	1	1	0	1	4	8	2	5
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7: Continuación Tabla 6.

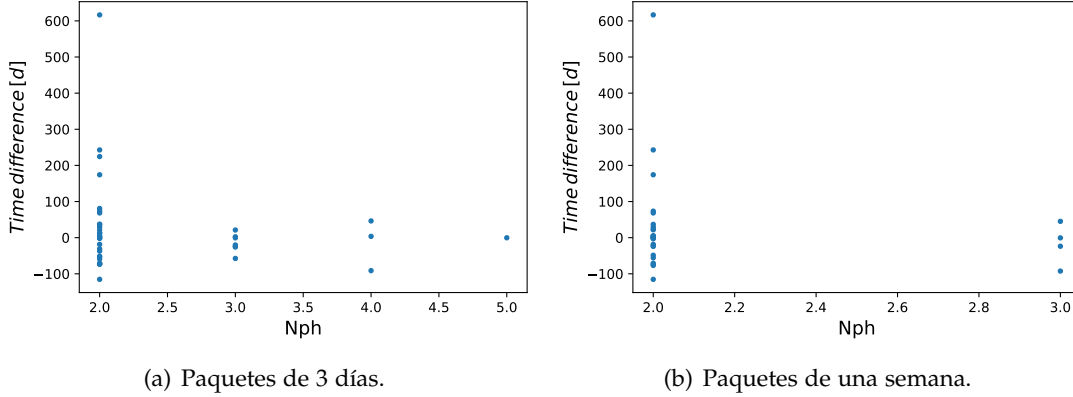


Figura 21: Diferencia temporal entre el tiempo promedio de emisión de los fotones que componen el paquete y el máximo relativo de flujo más cercano durante un flare frente al número de fotones por paquete.

escapar así ningún fotón de VHE, mientras que en el resto de FSRQ haya determinados instantes en los que la región de emisión pueda encontrarse fuera de la BLR.

4.3 Estudio del EBL

Del total de 1892 blázares fuera del plano galáctico, a latitudes $|b| > 10^\circ$, no se han observado fotones con energías mayores que 10 GeV para 328. De los 1564 restantes se han utilizado los 1098 para los que hay datos de redshift para comprobar los modelos actuales de la absorción producida por la luz extragaláctica de fondo. Se han seleccionado blázares a estas latitudes para evitar considerar fotones de VHE procedentes de nuestra galaxia.

En la figura 22 se muestra la energía máxima de los fotones detectados para cada una de las fuentes de la muestra frente al redshift al que se encuentran cada una de ellas. Además, se han representado el horizonte cósmico de rayos γ (energía para la cual la profundidad óptica τ es igual a uno en función del redshift) calculado según los distintos modelos actuales para el EBL [23], [34], [35], [36], [37] y [38]. De esta forma, un fotón que se encuentre por debajo de dicha curva tiene $\tau < 1$, mientras que si se encuentra por encima, tendría $\tau > 1$. En ella se puede apreciar que el intervalo de energías observadas para las fuentes con z disponible comprende entre 10 GeV y 1,604 TeV. Además, las fuentes estudiadas abarcan un rango amplio de distancias, ya que se han detectado entre $z=0$ y $z=3,5$. Se observa que las fuentes que se han observado a energías mayores se encuentran a bajo z . Este comportamiento puede explicarse atendiendo a que cuanto más

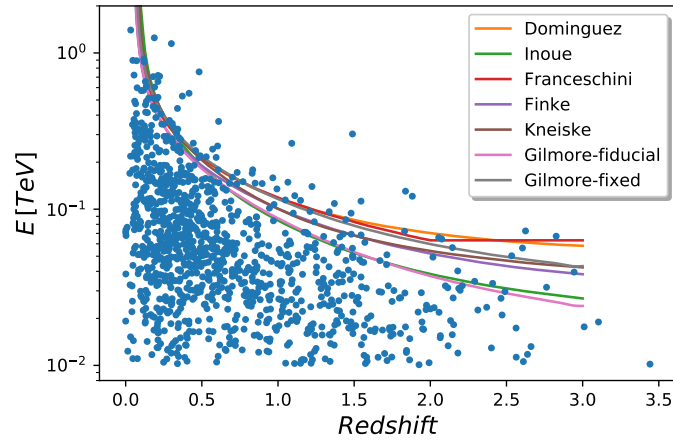


Figura 22: Representación de los distintos modelos encontrados en la bibliografía para el EBL superpuestos a los resultados obtenidos para las fuentes del catálogo 4LAC.

distante es una fuente, mayor es la probabilidad de que los fotones de VHE interaccionen con fotones del EBL. Para la mayoría de fuentes, los fotones observados tienen $\tau < 1$, encontrándose algunos con τ mayor, especialmente en el intervalo de z entre 0,5 y 2,5. Comparando el horizonte cósmico de rayos γ para los distintos modelos, se observa que todos ellos coinciden a bajo z (a $z=0.1$ se observa una discrepancia entre modelos del $\sim 4\%$), mientras que conforme z aumenta, se observa una mayor discrepancia entre estos (a $z=3$ la discrepancia es del $\sim 60\%$). Este comportamiento indica que a alto z , los modelos no son capaces de estimar con suficiente precisión el EBL.

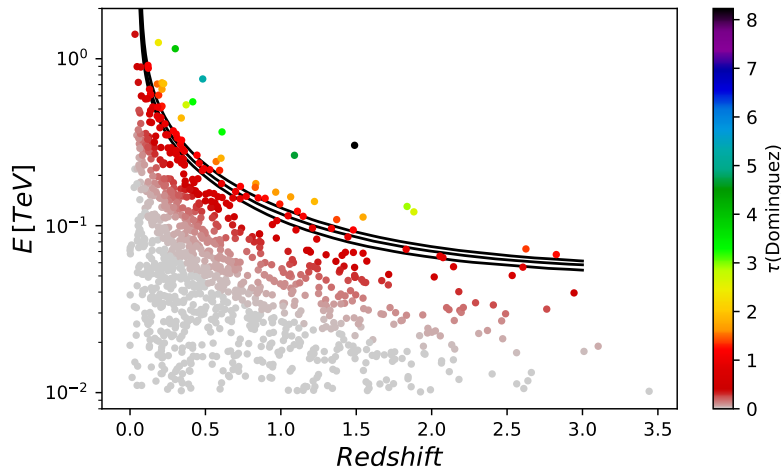


Figura 23: Profundidad óptica de los fotones detectados para las fuentes del catálogo 4LAC calculadas según el modelo de Dominguez et al. 2011 [23]. Las líneas negras muestran la energía que tendría que tener un fotón para tener $\tau = 1$ en función del redshift.

De los modelos mostrados en la figura 22, el más utilizado es el modelo de Dominguez et al. 2011. Este modelo ha sido empleado para calcular la profundidad óptica máxima de las fuentes de la muestra. El resultado está representado en la figura 23. Los resultados obtenidos para el resto de modelos de la bibliografía se muestran en el apéndice.

ce (sec. 6.1) en la Figura 25. En la Figura 23 se observan un total de 54 fuentes con $\tau > 1$. Dentro de estas fuentes, 3 de ellas presentan $\tau > 4$. Estas fuentes son 4FGL J0035.2+1514 ($\tau = 4.68_{-0.3}^{+0.18}$), 4FGL J1224.1+2239 ($\tau = 5.3_{-0.5}^{+0.3}$) y 4FGL J1522.1+3144 ($\tau = 8.23_{-0.3}^{+0.03}$). Estudios recientes, como el de Ajello. et al., 2017 [39] no han encontrado fuentes con $\tau > 5$, lo que hace que estos valores encontrados sean especialmente interesantes. Además, el hecho de que estas fuentes se encuentren a $z = 1.09$, $z = 0.48$ y $z = 1.49$ respectivamente, aumenta considerablemente el interés sobre ellas, ya que a estas distancias los modelos del EBL discrepan en torno a un 28%, 14% y un 38% respectivamente. Estas fuentes son las que presentan también los valores de τ más altos según el resto de modelos representados en la figura 25 en el apéndice (sec. 6.1).

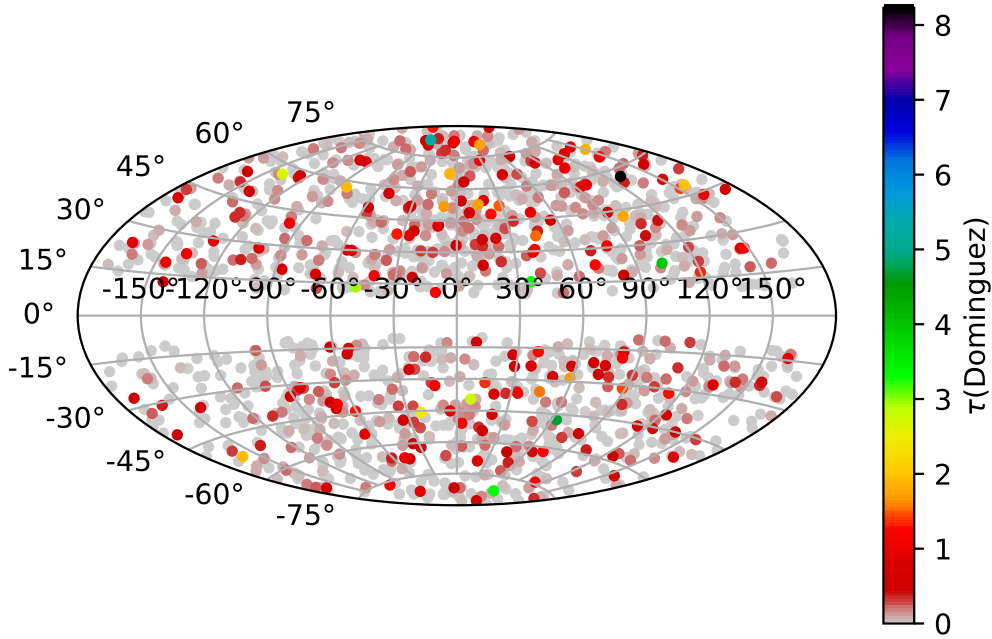


Figura 24: Representación en coordenadas galácticas de la profundidad óptica obtenida según el modelo de Dominguez et al. 2011 [23].

Para determinar la validez de los valores de $\tau > 4$ obtenidos, se han estudiado las probabilidades de que los fotones con mayor profundidad óptica provengan de cada una de las fuentes. En el caso de 4FGL J0035.2+1514, se trata de un BL Lac para el que se han detectado un total de 50 fotones de energía mayor que 10 GeV con una probabilidad de proceder de la fuente mayor del 90%, el fotón que produce un valor de $\tau = 4.68_{-0.3}^{+0.18}$ tiene una energía de 264 GeV y una probabilidad de pertenecer a la fuente del 96%, no obstante, es el único fotón que se observa por encima de 100 GeV. 4FGL J1224.1+2239 por su parte, es otro BL Lac con 5 fotones detectados con el mismo criterio que antes. En este caso, el fotón que produce el valor de $\tau = 5.3_{-0.5}^{+0.3}$ tiene una energía de 757 GeV y una probabilidad de pertenecer a la fuente del 97%, aunque el siguiente fotón detectado con más energía tiene 97 GeV. Por último, 4FGL J1522.1+3144 es un FSRQ con un total de 71 fotones que cumplen el mismo criterio que el de las otras fuentes. En este caso, el fotón que produce el valor de $\tau = 8.23_{-0.3}^{+0.03}$ tiene una energía de 303 GeV y una probabilidad de pertenecer a la fuente del 90%, lo que lo sitúa justo en el límite de probabilidad que se está considerando, además, es el único fotón con energía mayor que 60 GeV. Teniendo

en cuenta las probabilidades y el resto de fotones detectados para cada fuente, es posible concluir que los valores de $\tau = 4.68_{-0.3}^{+0.18}$ y $\tau = 5.3_{-0.5}^{+0.3}$ son fiables, mientras que el de $\tau = 8.23_{-0.3}^{+0.03}$ habría que estudiarlo en más detalle o en el futuro cuando se dispongan de más datos.

Con el objetivo de estudiar la homogeneidad del EBL, en la figura 24 se muestra un mapeado en coordenadas galácticas de las fuentes estudiadas. En la escala de colores, se ha representado la profundidad óptica máxima para cada una de las fuentes según el modelo de Dominguez et al., 2011. En ella se observa que en la zona con longitudes galácticas, l , entre -60° y 60° y latitudes mayores que 10° , parece haber una sobredensidad de fotones con $\tau \geq 1$. Mientras que en la región con longitud entre -180° y -90° y latitud menor que -10° se observa una baja densidad de este tipo de fotones. No obstante, dado que el τ obtenido para estas regiones oscila alrededor de 1-2, la sobredensidad observada no es del todo significativa. En cuanto a los fotones con $\tau > 2$, se observa que están repartidos por todo el mapa, no encontrándose ninguna región en la que el número de los fotones que los producen sea especialmente alto con respecto al resto.

5 Resumen y conclusiones

En este trabajo se han caracterizado una muestra de blázares observados a $E > 100$ GeV con telescopios Cherenkov (TeVCat) y otra muestra representativa de toda la población de blázares emisores de rayos γ , extraída del catálogo 4FGL. Se han estudiado las relaciones entre los tiempos de llegada de los fotones con $E > 30$ GeV con la curva de luz a partir de 100 MeV a partir de los datos disponibles de *Fermi*-LAT para ambas muestras. Con el objetivo de estudiar las diferencias entre los distintos tipos de blázares, los resultados obtenidos se han presentado por separado para FSRQ, LBL, IBL y HBL. La muestra de TeVCat se compone de un total de 75 fuentes, entre las que se encuentran 9 FSRQ, 2 LBL, 10 IBL y 54 HBL. La muestra de 4FGL está compuesta por 1915 fuentes: 664 FSRQ, 330 LBL, 313 IBL, 389 HBL y 219 BL Lac sin clasificar. Finalmente, utilizando los datos obtenidos se ha estudiado la homogeneidad del EBL.

Los resultados obtenidos se enumeran a continuación.

- De la muestra de 4FGL, se han detectado fotones con $E > 30$ GeV para el 28 % de los FSRQ, el 63 % de los LBL, el 78 % de los IBL, el 92 % de los HBL y el 74 % de los BL Lacs sin clasificar (BLU). De la muestra de TeVCat se han detectado para todos salvo para el HBL 4FGL J2347.0+5141.
- Tanto la energía máxima observada como el número máximo de fotones detectados es mayor para los BL Lacs que para los FSRQ. Dentro de los BL Lacs, para la muestra de TeVCat ambas propiedades crecen conforme vamos de LBL a HBL, mientras que en la muestra de 4FGL los IBL presentan la mayor energía observada, pero el número de fotones detectados más bajo de los BL Lacs.
- *Fermi*-LAT ha observado un fotón de 1,97 TeV procedente del IBL 4FGL J1558.9-6432, el cual se encuentra a $z=0,0796$, que no aparece en el catálogo TeVCat.
- El espectro de los BL Lacs intrínseco sigue una ley de potencias con índice espectral $\alpha = 1,85 \pm 0,05$ mientras que los FSRQ siguen una ley de potencias hasta 50 GeV

con $\alpha = 1,62 \pm 0,11$, a partir de esta energía el número de fotones decae más rápidamente, especialmente para los FSRQ. Esto implica diferencias intrínsecas entre los BL Lacs y los FSRQ.

- Dentro de la muestra de TeVCat no se han observado flares según el criterio 5σ para 2 LBL, 4 IBL y 30 HBL. De la muestra de 4FGL para la que había disponibles curvas de luz, no se han observado flares pero sí fotones con $E > 30$ GeV para el 16% de los FSRQ, el 63% de los LBL, el 79% de los IBL, el 90% de los HBL y el 83% de los BLU.
- El flujo relativo al flujo promedio de la fuente en el instante en el que se emiten los fotones disminuye conforme aumenta la energía de los mismos. Los fotones detectados de los FSRQ son emitidos cuando la fuente se encuentra en flujos relativos más altos que para los BL Lacs.
- Los fotones con $E > 30$ GeV de los FSRQ se detectan en instantes temporales cercanos a cuando la fuente se encuentra en flare según el criterio 5σ . Esto no ocurre para los BL Lacs.
- Se han detectado grupos de fotones que llegan en intervalos temporales menores que 3 días y una semana para los FSRQ de TeVCat. El número máximo de fotones detectados en un paquete de 3 días es de 3, mientras que en los paquetes de 7 días se han observado hasta 5 fotones. Todos los FSRQ de TeVCat presentan al menos un paquete de 2 fotones en 7 días salvo PKS 0736+17.
- Se han observado 3 fuentes a profundidades ópticas mayores que 4: 4FGL J0035.2+1514 ($\tau = 4.68_{-0.3}^{+0.18}$, $z=1,09$), 4FGL J1224.1+2239 ($\tau = 5.3_{-0.5}^{+0.3}$, $z=0,48$) y 4FGL J1522.1+3144 ($\tau = 8.23_{-0.3}^{+0.03}$, $z=1,49$). Aunque sería necesario estudiar en más detalle el fotón que produce el valor de $\tau = 8.23_{-0.3}^{+0.03}$.
- El EBL es compatible con una distribución homogénea para las fuentes situadas a latitudes galácticas $|b| > 10^\circ$.

Nuestros resultados son compatibles con un escenario en el que, en los FSRQ, la emisión de los fotones de alta energía se produciría cuando la región de emisión en el jet se encuentra fuera de la BLR, lo que ocurriría en instantes temporales próximos a los flares observados a $E > 100$ MeV. Por el contrario, en los BL Lacs, al no encontrarse la BLR, los fotones de altas energías escapan sin problemas del AGN.

En cuanto a optimizar la estrategia de observación de CTA, parece que el mejor momento para detectar FSRQ en $E > 30$ GeV es cerca de los flares en la curva de luz a partir de 100 MeV. Mientras que para los BL Lacs se podrían observar a estas energías en cualquier momento. No obstante, los flares presentan una amplia variabilidad y existen flares durante los cuales LAT no ha observado fotones con $E > 30$ GeV. Teniendo en cuenta, además, que *Fermi*-LAT no es especialmente sensible a estas energías, sería necesario realizar este mismo estudio utilizando también los datos disponibles de los telescopios Cherenkov actuales para obtener una estadística más representativa a $E > 30$ GeV.

Otra posible mejora para este trabajo sería realizar un modelado de la BLR de los FSRQ de TeVCat a partir de observaciones en otras longitudes de onda para estudiar más en detalle la absorción que produce.

Además, se podría realizar un estudio detallado de la SED de los blázares con $\tau > 4$ para comprobar los modelos de EBL y la opacidad del Universo a VHE.

6 Apéndice

6.1 Modelos de EBL

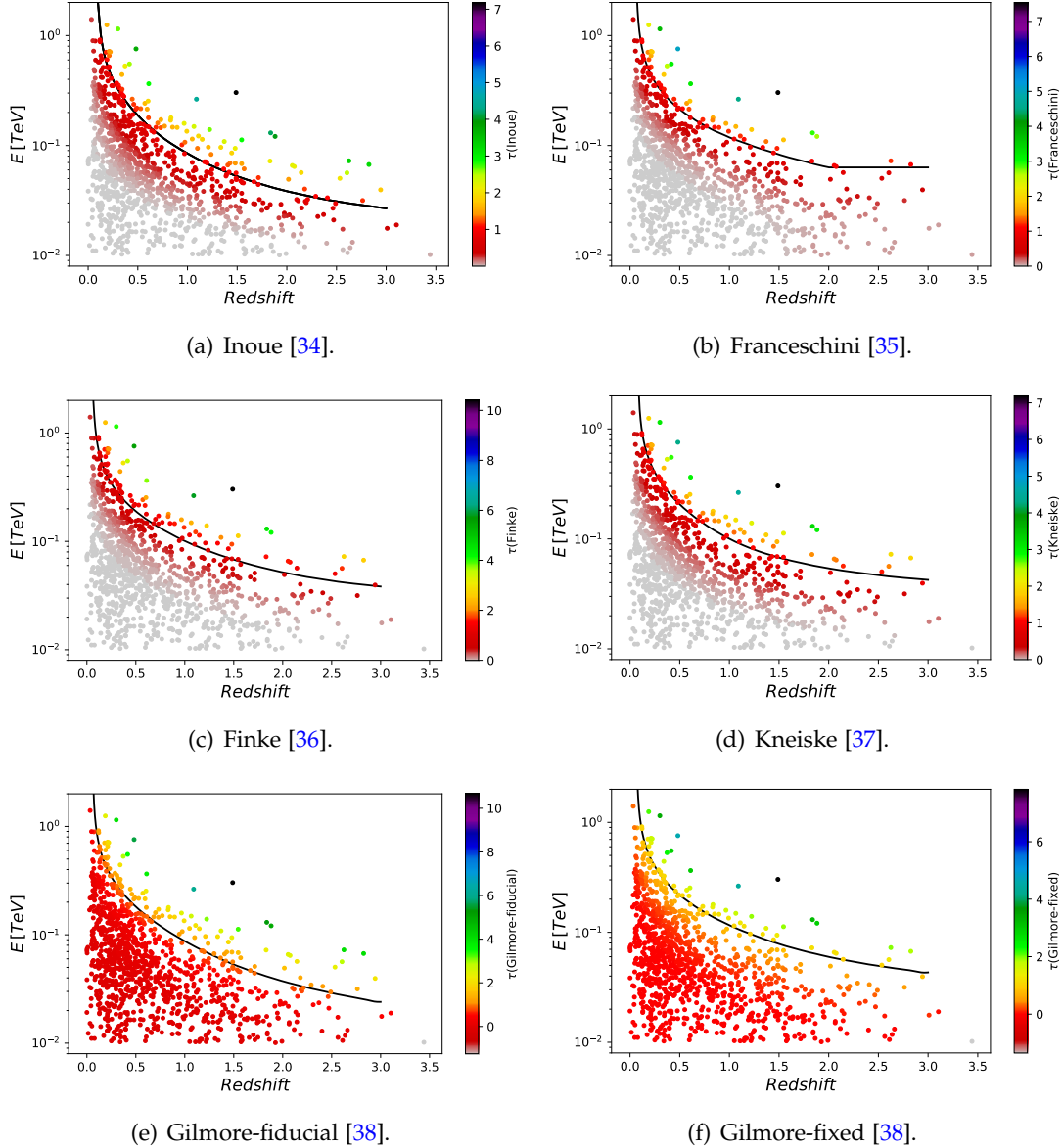


Figura 25: Profundidad óptica de los fotones detectados para las fuentes del catálogo 4LAC calculadas según los distintos modelos encontrados en la bibliografía. Las líneas negras muestran la energía que tendría que tener un fotón para tener $\tau = 1$ en función del redshift.

En la figura 25 se muestra la profundidad óptica de los fotones detectados para las fuentes del catálogo 4LAC calculadas según el resto de modelos encontrados en la bi-

bliografía. En ella se puede apreciar que empleando los distintos modelos se obtienen valores similares al de Dominguez et al. 2011 (figura 23). Aunque en el caso de Dominguez et al. 2011 el número de fuentes con $\tau > 1$ es ligeramente menor que para el resto de modelos mostrados.

Referencias

- [1] Bose , D., et al., 2022, EPJST, 231, 3.
- [2] CTA Observatory
- [3] Bose , D., et al., 2022, EPJST, 231, 27.
- [4] Fermi/LAT Collaboration., 2022, ApJS, 1902, 10045.
- [5] Sparke, L. S., Gallagher, J. S., 2007, Cambridge University Press.
- [6] Beckmann, V., Shrader, C., 2012.
- [7] Blandford , R., Meier, D., Readhead, A., 2019, ARA&A, 57, 467.
- [8] Padovani, P., et al., 2017, A&ARv, 25, 2.
- [9] Urry, C. M., Padovani, P., 1995, ASP, 107, 803.
- [10] Hermine, L., et al., 2004, MNRAS, 351, 83.
- [11] Donato , D., et al., 2001, A&A, 375, 739.
- [12] Sikora , M., et al., 1994, ApJ, 421, 153.
- [13] van den Berg, J. P., et al., 2019, ApJ, 874, 47.
- [14] Mücke , A., et al., 2003, APh, 18, 593.
- [15] Hayashida , M., et al., 2015, ApJ, 807, 79.
- [16] Madejski , G., Sikora, M., 2016, ARA&A, 54, 725.
- [17] Wang , Z. R, et al., 2022, PhRvD, 105.023005.
- [18] Nalewajko, K., et al., 2014, ApJ, 789, 161.
- [19] Böttcher, M., et al., 2008, AIPC, 1085, 427.
- [20] Primack, J., et al., 2011, AIPC, 1381, 72.
- [21] Saldana-Lopez, A., et al., 2021, MNRAS, 507, 5144.
- [22] Cooray, A., 2016, RSOS, 3, 150555.
- [23] Dominguez, A., 2011, MNRAS, 410, 2556.
- [24] Martin, C., Bowyer, S., 1989, ApJ, 338, 677.
- [25] Fermi/LAT Collaboration: W. B. Atwood, et al., 2009, ApJ, 697, 1071.
- [26] The MAGIC Telescopes
- [27] VERITAS
- [28] HESS

-
- [29] Kocevski, et al., 2021, *ATel*, 15110.
 - [30] Abdo, A. A., et al., 2009, *ApJS*, 183, 46.
 - [31] Ajello, M., et al., 2020, *ApJ*, 892, 105.
 - [32] Petry, D., 1996, *A&A*, 311, 13.
 - [33] Ahnen, M. L., et al., 2015, *ApJL*, 815, 23.
 - [34] Inoue, Y., et al., 2013, *ApJ*, 768, 197.
 - [35] Franceschini, A., et al., 2008, *A&A*, 487, 837.
 - [36] Finke, D. J., et al., 2010, *ApJ*, 712, 238.
 - [37] Kneiske, T. M., Dole, H., 2010, *A&A*, 515, A19.
 - [38] Gilmore, R. C., et al., 2012, *MNRAS*, 422, 3189.
 - [39] Ajello, M., et al., 2017, *ApJS*, 232, 18.