



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

**ESTUDIO DE CORRELACIONES EN LOS FLUJOS
OBSERVADOS EN ÓPTICO, RADIO Y RAYOS-GAMMA
DEL BLAZAR MRK 421**

Mitsa Marisol Castellanos Pineda

Asesorada por Dra. María Magdalena González Sánchez y Dr. José Rodrigo
Sacahui Reyes

Guatemala, Mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**ESTUDIO DE CORRELACIONES EN LOS FLUJOS
OBSERVADOS EN ÓPTICO, RADIO Y
RAYOS-GAMMA DEL BLAZAR MRK 421**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

MITSA MARISOL CASTELLANOS PINEDA
ASESORADA POR DRA. MARÍA MAGDALENA GONZÁLEZ SANCHÉZ Y
DR. JOSÉ RODRIGO SACAHUI REYES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO

Director	M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Representante Egresado	Lic. Urías Amitaí Guzmán García
Representante Docente	M.A. Pedro Peláez Reyes
Representante Docente	Arqta. Ana Verónica Carrera Vela
Representante Estudiante	Elvis Enrique Ramírez Mérida
Representante Estudiante	Oscar Eduardo García Orantes
Secretario	Ing. Edgar Damián Ochoa Hernández

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	Dr. Enrique Pazos Avalos
EXAMINADOR	MSc. Edgar Cifuentes Anléu
EXAMINADOR	Dr. Ángel Giovanni Ramírez García

Ref. D.DTG. 005-2022

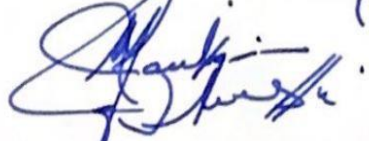
Guatemala 28 de octubre de 2022

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada, al trabajo de graduación titulado: "ESTUDIO DE CORRELACIONES EN LOS FLUJOS OBSERVADOS EN ÓPTICO, RADIO Y RAYOS-GAMMA DEL BLAZAR MRK 421", presentado por la estudiante universitaria Mitsa Marisol Castellanos Pineda, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Director

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT IG101320.

Los datos utilizados en este trabajo para la banda de óptico con el telescopio KVA fueron obtenidos gracias a V. Fallah y para la banda en radio gracias a A. Lahteenmak del Observatorio Metsähovi.

A mis asesores, Magda y Rodrigo por compartir su inmensa sabiduría y experiencia conmigo, gracias por sus consejos y regaños cuando eran debidos. Han sido clave para mi desarrollo como científica y humana. Gracias por permitirme ser parte de su equipo.

A mi papá quién ha confiado y creído en mi desde siempre, gracias por enseñarme el valor de la vida, a luchar por lo que creo y por el apoyo y soporte incondicional. Gracias por darnos eso que te hubiera gustado tener de pequeño. *I love soo much dad.*

A mi hermano Ronald que ha sido un confidente y amigo en todo momento. Gracias por compartir tu conocimiento y experiencias conmigo que sin duda me han ayudado a afrontar mejor este proceso.

A mi familia, en especial a mi mamá por formar parte desde el inicio de este proceso.

A mis amicxs y profesores que me han acompañado durante este camino. En especial a: Luz y Adriana amigas del alma, compañeras de aventura, “novias”, con quienes he podido florecer. Gracias amigas feministas por estar ahí siempre.

Mabel, Erick, Tomás compañeros de equipo que me han ayudado de forma desinteresada. Gracias por compartir su conocimiento.

Joshua, Ludwing, Mabel, Amanda, Subadra, Julio, Chubis, Damian, Amilcar, Robin y Giovanni por brindarme su amistad y soporte durante toda la carrera, los llevo en el corazón.

Ha sido un placer coincidir temporal y espacialmente con todos ustedes.

Para mi papá:

*Desde pequeña me enseñaste a ver al cielo y sin saberlo me has abierto las puertas al
Universo.*

...

Viejo mi querido viejo

Eustaquio Castellanos

También dedico este trabajo para todas aquellas niñas, chicas, mujeres que fueron, son y serán científicas. Confíen en ustedes, hagan lo que les gusta, sigan su intuición y trabajen por aquello que anhelan, todas son inteligentes y totalmente capaces. El camino no será fácil, he pasado por una etapa que pasarán ustedes y con certeza les digo que son perfectamente capaces de alcanzar sus metas y más. Ayúdense unas a las otras y no hagan caso del sistema patriarcal y de los machos, cuestionenlos y retenlos. Juntas podemos transformar generaciones.

“Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido. Ahora es el momento de comprender más para temer menos” - Marie Curie.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
OBJETIVOS	VII
INTRODUCCIÓN	IX
1. Núcleos Galácticos Activos	1
1.0.1. Reseña Histórica	1
1.0.2. Núcleos Galácticos Activos	2
1.1. Modelo Unificado	5
2. Blazares	9
2.0.1. Distribución de energía espectral en blazares	9
2.0.2. Fondo de Luz Extragaláctica	11
2.0.3. Chorros relativistas	13
2.0.3.1. Amplificación Doppler	15
2.0.4. Variabilidad	16
2.0.5. Polarización	17
2.1. Procesos Radiativos en Blazares	18
2.1.1. Emisión Sincrotrón	18
2.1.2. Efecto Compton Inverso	18
2.2. Modelos de emisión en Blazares	19
2.2.1. Modelo leptónico	19
2.2.1.1. Modelo leptónico de una zona	20
2.2.1.2. Proceso Compton Externo	22
2.2.2. Modelo Hadrónico	22
3. Markarian 421	25

4. Metodología	29
4.1. Instrumentos de Observación	29
4.1.1. Metsähovi Radio Observatory	29
4.1.2. Programa de Monitoreo Tuorla Blazar	30
4.1.3. Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi	31
4.1.3.1. Análisis de datos de Fermi-LAT	36
4.1.3.2. Binned Likelihood	37
4.1.4. Fermi Science Tools	38
4.1.5. Software: Enrico	40
4.2. Curvas de Luz	42
4.2.1. Curva de Luz en radio	42
4.2.2. Curva de Luz en óptico	43
4.2.3. Curva de Luz en rayos γ (2-300 GeV)	43
4.2.4. Simultaneidad en las curvas de luz	45
4.2.4.1. Simultaneidad entre las curvas de luz de radio, óptico y rayos γ	45
4.2.4.2. Simultaneidad entre las curvas de luz de radio y óptico . .	48
4.3. Metodo D'Agostini	49
5. Resultados y Discusión	53
5.0.1. Correlación entre óptico y rayos γ	53
5.0.2. Correlación entre radio y rayos γ	54
5.0.3. Correlación entre radio y óptico	55
5.1. Discusión de Resultados	57
6. CONCLUSIONES	59
7. Anexos	61

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Representación esquemática del AGN.	3
1.2. Taxonomía de los AGNs.	7
1.3. Representación esquemática del AGN en el Modelo Unificado.	8
2.1. Distribución de energía espectral de un blazar.	10
2.2. Representación esquemática de la SED para BL Lac.	11
2.3. Intensidad del fondo extragaláctico en función de la longitud de onda Cooray (2016)	12
2.4. Intensidad del fondo extragaláctico en función de la longitud de onda λ para diferentes modelos. La EBL para el modelo de referencia se muestra con la curva sólida Inoue y cols. (2013)	13
2.5. Esquema del efecto superlumínico. Créditos: Elaboración propia . . .	14
2.6. Esquema de la radiación sincrotrón.	18
2.7. Esquema de la emisión del efecto Compton inverso	19
2.8. Distribución de energía espectral de Mrk 421 según el modelo leptó- nico de una zona.	20
2.9. Diagrama de un AGN, que ilustra los diversos campos de radiación externos que pueden ser dispersados mediante el efecto Compton in- verso.	23
3.1. Mapa del cielo localizado en Mrk 421.	25
4.1. Observatorio Metsähovi.	30
4.2. Telescopios del programa de Monitoreo Tuorla Blazar.	31
4.3. Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi.	32
4.4. Esquema de la parte interna del LAT.	33
4.5. Ilustración de los principios de diseño del rastreador.	34
4.6. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de radio durante la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados por Metsähovi Radio Observatory	42

4.7. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de óptico durante la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados del telescopio KVA	43
4.8. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de rayos γ (2-300 GeV) para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados del telescopio Fermi LAT.	44
4.9. Curvas de luz simultaneas del Metsähovi, KVA y Fermi-LAT para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Un bin temporal de 1 semana fue usado en las tres frecuencias.	47
4.10. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de rayos γ y radio (37GHz) . .	47
4.11. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de radio (37GHz) y rayos γ . .	48
4.12. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de radio y óptico	49
5.1. Correlación entre la banda de óptico y rayos γ (2-300 GeV)	54
5.2. Correlación entre la banda de radio y rayos γ (2-300 GeV)	55
5.3. Correlación entre la banda de radio y óptico	56

ÍNDICE DE TABLAS

5.1.	Tabla con los valores de los parámetros obtenidos al ajustar una función lineal o ley de potencias a las bandas de radio (R), óptico (O) y rayos γ (γ) (2-300 GeV) a través del método de D'Agostini	57
------	--	----

OBJETIVOS

General

Determinar si existe correlación entre la emisión en radio (37 GHz), óptico (banda R) y rayos- γ en el rango de energía entre 2 a 300 GeV del blazar Mrk 421.

Específicos

1. Buscar datos históricos en la banda de óptico, radio y rayos γ (2-300 GeV) para Mrk 421.
2. Generar curvas de luz en las bandas de óptico, radio y rayos γ (2-300 GeV).
3. Y en caso de haber correlación, determinar el tipo de correlación que presente Mrk 421.

INTRODUCCIÓN

Los núcleos galácticos activos (AGNs por sus siglas en inglés), son núcleos de galaxias con luminosidades muy altas ($L \approx 10^{42-47} \text{ erg s}^{-1}$) originadas en un volumen compacto y que opacan en la mayoría de los casos a la emisión de la galaxia anfitriona (Urry y Padovani, 1995). Están conformados por: un agujero negro supermasivo (SMBH, por sus siglas en inglés) con masa de entre 10^6 - $10^9 M_{\odot}$ (masas solares¹) rodeado por un disco de acreción y un toroide de polvo y gas que absorbe radiación óptica y ultravioleta y dos chorros relativistas en dirección opuesta uno de otro, perpendiculares al plano de la galaxia que emiten en longitudes de onda desde radio hasta rayos γ .

El Modelo Unificado (Urry y Padovani, 1995) propone que las propiedades observacionales de los AGNs dependen de su orientación con respecto al observador. Los blazares son una sub-clase de AGN que se diferencia en que uno de los chorros relativista está apuntando en dirección al observador. Dentro de las características principales de los blazares, se encuentra la evidencia de variabilidad muy rápida, desde algunas pocas horas hasta meses Rajput, Bhoomika, Stalin, C. S., y Rakshit, Suwendu 2020. Su radiación, que se extiende a lo largo de todo el espectro electromagnético, está dominada por procesos no térmicos, y su distribución espectral de energía (SED, por sus siglas en inglés) presenta la forma de “doble joroba” que puede estar descrita mediante el modelo de Sincrotrón Comptón Autoinducido de una zona (SSC, por sus siglas en inglés). Una consecuencia de este modelo es la existencia de correlación entre emisiones a distintas frecuencias. Los modelos leptónicos EC (Compton Externo, por sus siglas en inglés) y hadrónicos son otra alternativa para describir la distribución de energía espectral en blazares.

Markarian 421 (Mrk 421) es uno de los blazares más estudiados en rayos X y rayos γ de muy alta energía (VHE, por sus siglas en inglés, energía $>100 \text{ GeV}$).

¹ $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Debido a su proximidad ($z=0.031$), es una fuente ideal para estudiar la naturaleza de los blazares. Dado que Mrk 421 es brillante y muy variable, se han organizado campañas de seguimiento a diferentes longitudes de onda desde radio hasta rayos γ para estudiar su evolución temporal y los mecanismos de radiación a través de su SED. Desde 2008 con el lanzamiento de la misión Fermi se inicia una nueva era para el estudio de blazares a altas energías, desde entonces se han realizado extensos monitoreos simultáneos y continuos en diferentes frecuencias del espectro: Rebillot y cols. 2008, Horan y cols. 2009, Donnarumma y cols. 2009, Ackermann y cols. 2011, Acciari y cols. 2011, Acciari y cols. 2014a, Shukla y cols. 2012, Aleksić y cols. 2015a, Baloković y cols. 2016, Carnerero y cols. 2017, Acciari y cols. 2020, Acciari y cols. 2020a, Abeysekara y cols. (2020) los cuales han permitido realizar diversos estudios sobre correlación entre emisiones a diferentes frecuencias.

En particular el estudio presentado en González, Patricelli, Fraija, y García-González (2019) reporta una correlación lineal entre rayos X en un rango de energía de 2 a 10 keV y rayos γ con energía >400 GeV. Donnarumma y cols. (2009), Lico y cols. (2014), Max-Moerbeck y cols. (2014), Carnerero y cols. (2017), Abeysekara y cols. (2020) reportaron indicios de posibles correlaciones de flujo en las bandas de óptico, radio y rayos γ en diferentes períodos de observación con niveles de significancia $< 3\sigma$. Sin embargo, la existencia de correlación en la emisión en distintas longitudes de onda aún sigue siendo un tema de debate. Si bien se encuentran estudios de Mrk 421, es poco lo que se conoce sobre el comportamiento de los mecanismos de radiación en diferentes longitudes de onda y de la existencia y significancia estadística de correlaciones entre diferentes frecuencias. Motivados por el trabajo presentado en González y cols. (2019) extenderemos aquí el análisis a la búsqueda de correlación entre las longitudes de onda de radio, óptico y rayos γ (2-300 GeV).

En este trabajo, se utilizan datos de flujo en la banda óptica, radio y rayos γ de 2 – 300 GeV del blazar Mrk 421 del Programa de Monitoreo Tuorla Blazar, del telescopio Metsähovi y del Telescopio de Gran Área de la misión Fermi (Fermi LAT), respectivamente. Con ellos se construirán curvas de luz en las diferentes bandas en un período que abarca 13 años, desde el 8 de agosto de 2008 hasta el 2 de mayo de 2021. Se analizarán estas curvas de luz y se determinará si existe o no correlación entre las bandas de óptico (banda R) y rayos γ (2-300 GeV), entre radio (37 GHz) y rayos γ (2-300 GeV) y entre óptico (banda R) y radio (37 GHz). Y cuando existe, se caracterizará su forma. Es importante destacar que el estudio de la correlación

permite entender mejor los distintos mecanismos de radiación de la región de emisión de la fuente y provee información sobre las estructuras del chorro del núcleo activo.

1. Núcleos Galácticos Activos

1.0.1. Reseña Histórica

El estudio de los Núcleos Galácticos Activos (AGNs, por sus siglas en inglés) comenzó a inicios del siglo XX cuando al observar las galaxias con telescopios ópticos se encontró que una fracción poseía regiones centrales mucho más luminosas que la galaxia en su totalidad. La primera evidencia observacional registrada de la existencia de un AGN se ubica en el año 1908, cuando Fath (1909) obtuvo espectros de cúmulos estelares y nebulosas espirales con el Observatorio Lick. En esa época, una galaxia era considerada como una nebulosa y se desconocía si eran objetos relativamente cercanos, muy gaseosos del tipo de la nebulosa de Orión o si en realidad eran sistemas estelares distantes. Para muchos de los objetos de su muestra, Fath observó un espectro continuo con líneas estelares de absorción, lo que sugirió que estos objetos en realidad son sistemas de estrellas de tipo solar. Al observar NGC 1068, Fath, en 1909, encontró un espectro que mostraba líneas de emisión intensas, con anchos de hasta 3000 km/s. Años más tarde, Slipher en 1913 obtuvo un espectro de la nebulosa de Andrómeda (M31), en el cual se observaron líneas de emisión similares a las que se mostraban en nebulosas planetarias Curtis (1918). Las observaciones realizadas por Carl Keenan Seyfert en 1943 atrajeron la atención de los astrónomos hacia esta nueva clase de galaxias. Seyfert observó que varios de los objetos en su estudio tenían un brillo extremadamente alto y que el espectro de su región central era dominada por líneas de emisión muy anchas Seyfert (1943). Después de la Segunda Guerra Mundial, en 1946 surge la radioastronomía, Baade y Minkowski (1954) encontraron espectros parecidos entre las galaxias estudiadas por Seyfert y el de la galaxia que ellos habían asociado a una fuente en radio, Cygnus A. Las propiedades encontradas en estos objetos como el amplio rango de estados de ionización y el hecho de que se producen en un núcleo brillante, permitieron definir la clase de objetos que llamamos en la actualidad como “galaxias Seyfert”, una de las clases de AGN.

El catálogo astronómico denominado *Tercer catálogo de Cambridge de fuentes de*

radio detectadas a 159 MHz (3C) y el catalogo para fuentes detectadas a 178 MHz (3CR) permitieron encontrar objetos puntuales con líneas características de emisión. Debido a la alta emisión presente, no se podía determinar la forma del objeto central que hospedaba la galaxia. No fue sino hasta que se inicia la construcción de telescopios con un poder de resolución mayor a los antiguos telescopios, que se pudo ratificar que eran fuentes puntuales. Posterior a esto, en 1963, se descubre el primer quásar por Hazard, Mackey, y Shimmins (1963), el cual fue identificado con el nombre de 3C 273. Este tipo de AGNs son los más luminosos y se los puede observar a muy altos corrimientos al rojo de hasta $Z=7.085$. Originalmente, el nombre “cuasar” en inglés, hacía referencia a “*quasistellar radio sources*”, por haber sido descubiertos en radio.

En el año 1962 se propuso un modelo en el cual el centro de estas galaxias debía ser un objeto estelar masivo, donde procesos de acreción asociados a un disco eran responsables de la emisión, Hoyle y Fowler. Un año posterior a esto se propuso que tal objeto debía ser un agujero negro super masivo del orden de $10^6 - 10^9 M_{\odot}$, Salpeter, dando origen al Modelo estándar de acreción de materia a un agujero negro supermasivo. Así, la idea de un agujero negro en el centro de estas galaxias permitió explicar las grandes cantidades de energía liberada en un volumen compacto.

El astrofísico armenio soviético Viktor Ambartsumian introdujo los núcleos galácticos activos a principios de la década de 1950. En la Conferencia de Física de Solvay en 1958, Ambartsumian presentó un informe argumentando que los núcleos galácticos deben contener cuerpos de gran masa y naturaleza desconocida. A partir de este punto, los AGNs se convirtieron en un componente clave en las teorías de la evolución galáctica. Todos estos avances dieron origen al estudio de los AGNs, con el objetivo de comprender la física involucrada en el fenómeno de acreción y emisión observada en todo el espectro electromagnético.

1.0.2. Núcleos Galácticos Activos

Los Núcleos Galácticos Activos son fuentes astrofísicas extremadamente energéticas con luminosidades muy altas desde $10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ hasta los $10^{47} \text{ erg s}^{-1}$, originadas en una región compacta cuyo volumen es menor a un pársec cúbico¹ y que opacan, en la mayoría de los casos, a la emisión de la galaxia anfitriona. Algunas de sus principales características son la de ser emisores en todo el espectro electromagnético Padovani y cols. (2017), de presentar variabilidad de flujo en escalas

¹El pársec (pc) equivale a 10^{18} cm

de minutos a años, su estructura conformada por un agujero negro supermasivo (SMBH, por sus siglas en inglés), un disco de acreción, un toroide de gas y polvo, dos chorros (o jets) relativistas de plasma eyectados perpendicularmente al disco que emiten de forma no térmica y dos regiones que producen líneas visibles en el espectro. La región cercana al SMBH con nubes de gas con alta densidad moviéndose a altas velocidades produce líneas anchas (Broad Line Region, BLR, por sus siglas en inglés), y otra más lejana, con nubes de gas con velocidades y densidades bajas, produce líneas angostas (Narrow Line Region, NLR, por sus siglas en inglés) ver figura 1.1. A continuación se detallan brevemente estas partes.

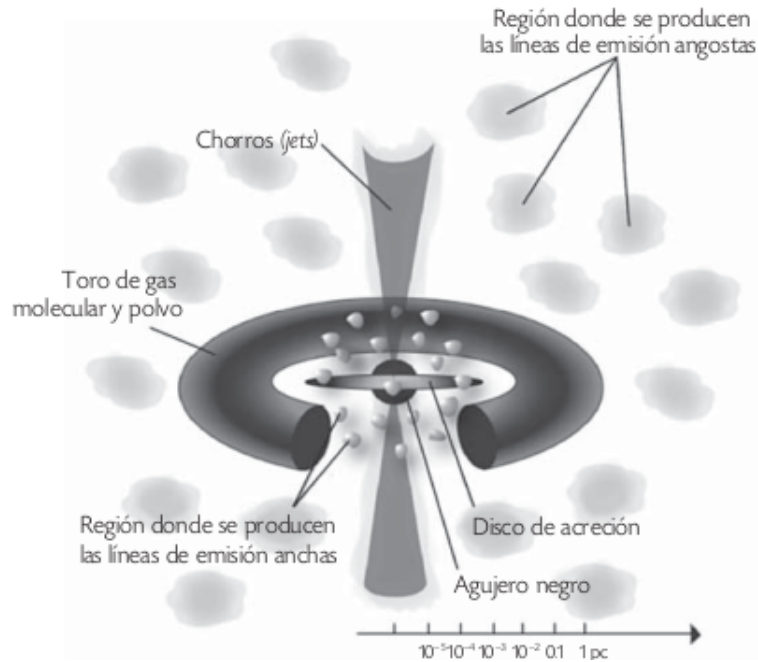


Figura 1.1. Representación esquemática del AGN. La figura muestra el agujero negro central, el disco de acreción, el toro de gas y polvo rodeando las regiones internas donde se produce las líneas de emisión anchas (BLR) y a regiones mas alejadas la región de líneas de emisión angostas (NLR). En el eje de simetría, dos chorros relativistas en dirección perpendicular al disco. Fuente: <http://casanchi.org/ast/estallidos01.pdf>

Agujero Negro: se trata de un agujero negro supermasivo ubicado en el centro del AGN considerado como el "motor". Este acreta toda la materia de su alrededor convirtiendo la energía gravitacional en energía cinética Urry y Padovani (1995). Posee una masa de $M = (10^6 - 10^9) M_{\odot}$, y un radio de $R_s \approx 3 \times 10^{13}$ cm (radio de Schwarzschild²).

² $R_s = \frac{2GM}{c^2}$, donde G es la constante gravitacional universal y c es la velocidad de la luz.

Disco de Acreción: Es una consecuencia de la acreción gravitacional del agujero negro. Se forma de materia, gas y polvo. La velocidad de rotación y la temperatura de la materia en el disco aumentan conforme disminuye la distancia al agujero negro. El mecanismo de emisión en el disco se da debido al momento angular que tiene el SMBH ³. Cuando la energía potencial de la materia que está siendo acretada se convierte en energía de radiación térmica, que extiende desde el óptico-NIR (IR cercano, del inglés, Near Infrared) hasta el UV y rayos X.

Corona de electrones: es una capa esférica de electrones extremadamente calientes (de decenas a cientos de keV) que rodean el disco de acreción. Los electrones interactúan con los fotones UV del disco a través del proceso de Compton inverso, lo que da lugar a emisiones de rayos X.

Toro: Se trata de una región gruesa compuesta de una distribución de gas y polvo con forma toroidal ubicada entre 1-10 pársecs del centro del agujero negro y con radio interior de $\approx 10^{16}m$. Propuesta por R. Antonucci (1993). Su emisión abarca las longitudes de onda en el infrarrojo y puede absorber la mayor parte de luz proveniente del disco de acreción, de la corona de electrones y de la BLR, dependiendo de la línea de visión Urry y Padovani (1995).

Región de líneas anchas (BLR): son nubes de gas con velocidades rápidas ($1 - 25 \times 10^6 \text{ m/s}$) y altas densidades ($10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) localizadas cerca de la región central ($2 - 20 \times 10^{14}m$) Véron-Cetty y Véron (2000). Interceptan $\approx 10\%$ de la radiación ionizante producida por el disco, y la reemiten en forma de líneas de emisión principalmente en el óptico y UV ensanchadas por el efecto Doppler⁴ Gaskell (2009). Se estima que la masa de la región de línea ancha está entre $10^3 - 10^4 M_{\odot}$ Baldwin, Ferland, Korista, Hamann, y Dietrich (2003).

Región de líneas angostas (NLR): es una región con nubes de gas a bajas densidades (10^3 cm^{-3}) y velocidades de 10^4 m/s , localizada a unos 100 pársec del centro de la galaxia Véron-Cetty y Véron (2000). El gas emite líneas de elementos ionizados, sin embargo, el ensanchamiento Doppler es menos pronunciado que en la BLR, debido a su movimiento lento, por lo que las líneas son más estrechas Gaskell (2009).

³Debido a que se lo considera como un agujero negro de Kerr, esto es, un agujero negro rotante

⁴A partir de un marco de referencia en reposo, el movimiento de la materia acercándose y alejándose tendrá un efecto Doppler de corrimiento al azul y corrimiento al rojo, respectivamente.

Chorros: son salidas de energía relativista formados por un flujo de plasma colimado, que se extiende desde algunos kilopársec a megáparsec en el espacio intergaláctico. Estos están compuestos principalmente por electrones, con una pequeña población de protones (y piones o muones) Urry y Padovani (1995). La mayoría de la emisión no térmica de los blazares en todo el espectro electromagnético se cree que proviene de estos chorros (la primer evidencia observacional fue hecha por Curtis (1918) en la galaxia M87). Esta emisión no térmica se debe al proceso sincrotrón desde la banda de radio hasta rayos X, mientras que la emisión a altas energías (rayos γ) podría ser explicada por la radiación Compton inverso.

1.1. Modelo Unificado

A partir de la propuesta del modelo estándar de acreción, es posible explicar la fenomenología observada en las galaxias asociadas con AGNs. Este modelo presenta que los AGNs tienen una simetría particular, que podría explicar como las diferencias observacionales dependen de la orientación respecto del observador. Tomando esto como base, Urry y Padovani 1995 propusieron el denominado *Modelo Unificado*.

En este esquema la taxonomía viene dada según su emisión en las bandas óptica, ultravioleta y radio, en esta última. Los AGNs se clasifican en dos subclases principales, los radio ruidosos y los radio silenciosos, es decir, aquellos objetos con y sin prominente emisión del chorro, respectivamente. Entre todos, el 15 %-20 % de los AGNs son de origen radio ruidosos, mientras que el resto se clasifica como radio silenciosos. Si la relación, entre el flujo de radio a 5 GHz y el flujo óptico en la banda B es $R = F_5/F_B \geq 10$ (parámetro de radio-loudness), entonces el AGN se considera radio ruidoso Kellermann, Sramek, Schmidt, Shaffer, y Green (1989). Observacionalmente, los AGNs radio ruidosos se caracterizan por presentar chorros de radio bipolares altamente relativistas que alcanzan escalas de Mpc y, en general, son más potentes que sus contrapartes, los radio silenciosos Kellermann y cols. (1989). Estos objetos son asociados a galaxias elípticas mientras los radio silenciosos generalmente habitan en galaxias espirales. Los espectros de estas dos subclases que van desde el continuo óptico al continuo de rayos X suaves son muy similares, lo que sugiere que la emisión se produce de la misma manera Sanders, Phinney, Neugebauer, Soifer, y Matthews (1989), Netzer (2013).

Según el espectro en óptico y ultravioleta, los AGNs se pueden clasificar en

tres tipos, el Tipo 2 con líneas de emisión angostas, el Tipo 1 con líneas de emisión anchas, y el Tipo 0 de líneas de emisión débiles o inusuales. La figura 1.2 muestra la taxonomía de los AGNs. Los AGNs de Tipo 1 son aquellos objetos con poco o nulo oscurecimiento de la fuente central de radiación y el espectro óptico presenta líneas de emisión anchas, con FWHM⁵(del inglés, Full Width at Half Maximum) asociados con la velocidad del gas del orden de $10^3 - 10^4$ km/s. En este tipo se encuentran los AGNs radio silenciosos de luminosidad alta ($\approx 10^{47}$ erg s^{-1}) como los quéasares radio silenciosos (QSO, Quasi Stellar Objects, del inglés), y los radio silenciosos de luminosidad baja ($\approx 10^{45}$ erg s^{-1}) como los Seyfert 1, que al ser cercanos a la Tierra, con bajos corrimientos al rojo ($z < 0.2 - 0.4$) se les identifica la galaxia anfitriona.

Por otro lado, en los radio ruidosos de luminosidad alta se encuentran los SSRQ (Steep Spectrum Radio Quasars) o los FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar), y a los de baja luminosidad pertenecen las radio galaxias de líneas anchas Urry y Padovani (1995).

Los AGNs de Tipo 2 son aquellos objetos en los que la línea de visión hacia la región central está completamente oscurecida, con extinción en longitudes de onda del UV, óptico y cercano al infrarojo (NIR, del inglés), y líneas de emisión con FWHM que son significativamente más pequeñas que las del Tipo 1, del orden de algunos 10^2 km/s Beckmann y Shrader (2012). Se clasifican en AGNs radio silenciosos de luminosidades bajas los Seyfert II. En tanto que para los radio ruidosos de luminosidades altas se tienen las radio galaxias de líneas estrechas que a su vez se clasifican en FRI y FRII.

Un tipo adicional de AGN radio ruidoso es el Tipo 0, que también se llama blazar, estos son un pequeño número de AGNs que tienen un espectro diferente al de los Tipos 1 y 2, ya que presentan un chorro que está casi alineado hacia la línea de visión. Los objetos BL Lac y los radiocuéasares de espectro plano (FSRQ, por sus siglas en inglés) son dos subclases de blazares. Los BL Lacs presentan líneas muy débiles o ninguna línea Urry y Padovani (1995). A pesar de que la FSRQ tienen líneas de emisión amplias y fuertes como los objetos de Tipo 1, también se clasifican como Tipo 0 porque tienen la misma emisión continua que los objetos BL Lac, además que también presentan rápida variabilidad, alta y variable polarización, altas

⁵FWHM es la diferencia entre los dos valores de la variable independiente en la que la variable dependiente es igual a la mitad de su valor máximo.

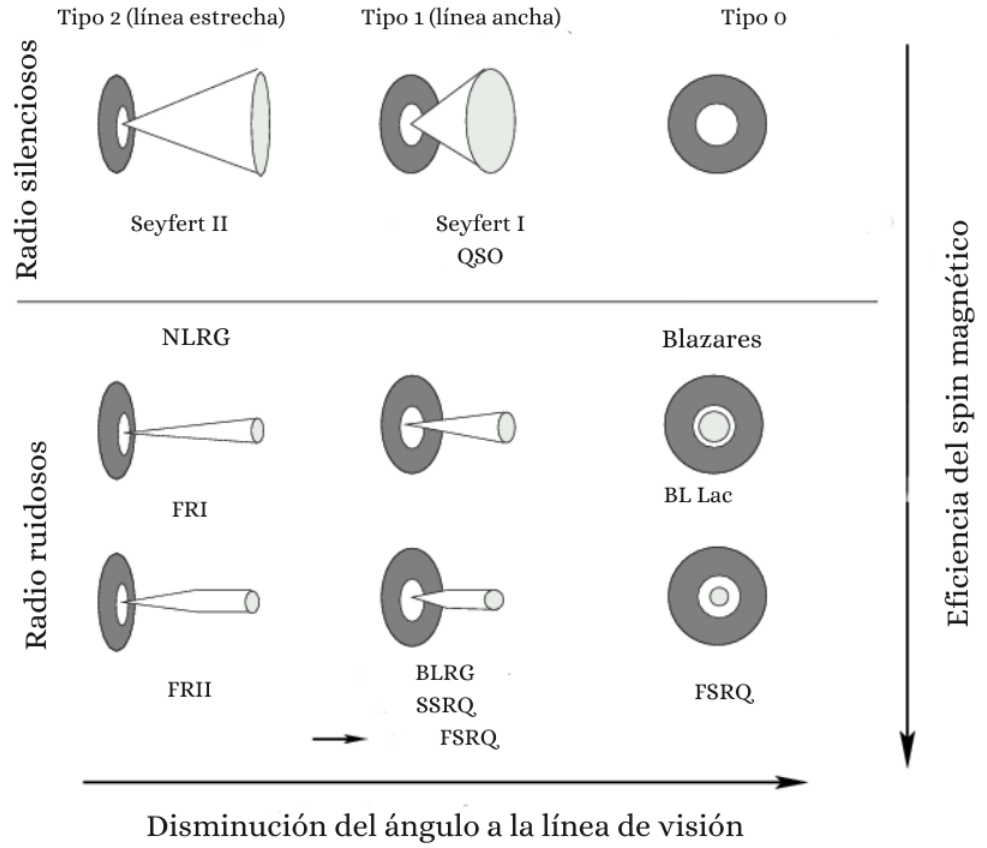


Figura 1.2. Taxonomía de los AGNs según Urry y Padovani (1995). Según su emisión en radio se dividen en: radio callados y radio ruidosos. Y según su espectro en óptico: Tipo 2, Tipo 1 y Tipo 0. El eje horizontal corresponde a la inclinación del eje de la fuente con la línea de visión y el eje vertical representa la eficiencia del spin magnético. *Créditos:* Meliani, Z. y cols. (2010)

temperaturas de brillo ($T \sim 10^{12}K$) y velocidades superlumínicas Urry y Padovani (1995). La figura 1.3 muestra el esquema del *Modelo Unificado*.

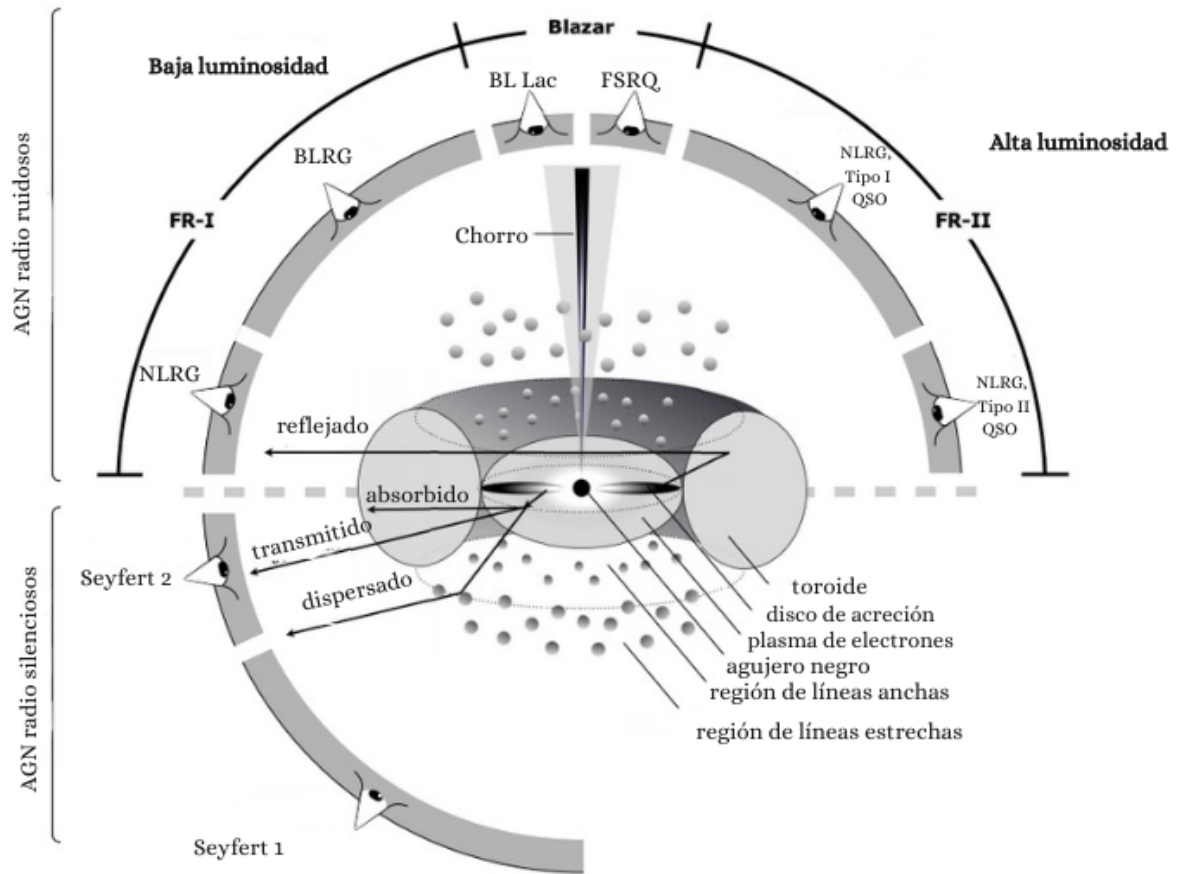


Figura 1.3. Representación esquemática del AGN en el Modelo Unificado Urry y Padovani (1995). El tipo de AGN que vemos depende del ángulo de visión y si este presenta o no emisión prominente del chorro. *Créditos:* Beckmann y Shrader (2013)

2. Blazares

Los blazares son la clase de AGN que muestra el comportamiento más extremo. Se caracterizan por su emisión extendida en todo el espectro electromagnético desde radio hasta las bandas de los GeV y TeV, por su alta polarización, y su emisión es de origen no térmica y variable. La emisión de su chorro enmascara casi por completo la propia emisión de la galaxia. El término blazar fue introducido por primera vez por el astrónomo Edward Spiegel en la Conferencia de Pittsburgh del año 1978 sobre Objetos BL Lac al buscar un acrónimo para las dos categorías; los objetos BL Lac y los FSRQ, anteriormente llamados cuántares ópticamente variables Blandford 1996.

La clasificación convencional de los blazares es en dos categorías: BL Lac, llamados así porque el prototipo estaba clasificado en catálogos de estrellas variables como una “estrella peculiar” en la constelación del Lagarto (Lacertae) que posteriormente fue clasificado como objeto extragaláctico, los cuales presentan corrimientos al rojo relativamente bajos ($z \leq 0.2$) y los FSRQs, que se encuentran a distancias mas lejanas que los objetos tipo BL Lac. Sin embargo, la mayor diferencia entre estos dos tipos de blazares se basa en sus propiedades ópticas. Mientras que los BL Lacs tienen líneas de emisión en su mayoría muy débiles o inexistentes ($EW^1 \leq 5 \text{ \AA}$), los FSRQ poseen líneas de emisión fuertes y anchas con $EW \geq 5 \text{ \AA}$. A continuación se presentan algunas de las principales características de los blazares.

2.0.1. Distribución de energía espectral en blazares

Las distribuciones espectrales de energía (SEDs, por sus siglas en inglés) son la representación gráfica del comportamiento del flujo electromagnético emitido por la fuente con respecto a la energía, frecuencia o longitud de onda del flujo. Los blazares presentan en su SED una forma coloquialmente conocida como “doble joroba” (ver figura 2.1) que suele ser utilizada para distinguir y clasificar a los dos tipos

¹Siendo EW el ancho equivalente de las líneas espectrales, por su siglas en inglés

de blazares, además que nos permite obtener información sobre los procesos físicos involucrados en la emisión de flujo. La primera “joroba” es la componente de baja energía que se encuentra en la región del espectro entre IR y rayos X, y es atribuida a radiación sincrotrón producida por la interacción entre electrones relativistas y el campo magnético en el chorro. En la década de 1990, se comenzaron a clasificar a los blazares según su detección en radio o en rayos X, con ello surgen los BL Lacs seleccionados en radio (RBL, del inglés, Radio-selected Blazars) que han sido identificados con emisión de radio muy fuerte y polarizada, y los BL Lacs seleccionados en rayos X (XBL, del inglés, X-ray-selected Blazars) debido a que su flujo en la banda de rayos X es alto en comparación a su emisión en el óptico.

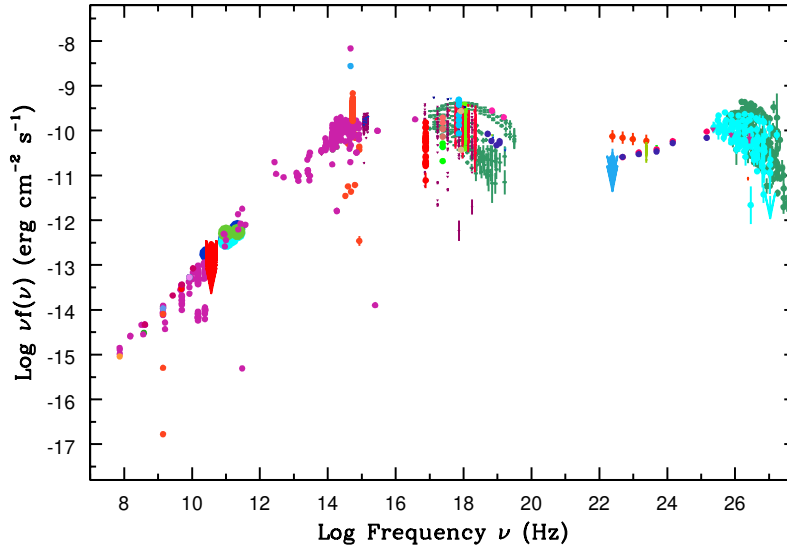


Figura 2.1. Distribución de energía espectral característica de un blazar con dos jorobas. La figura muestra la SED para Markarian 421, los puntos de colores son los datos históricos observados. Gráfica obtenida: <https://tools.ssdc.asi.it/>

Sin embargo, actualmente se acepta la división propuesta por Abdo, Ackermann, Agudo, y cols. (2010) para la clasificación de los BL Lac según la ubicación de la frecuencia de la máxima emisión sincrotrón, ν_s de la primera componente de la SED. Se dividen en: LSP, ISP y HSP (del inglés Low, Intermediate and High Synchrotron Peaked), respectivamente si está en el rango IR ($\nu_s \leq 10^{14}$ Hz), en el rango óptico-UV ($10^{14} \leq \nu_s \leq 10^{15}$ Hz) o si se encuentra en los rayos X ($\nu_s \geq 10^{15}$ Hz), respectivamente (ver figura 2.2). Por otro lado, en los FSRQ, el primer pico de la SED se encuentra usualmente en el rango infrarrojo, es decir, son clasificados como LSP. Todas las SEDs tienen una tendencia a un pico de luminosidad más alto junto con un pico de frecuencia más alto; y además “la relación de luminosidad de la

“joroba de los HSP a la de los LSP” aumenta a medida que disminuye la frecuencia máxima del primer pico. Este compartimento de frecuencias pico de los blazares se le denomina *secuencia blazar*.

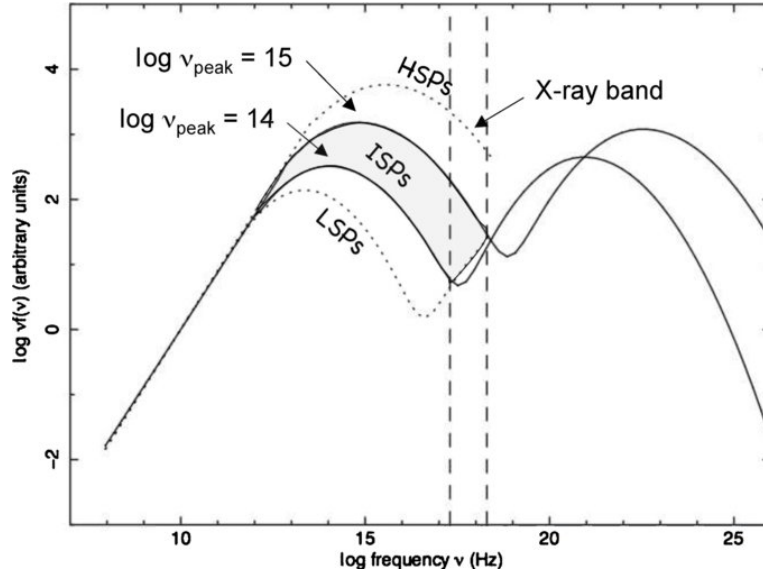


Figura 2.2. Representación esquemática de la SED para la clasificación los blazares BL Lac, según la frecuencia máxima de emisión sincrotrón se observa las luminosidades para cada tipo espectral. *Créditos Abdo, Ackermann, Agudo, y cols. (2010):*

La segunda “joroba” se produce en regiones que comprenden los rayos X suaves ($< 10\text{keV}$) hasta los rayos γ de muy alta energía. Aún no se ha establecido de forma clara el mecanismo que lo produce, sin embargo, se proponen modelos de emisión para explicarlo, como los modelos leptónico y los hadrónicos. En la sección 2.2 se extenderá el contenido.

2.0.2. Fondo de Luz Extragaláctica

La luz de fondo extragaláctica (EBL, por sus siglas en inglés) es toda la radiación debido a los procesos de formación y estructura de evolución cosmológica. La emisión del EBL abarca las longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano. Su distribución de energía espectral (ver figura 2.3) generalmente se describe con dos componentes principales: una componente óptica debida a la emisión de luz de las estrellas y una componente infrarroja debido al reprocesamiento de luz en las estrellas debido a el polvo H.E.S.S. Collaboration y cols. (2017).

En la parte UV a infrarroja, el espectro del EBL se debe a la energía liberada por todas las estrellas y galaxias, incluidos los primeros objetos estelares y los agujeros negros primordiales. Las mediciones de intensidad de EBL son una combinación

de observaciones que consideren contribuciones del Sistema Solar, la luz zodiacal en longitudes de onda óptica e infrarroja, la Vía Láctea o la emisión galáctica en longitudes de onda de radio, infrarrojo, rayos X o rayos γ Cooray (2016).

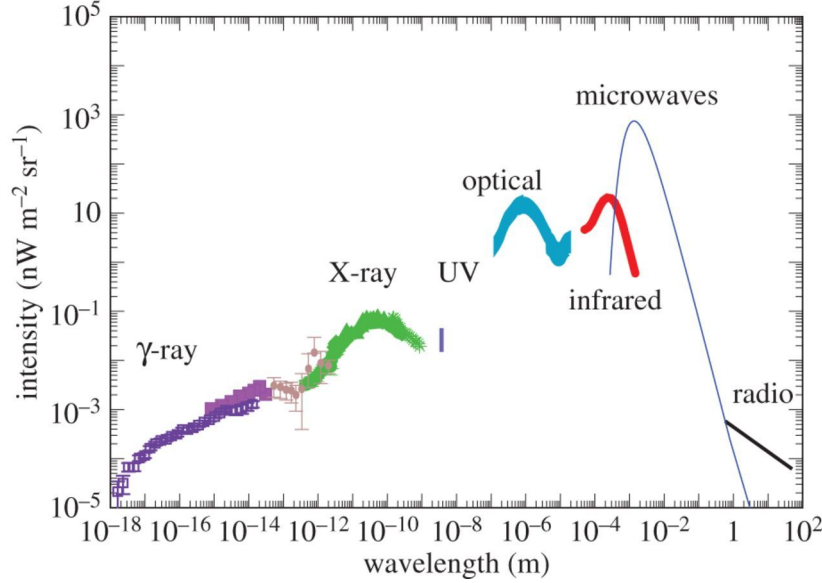


Figura 2.3. Intensidad del fondo extragaláctico en función de la longitud de onda Cooray (2016)

Los rayos γ pueden interactuar por producción de pares e^+ , e^- con fotones provenientes del EBL en el espacio intergaláctico. La observación de fuentes extragalácticas de alta energía como los blazares se ve afectada por esta atenuación que depende de la energía del fotón de rayos γ y de la distancia hacia la fuente.

Se requiere un conocimiento preciso y amplio de la evolución EBL para la correcta interpretación del espectro de rayos γ que presentan fuentes extragalácticas. Los modelos EBL se pueden construir utilizando diferentes metodologías que permiten una estimación evolutiva de su SED. Existen varios modelos teóricos utilizados para describirlos, según Domínguez y cols. (2011) son 4: (1) Evolución hacia adelante, que comienza con las condiciones cosmológicas iniciales y sigue una evolución hacia adelante en el tiempo por medio de modelos semianalíticos de formación de galaxias Finke, Razzaque, y Dermer (2010b). (2) Evolución hacia atrás, que comienza con poblaciones de galaxias existentes y los extrapola hacia atrás en el tiempo cósmico Somerville, Gilmore, Primack, y Domínguez (2012). (3) Evolución inferida, la evolución de las galaxias se infiere a partir de alguna cantidad observada, como la densidad de la tasa de formación de estrellas del Universo en un determinado rango de longitud de onda Finke, Razzaque, y Dermery Kneiske, T. M. y Dole, H. 2010

y (4) Evolución observada, la población de galaxias se observa directamente en un rango de corrimiento al rojo que contribuye significativamente a la EBL Domínguez y cols. (2011). La figura 2.4 muestra algunos de los modelos antes mencionados.

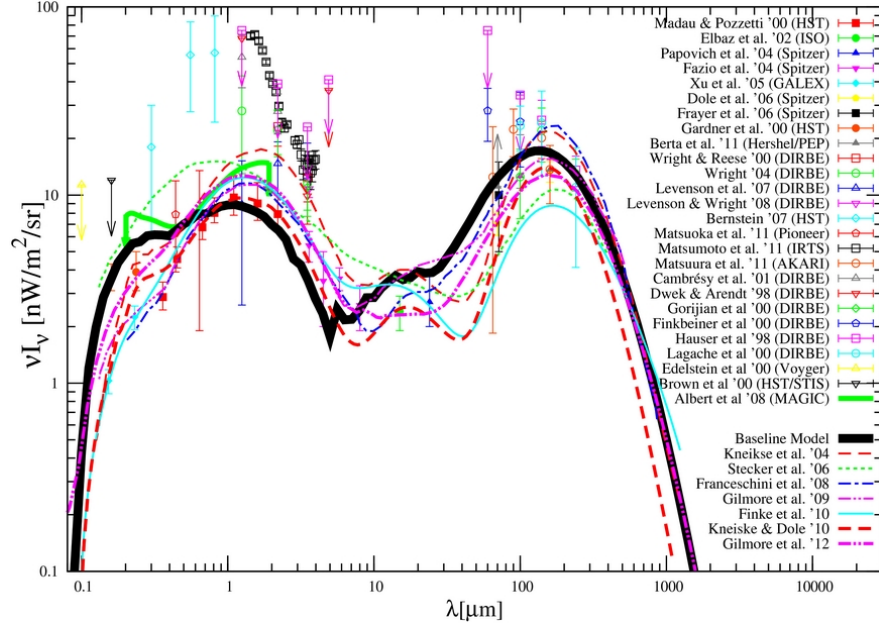


Figura 2.4. Intensidad del fondo extragaláctico en función de la longitud de onda λ para diferentes modelos. La EBL para el modelo de referencia se muestra con la curva sólida Inoue y cols. (2013)

2.0.3. Chorros relativistas

Como se mencionó en la sección 1.0.2 los chorros son relativista formados por flujos de plasma colimados que son perpendiculares al plano de la galaxia. En los blazares estos chorros están alineados al eje del observador. Diferentes modelos se han propuesto para determinar su composición y estructura. En cuanto a su composición se cree están formados de materia en forma de plasma posiblemente por positrones y electrones. Mientras que su estructura puede estar originada por interacciones locales de tipo viscoso dentro del fluido que forma el propio chorro. Esto sucede cuando el chorro está altamente magnetizado y produce disipación viscosa la cual se genera a través de interacciones entre el campo magnético y el gas Finazzo, Critelli, Rougemont, y Noronha (2016). Sin embargo, tanto su composición como estructura aun siguen siendo tema de debate.

Actualmente el mecanismo para la formación de los chorros relativistas es aun

desconocido, el modelo más aceptado hasta ahora es el propuesto por Blandford y Znajek (1977) quienes descubrieron que el plasma magnetizado puede extraerse continuamente de la energía rotacional de los agujeros negros. Este modelo establece que el campo magnético es proporcionado por el disco de acreción y el plasma es generado a través de la aceleración y colisión de partículas en campos eléctricos inducidos por rotación. Por lo que es posible explicar los fenómenos relativistas a través de la siguiente geometría.

Movimiento superlumínico

El movimiento superlumínico surge de la diferencia entre la velocidad aparente de los objetos distantes que se mueven por el cielo y su velocidad real en el sistema de referencia de la fuente. La velocidad aparente v es mayor a la velocidad de la luz c Bond y cols. (2003). Este tipo de movimiento se observa en los chorros relativistas de los blazares cuando el núcleo expulsa material a alta velocidad, cercana a la de la luz. Este fenómeno se puede explicar con el diagrama de la figura 2.5:

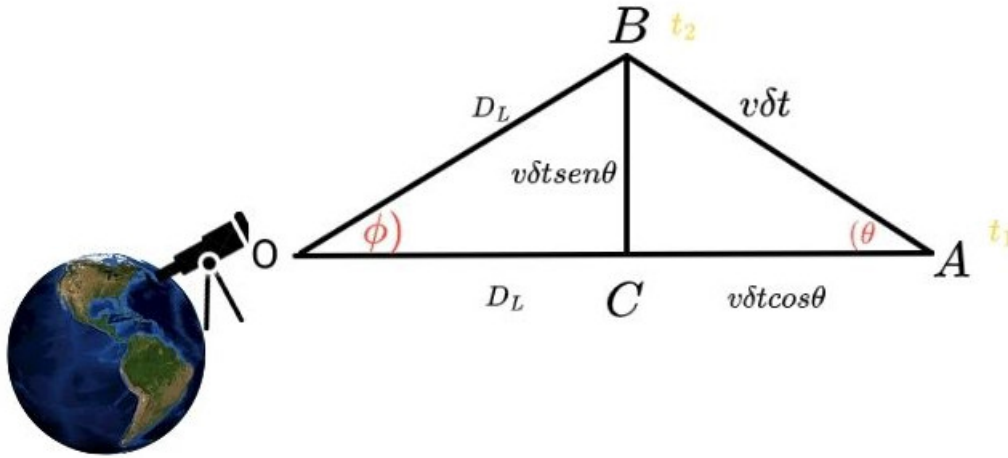


Figura 2.5. Esquema del efecto superlumínico. Créditos: Elaboración propia

Consideremos un chorro relativista que sale de un blazar que se mueve a lo largo de AB con una velocidad v y al observador en el punto O. En el momento que un rayo de luz sale del chorro desde el punto A en el momento t_1 y otro rayo sale en el momento $t_2 = t_1 + \delta t$ desde el punto B, el observador en O recibe los rayos en el momento t'_1 y t'_2 , respectivamente. El ángulo ϕ es lo suficientemente pequeño como para que las dos distancias D_L puedan considerarse iguales. Por lo que dado la geometría del problema,

$$t'_1 = t_1 + \frac{D_L + v\delta t \cos \theta}{c} \quad (2.1)$$

$$t'_2 = t_2 + \frac{D_L}{c} \quad (2.2)$$

$$\delta t' = t'_2 - t'_1 = \delta t - \frac{v\delta t \cos \theta}{c} \quad (2.3)$$

Por lo que entonces,

$$\delta t = \frac{\delta t'}{1 - \beta \cos \theta} \quad (2.4)$$

Donde $\beta = v/c$. Y además, $BC = D_L \sin \phi \approx \phi D_L = v\delta t \sin \theta$, por lo que la velocidad transversal aparente a lo largo de CB:

$$v_T = \frac{\phi D_L}{\delta t'} = \frac{v \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (2.5)$$

Dividiendo la expresion anterior por c :

$$\frac{v_T}{c} = \beta_T = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (2.6)$$

Para velocidades lo suficientemente grandes y ángulos de visión pequeños, las velocidades aparentes serán mayores a la de la luz Recami, Castellino, Maccarrone, y Rodonò (1986).

2.0.3.1. Amplificación Doppler

La amplificación Doppler dentro del chorro relativista es un efecto que se obtiene cuando el flujo observado de la fuente en movimiento se ve incrementado respecto al flujo intrínseco de ésta. Esto se debe a que los nodos del chorro se mueven hacia el observador con velocidades cercanas a la de la luz. Esta ampliación esta descrita por el “factor Doppler”:

$$\delta = [\gamma(1 - \beta \cos \theta)]^{-1} \quad (2.7)$$

donde $\beta = v/c$

2.0.4. Variabilidad

Los blazares se caracterizan por presentar variaciones en el flujo observado en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético en un amplio rango de escalas de tiempo que van desde minutos hasta años, este fenómeno es denominado variabilidad Rajput, Bhoomika y cols.. La detección y los estudios de la variabilidad son determinantes para una mejor comprensión de los modelos de emisión de blazar, en particular, sobre los procesos que tienen lugar en los chorros. En la mayoría de blazares se presenta una variabilidad en diferentes frecuencias de naturaleza no periódica, observándose oscilaciones cuasi-periódicas en algunas fuentes Zola y cols. (2016). También es posible observar fuertes “ráfagas” que consisten en un aumento de flujo que se detecta en diferentes bandas del espectro electromagnético simultáneamente ó con algún desfase en tiempo, o bien se observan ráfagas en una determinada banda pero sin contraparte en otras longitudes de onda, en este caso las ráfagas se llaman huérfanas.

La escala de tiempo de la variabilidad en el marco de referencia de la fuente t_{fuente} es determinada debido al efecto Doppler relativista la cual es estimada de acuerdo con la escala de tiempo observada, esto es,

$$t_{fuente} = \frac{\delta}{1+z} t_{obs} \quad (2.8)$$

donde δ es el factor de Doppler, z el corrimiento al rojo y t_{obs} es la escala temporal de variabilidad en el marco de referencia del observador Galante (2021).

La variabilidad se puede clasificar según la escala observada. Las escalas de tiempo que van desde meses hasta años se les conoce como variabilidad a largo plazo (LTV, Long Term Variability, por sus siglas en inglés) Marscher y cols. (2008). A este tipo de variabilidad no se le puede asociar algún período y es posible que se describa por mecanismos turbulentos provocados por cierta inestabilidad en el proceso de acreción Ulrich, Maraschi, y Urry (1997). En tanto que para los períodos que abarcan escalas temporales de días y semanas, se le denomina como variabilidad a escala corta (STV, Short Term Variability, por sus siglas en inglés). La variabilidad en escalas de tiempo menores a un día, es decir, de horas hasta minutos, se denomina microvariabilidad o variabilidad intra-día (IDV, Intraday Variability, por sus siglas en inglés) este tipo de variabilidad permite inferir y conocer más en detalle cómo es la física en la región emisora cerca al núcleo Wagner y Witzel (1995).

2.0.5. Polarización

La polarización es una medición directa del campo magnético que proporciona información sobre su geometría en el chorro relativista. La emisión sincrotrón que predomina a bajas frecuencias en blazares se encuentra intrínsecamente polarizada linealmente Muriel, H., Donzelli, C., Rovero, A. C., y Pichel, A. (2015).

Se han propuesto varios modelos para explicar la polarización observada en blazares, estos se pueden dividir en modelos estocásticos y modelos deterministas. Los modelos estocásticos se basan en reducir el grado de polarización máximo para la radiación de sincrotrón (el cual es $\sim 69\%$ para un espectro de partículas de ley de potencia con índice $p=2$) a valores compatibles con las observaciones ($< \sim 10\%$), asumiendo que la región de emisión está compuesta por muchas celdas, cada una de las cuales contiene un campo magnético aproximadamente uniforme que está orientado aleatoriamente de una celda a otra Peceur, Taylor, y Kraan-Korteweg (2020). Mientras que los modelos deterministas generalmente consideran la polarización debido a un campo magnético helicoidal a gran escala Peceur y cols. (2020).

Además estudios reportan correlación entre el grado de polarización y la luminosidad de la fuente Larionov y cols. (2008). Esto permite en primera instancia, ajustar modelos como el de choques, en el que se espera un incremento de la polarización seguido de un aumento en la luminosidad. Se ha observado estas correlaciones en episodios de alta actividad Hoyle y Fowler (1962).

El estudio de las propiedades polarimétricas en óptico ha encontrado que el grado de polarización óptica está relacionado con el campo magnético o con la densidad de los electrones dentro de la región de emisión, mientras que el ángulo del vector de polarización esta relacionado con la dirección del vector del campo magnético a lo largo de la línea de visión Planck Collaboration y cols. (2018).

Beskrovnaya, Ikhsanov, Bruch, y Shakhovskoy (1995) realizó un estudio de una muestra de blazares en la banda óptica y demostró que el alto grado de polarización y la variabilidad de polarización son fenómenos comunes en los blazares. Esto junto con el alto nivel de polarización observado en la banda de radio, proporciona una fuerte evidencia para la radiación de sincrotrón como origen de la emisión a bajas energías.

2.1. Procesos Radiativos en Blazares

2.1.1. Emisión Sincrotrón

La radiación sincrotrón es resultado de la interacción de una partícula con carga eléctrica q y velocidad relativista $\vec{v}$ con un campo magnético $\vec{B}$, ocasionando que la partícula tenga una trayectoria helicoidal debido a la fuerza magnética $\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B})$. La radiación en fotones sincrotrón desde longitudes de onda de radio hasta los rayos X se debe al cambio de dirección del vector velocidad a lo largo de la trayectoria (ver figura 2.6). Para una lectura mas detallada consultar Rybicki y Lightman (2008).

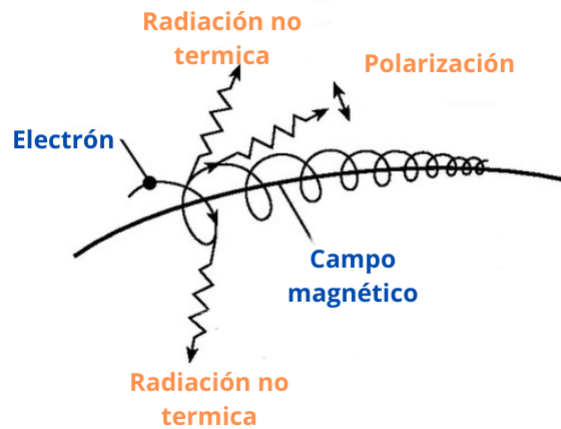


Figura 2.6. Esquema de la radiación sincrotrón. Los electrones que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz emiten un haz estrecho de radiación sincrotrón cuando giran en espiral alrededor de un campo magnético. Este proceso es un tipo de radiación no térmica porque la radiación no depende de la temperatura de la fuente. *Fuente:* https://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=1424

2.1.2. Efecto Compton Inverso

La emisión del Efecto Compton Inverso (IC) se origina cuando fotones poco energéticos disminuyen su longitud de onda al interactuar con electrones relativistas, y recibe el nombre de Compton inverso puesto que al contrario que en la dispersión Compton, es el fotón el que gana energía y no el electrón (ver figura 2.7).

La relación entre la longitud de onda original y después de la dispersión del fotón viene dada por:

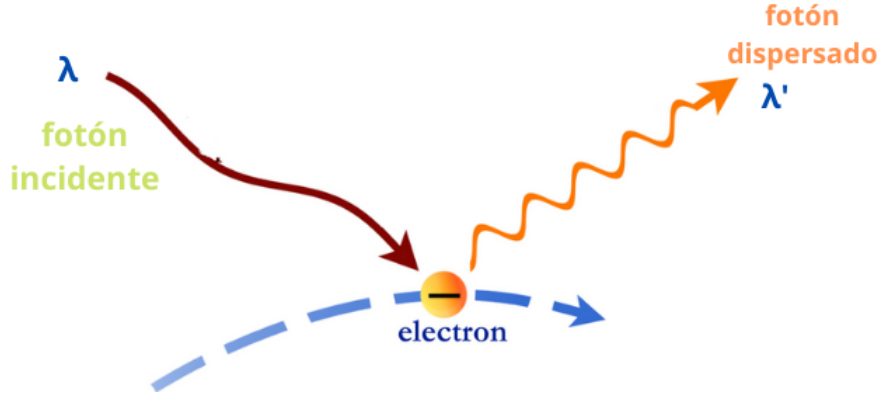


Figura 2.7. Esquema de la emisión del efecto Compton inverso. *Fuente:* https://chandra.harvard.edu/xray_astro/xrays.html

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos \theta) \quad (2.9)$$

donde λ y λ' son las longitudes de onda antes y después de la dispersión del fotón, respectivamente, θ es el ángulo de dispersión del fotón y λ_c es la constante llamada longitud de onda de Compton del electrón que tiene un valor de $\lambda_c = 2.42 \cdot 10^{-3} \text{nm}$.

2.2. Modelos de emisión en Blazares

Para conocer las SED de los blazares se requieren observaciones en todo el espectro electromagnético. Idealmente, las observaciones deberían ser simultáneas, ya que las SEDs de los blazares evolucionan continuamente. Como mencioné en la sección 2.0.1, la emisión de baja frecuencia (radio e IR) de los blazares es la emisión sincrotrón de electrones relativistas en el chorro, mientras que para la emisión a altas frecuencias es aún incierto el mecanismo que las describe, existen principalmente dos tipos de escenarios teóricos para explicar esta emisión: los modelos *leptónicos* y *hadrónicos*.

2.2.1. Modelo leptónico

En el modelo leptónico, se supone que las partículas de los chorros relativistas están dominados por leptones (electrones y positrones), mientras que cualquier protón que esté presente en el chorro, no se acelera a energías suficientemente altas como para contribuir significativamente a la emisión radiativa. Sin embargo, si los

protones son ultrarelativistas, pueden producir un nivel sustancial de emisión de sincrotrón de protones Böttcher, Reimer, Sweeney, y Prakash (2013).

2.2.1.1. Modelo leptónico de una zona

La primera “joroba” de la distribución espectral de blazares es debido a la emisión sincrotrón, los fotones resultantes de esta emisión son los que forman el espectro continuo que se extiende desde el rango de radio hasta el óptico para blazares tipo LSP y hasta el rango de rayos X para blazares HSP.

La segunda “joroba” se forma por la interacción SSC (Synchrotron Self Compton, por sus siglas en inglés) de los fotones sincrotrón del primer pico y los electrones relativistas que están en el chorro Ginzburg y Syrovatsk (1969). El modelo asume que los fotones producidos en un momento dado están disponibles instantáneamente como fotones semilla para la dispersión inversa de Compton. Ver figura 2.8.

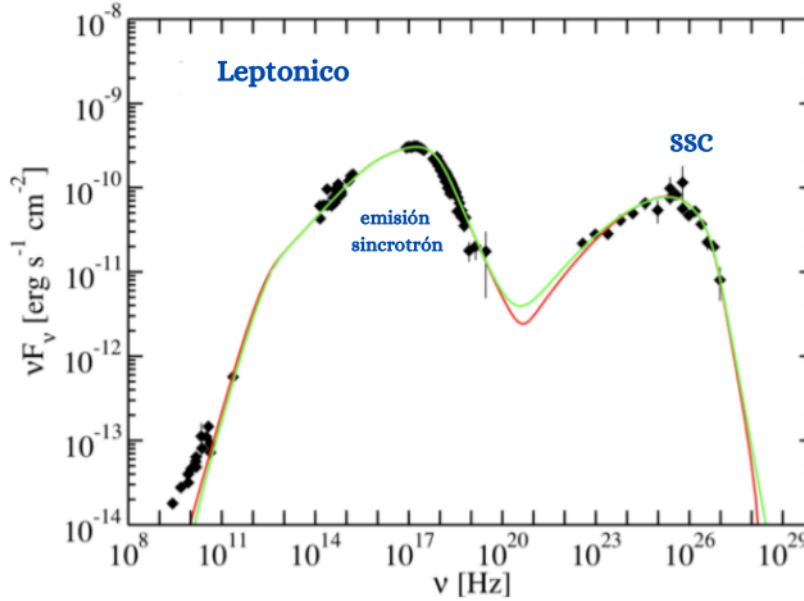


Figura 2.8. Distribución de energía espectral de Mrk 421 según el modelo leptónico de una zona. El primer pico de la SED es debido a la emisión sincrotrón, mientras el segundo pico es debido al SSC. *Fuente: Cerruti (2020)*

Se supone que el campo magnético no tiene una orientación preferencial en el marco comóvil de la región de emisión y como generalmente suponemos que la distribución de electrones es isotrópica en el marco de movimiento de la región de

emisión, también lo es la radiación sincrotrón y, por lo tanto, también la emisión de SSC, que corresponde al campo radiativo Boettcher, Harris, y Krawczynski (2012). Entonces el modelo leptónico de una zona predice que la emisión a diferentes longitudes de onda estará correlacionada porque esta se produce por una misma población de electrones.

Para modelar los procesos de emisión en el modelo leptónico de una zona, supongamos que tenemos un plasma de leptones ($e^{+/-}$) distribuidos en una región de emisión homogénea, además, que esta emisión tiene una geometría esférica y un campo magnético.

La distribución de fotones dentro de la región emisora en el modelo SSC, se mueve dentro de un chorro colimado, adquiere una distribución consistente con el mecanismo de Fermi Cao y Wang (2013) y puede ser modelado con diferentes funciones analíticas que están definidas en el intervalo de energía $[\gamma_{min}, \gamma_{max}]^2$: ley de potencias, log-parábola, ley de potencias quebrada y ley de potencias log-parábola.

- *Ley de Potencias:*

$$f(\gamma) = \gamma^{-p} \quad (2.10)$$

donde p , indica el índice espectral del electrón.

- *Log-parábola:*

$$f(\gamma) = \frac{\gamma}{\gamma_0}^{-(s+r \cdot \log(\gamma/\gamma_0))} \quad (2.11)$$

donde, γ_0 es la energía de referencia, s es el índice espectral del fotón, y r es la curvatura espectral.

- *Log-parábola ley de potencias (lppl):*, es una función log-parabólica más una función de baja energía de ley de potencias:

² γ_{min} y γ_{max} es el mínimo y máximo factor del Lorentz de electrón, respectivamente.

$$f(\gamma) = \begin{cases} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^{-s} & \gamma \leq \gamma_0 \\ \frac{\gamma}{\gamma_0} (-s + r \log(\gamma/\gamma_0)) & \gamma \geq \gamma_0 \end{cases}$$

donde γ_0 es la energía de quiebre

- *Ley de potencias quebrada:*

$$f(\gamma) = \begin{cases} (\gamma)^{-p}, \gamma \leq \gamma_{break} \\ (\gamma)^{-p_1}, \gamma > \gamma_{break} \end{cases}$$

donde p es el índice espectral del electrón de baja energía, γ_{break} es la energía de quiebre y p_1 = índice espectral del electrón de alta energía.

2.2.1.2. Proceso Compton Externo

Para explicar la radiación en rayos γ también se recurre a la emisión de Compton Externo (EC por sus siglas en inglés, External Compton) donde los fotones semilla de la dispersión Compton inverso son fotones externos al chorro.

En los entornos típicos de blazares, hay varios campos de radiación que pueden servir como fotones blanco (ver figura [2.9]). Estos incluyen,

- (ii) Emisión óptica/UV/rayos X del disco de acreción central.
- (iii) Emisión de la región de líneas anchas y estrechas.
- (iv) Emisión infrarroja del toroide.
- (v) Radiación de fondo cósmico de microondas (CMB) .

2.2.2. Modelo Hadrónico

En el modelo hadrónico se consideran protones y sus interacciones con otros protones o fotones que generan fotones en el orden de rayos γ . La primera joroba de la SED sigue siendo dominada por la radiación sincrotrón de los electrones relativistas, sin embargo, la segunda joroba es atribuida a la interacción de un protón de alta energía con un fotón “suave” (γ_{suave} , 120 keV - 10 GeV) o incluso con otro protón a

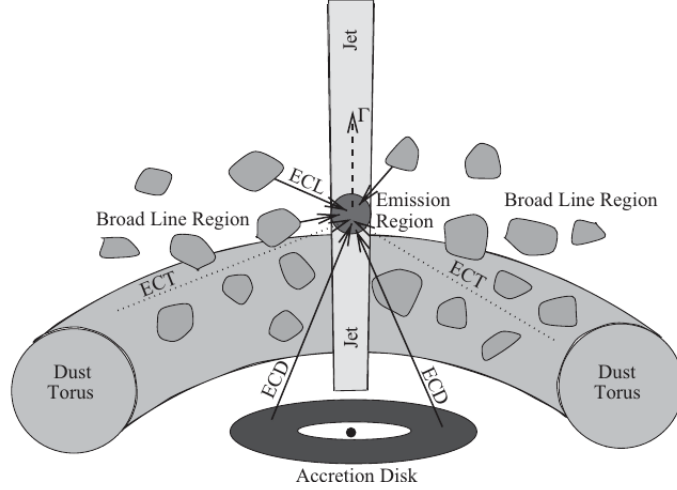


Figura 2.9. Diagrama de un AGN, que ilustra los diversos campos de radiación externos que pueden ser dispersados mediante el efecto Compton inverso para formar la emisión de alta energía observada en AGNs. Las líneas representan distintos tipos de emisión, Compton externo de emisión de la BLR (ECL, por sus siglas en inglés), Compton externo de emisión del disco (ECD, por sus siglas en inglés), Comptonización externa de fotones en el toro (ECT, por sus siglas en inglés). *Fuente:* Boettcher y cols. (2012)

través de dos posibles interacciones cuyo producto son piones que se desintegran en fotones de alta energía Cannon (2011).

$$p + p \rightarrow \pi^0 + N \quad (2.12)$$

$$p + p \rightarrow \pi^\pm + N \quad (2.13)$$

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0 + N \quad (2.14)$$

donde N son otras partículas resultantes. Y los piones π^0 producidos decaerán en rayos γ de alta energía (>10 GeV):

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (2.15)$$

los cuales a su vez podrán descomponerse para producir muones,

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (2.16)$$

y que luego decaerán en pares de positron-electrón y neutrinos a través de la producción de pares y, finalmente, rayos γ a través de la radiación bremsstrahlung:

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu \quad (2.17)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma_{duro} \quad (2.18)$$

En el caso de la radiación sincrotrón directa de los protones relativistas ($E > 10^{19}$ eV) se requeriría un campo magnético alto del orden de $30 - 100$ G, un valor considerablemente mucho mas mayor que para los modelos léptonicos.

3. Markarian 421

El blazar Markarian 421 (también conocido como Mrk 421 o Mkn 421) está clasificado como un BL Lac HSP. Se localiza en la constelación de Osa Mayor, con una ascensión recta (RA) de 11h 4m 27.31s y declinación (DEC) de $38^{\circ} 12' 31.8''$ de Vaucouleurs y cols. (1991) (ver figura 3.1). Con un corrimiento al rojo de $z = 0.031$, es el blazar TeV más cercano conocido. Fue la primera fuente extragaláctica de rayos γ (>100 GeV) detectada por el telescopio Whipple en 1992 (Punch y cols. (1992)) y una de las fuentes de rayos γ de variabilidad más rápida (Abdo, Ackermann, Agudo, y cols. (2010)).

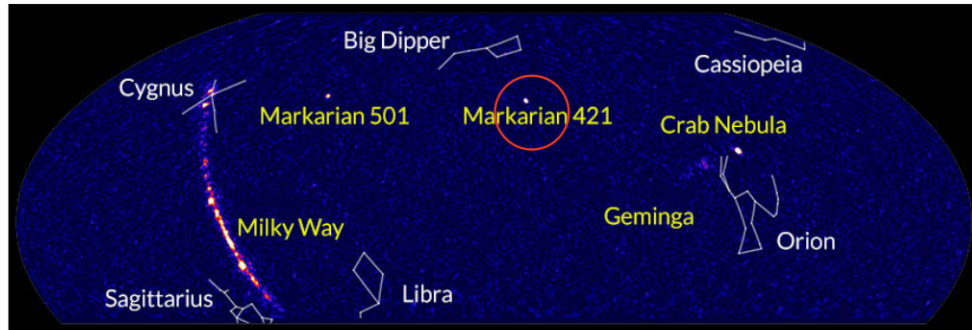


Figura 3.1. Dos terceras partes del cielo en TeV observado con el Observatorio de Rayos Gamma (HAWC) entre noviembre de 2014 y 2015. *Créditos:* Colaboración HAWC

Mrk 421 es uno de los objetos mejor estudiados en muy altas energías puesto que puede ser detectado por IACTs (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, por sus siglas en inglés) en minutos, y su SED puede observarse con instrumentos que cubren energías desde radio hasta rayos γ de TeV (Ahnen y cols. 2016), (Abdo, Ackermann, Agudo, y cols. (2010)), Abdo y cols. 2011. Casi todos los IACTs han observado su espectro de rayos γ en los últimos años, Aharonian y cols. 2002; Krennrich y cols. 2002, Aharonian y cols. 2003, Aharonian y cols. 2005; Albert y cols. (2007); Acciari y cols. 2009, (Acciari y cols., 2011). Además esta fuente ha sido continuamente monitoreada por el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi en rayos γ de MeV a TeV desde que se puso en órbita en el año 2008.

Durante las últimas dos décadas se han organizado diversas campañas de observación simultáneas en múltiples longitudes de onda (radio hasta rayos γ de VHE) de la fuente Macomb y cols. 1995a, Błażejowski y cols. 2005, Rebillot y cols. 2008, Horan y cols. 2009, Donnarumma y cols. 2009, Ackermann y cols. 2011, Acciari y cols. 2011, Acciari y cols. 2014a, Shukla y cols. 2012, Aleksić y cols. 2015a, Baloković y cols. 2016, Carnerero y cols. 2017, Acciari y cols. 2020, Acciari y cols. 2020a, Abeysekara y cols. (2020). La mayoría de los estudios sobre variabilidad y correlación en multifrecuencia han sido durante estados de alta actividad en la que la fuente presenta ráfagas cuyo flujo en rayos γ VHE excede entre 2 y 3 veces las unidades de crab ¹ (Aleksić y cols., 2015b). Mientras que en los estados de menor actividad pocos estudios se han realizado (Acciari y cols., 2020a).

Mrk 421 exhibe variabilidad en las frecuencias de TeV, GeV, rayos X y óptico con periodos de años hasta minutos (Acciari y cols., 2011), Horan y cols. (2009). En estudios previos multifrecuencia Macomb y cols. 1995b, Buckley y cols. 1996, Albert y cols. 2007, Fossati y cols. 2008, Donnarumma y cols. 2008 y González y cols. (2019) se ha encontrado evidencia directa de correlación entre la banda de rayos X y rayos γ (TeV). En tanto que la emisión en las bandas de menor energía parecen no estar correlacionadas. Błażejowski y cols. (2005), Rebillot y cols. (2008), Albert y cols. (2007), Acciari y cols. (2014b) y Aleksić y cols. (2015a) reportan la no existencia de correlación entre las bandas de rayos γ /radio y rayos γ /óptico para diferentes campañas de observación durante los años 2002 y 2009. Sin embargo, existen estudios sobre indicios de correlación en la banda de rayos γ / óptico. Donnarumma y cols. (2008) reporta una posible correlación durante una fuerte ráfaga del 12 al 15 de Junio de 2008 con datos proporcionados por GASP-WEBT y AGILE, mientras que, Carnerero y cols. (2017) reporta correlación entre rayos γ (GeV) y óptico (banda R) durante un fuerte estallido observado en el año 2012. Esta correlación fue analizada utilizando la función de correlación discreta (DCF, por sus siglas en inglés) con un tiempo de retraso $\tau = 0$ ² entre estas frecuencias. Recientemente Abeysekara y cols. (2020) realizó un análisis de correlación entre rayos γ ($420 \text{ GeV} < E < 30 \text{ TeV}$) y la banda óptica (banda R) durante la noche de la ráfaga del 17 de febrero de 2010, utilizando la función de correlación (DCCF) que reporta una correlación con un tiempo

¹ 1 Crab = $9 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en un rango de energía mayor a 300 GeV medido con el instrumento MAGIC.

²El tiempo de retraso muestra el desfase que existe entre la emisión observada de una frecuencia respecto a otra.

de retraso τ de 25-55 minutos en la banda óptica y cuya significancia estadística es de $3 - 4\sigma$, calculada a través de simulaciones Monte Carlo siguiendo el método de Emmanoulopoulos, McHardy, y Papadakis (2013).

En el caso de las bandas en radio y rayos γ , Lico y cols. (2014) reporta correlación entre las frecuencias en radio de 15, 24 y 43 GHz con rayos γ (0.1-100 GeV) cuyos coeficientes de correlación están en el rango de 0.42-0.46, siendo la correlación mas fuerte en los datos de 43GHz con una significancia estadística de 3σ . Max-Moerbeck y cols. (2014) reporta evidencia de una correlación positiva entre rayos γ (GeV) y radio (15Hz) con una significancia estadística de 2.6σ .

Con respecto a correlación entre la emisión de radio y óptico, Tosti y cols. (1998) reporta una correlación para el gran estallido de 1996-97 con un retraso en la emisión de radio entre 30 a 60 días con respecto a la emisión óptica, la significancia estadística no fue reportada. Mientras que Błażejowski y cols. (2005) reporta la no existencia de correlación durante la campaña observacional del 2003-2004.

El entendimiento de los procesos físicos observados de Mrk 421 es en general complejo, a menudo se hacen afirmaciones sobre las correlaciones en períodos de tiempo cortos, pero rara vez se calcula la significancia estadística. Y aunque en la ultima década se han llevado a cabo campañas observacionales en múltiples frecuencias, estas no suelen abarcar periodos extensos con datos simultáneos. Este trabajo pretende buscar la existencia de correlaciones entre la emisión de óptico, radio y rayos γ de VHE a través de campañas de observación comprendidas entre agosto de 2008 y mayo de 2021. Aplicaremos métodos estadísticos robustos para estimar las correlaciones y de ser posible el tipo de correlación. Además es importante analizar si las diferentes tendencias o comportamientos reportados en la literatura, muchas de ellas con un significado marginal, se repiten a lo largo del tiempo o si estas se deben a eventos esporádicos.

4. Metodología

Para llevar a cabo el estudio propuesto en este trabajo, se realizó una búsqueda de observatorios en la banda de óptico, radio y rayos γ de alta energía que contaran con detecciones de la fuente Mrk 421 para asegurar el monitoreo quasi simultáneo y continuo entre los años del 2008 al 2021. En las últimas décadas se han establecido varios programas de observación en diferentes frecuencias para proporcionar un monitoreo regular de blazares¹. Los observatorios y telescopios seleccionados son: para la banda de radio (37 GHz) el Metsähovi Radio Observatory, para la banda de óptico (banda R) el programa de monitoreo Tuorla Blazar, y para la banda de rayos γ ($2 - 300 \text{ GeV}$) el telescopio espacial Fermi-LAT, todos estos en el período comprendido entre 08/08/2008 al 02/05/2021. A continuación se detalla los instrumentos mencionados.

4.1. Instrumentos de Observación

4.1.1. Metsähovi Radio Observatory

El radio telescopio Metsähovi² es una antena paraboloide encerrada en una cúpula, con un diámetro de 13.7 m (ver figura 4.1) situado a 60 m sobre el nivel del mar en Kirkkonummi, Finlandia. Este se encuentra en operación desde 1974, las 24 horas del día todos los días del año. En 1994 se completó una actualización del telescopio que permite el funcionamiento desde 2 GHz hasta 100 GHz, con una velocidad de la antena de 1.2 grados por segundo. Metsähovi consta de un programa dedicado al monitoreo de AGNs en forma continua.

El telescopio Metsähovi ha estado dedicado a monitorear diariamente el blazar

¹Una lista detallada de los diferentes instrumentos de observación se puede encontrar en: <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/blazarprogramlist.html>

²<https://users.utu.fi/kani/1m/index.html>



Figura 4.1. Radio Observatorio Metsähovi. Imagen cortesía del Radio Observatorio Metsähovi, Universidad Alto.

Mrk421, excepto los días en que las condiciones climáticas no son óptimas para la observación. Los datos medidos durante la campaña observacional (08/08/2008 - 02/05/2021) fueron solicitados al equipo encargado del observatorio. Estos datos se encuentran a una frecuencia de 37 GHz con un límite de detección para el flujo del orden de 0.2 Jy en condiciones óptimas. La estimación del error del flujo incluye las contribuciones de la medición del valor cuadrático medio (rms, por sus siglas en inglés) y la incertidumbre en la calibración absoluta. El tiempo de integración típico de observación es de alrededor de 2100 s ó 35 minutos. La escala de flujo se establece mediante observaciones de DR 21³. Las fuentes NGC 7027, 3C 274 y 3C 84 se utilizan como calibradores secundarios. En Terasranta y cols. (1992) y Teraesranta y cols. (1998) se encuentra una descripción mas detallada sobre la reducción y análisis de los datos.

4.1.2. Programa de Monitoreo Tuorla Blazar

Las observaciones para la región de óptico son obtenidas del Programa de Monitoreo Tuorla Blazar el cual se encarga de realizar un monitoreo continuo de 31 fuentes Bl Lac, visibles desde el hemisferio norte, dentro de las cuales se encuentra Mrk 421. Este programa mantiene una estrecha colaboración con el Metsähovi Radio Observatory para el monitoreo de las fuentes.

Los telescopios encargados del monitoreo son: el telescopio del Observatorio de Tuorla, 1.03 m Dall-Kirkham, a la izquierda, figura 4.2, ubicado en Piikkiö, Finlandia, a 53 m sobre el nivel del mar. Este posee una distancia focal de 8.45 m, lo que da

³Es una nube molecular ubicada en la constelación de Cygnus la cual posee varias moléculas incluidas, formaldehído, amoníaco, agua y monóxido de carbono



Figura 4.2. A la izquierda: Telescopio Dall-Kirkham del Observatorio de Tuorla. Créditos: <http://www.astro.utu.fi/telescopes/metri.html>. A la derecha, Telescopio de KVA (Kunliga Vetenskap-sakademien). Créditos: <http://www.astro.utu.fi/telescopes/metri.html> y <http://www.astro.utu.fi/>, respectivamente.

como resultado un campo de visión (FOV, por sus siglas inglés) de 10×10 minutos de arco. También se incluye el telescopio KVA (Kunliga Vetenskap-Sakademien), a la derecha 4.2, localizado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en La Palma, España a 2396 m sobre el nivel del mar. El sistema KVA consta de dos telescopios, un telescopio de 60 cm en un soporte de horquilla y un telescopio Celestron-14 de 35 cm atornillado a la parte inferior del telescopio de 60 cm. El telescopio de 35 cm posee una distancia focal de 3.91 m y un campo de visión de 12×8 minutos de arco.

Los datos observacionales solicitados al programa comprenden las fechas entre 08/08/2008 y 02/05/2021. Estos datos fueron medidos utilizando el filtro en la banda R (Cousine). Y para determinar el flujo en cada punto de observación se utiliza fotometría diferencial con un radio de apertura de 7.5 segundos de arco con un tiempo de integración de 24 min. Nilsson y cols. 2018 describen la reducción y el análisis de los datos.

4.1.3. Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi

El telescopio espacial de rayos gamma Fermi (ver figura 4.3) es un observatorio de rayos γ de alta energía diseñado para realizar observaciones de objetos celestes en la banda de energía que se extiende desde 8 keV hasta ~ 300 GeV. Nombrado en honor al físico italiano pionero de la física de altas energías, Enrico Fermi. Fue puesto en operación el 11 de junio de 2008 por la NASA, en el cohete Delta II desde

Cabo Cañaveral en Florida. Fermi lleva a bordo dos instrumentos: (i) el Monitor de destellos de rayos gamma (GBM, por sus siglas en inglés) y (ii) el telescopio de área grande (LAT, por sus siglas en inglés).



Figura 4.3. Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi. Créditos:Michelson y cols. (2010)

Monitor de destellos de rayos gamma (GBM): este instrumento está diseñado para detectar fenómenos transitorios en el rango de $8keV - 30MeV$ y detecta brotes repentinos de rayos γ producidos por Destellos de Rayos γ (GRBs, por sus siglas en inglés) y erupciones solares, por ejemplo. Sus detectores de centelleo están a los lados de la nave espacial para observar todo el cielo que no está bloqueado por la Tierra Atwood y cols. (2009a).

Telescopio de área grande (LAT): es el instrumento principal, construido con una mejor sensibilidad que su antecesor, el Telescopio de Experimento de Rayos Gamma Energéticos (EGRET, por sus siglas en inglés) a bordo del satélite del Observatorio de Rayos Gamma Compton. Tiene un área efectiva de $\sim 8000\text{ cm}^2$ (~ 6 veces mayor que EGRET), una resolución superior ($\sim 0.6^\circ$ a 1 GeV) de la sección frontal y alrededor de un factor 2 veces más grande que la sección trasera ($\sim 1.7^\circ$ a 1 GeV para EGRET). Se ubica en una órbita terrestre circular, a una altitud de $\approx 565\text{ km}$ con una inclinación de $\approx 24.7^\circ$ respecto al ecuador y recorre una órbita completa en 96 minutos. Su campo de visión abarca $\sim 2sr$ ($\sim 20\%$ de todo el cielo)⁴, el cual detecta fotones de rayos γ en el rango de energía de $30MeV$ a $300GeV$, y opera principalmente en modo de escaneo en el que se logra una exposición casi uniforme de todo el cielo cada dos órbitas en aproximadamente 3 horas Atwood y cols. (2009a).

⁴Estereorradián (sr) es la unidad derivada del SI que mide ángulos sólidos.

El LAT tiene cuatro subsistemas (ver figura 4.4) que trabajan juntos para detectar rayos γ y rechazar señales de rayos cósmicos. Por cada rayo γ que ingresa al LAT, filtra entre 100 000 y un millón de rayos cósmicos. Los cuatro subsistemas principales que lo conforman son: un rastreador, un calorímetro, un detector anti-coincidencia (ACD, por sus siglas en inglés) y un sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés).

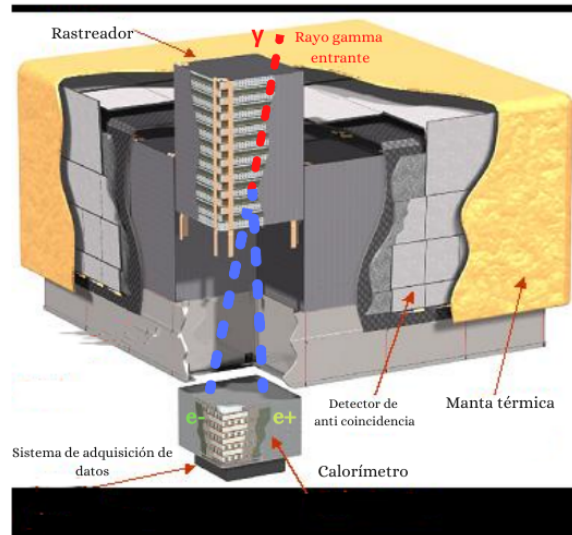


Figura 4.4. Esquema de la parte interna del LAT. *Créditos: Atwood y cols. (2009b)*

Es un instrumento basado en la detección de pares positrón-electrón que, su funcionamiento que se genera a partir del ingreso de un rayo γ al rastreador. Este rayo atraviesa primero de detector anti-coincidencia (ACD) sin emitir señal, luego interactúa en una de las 16 láminas delgadas de tungsteno convirtiéndose en par electrón-positrón (e^+e^-). Posterior a esto, las partículas creadas pasan a través de un rastreador que está formado de 36 capas de detectores de silicio que permite determinar su trayectoria. Finalmente, las partículas entran en el calorímetro, en donde se mide su energía y, por tanto, la energía del rayo γ original Michelson, Atwood, y Ritz (2010).

Las partículas de rayos cósmicos producen una señal en el detector antioincidente, que le dice al sistema de adquisición de datos que rechace la señal. El detector antioincidente rechaza el 99.97 % de las señales no deseadas producidas por los rayos cósmicos que ingresan al LAT. El software del sistema de adquisición de datos

también rechaza, según la dirección de llegada, los rayos gamma no deseados que se originan en la atmósfera de la Tierra. A continuación se detalla el funcionamiento de los cuatro subsistemas antes mencionados:

Rastreador: El rastreador consta de un arreglo de cuatro por cuatro módulos de torres. Cada módulo de torre consta de capas que detectan el seguimiento de partículas y están elaboradas de silicio, estas son intercaladas con láminas delgadas de conversión de tungsteno. Los detectores de silicio miden con precisión las trayectorias del electrón y del positrón producidos a partir del rayo γ inicial, es decir, que su dirección es reconstruida (ver figura 4.5).

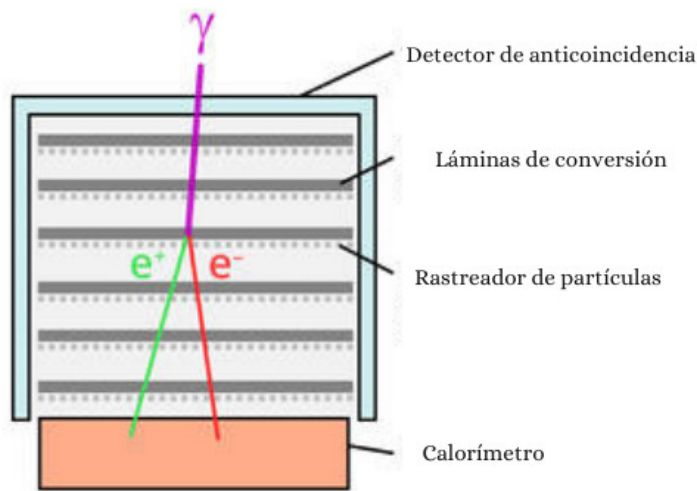


Figura 4.5. Ilustración de los principios de diseño del rastreador. *Créditos: NASA's Goddard Space Flight Center*

Calorímetro: Los propósitos principales del calorímetro son dos: (i) medir la energía depositada debido a la cascada de partículas electromagnéticas que resulta del par e^+e^- producido por el rayo γ incidente; y (ii) obtener una imagen del perfil de desarrollo de la cascada de partículas, proporcionando así un importante discriminador de fondo Atwood y cols. (2009b).

El calorímetro está compuesto por 96 cristales de yoduro de cesio talio activado (CsI (Ti)), ordenados en 8 capas de 12 cristales. Cada cristal tiene un tamaño $2.7 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm} \times 32.6 \text{ cm}$. Las dimensiones laterales de los cristales son comparables a la longitud de radiación CsI (1.86 cm) y al radio de Molière⁵ (3.8 cm) para cascadas electromagnéticas. La lectura se realiza mediante fotodiodos PIN, montados a ambos lados de cada cristal, midiendo la luz de centelleo producida. La diferencia entre

⁵Es una constante característica de un material que da la escala de la dimensión transversal de las cascadas electromagnéticas iniciadas por un electrón o fotón de alta energía incidente

los niveles de luz transmitidos a los dos extremos permite determinar la posición del depósito de energía en el cristal Atwood y cols. (2009b).

El detector proporciona tres coordenadas espaciales: las primeras dos especifican la posición del cristal en el arreglo y la tercera, mide la asimetría del campo de luz. La resolución de posición lograda por la relación de luz vista en cada extremo de un cristal escala con la energía depositada y varía desde unos pocos milímetros para deposiciones de baja energía (≈ 10 MeV) hasta una fracción de milímetro para deposiciones de gran energía (> 1 GeV).

Detector anti-conincidencia (ACD): La función principal del detector ACD es la discriminación de fotones del fondo de rayos cósmicos. Está compuesto por 89 placas de centelleo de plástico que encierran el calorímetro y el rastreador. La luz de centelleo de cada baldosa se registra mediante fibras de cambio de longitud de onda incrustadas en el centellador y conectadas en ambos extremos a dos tubos fotomultiplicadores. Se requiere que el ACD proporcione al menos una eficiencia de 0.9997 (promediado sobre el área del ACD) para la detección de partículas cargadas individuales que ingresan al campo de visión del LAT. El efecto "auto-veto" ⁶ se evita correlacionando la información espacial proporcionada por el ACD con la señal del rastreador y el calorímetro.

Sistema de adquisición de datos (DAQ):

El sistema de adquisición de datos recopila datos de todos los subsistemas para transmitirlos al control terrestre. El software está optimizado para eliminar el fondo de partículas cargadas con el fin de maximizar la velocidad de detección de eventos de rayos γ . El DAQ consta de un grupo de diferentes subsistemas dispuestos en un orden jerárquico, en el nivel más bajo se puede encontrar el Modelo de Electrónica de Torre (TEM, por sus siglas en inglés), el cual proporciona una interfaz a los calorímetros y rastreadores en las 16 torres del Fermi-LAT.

Cada TEM proporciona almacenamiento de eventos para respaldar la lectura de eventos y se comunica con el Módulo Generador de Eventos (EBM, por sus siglas en inglés) a nivel de instrumento que es parte del Disparador Global/Módulo ACD/Unidad de Distribución de Señal (GASU, por sus siglas en inglés). GASU esta compuesto de cuatro componentes: el Módulo Electrónico de Activación Global

⁶El efecto de "auto-veto" rechaza los rayos γ de alta energía (>10 GeV), porque las partículas retrodispersadas del calorímetro regresan al rastreador y activan el ACD Atwood y cols. (2009b)

(GEM, por sus siglas en inglés) que genera señales relativas a la lectura basada en información de los disparadores en TEM y ACD, del Módulo Electrónico ACD (AEM, por sus siglas en inglés) que opera con el ACD, de la Unidad de Respuesta de Comando (CRU, por sus siglas en inglés) que envía y recibe comandos dentro del DAQ y del EBM, que en base a la información proporcionada por el TEM y el AEM, crea eventos completos y los envía para su posterior procesamiento en la Unidad Procesadora de Eventos (EPU, por sus siglas en inglés). La Unidad de Interfaz de la Nave Espacial (SIU) controla el LAT y contiene la interfaz de comando para la nave espacial Atwood y cols. (2009b).

Las comunicaciones son manejadas por el Sistema de satélite de seguimiento y retransmisión de datos (TDRSS, por sus siglas en inglés) que actúa como enlace descendente para los datos. Los datos se envían al Centro de Operaciones de la Misión Fermi (MOC, por sus siglas en inglés), que es el encargado de separar los datos LAT de otros datos relacionados con la transmisión. La etapa final para el procesamiento de datos se lleva a cabo en la Universidad de Stanford en California en el Centro de Operaciones de Ciencia de Instrumentos LAT (ISOC, por sus siglas en inglés), para que finalmente los datos se encuentren listos para ser publicados en el Fermi Support Science Center (FSSC, por sus siglas en inglés) aproximadamente 3 ó 4 horas después de ser enviados a la Tierra Atwood y cols. (2009b).

4.1.3.1. Análisis de datos de Fermi-LAT

El análisis se refiere a la determinación de flujo y modelado espectral de fuentes detectadas por Fermi-LAT. Esto se logra mediante el uso de una técnica de optimización de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Analysis, del inglés) propuesto por Fisher (1925). La función de verosimilitud está definida como la probabilidad de obtener los datos observacionales dado un modelo de entrada. Los modelos utilizados para la prueba de verosimilitud describen la distribución de las fuentes de rayos γ en el cielo, incluida la intensidad y los espectros. Estos modelos consideran la respuesta de los detectores del telescopio Fermi al flujo incidente.

Este análisis se puede hacer siguiendo dos opciones posibles: análisis agrupado de la función de máxima verosimilitud (binned likelihood, de ahora en adelante) o un análisis no agrupado de máxima verosimilitud (unbinned likelihood, de ahora en adelante). El análisis unbinned es el método preferido para el análisis de series de tiempo, donde se espera que el número de eventos en cada intervalo de tiempo

sea pequeño, del orden de días. En tanto que para intervalos de tiempo grandes, de semanas o meses, se debe utilizar el análisis binned, este incluye fuentes de fondo brillante (como el plano galáctico), análisis espacial y espectral. El análisis utilizado para este trabajo se basa en el método binned likelihood y se detalla a continuación.

4.1.3.2. Binned Likelihood

El análisis Binned se utiliza cuando los datos se combinan en grupos en lugar de eventos únicos. El número de fotones observado en cada bin sigue una distribución de Poisson.

La función de verosimilitud $\mathcal{L}$ está dado por el producto de la probabilidad de los conteos observados en cada bin. Asumiendo que el número esperado de conteos por el modelo de entrada en el i -ésimo bin es m_i , la probabilidad de detectar n_i cuentas en el i -ésimo bin está definido como:

$$P_i = m_i^{n_i} \times e^{-m_i} \times \frac{1}{n_i!} \quad (4.1)$$

$$P_i = e^{-m_i} \times \frac{m_i^{n_i}}{n_i!} \quad (4.2)$$

Por lo que la función de verosimilitud total, es entonces, el producto de todas las probabilidades P_i para cada $i : 1 \rightarrow N_b$, donde N_b representa el número de bins. Observando la exponencial de la ecuación anterior (4.2) notamos que puede ser escrita como:

$$e^{-m_1} \times e^{-m_2} \times e^{-m_3} \times \dots \times e^{-m_{i-1}} \times e^{-m_i} = e^{\sum_{i=1}^{N_b} m_i} \quad (4.3)$$

donde:

$$-\sum_{i=1}^{N_b} m_i = -N_{exp} \quad (4.4)$$

siendo N_{exp} igual al número total de cuentas esperadas, por lo que:

$$e^{\sum_{i=1}^{N_b} m_i} = e^{-N_{exp}} \quad (4.5)$$

Y $\mathcal{L}$ se expresa como:

$$\mathcal{L} = e^{-N_{exp}} \prod_{i=1}^{N_b} \frac{m_i^{n_i}}{n_i!} \quad (4.6)$$

Por tanto, el modelo que mejor se ajusta tendrá una mayor probabilidad de describir los datos observacionales con respecto a otros modelos. Sin embargo, cuando se utilizan datos agrupados, parte de la información asociada a un único fotón o evento se “destruye” o se pierde porque las características del evento se mezclan con las de todos los demás eventos del bin.

4.1.4. Fermi Science Tools

Science Tools⁷ es un software especializado compuesto de herramientas diseñadas y desarrolladas para realizar el procesamiento y análisis de los datos proporcionados por el Fermi-LAT. Los datos disponibles resultantes del procesamiento de datos telemétricos desde la nave espacial Fermi, consisten en dos tipos de archivos. *Los archivos de eventos (o events file)*, que son una lista de eventos cuyas características son reconstruidos, como la energía y dirección, el tiempo de detección y los parámetros de clasificación del evento. Estos a su vez se subdividen en dos tipos, el archivo de fotones que contiene datos de fuentes puntuales y el archivo extendido que contiene información sobre fuentes transitorias. Por otro lado, *el archivo de la nave espacial (o spacecraft file)* contiene datos sobre la ubicación y orientación de la nave espacial y es necesario para el análisis.

El tiempo de detección de los eventos se expresa en MET⁸ (Mission Elapsed Time, por sus siglas en inglés), definido como el número de segundos desde la hora de referencia del 1 de enero de 2001 a las 00:00:00 (UTC) . A continuación se detalla brevemente los pasos para el procesamiento de los datos del Fermi Science Tools siguiendo el método binned likelihood⁹:

Selección de datos

Los archivos de eventos son extraídos de la base de datos de Fermi-LAT¹⁰, los cuales son de acceso público y se descargan en formato FITS (Flexible Image Transport System), utilizado comúnmente para datos astronómicos. Para este trabajo se

⁷<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/references.html>

⁸Para convertir diferentes unidades de tiempo: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/xTime/xTime.pl>

⁹Para mas detalles consultar el tutorial https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/likelihood_tutorial.html

¹⁰<https://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>

consideran únicamente archivos de eventos de fotones dado que la fuente es puntual, estos archivos abarcan la campaña observacional comprendida entre 08/08/2008 a las 15:43:36 UTC al 02/05/2021 a las 15:43:36 UTC en el rango de energía de 2-300 GeV.

El primer paso para la selección de datos es aplicar cortes al conjunto de datos, para ello se utiliza la herramienta *gtselect*. Los parámetros requeridos son las coordenadas de la fuente ubicada en el centro de una región circular de interés (ROI, por sus siglas en inglés) en la que se seleccionan los eventos, el radio del ROI, la hora de inicio y finalización de la detección de los eventos, el rango de energía y el valor máximo del ángulo cenital. Este último parámetro representa el ángulo entre la dirección del fotón entrante y la dirección perpendicular a la superficie de la Tierra. La selección basada en el valor del ángulo cenital se realiza para excluir períodos de tiempo en los que cualquier parte del ROI está demasiado cerca del limbo de la Tierra, lo que provoca elevados niveles de fondo.

El segundo paso consiste en hacer una buena selección de intervalos de tiempo (GTI, por sus siglas en inglés) en los que los datos pueden considerarse válidos. La herramienta utilizada para evaluar estos intervalos de tiempo es *gmktime*, que utiliza los datos contenidos en el archivo de la nave espacial para cortar los intervalos en los que la fuente está sujeta a la contaminación del limbo de la Tierra, o cuando la nave espacial está cruzando por la Anomalía del Atlántico Sur (AAS). Para este trabajo se utilizó los siguientes datos:

- t_{min} (MET) = 239903017.192
- t_{max} (MET) = 641663345.192
- ROI = 15°
- E_{min} (MeV) = 2000.0
- E_{max} (MeV) = 300000.0

Mapa de cuentas

En este paso se crea un mapa de cuentas del ROI para identificar las fuentes candidatas al modelo de máxima verosimilitud y así asegurarnos de que el campo de interés sea apreciable, para esto se utiliza la herramienta *gtbin* la cual elabora mapas de conteo en 2D para el análisis binned.

Mapa de exposición

Para crear el mapa de exposición se debe considerar las funciones de respuesta del instrumento, las cuales dependen del ángulo de inclinación (el ángulo formado entre la dirección de la fuente y el eje z del instrumento) y del número de cuentas detectadas para una fuente cuya intensidad depende de cuánto tiempo estuvo el instrumento cubriendo una cierta posición en el cielo. Para realizar este análisis se utiliza la herramienta *gtltcube*, la cual genera un archivo que contiene el *livetime cube*, es decir, el tiempo que LAT ha tomado datos de forma activa, en función de la posición en el cielo y el ángulo de inclinación, durante un período de observación específico. Esta cantidad se evalúa a partir del archivo de la nave espacial.

Luego la herramienta *gtexpmap* crea un mapa de exposición basado en la selección de eventos utilizada en el archivo de fotones de entrada y el *livetime cube*. El mapa de exposición debe recalcularse si se cambia el ROI, el cenit, la selección de energía o la selección del intervalo de tiempo de los eventos.

Caracterización del campo:

Como último paso, se descarga los archivos del modelo galáctico de emisión difusa¹¹ y del modelo isotópico extragaláctico de emisión difusa. Luego se utiliza la herramienta *gtlike*, la cual utiliza los resultados generados de las anteriores herramientas y lee el modelo fuente de un archivo XML (Extensible Markup Language, por sus siglas en inglés). El archivo del modelo contiene su mejor estimación sobre las ubicaciones y las formas espectrales de las fuentes en sus datos, y cuya finalidad es realizar el ajuste de máxima verosimilitud para los datos del LAT.

4.1.5. Software: Enrico

Enrico es un paquete de Python, diseñado para facilitar el análisis de datos de Fermi LAT. Usando sólo archivos de configuración y herramientas desde la línea de comandos, el usuario puede realizar o reproducir fácilmente un análisis completo de las FermiTools y crear gráficos. El software está disponible para los sistemas operativos Mac OS y Linux y se puede descargar de la pagina oficial de Enrico¹², previo a su instalación se necesita tener instalada las Fermi Science Tools Sanchez y Deil (2013).

El archivo de configuración de Enrico contiene parámetros que pueden ser mo-

¹¹https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/likelihood_tutorial.html

¹²<https://enrico.readthedocs.io/en/latest/setup.html>

dificados según el análisis que se requiera. La rutina para obtener SED o curvas de luz se ejecuta a través de los siguientes comandos:

- *enrico_config*: este comando se encarga de crear un archivo de configuración con extensión .conf. Para ejecutarlo se coloca el comando seguido del nombre deseado: *enrico_config nombre.conf*. El archivo de configuración utilizado se muestra en el Anexo 7). Este archivo contiene una serie de parámetros iniciales como: coordenadas del objeto, corrimiento al rojo, ROI, modelo EBL, tiempo, energía, función espectral, método de análisis (binned o unbinned), número de puntos en la curva de luz, y en el sed, modelos de fondo (isotérmico y galáctico), entre otros.
- *enrico_xml*: este comando genera un archivo con extensión .xml del modelo en rayos γ del cielo.
- *enric_sed*: este comando hará todos los pasos gtselect, gtmktime, gtlcube, etc, para producir todos los archivos FITS y ajustará los datos con gtlike. Este producirá un archivo con la extensión .results el cual almacena valores como los parámetros de la función espectral utilizada, flujo, energía y la prueba estadística (TS, por sus siglas en inglés.)
- *enrico_plot_sed*: este comando crea la gráfica de la SED generada en el comando *enric_sed*.
- *enrico_lc*: este comando realiza el análisis completo en un intervalo de tiempo específico (bin temporal), con una separación entre cada punto que es determinada por el número de puntos en la gráfica ó bien al ingresar un archivo de datos especificando el inicio y fin de cada intervalo. Este archivo se especifica en la sección [LightCurve] para el número de puntos en la gráfica y en la sección [time] para ingresar datos del archivo de configuración (ver Anexo 7). Genera los archivos FITS faltantes para hacer el análisis gtlike y así producir los puntos de la curva de luz.
- *enrico_plot_lc*: este comando gráfica los puntos de la curva de luz generados por el comando *enrico_lc*.

4.2. Curvas de Luz

A continuación se presentan las curvas de luz obtenidas de los distintos instrumentos para la banda de radio, óptico y rayos γ (2-300 GeV).

4.2.1. Curva de Luz en radio

En la figura 4.6 se muestra la curva de Luz en la banda de radio con los datos reportados del Metsähovi Radio Observatory para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Estos datos fueron medidos a una frecuencia de 37 GHz y con un tiempo de integración de 35 min.

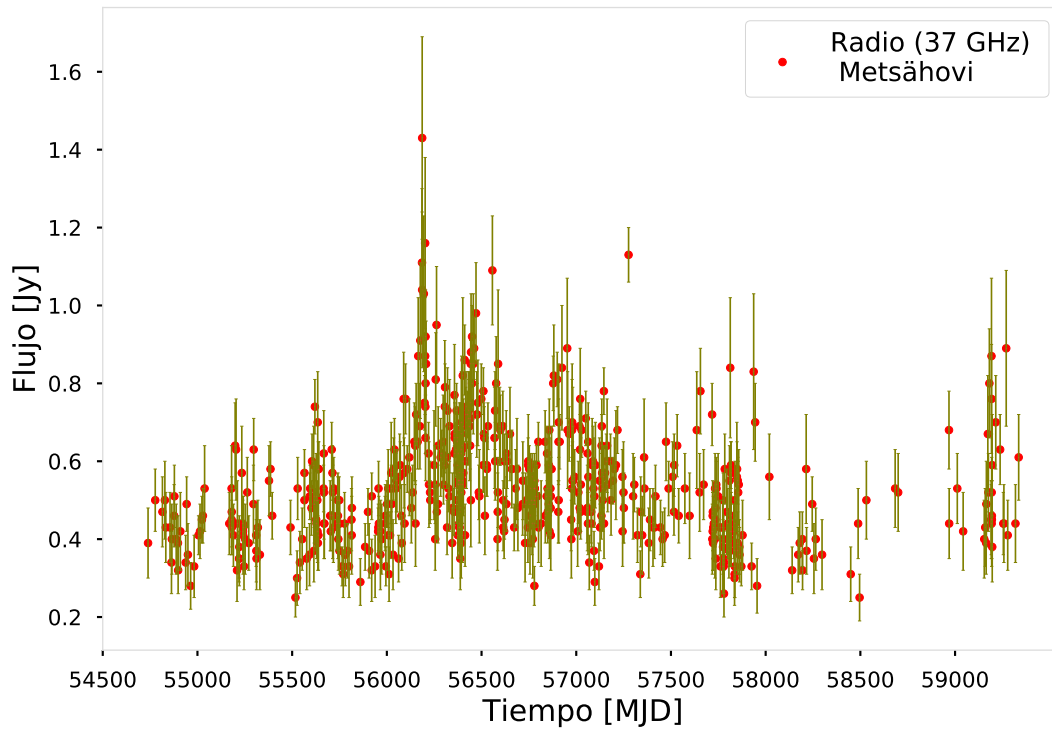


Figura 4.6. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de radio durante la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados por Metsähovi Radio Observatory. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky.

4.2.2. Curva de Luz en óptico

En la figura 4.7 se muestra la curva de Luz en la banda de óptico con los datos reportados del telescopio KVA del programa Tuorla Blazar para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Estos datos fueron medidos con un filtro en la banda R (Cousine) y con un tiempo de integración de 24 min.

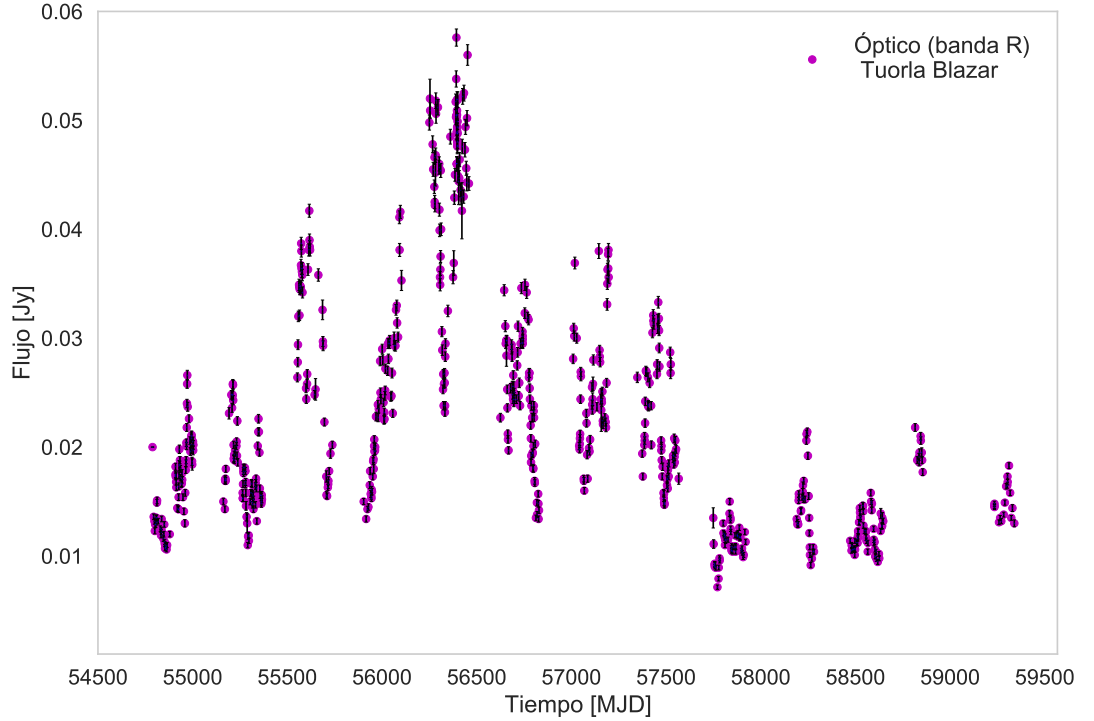


Figura 4.7. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de óptico durante la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados del telescopio KVA. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky.

4.2.3. Curva de Luz en rayos γ (2-300 GeV)

La curva de luz en rayos γ es obtenida con datos del instrumento LAT para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Los datos presentados en este trabajo son analizados utilizando las ScienceTools (versión v11r5p3), el software Enrico con el procedimiento descrito en la sección 4.1.4, y con los archivos del modelo isotrópico extragaláctico de emisión difusa iso_P8R3_SOURCE_V3_v1.txt y del

modelo galáctico de emisión difusa `gll_iem_v07.fits`¹³. Los eventos fueron seleccionados en la banda de 2-300 GeV dentro de 15° de la región de interés alrededor de Mrk 421 y con un ángulo zenital máximo de 100° para evitar contaminación desde el limbo de la Tierra. Los valores de flujo se calcularon utilizando la función de ley de potencia con el índice fijado en 1.8 siguiendo lo reportado en el catalogo 4FGL Abdollahi y cols. (2020), que es la forma espectral que describe a Mrk 421. Para generar la curva de luz se realizó un análisis de máxima verosimilitud binned con un intervalo de tiempo de 1 semana como se muestra en la figura 4.8. La elección del bin de 1 semana es debido a que al hacer el estudio de correlación con una resolución temporal de bin menor, del orden de días, encontramos una reducción significativa de coincidencias temporales con los datos en las otras frecuencias de radio y óptico.

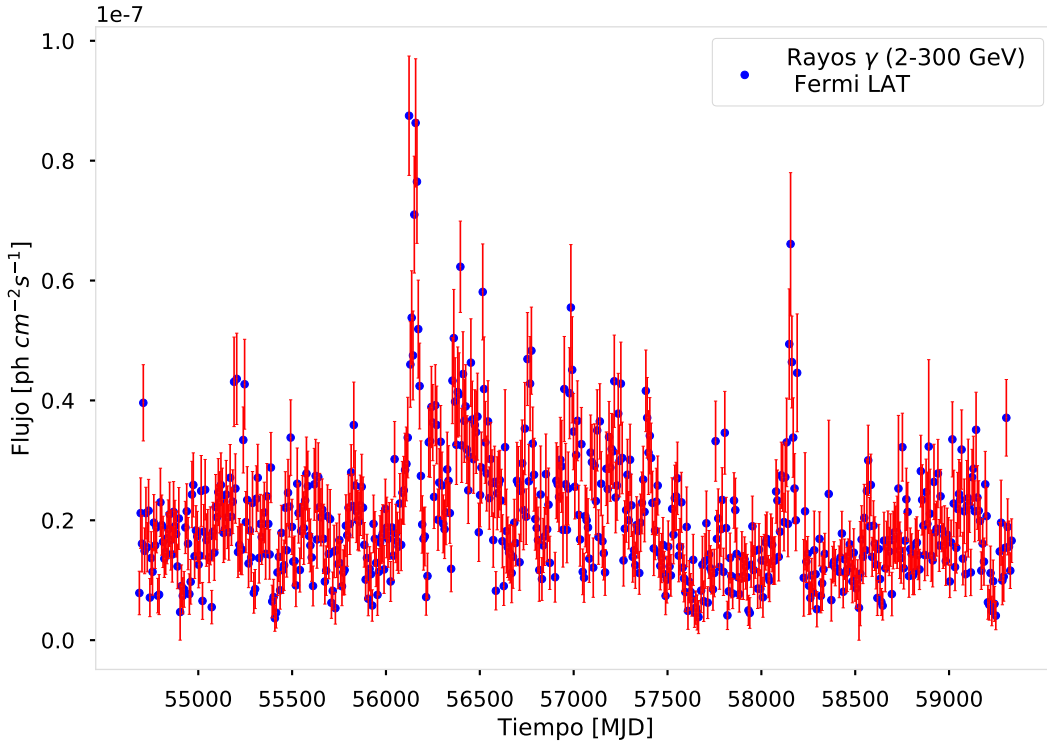


Figura 4.8. Curva de luz de Mrk 421 en la banda de rayos γ (2-300 GeV) con bin temporal de 1 semana para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021 con datos proporcionados del telescopio Fermi LAT. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

¹³<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/BackgroundModels.html>

4.2.4. Simultaneidad en las curvas de luz

Con el fin de estudiar las correlaciones en las diferentes longitudes de onda es necesario comparar observaciones en los mismos intervalos de tiempo. Puesto que las observaciones reportadas por los diferentes instrumentos no coinciden temporalmente entre sí en el orden de minutos, es necesario agrupar los datos con un intervalo de tiempo más amplio. En las tres frecuencias analizadas en esta sección se utiliza un bin temporal con duración de 1 semana.

Para las bandas de radio y óptico se agruparon los datos según las fechas reportadas para cada intervalo de los bins de Fermi-LAT. Cada uno de estos datos en óptico y radio tiene una importancia relativa que depende de la fracción temporal del flujo observado que se encuentra en cada bin. El promedio ponderado del flujo que viene dado por la siguiente expresión:

$$F_w = \frac{w_1 \cdot F_1 + w_2 \cdot F_2 + \dots w_n \cdot F_i}{w_1 + w_2 + \dots w_i} \quad (4.7)$$

donde:

F_i = i-ésimo flujo observado

w_i = el i-ésimo peso ponderado correspondiente a la fracción temporal del flujo observado en el bin i.

Y cuyo error en el flujo ponderado es calculado a través de:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N w_i (F_i - \bar{F})^2}{\frac{M-1}{M} \sum_i^N w_i}} \quad (4.8)$$

donde:

$\bar{F}$ = media del flujo observado

w_i = el i-ésimo peso ponderado

M = la cantidad de pesos ponderados no nulos.

4.2.4.1. Simultaneidad entre las curvas de luz de radio, óptico y rayos γ

La curva de luz multifrecuencia con bin temporal de 1 semana se muestra en la figura 4.9 donde se observa que la curva de luz menos variable corresponde a radio mientras que la frecuencia en óptico presenta alta variabilidad. En esta última frecuencia podemos observar un comportamiento simétrico respecto a noviembre del año 2012 (MJD = 56250) iniciando en agosto del 2008 (MJD = 54700) y finalizando

en el año 2017 (MJD = 58000). Para el año 2012 (banda amarilla) se observa una fuerte ráfaga en la frecuencia de radio y rayos γ que no es observada en la frecuencia de óptico dado que no se tienen observaciones completas durante este período de actividad, a pesar de que presenta un aumento de flujo previo a esta ráfaga. Por otro lado, en la frecuencia de radio se observa un aumento de flujo correspondiente a septiembre del año 2015 (MJD = 57276, banda roja) que no se observa en las frecuencias de rayos γ o de óptico. En el año 2018 (MJD = 58300, banda azul) se observa una ráfaga en la banda de rayos γ pero sin contraparte en las otras dos frecuencias.

Las figuras 4.10 y 4.11 muestran las curvas de luz correspondientes a las coincidencias temporales encontradas para rayos γ /óptico y para rayos γ /radio, respectivamente. En la figura 4.10 se observa un aumento de flujo para la banda de rayos γ en el año 2010 (MJD = 55200, banda azul) pero sin aumento en la contraparte de la banda de óptico. De forma inversa, para el año 2011 (MJD = 55500, banda roja) se observa un aumento en la frecuencia de óptico pero sin un aumento en la frecuencia de rayos γ . Y como se mencionó anteriormente, debido a la ausencia de observaciones no es posible determinar la existencia de la ráfaga del 2012 (banda amarilla) que esta presente en rayos γ , pero si es posible observar un aumento de flujo para abril de 2013 (MJD = 56296, banda magneta) en ambas frecuencias, que en óptico antecede a la disminución de la actividad del 2012. Otra característica importante es que el comportamiento simétrico observado en la banda de óptico es menos apreciable en la banda de rayos γ . Para el año 2018 (MJD = 58150, banda azul) se observa un aumento de la actividad notable en la banda de rayos γ pero apenas distinguible en la banda de óptico. Luego de esta actividad Mrk 421 no vuelve a alcanzar un estado prominente en ninguna de las dos frecuencias.

En la figura 4.11 es notorio observar que la frecuencia de radio presenta en general poca variabilidad y se mantiene en un estado base hasta el año 2012 (MJD = 56250, banda amarilla) cuando se presenta la fuerte ráfaga que también es observada en la banda de rayos γ , exhibiendo el período mas activo durante toda la campaña observacional con flujos superiores a 1 Jy en radio y cercanos $1 \times 10^{-7} \text{ ph cm}^{-1} \text{ s}^{-7}$ en rayos γ . Posterior a esto, ambas frecuencias vuelven al estado base y presentan ligeros aumentos de flujo de manera no simultanea, como el observado en el año 2015 (MJD = 57276, banda roja) y 2017 (MJD = 57936, banda verde) para la banda de radio o el de 2018 (banda azul) para la banda de rayos γ .

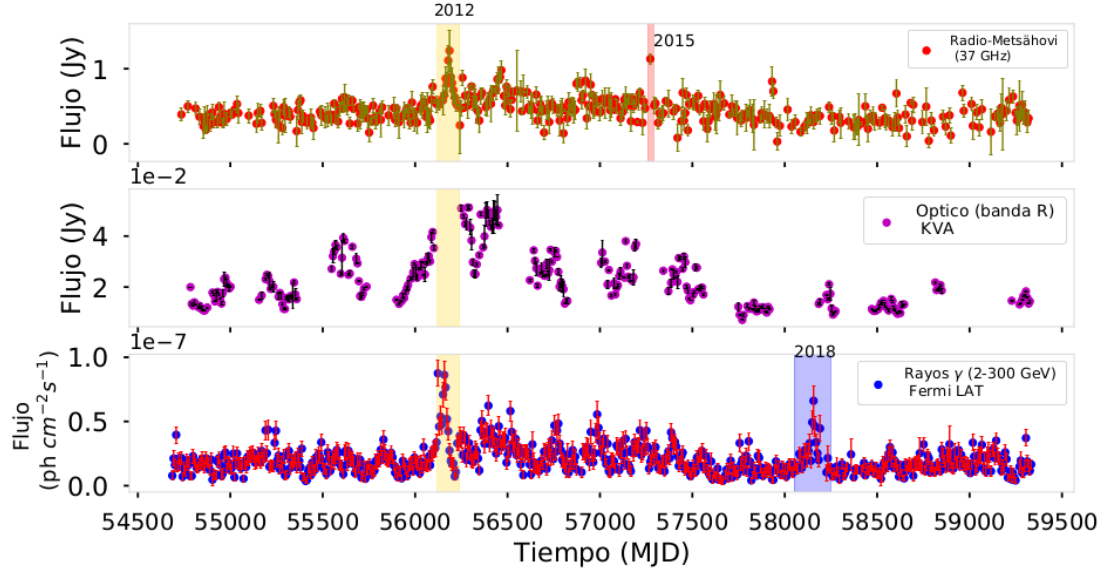


Figura 4.9. Curvas de luz de Metsähovi, KVA y Fermi-LAT para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Un bin temporal de 1 semana fue utilizado en las tres frecuencias. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky y de $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

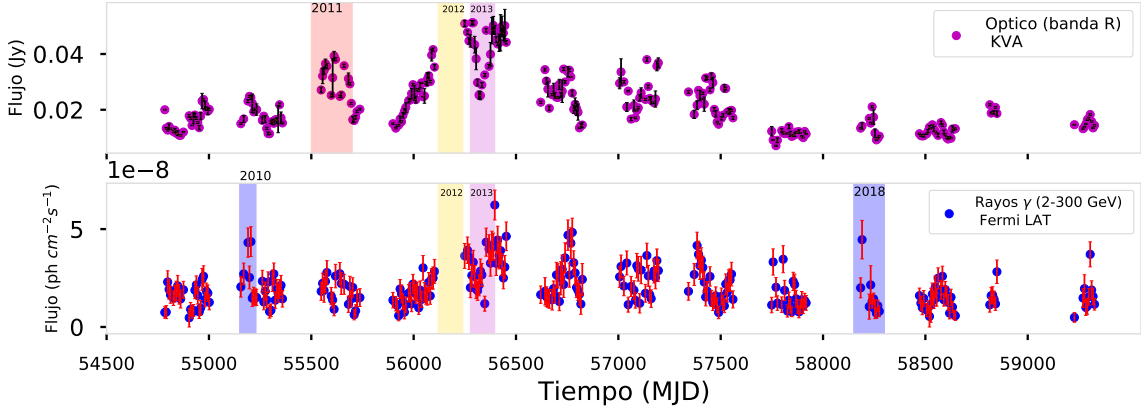


Figura 4.10. Curvas de luz de simultaneas de rayos γ y radio (37GHz) para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Un bin temporal de 1 semana fue utilizado para ambas frecuencias. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky y de $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

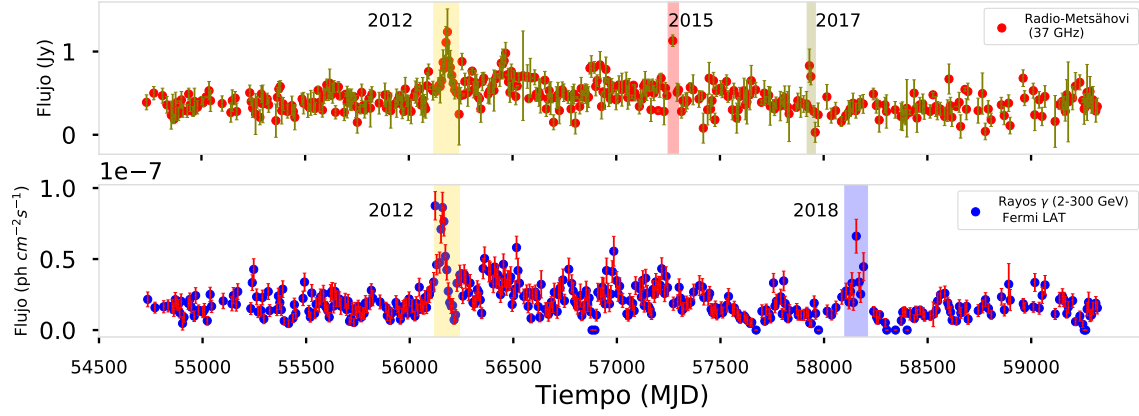


Figura 4.11. Curvas de luz de simultaneas de rayos γ y radio (37GHz) para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Un bin temporal de 1 semana fue utilizado para ambas frecuencias. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky y de $\text{ph cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

4.2.4.2. Simultaneidad entre las curvas de luz de radio y óptico

La figura 4.12 muestra la curva de luz de radio y óptico con las coincidencias temporales encontradas para ambas frecuencias. Los datos disponibles son menos comparados con los datos reportados en rayos γ y al encontrar coincidencias temporales entre ambas bandas se reducen significativamente. Sin embargo, podemos notar que el comportamiento de la banda de radio se mantiene en general en su estado base con ligeros aumentos del flujo, mientras que la banda de óptico presenta un comportamiento más variable. En el año 2011 (MJD = 55500, banda roja) vemos un aumento de flujo en la banda de óptico pero sin contraparte en la banda de radio. Y para el año 2012 (MJD = 56470, banda amarilla) observamos una correspondencia del aumento de flujo en ambas frecuencias. Posterior a esto la banda de radio se mantiene en su estado base hasta alcanzar un aumento notable en febrero de 2021 (MJD = 59270, banda azul) pero sin contraparte en óptico, mientras que la banda en óptico muestra una disminución en la actividad.

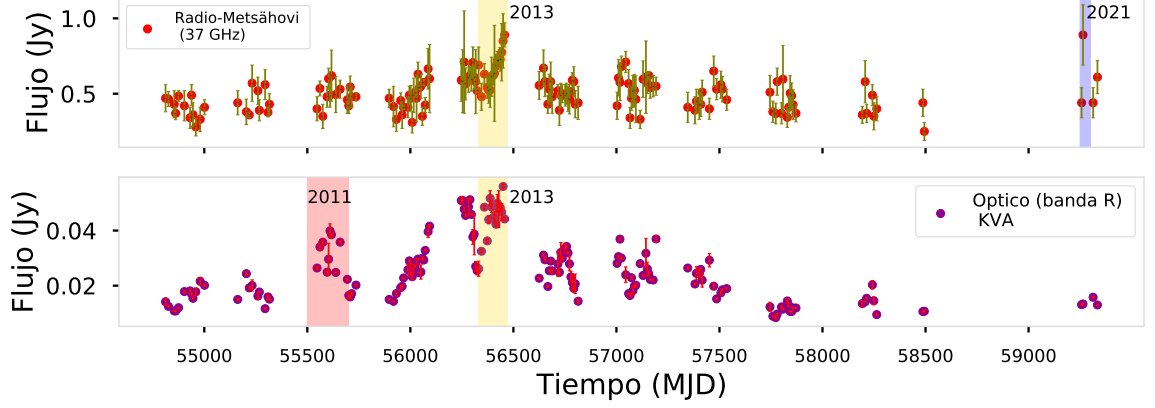


Figura 4.12. Curvas de luz de simultaneas de Metsähovi y KVA para la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. Un bin temporal de 1 semana fue utilizado para ambas frecuencias. El eje horizontal muestra el tiempo en Días Julianos Modificados y el eje vertical el flujo en unidades de Jansky y de $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

4.3. Metodo D’Agostini

El método D’Agostini es un método estadístico bayesiano propuesto por D’Agostini el cual consiste en obtener la mejor estimación de los parámetros de un modelo que relaciona cantidades físicas en un experimento bajo ciertas condiciones a través de una función de máxima verosimilitud ó Likelihood. Este método considera una dispersión extra de los datos medidos.

D’Agostini 2005 propone un enfoque bayesiano con interpretación probabilística para ajustar modelos, este ajuste es nombrado como inferencia paramétrica. Los parámetros resultantes de la inferencia dependen del modelo inicial y del conocimiento previo sobre los posibles valores que pueden tomar los parámetros.

Si consideramos un conjunto de datos con errores en ambos ejes podemos calcular la inferencia paramétrica a partir de un modelo que relaciona los valores “verdaderos” de dos cantidades, μ_x y μ_y :

$$\mu_y = \mu_y(\mu_x; \theta) \quad (4.9)$$

donde θ representa los parámetros del modelo y la cantidad de parámetros es representada por M. Para el caso de un modelo lineal, la ec. 4.9 se expresa como:

$$\mu_y = a\mu_x + b \quad (4.10)$$

es decir, $\theta = a, b$ y $M=2$.

Las variables μ_x y μ_y son parte del modelo por lo que no podemos hacer mediciones directas de estas, sin embargo, x y y son cantidades físicas que son medidas por el experimento y cuyas incertidumbres están representadas por σ_x y σ_y . Si ahora consideramos hacer i repeticiones del experimento, el x_i corresponderá a cada $\mu_{x,i}$ y análogamente para y_i y $\mu_{y,i}$. El error puede ser modelado con una función de densidad de probabilidad $f(x_i|\mu_{x_i}, I)$ condicionado por μ_{x_i} e I , siendo I el conocimiento previo del experimento, es decir, la suposición de que exista una relación $\mu_y = \mu_y(\mu_x; \theta)$. Asumiremos entonces que los errores están distribuidos de forma normal¹⁴:

$$x_i \sim \mathcal{N}(\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}) \quad (4.11)$$

$$y_i \sim \mathcal{N}(\mu_{y_i}, \sigma_{y_i}) \quad (4.12)$$

Y por ende, la función de densidad de probabilidad puede ser escrita como:

$$f(\theta|x, y, I) = \int f(\mu_x, \mu_y, \theta|x, y, I) d\mu_x d\mu_y \quad (4.13)$$

Utilizando el teorema de Bayes multivariable podemos extender este análisis a más variables:

$$f(\mu_x, \mu_y, \theta|x, y, I) = \frac{f(x, y, \mu_x, \mu_y, \theta|I)}{\int f(x, y, \mu_x, \mu_y, \theta|I) d\mu_x d\mu_y d\theta} \quad (4.14)$$

Una vez definido el modelo y el conjunto de observaciones $\{x, y\}$ la distribución toma la forma:

$$f(\theta|x, y, I) \propto \int f(x, y, \mu_x, \mu_y, \theta|I) d\mu_x d\mu_y$$

que puede ser reescrita como:

$$f(\theta|x, y, I) \propto \int f(x, y|\theta, I) f(\theta|I) \quad (4.15)$$

Tradicionalmente, se nombra la función “likelihood” a la probabilidad de los datos dados los parámetros, es decir, $f(x, y|\theta, I)$. Esta es vista como una función matemática de los parámetros que puede ser escrita con la siguiente equivalencia:

$$f(x, y|\theta, I) \equiv \mathcal{L}(\theta; x, y) \quad (4.16)$$

¹⁴Donde $\sim$ significa que “está descrito por la distribución”

Por tanto, la función de distribución de parámetros para un modelo de dos variables asumiendo una función normal viene dada por:

$$f(\theta|x, y, I) \propto \prod_i \frac{1}{\sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \mu_y'(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2}} \exp \left[-\frac{[(y_i - \mu_y(x_i; \theta))]^2}{2(\sigma_{y_i}^2 + \mu_y'(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2)} \right] \quad (4.17)$$

Las ecuaciones anteriores suponen que las únicas fuentes de desviación de los datos experimentales son σ_x y σ_y , sin embargo, en el caso que y dependa de otras fuentes de incertidumbre “ocultas” ¹⁵ lo que observaríamos son los efectos generales integrados sobre toda las variables que no “vemos”. A falta de información más detallada, la modificación más simple del modelo descrito anteriormente consiste en agregar un “ruido” gaussiano adicional en una de las coordenadas, por simplicidad, este ruido se agrega a la variable y se representa como σ_d . La ecuación 4.17 se convierte en:

$$f(\theta|x, y, I) \propto \prod_i \frac{1}{\sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \mu_y'(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2}} \exp \left[-\frac{[(y_i - \mu_y(x_i; \theta))]^2}{2(\sigma_d^2 + \sigma_{y_i}^2 + \mu_y'(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2)} \right] \quad (4.18)$$

Si aplicamos el método de Likelihood la ecuación que resulta de maximizar la probabilidad para encontrar los valores que mejor se ajusten al modelo es:

$$\mathcal{L}(\theta, \sigma_d; x, y) \approx \frac{1}{2} \sum_i \log[\sigma_d^2 + \sigma_{y_i}^2 + \mu_y'^2(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2] + \frac{1}{2} \sum_i \frac{[y_i - \mu_y(x_i; \theta)]^2}{\sigma_d^2 + \sigma_{y_i}^2 + \mu_y'^2(x_i; \theta)\sigma_{x_i}^2} \quad (4.19)$$

Para una descripción mas detallada consultar D'Agostini (2005) y Osorio (2022). El modelo utilizado en este trabajo esta descrito por la función lineal de la ec.4.10. Por lo que utilizando la ecuación anterior (4.19) con la función lineal obtenemos:

$$\mathcal{L}(\theta, \sigma_d; x, y) \approx \frac{1}{2} \sum_i \log[\sigma_d^2 + \sigma_{y_i}^2 + a^2\sigma_{x_i}^2] + \frac{1}{2} \sum_i \frac{[y_i - \mu_x a + b]^2}{\sigma_d^2 + \sigma_{y_i}^2 + a^2\sigma_{x_i}^2} \quad (4.20)$$

siendo esta la ecuación que se utiliza para encontrar a , b y σ_d .

¹⁵Se considera una fuente de incertidumbre oculta a aquella que genera variabilidad en los datos de un experimento pero el origen que lo produce es desconocido.

5. Resultados y Discusión

En este trabajo se utilizó el método bayesiano D’Agostini descrito la sección anterior 4.3 para determinar la existencia de la correlación entre los flujos en la banda de radio con rayos γ (2-300 GeV), óptico con rayos γ (2-300 GeV) y óptico con radio para Mrk 421 con los datos reportados en la sección 4.2. Se utilizó el modelo lineal para describir los datos: $F_\gamma = aF_\lambda + b$ donde a es la pendiente y b es la ordenada al origen. El subíndice γ hace referencia a la banda en rayos γ (2-300 GeV) , λ a la banda de radio (R) u óptico (O) según corresponda. La ecuación utilizada por el método D’Agostini para maximizar la probabilidad de encontrar los valores que mejor se ajusten al modelo vienen dado por la ec.4.20. Las bandas de colores en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 representan la dispersión de los datos con significancia de $3\sigma = 99.7\%$ para los datos que son parte de la correlación, $2\sigma = 95.5\%$ y $1\sigma = 68.3\%$.

5.0.1. Correlación entre óptico y rayos γ

La figura 5.1 muestra la correlación en la banda de óptico (banda R) con rayos γ (2-300 GeV) modelada con la función lineal $F_\gamma = aF_O + b$ cuyos parámetros son obtenidos con el método D’Agostini: la pendiente $a = (5.13 \pm 0.43) \times 10^{-7}$ y la ordenada $b = (7.06 \pm 1) \times 10^{-9}$. La desviación de D’Agostini tiene un valor de $\sigma_d = (4.82 \pm 0.44) \times 10^{-9}$. El coeficiente de Pearson arroja un valor de $R^2 = 0.57$ y un p-value = 4.44×10^{-7} .

Los puntos fuera de la bandas de colores muestran que el flujo más prominente que se observa en esta correlación corresponde a la actividad de abril del año 2013 (MJD = 56375) alcanzando un valor de $6.23 \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la banda de rayos γ y de 0.0486 Jy en la banda de óptico. El segundo flujo más prominente corresponde a marzo del 2018 (MJD = 58190) alcanzando un flujo en rayos γ de $4.46 \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mientras que los dos puntos entre los flujos de $(1-2) \times 10^{-2}$ Jy corresponden a la actividad de enero-febrero del 2017 (MJD = 57759-57805) y

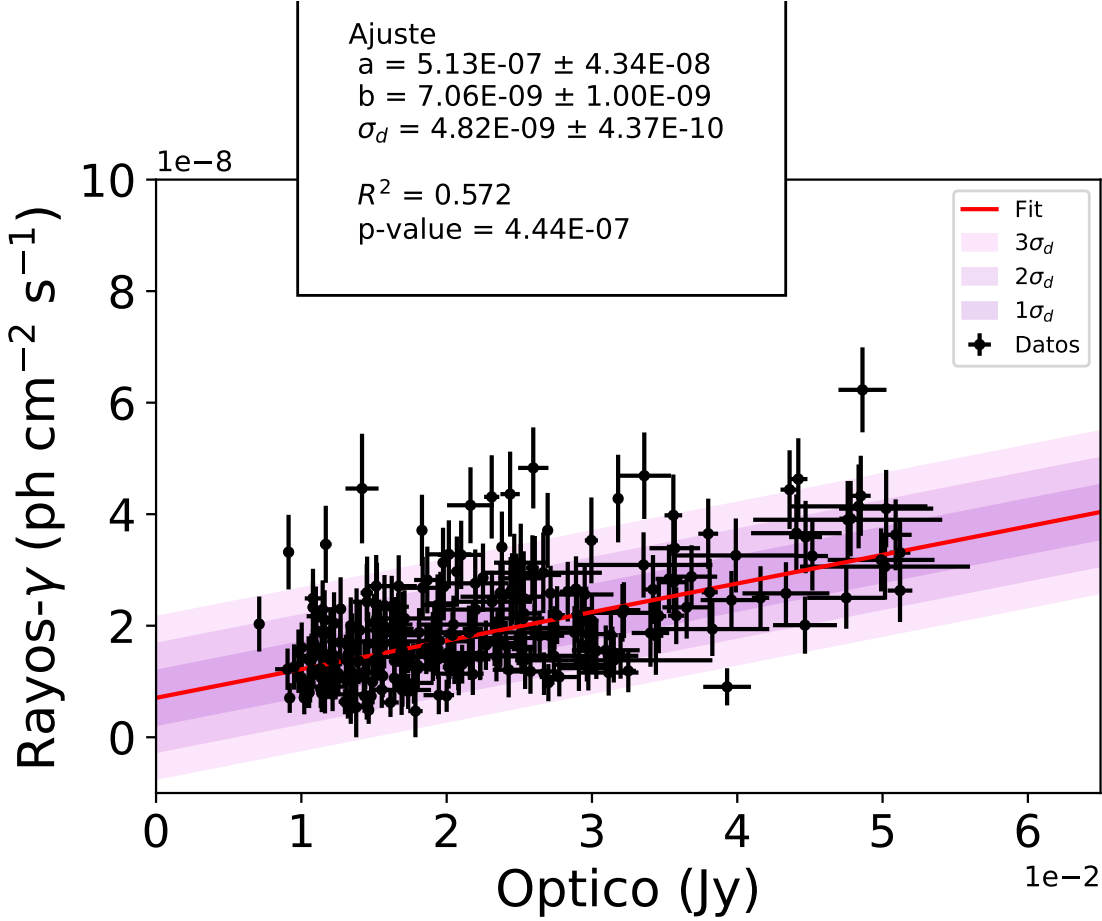


Figura 5.1. Correlación entre la banda de óptico (banda R) y rayos γ (2-300 GeV). Las bandas de colores muestran la desviación de los datos calculada con el método de D'Agostini. El cuadro muestra el valor de los parámetros al ajustar una función lineal.

los flujos entre $(2 - 3) \times 10^{-2}$ Jy corresponden a la actividad de los años 2009 (MJD = 55190) , 2010 (MJD = 55204), 2014 (MJD = 56774) y 2015 (MJD = 57384). Y por último, los puntos entre $(3 - 4) \times 10^{-2}$ Jy corresponden a la actividad de abril del 2014 (MJD = 56753-56756) y el flujo más bajo en rayos γ corresponde a febrero de 2011 (MJD = 55611).

5.0.2. Correlación entre radio y rayos γ

Para la correlación entre la banda de radio (37 GHz) con rayos γ (2-300 GeV) se muestra la figura 5.2 la cual presenta un comportamiento constante. Sin embargo, notamos que los puntos prominentes fuera de las bandas de colores alcanzan flujos cercanos a 1×10^{-7} ph cm^{-2} s^{-1} correspondientes a la fuerte actividad de la ráfaga de 2012 que se observa en la banda amarilla de la figura 4.11.

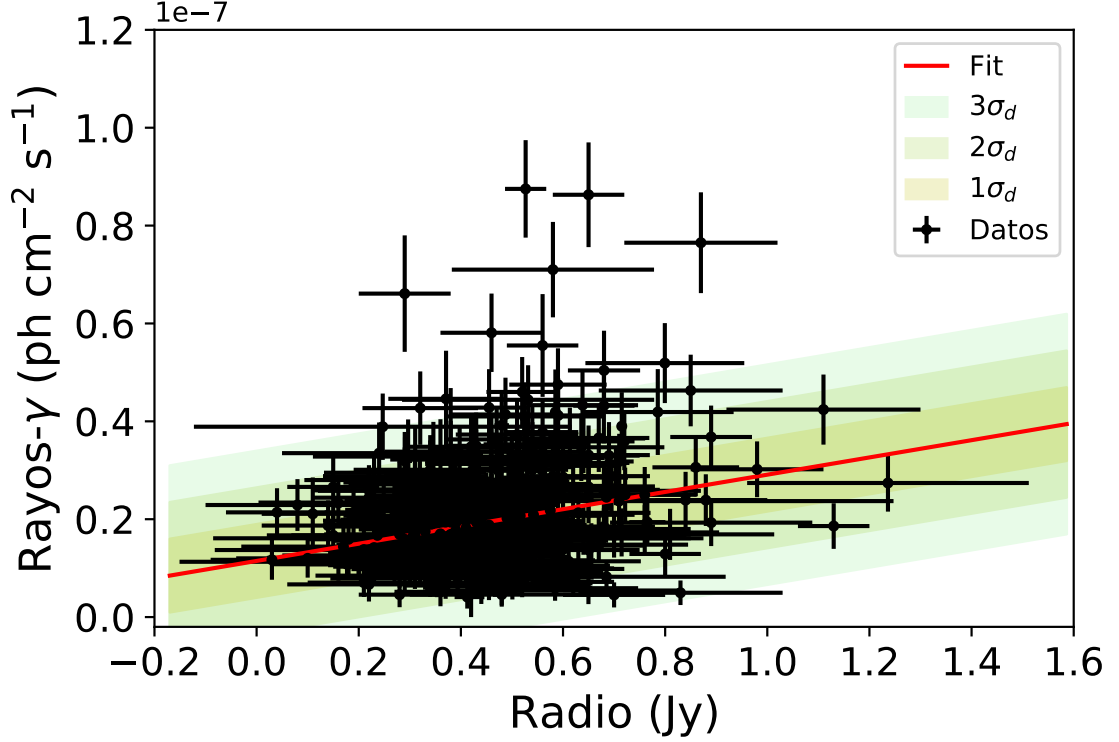


Figura 5.2. Correlación entre la banda de radio (37 GHz) y rayos γ (2-300 GeV). Las bandas de colores muestran la desviación de los datos calculada por el método de D’Agostini.

5.0.3. Correlación entre radio y óptico

La correlación entre la banda de radio (37 GHz) y óptico (banda R) modelada con la función lineal $F_R = aF_O + b$ se muestra la figura 5.3. Los valores obtenidos para los parámetros son: la pendiente $a = 6.16 \pm 0.64$ y la ordenada $b = 0.34 \pm 0.18$. La desviación de D’Agostini tiene un valor de $\sigma_d = (5.85 \pm 0.7) \times 10^{-2}$. El coeficiente de Pearson arroja un valor de $R^2 = 0.56$ y un p-value = 2.63×10^{-6} .

El punto prominente fuera de la banda de colores corresponde a febrero de 2021 (MJD = 59264) con un flujo en radio de 0.89 Jy, mientras el segundo flujo más prominente corresponde a junio de 2013 (MJD = 56457) con un flujo en radio de 0.86 Jy. Mientras el punto correspondiente a abril de 2011 (MJD = 55659) presenta uno de los flujos mas bajos en radio, 0.24 Jy.

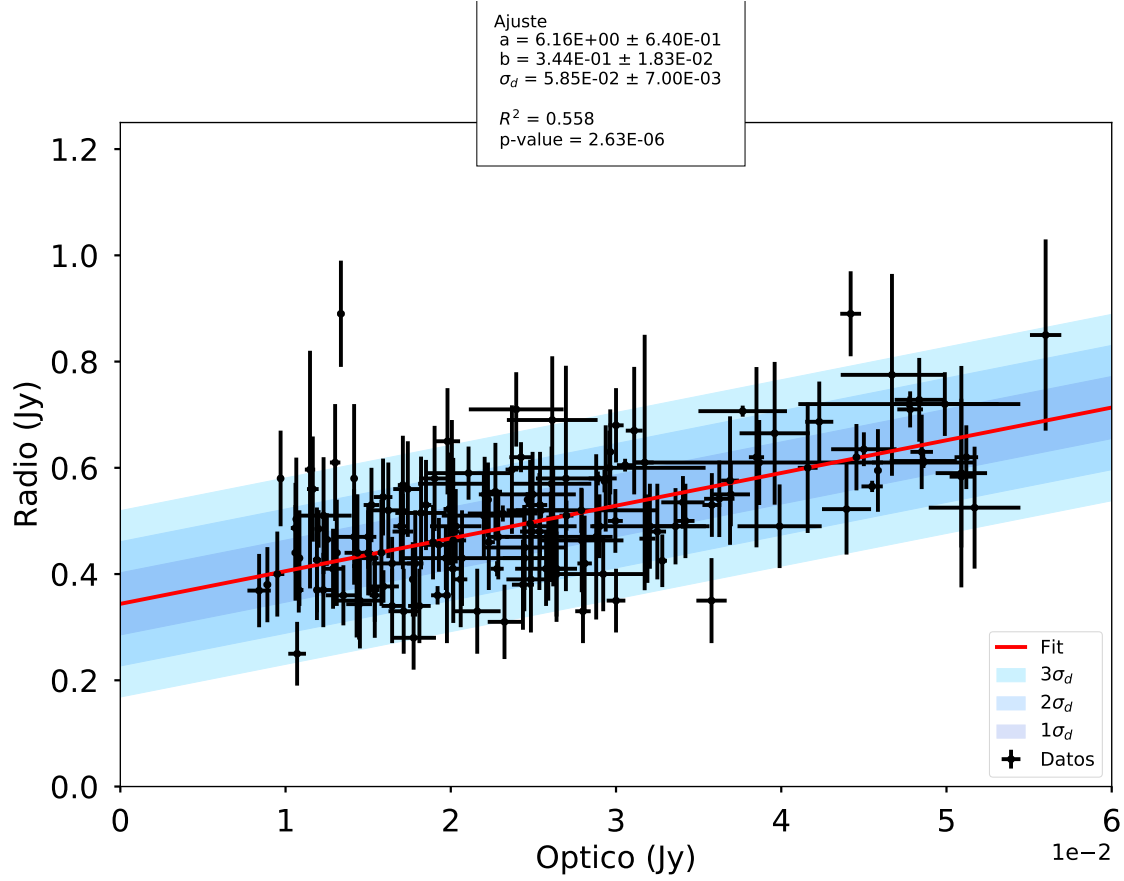


Figura 5.3. Correlación entre la banda de radio y óptico. Las bandas de colores muestran la desviación de los datos calculada por el método de D’Agostini. El cuadro muestra el valor de los parámetros al ajustar una función lineal.

La tabla 5.1 muestra los valores de los parámetros obtenidos al ajustar la función lineal entre las bandas de radio (37GHz), óptico (banda R) y rayos γ (2-300 GeV) a través del método de D’Agostini.

Banda	Función	$a \pm \Delta a$	$b \pm \Delta b$	$\sigma_d \pm \Delta \sigma_d$
O/ γ	L	$(5.13 \pm 0.43) \times 10^{-7}$	$(7.06 \pm 1) \times 10^{-9}$	$(4.82 \pm 0.44) \times 10^{-9}$
R/O	L	6.16 ± 0.64	0.34 ± 0.018	$(5.85 \pm 0.7) \times 10^{-2}$

Tabla 5.1. Tabla con los valores de los parámetros obtenidos al ajustar una función lineal (LP) a las bandas de radio (R), óptico (O) y rayos γ (2-300 GeV) (γ) a través del método de D’Agostini.

5.1. Discusión de Resultados

El estudio realizado en este trabajo se basa en la determinación de la existencia de correlación entre la emisión de radio, óptico y rayos γ durante la campaña observacional del 08/08/2008 al 02/05/2021. La escala temporal utilizada para este análisis es de 1 semana para la emisión entre radio, óptico y rayos γ . Se determinó la existencia de las correlaciones utilizando el método bayesiano D’Agostini para la función lineal. Se utilizó el coeficiente de Pearson y el p-value con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ como herramientas estadísticas para establecer la validez de las correlaciones.

Los resultados muestran que para la emisión entre las bandas de óptico/rayos γ (2-300 GeV) Mrk 421 presenta correlación lineal con una pendiente de $(5.13 \pm 0.43) \times 10^{-7}$, un coeficiente de Pearson de $R^2 = 0.57$ y un p-value de 4.44×10^{-7} . Esto confirma y refuerza los resultados encontrados por (Acciari y cols., 2020a) y (Carnerero y cols., 2017).

Para la banda de radio/rayos γ (2-300 GeV) Mrk 421 muestra un estado alto actividad correspondiente a la ráfaga de 2012, sin embargo el resto de la actividad se mantiene en general constante. Estudios previos hechos por (Lico y cols., 2014) y (Max-Moerbeck y cols., 2014) reportan que la emisión entre radio (15, 24 y 43 GHz) y rayos γ (GeV) están correlacionadas, sin embargo, el nivel de significancia que reportan ambos estudios es $< 3\sigma$. Recientemente (Acciari y cols., 2020a) reporta correlación positiva con significancia de 7σ entre la emisión de radio (37GHz)/rayos γ (GeV) y con una significancia de 11σ para la emisión de radio (15 GHz)/ rayos γ (GeV) durante los años 2012 y 2015, esto podría darnos un indicio que a frecuencias más altas en radio la relación con la emisión en rayos γ podría estar menos correlacionada. Sin embargo, el análisis realizado entre estas bandas no nos permite determinar la existencia de la correlación.

En el caso de la correlación entre la emisión de radio y óptico Mrk 421 presenta una correlación lineal con una pendiente de 6.16 ± 0.64 , un coeficiente de Pearson de $R^2 = 0.56$ y un p-value de 2.63×10^{-6} lo que refuerza lo encontrado en el trabajo de (Tosti y cols., 1998) para los datos reportados del año 1998.

6. CONCLUSIONES

1. Se encontró correlación lineal positiva entre la emisión de óptico (banda R) y rayos γ (2-300 GeV) para los 13 años de observación (2008-2021). Estos resultados sugieren que la emisión entre estas dos bandas pueden ser producidas por la misma población de partículas en el misma región del chorro.
2. La correlación entre la emisión entre radio y rayos γ (2-300 GeV) presenta en general un comportamiento constante para los 13 años de observación (2008-2021). La no existencia de correlación podría dar indicios que las partículas que producen las emisiones observadas en estas bandas provienen de diferentes regiones de la fuente mostrando así una estratificación.
3. La emisión entre radio y óptico muestra un tipo de correlación lineal para los 13 años de observación (2008-2021) lo que nos da indicios que la emisión de estas dos bandas proviene al menos parcialmente de la misma región.
4. Los resultados en este trabajo demuestran la dificultad de determinar la existencia de correlación entre múltiples longitudes de onda y el trabajo necesario para comparar curvas de luz en simultaneidad incluso cuando se utilizan períodos largos de observación.
5. Para estudios futuros es necesario contar con mejores capacidades de sensibilidad en los instrumentos, esto permitiría recompilar mas información y mejorar la precisión en la determinación de correlaciones y por ende entender mejor el comportamiento en los procesos de emisión de la fuente.

7. Anexos

mrk421-13.conf

```
# Default config and validation file for Enrico.
```

```
#
```

```
# Besides providing default options it is also used  
# to check the user config file.
```

```
# Options without default options here must be  
# specified in the user config file
```

```
# Folder where the output will be stored
```

```
out = /home/marisol/lc-mrk421-13-years/datos
```

```
# verbosity
```

```
verbose = yes
```

```
#Overwrite existing output files. Use with caution
```

```
clobber = yes
```

```
#Submit the job to a cluster?
```

```
Submit = no
```

```
[target]
```

```
    name = Mrk421
```

```
    ra = 166.113808
```

```
    dec = 38.20883287
```

```
    redshift = 0.031
```

```
    ebl_model = 4
```

```
    spectrum = PowerLaw
```

```
    # 0=Kneiske, 1=Primack05, 2=Kneiske_HighUV, 3=Stecker05, 4=Franceschini, 5=Finke  
    #6=Gilmore, 10=Dominguez11
```

```
    # full list http://www-glast.stanford.edu/cgi-bin/viewcvs/celestialSources/eblAtten/EblAtten.h?view=markup
```

```
    fit_tau = no
```


[space]

```
xref = 166.113808
yref = 38.20883287
rad = 10.0
binsz = 0.1
coordsys = CEL
proj = AIT
phibins = 0
```

[file]

```
spacecraft = sc.fits
event = foton.es.dat
xml = /home/marisol/lc-mrk421-13-years/datos/Mrk421_PowerLaw_model.xml
tag = LAT_Analysis
# keep track of the parent config during nested operations
#e.g. energy/time bins
parent_config = ""
```

[time]

```
tmin = 239557417.192
tmax = 641663345.192
file = ""
type = MET
```

[energy]

```
emin = 2000.0
emax = 300000.0
enumbins_per_decade = 10
decorrelation_energy = no
```

[event]

```
irfs = CALDB
evclass = 128
evtype = 3
```

[analysis]

```
zmax = 100
# General analysis options
```

```

likelihood = unbinned
# Correct energy dispersion?
EnergyDispersion = yes
ComputeDiffrrsp = yes
roicut = no
# cuts applied during the first coarse bin selection:
evtroicuts = yes
evttimecuts = yes
filter = DATA_QUAL>0&&LAT_CONFIG==1
# should we keep the srcmaps for all sources in the srcMap file?
# this should speed up future fits, at the cost of disk space.
keep_all_srcmaps = no

```

[environ]

```

# Analysis environment configuration
# Can also be done via shell environment variables
FERMI_DATA_DIR = ""
FERMI_CATALOG_DIR = ""
FERMI_CATALOG = ""
FERMI_DIFFUSE_DIR = ""
FERMI_PREPROCESSED_DIR = ""

```

[fitting]

```

optimizer = MINUIT
ftol = 1e-06
# if source_ts < min_source_TS in the fit, the source is removed from the model
min_source_TS = 1.0

```

[model]

```

# The following options determine the xml model
diffuse_gal_dir = ""
diffuse_iso_dir = ""
diffuse_gal = ""
diffuse_iso = ""
# user points sources for diffuse catalog sources
# freeze spectral parameters for weak and far away sources:
min_significance_catalog = 4.0
min_significance_free = 25.0

```

```

max_radius = 5.0
# Add all source in a radius of analyse ROI + this radius
max_roi = 10.0
# Add gaussian noise to the spectral parameters of free sources
may help during the fit
parameters_noise = 0.0

```

[Spectrum]

```

#Generates fits files or not?
FitsGeneration = yes
#Generates plots SED, model map
ResultPlots = yes
# Plot update the parent config related plots during energy bin production
ResultParentPlots = no
#Freeze the spectral index of the source. Has no implication if 0
#Left free to vary
FrozenSpectralIndex = 0.0

```

[UpperLimit]

```

#Assumed Spectral index
SpectralIndex = 2.0
# UL method could be Profile or Integral provided by the fermi collaboration.
#Poisson is base on the Feldman-Cousins method for low signal. Only 95 % yet
#available
Method = Profile
envelope = no
#Compute an UL if the TS of the sources is <TSlimit
TSlimit = 25.0
# Confidence level for the UL computation
cl = 0.95

```

[LightCurve]

```

#Generates fits files or not?
FitsGeneration = yes
#Number of points for the LC
NLCbin = 1551
#Index for the power law. Left free to vary if 0
SpectralIndex = 1.8

```

```

MakeConfFile = yes
#Bayesian blocks
BayesianBlocks = no
#Compute Variability index as in the 2FGL.
ComputeVarIndex = yes
#Compute an UL if the TS of the sources is <TSLightCurve
TSLightCurve = 9.0
#Generates control plots
DiagnosticPlots = yes
# Plot update the parent config related plots during time bin production
DiagnosticParentPlots = no

```

[BayesianBlocks]

```

#Generates fits files or not?
FitsGeneration = yes
#False alarm probability
p0 = 0.01
#Index for the power law. Left free to vary if 0
SpectralIndex = 2.0
MakeConfFile = yes
#Compute an UL if the TS of the sources is <TSLightCurve
TSLightCurve = 9.0
#Generates control plots
DiagnosticPlots = yes
# Plot update the parent config related plots during time bin production
DiagnosticParentPlots = no

```

[FoldedLC]

```

#Number of bins for the orbitally folded LC
NLCbin = 10
#Epoch of phase=0 in MJD, equal to tmin is 0
epoch = 0.0
#Orbital period in days
Period = 0.0

```

[AppLC]

```

#Generates fits files or not?

```

```

FitsGeneration = yes
#Spectral index for the exposure calculation
index = 2.0
#Apperture radius
rad = 1.0
#Number of bins
NLCbin = 10
#bin form data or frozen bin size
binsFromData = no
#minimum energy for the apperture lightcurve, if -1 use the one define in energy
#section
emin = -1.0
emax = -1.0

```

[Ebin]

```

#Generates fits files or not?
FitsGeneration = yes
NumEnergyBins = 0
#Compute an UL if the TS of the sources is <TSEnergyBins
TSEnergyBins = 9.0
# How to generate the Ebins
# - logE: log scaled bins
# - TS: similar TS per bin
# - mix: half-way between log and TS.
# - [ E1, E2, E3, E4, ..., EN ]: custom binning.
# - default is logE
DistEbins = logE

```

[TSMaP]

```

#Re-fit before computing the TS map
Re-Fit = no
#Numbers of pixel in x and y
npix = 10
#Remove or not the target from the model
RemoveTarget = yes
#Generate the TS map pixel by pixel or by grouping the pixels by row.
#reduce the numbers of jobs but each job is longer
method = row

```

```

[findsrc]
    #Generates fits files or not?
    FitsGeneration = yes
    #Reoptimize before
    Refit = yes

[srcprob]
    #Generates fits files or not?
    FitsGeneration = yes
    #radius for the computation
    rad = 1.0
    # list of sources
    srclist = ""
    # number of photons to print
    numberPhoton = 10

[Contours]
    parname1 = Prefactor
    parname2 = Index

[ComponentAnalysis]
    # EUnBinned to the energy MeV where
    # binned and unbinned analysis should be split
    # disabled if -1
    EUnBinned = -1.0
    # Divide the analysis in FrontBack classes
    FrontBack = no
    # Divide the analysis in PSF classes
    PSF = no
    # Divide the analysis in EDISP classes
    EDISP = no
    # Divide the analysis in EDISP classes
    FGL4 = no

```

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

Abdo, A. A., Ackermann, M., Agudo, I., Ajello, M., Aller, H. D., Aller, M. F., ... Ziegler, M. (2010, junio). The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars. *The Astrophysical Journal*, 716(1), 30-70. doi: 10.1088/0004-637x/716/1/30

Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., Antolini, E., Atwood, W. B., ... Ziegler, M. (2010, mayo). The First Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope. *The Astrophysical Journal*, 715(1), 429-457. doi: 10.1088/0004-637X/715/1/429

Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., ... Fermi/LAT Collaboration (2009, julio). Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-Ray Source List. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 183(1), 46-66. doi: 10.1088/0067-0049/183/1/46

Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., ... and, M. Z. (2009, jun). FERMI /LARGE AREA TELESCOPE BRIGHT GAMMA-RAY SOURCE LIST. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 183(1), 46-66. Descargado de <https://doi.org/10.1088/0067-0049/183/1/46> doi: 10.1088/0067-0049/183/1/46

Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., ... Zook, A. (2011, agosto). Fermi Large Area Telescope Observations of Markarian 421: The Missing Piece of its Spectral Energy Distribution. *The Astrophysical Journal*, 736(2), 131. doi: 10.1088/0004-637X/736/2/131

Abdollahi, S., Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., ... Zaharijas, G. (2020, mar). Fermi large area telescope fourth source

catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 247(1), 33. Descargado de <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6bcb> doi: 10.3847/1538-4365/ab6bcb

Abeysekara, A. U., Benbow, W., Bird, R., Brill, A., Brose, R., Buchovecky, M., ... et al. (2020, Feb). The great markarian 421 flare of 2010 february: Multiwavelength variability and correlation studies. *The Astrophysical Journal*, 890(2), 97. Descargado de <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab6612> doi: 10.3847/1538-4357/ab6612

Acciari, V., Arlen, T., Aune, T., Benbow, W., Bird, R., Bouvier, A., ... Wissel, S. (2014a). Observation of markarian 421 in tev gamma rays over a 14-year time span. *Astroparticle Physics*, 54, 1-10. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650513001552> doi: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.10.004>

Acciari, V., Arlen, T., Aune, T., Benbow, W., Bird, R., Bouvier, A., ... et al. (2014b, Feb). Observation of markarian 421 in tev gamma rays over a 14-year time span. *Astroparticle Physics*, 54, 1-10. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.10.004> doi: 10.1016/j.astropartphys.2013.10.004

Acciari, V. A., Aliu, E., Arlen, T., Aune, T., Beilicke, M., Benbow, W., ... Aller, M. F. (2011, septiembre). TeV and Multi-wavelength Observations of Mrk 421 in 2006-2008. *The Astrophysical Journal*, 738(1), 25. doi: 10.1088/0004-637X/738/1/25

Acciari, V. A., Aliu, E., Arlen, T., Aune, T., Beilicke, M., Benbow, W., ... Aller, M. F. (2011, aug). TeV AND MULTI-WAVELENGTH OBSERVATIONS OF mrk 421 IN 2006-2008. *The Astrophysical Journal*, 738(1), 25. Descargado de <https://doi.org/10.1088/0004-637x/738/1/25> doi: 10.1088/0004-637x/738/1/25

Acciari, V. A., Aliu, E., Aune, T., Beilicke, M., Benbow, W., Böttcher, M., ... MAGIC Collaboration (2009, septiembre). Simultaneous Multiwavelength Observations of Markarian 421 During Outburst. *The Astrophysical Journal*, 703(1), 169-178. doi: 10.1088/0004-637X/703/1/169

Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., ... Reinthal, R. (2020, junio). Unraveling the Complex Behavior of Mrk 421 with

- Simultaneous X-Ray and VHE Observations during an Extreme Flaring Activity in 2013 April. *Astrophysical Journal, Supplement*, 248(2), 29. doi: 10.3847/1538-4365/ab89b5
- Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Asano, K., Babić, A., Banerjee, B., ... et al. (2020a, Dec). Multiwavelength variability and correlation studies of mrk 421 during historically low x-ray and -ray activity in 2015–2016. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa3727> doi: 10.1093/mnras/staa3727
- Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Asano, K., Babić, A., Banerjee, B., ... et al. (2020b, Dec). Multiwavelength variability and correlation studies of mrk 421 during historically low x-ray and -ray activity in 2015–2016. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa3727> doi: 10.1093/mnras/staa3727
- Ackermann, M., Ajello, M., Allafort, A., Angelakis, E., Axelsson, M., Baldini, L., ... et al. (2011, Oct). The radio/gamma-ray connection in active galactic nuclei in the era of the fermi large area telescope. *The Astrophysical Journal*, 741(1), 30. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/741/1/30> doi: 10.1088/0004-637X/741/1/30
- Aharonian, F., Akhperjanian, A., Beilicke, M., Bernlöhr, K., Börst, H., Bojahr, H., ... Remillard, R. A. (2002, octubre). Variations of the TeV energy spectrum at different flux levels of Mkn 421 observed with the HEGRA system of Cherenkov telescopes. *Astronomy & Astrophysics*, 393, 89-99. doi: 10.1051/0004-6361:20021005
- Aharonian, F., Akhperjanian, A., Beilicke, M., Bernlöhr, K., Börst, H. G., Bojahr, H., ... Wittek, W. (2003, noviembre). TeV gamma -ray light curve and energy spectrum of Mrk 421 during 2001 flare as measured with HEGRA CT1. *Astronomy & Astrophysics*, 410, 813-821. doi: 10.1051/0004-6361:20031265
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Aye, K. M., Bazer-Bachi, A. R., Beilicke, M., Benbow, W., ... Wagner, S. J. (2005, julio). Observations of Mkn 421 in 2004 with HESS at large zenith angles. *Astronomy & Astrophysics*, 437(1), 95-99. doi: 10.1051/0004-6361:20053050
- Ahnen, M. L., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Antoranz, P., Babic, A., Banerjee, B., ... et al. (2016, Sep). Long-term multi-wavelength variability and correlation study of markarian 421 from 2007 to 2009. *Astronomy Astrophysics*, 593,

- A91. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201628447> doi: 10.1051/0004-6361/201628447
- Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., Antoranz, P., Armada, A., Asensio, M., ... Zapatero, J. (2007, julio). Observations of Markarian 421 with the MAGIC Telescope. *The Astrophysical Journal*, 663(1), 125-138. doi: 10.1086/518221
- Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L., Antoranz, P., Babic, A., Bangale, P., ... et al. (2015b, Mar). Measurement of the crab nebula spectrum over three decades in energy with the magic telescopes. *Journal of High Energy Astrophysics*, 5-6, 30-38. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jheap.2015.01.002> doi: 10.1016/j.jheap.2015.01.002
- Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Antoranz, P., Babic, A., Bangale, P., ... et al. (2015a, Apr). The 2009 multiwavelength campaign on mrk 421: Variability and correlation studies. *Astronomy Astrophysics*, 576, A126. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201424216> doi: 10.1051/0004-6361/201424216
- Antonucci, R. (1993, enero). Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31, 473-521. doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353
- Antonucci, R. R. J., y Miller, J. S. (1985, octubre). Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. *The Astrophysical Journal*, 297, 621-632. doi: 10.1086/163559
- Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., ... Ziegler, M. (2009a, junio). The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2), 1071-1102. doi: 10.1088/0004-637X/697/2/1071
- Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., ... Ziegler, M. (2009b, junio). The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2), 1071-1102. doi: 10.1088/0004-637X/697/2/1071
- Baade, W., y Minkowski, R. (1954, enero). Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis A. *The Astrophysical Journal*, 119, 206. doi: 10.1086/145812

- Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Korista, K. T., Hamann, F., y Dietrich, M. (2003, enero). The Mass of Quasar Broad Emission Line Regions. *The Astrophysical Journal*, 582(2), 590-595. doi: 10.1086/344788
- Baloković, M., Paneque, D., Madejski, G., Furniss, A., Chiang, J., Ajello, M., ... et al. (2016, Mar). Multiwavelength study of quiescent states of mrk 421 with unprecedented hard x-ray coverage provided by *Swift* in 2013. *The Astrophysical Journal*, 819(2), 156. Descargado de <http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/819/2/156> doi: 10.3847/0004-637X/819/2/156
- Beckmann, V., y Shrader, C. R. (2012). *Active Galactic Nuclei*.
- Beckmann, V., y Shrader, C. R. (2013). *The agn phenomenon: open issues*.
- Beskrovnaya, N. G., Ikhsanov, N. R., Bruch, A., y Shakhovskoy, N. M. (1995, enero). Measurement of Circular Polarization and UBVPJ photometry of AR AQR. En D. A. H. Buckley y B. Warner (Eds.), *Magnetic cataclysmic variables* (Vol. 85, p. 364).
- Blandford, R. D. (1996, enero). Present and Future Blazar Variability. En H. R. Miller, J. R. Webb, y J. C. Noble (Eds.), *Blazar continuum variability* (Vol. 110, p. 475).
- Blandford, R. D., y Znajek, R. L. (1977, 07). Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 179(3), 433-456. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/179.3.433> doi: 10.1093/mnras/179.3.433
- Błażejowski, M., Blaylock, G., Bond, I. H., Bradbury, S. M., Buckley, J. H., Carter-Lewis, D. A., ... Jung, I. (2005, septiembre). A Multiwavelength View of the TeV Blazar Markarian 421: Correlated Variability, Flaring, and Spectral Evolution. *The Astrophysical Journal*, 630(1), 130-141. doi: 10.1086/431925
- Boettcher, M., Harris, D., y Krawczynski, H. (2012). *Relativistic jets from active galactic nuclei*. Wiley. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=RH1805vklT0C>
- Bond, H. E., Henden, A., Levay, Z. G., Panagia, N., Sparks, W. B., Starrfield, S., ... Munari, U. (2003, mar). An energetic stellar outburst accompanied by circumstellar light echoes. *Nature*, 422(6930), 405-408. Descargado de <https://doi.org/10.1038/nature01508> doi: 10.1038/nature01508

- Buckley, J. H., Akerlof, C. W., Biller, S., Carter-Lewis, D. A., Catanese, M., Cawley, M. F., ... Zweerink, J. (1996, noviembre). Gamma-Ray Variability of the BL Lacertae Object Markarian 421. *The Astrophysical Journal*, 472, L9. doi: 10.1086/310352
- Böttcher, M., Reimer, A., Sweeney, K., y Prakash, A. (2013, apr). Leptonic and hadronic modeling off ermi detected blazars. *The Astrophysical Journal*, 768(1), 54. Descargado de <https://doi.org/10.1088/0004-637x/768/1/54> doi: 10.1088/0004-637x/768/1/54
- Cannon, A. L. (2011). *A comparison study of intermediate frequency bl lacs and high frequency bl lacs detected by veritas and fermi lat* (Tesis Doctoral no publicada). University College Dublin.
- Cao, G., y Wang, J. (2013, octubre). Particle Acceleration and Emission Processes in Mrk 421. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65, 109. doi: 10.1093/pasj/65.5.109
- Carnerero, M. I., Raiteri, C. M., Villata, M., Acosta-Pulido, J. A., Larionov, V. M., Smith, P. S., ... Vince, O. (2017, 08). Dissecting the long-term emission behaviour of the BL Lac object Mrk 421. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472(4), 3789-3804. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2185> doi: 10.1093/mnras/stx2185
- Carroll, B., y Ostlie, D. (2017). *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=PY0wDwAAQBAJ>
- Cerruti, M. (2020, Feb). Neutrinos from blazars. *Journal of Physics: Conference Series*, 1468, 012094. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012094> doi: 10.1088/1742-6596/1468/1/012094
- Cooray, A. (2016, 03). Extragalactic background light: Measurements and applications. *Royal Society Open Science*, 3, 150555. doi: 10.1098/rsos.150555
- Coughlin, E. R., y Begelman, M. C. (2020, Oct). Structured, relativistic jets driven by radiation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(3), 3158-3177. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/staa3026> doi: 10.1093/mnras/staa3026

- Curtis, H. D. (1918, enero). Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector. *Publications of Lick Observatory*, 13, 9-42.
- D'Agostini, G. (2005, noviembre). Fits, and especially linear fits, with errors on both axes, extra variance of the data points and other complications. *arXiv e-prints*, physics/0511182.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, J., Herold G., Buta, R. J., Paturel, G., y Fouque, P. (1991). *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*.
- Diltz, C. S., y Boettcher, M. (2014, agosto). Time Dependent Leptonic Modeling of Fermi II Processes in the Jets of Flat Spectrum Radio Quasars. En *Aas/high energy astrophysics division #14* (Vol. 14, p. 106.23).
- Domínguez, A., Primack, J. R., Rosario, D. J., Prada, F., Gilmore, R. C., Faber, S. M., ... Cooper, M. C. (2011, febrero). Extragalactic background light inferred from AEGIS galaxy-SED-type fractions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(4), 2556-2578. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17631.x
- Domínguez, A., Primack, J. R., Rosario, D. J., Prada, F., Gilmore, R. C., Faber, S. M., ... Cooper, M. C. (2011, 01). Extragalactic background light inferred from AEGIS galaxy-SED-type fractions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(4), 2556-2578. Descargado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17631.x> doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17631.x
- Donnarumma, I., Vittorini, V., Vercellone, S., del Monte, E., Feroci, M., D'Ammando, F., ... Zitzer, B. (2009, enero). The June 2008 Flare of Markarian 421 from Optical to TeV Energies. *The Astrophysical Journal*, 691(1), L13-L19. doi: 10.1088/0004-637X/691/1/L13
- Donnarumma, I., Vittorini, V., Vercellone, S., Monte, E. D., Feroci, M., D'Ammando, F., ... et al. (2008, Dec). The June 2008 flare of Markarian 421 from optical to TeV energies. *The Astrophysical Journal*, 691(1), L13-L19. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/L13> doi: 10.1088/0004-637x/691/1/L13
- Duffett-Smith, P., y Zwart, J. (2011, 01). Practical astronomy with your calculator or spreadsheet. *Practical Astronomy with your Calculator or Spreadsheet by Peter Duffett-Smith and Jonathan Zwart. Cambridge University Press, 2010. ISBN: 9780521146548*. doi: 10.1017/CBO9780511861161

- Dulwich, F., Worrall, D. M., Birkinshaw, M., Padgett, C. A., y Perlman, E. S. (2009, 09). The magnetic field and geometry of the oblique shock in the jet of 3C 346. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(3), 1207-1216. Descargado de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15211.x> doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15211.x
- Emmanoulopoulos, D., McHardy, I. M., y Papadakis, I. E. (2013, 06). Generating artificial light curves: revisited and updated. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(2), 907-927. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/stt764> doi: 10.1093/mnras/stt764
- Fan, J. H., Kurtanidze, O., Liu, Y., Richter, G. M., Chanishvili, R., y Yuan, Y. H. (2014, agosto). Optical Monitoring of Two Brightest Nearby Quasars, PHL 1811 and 3C 273. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 213(2), 26. doi: 10.1088/0067-0049/213/2/26
- Fanaroff, B. L., y Riley, J. M. (1974, 04). The Morphology of Extragalactic Radio Sources of High and Low Luminosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167(1), 31P-36P. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/167.1.31P> doi: 10.1093/mnras/167.1.31P
- Fath, E. A. (1909, junio). The Spectra of Some Spiral Nebulæ and Globular Star Clusters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 21(126), 138-143. doi: 10.1086/121907
- Finazzo, S. I., Critelli, R., Rougemont, R., y Noronha, J. (2016, Sep). Momentum transport in strongly coupled anisotropic plasmas in the presence of strong magnetic fields. *Phys. Rev. D*, 94, 054020. Descargado de <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.94.054020> doi: 10.1103/PhysRevD.94.054020
- Finke, J. D., Razzaque, S., y Dermer, C. D. (2010a). Modeling the Extragalactic Background Light from Stars and Dust. *Astrophys. J.*, 712, 238-249. doi: 10.1088/0004-637X/712/1/238
- Finke, J. D., Razzaque, S., y Dermer, C. D. (2010b, feb). MODELING THE EXTRAGALACTIC BACKGROUND LIGHT FROM STARS AND DUST. *The Astrophysical Journal*, 712(1), 238-249. Descargado de <https://doi.org/10.1088%2F0004-637x%2F712%2F1%2F238> doi: 10.1088/0004-637x/712/1/238

- Fossati, G., Buckley, J. H., Bond, I. H., Bradbury, S. M., Carter-Lewis, D. A., Chow, Y. C. K., ... Weekes, T. C. (2008, abril). Multiwavelength Observations of Markarian 421 in 2001 March: An Unprecedented View on the X-Ray/TeV Correlated Variability. *The Astrophysical Journal*, 677(2), 906-925. doi: 10.1086/527311
- Fraix-Burnet, D. (2002, enero). Linear polarization and composition of VLBI jets. *Astronomy and Astrophysics*, 381, 374-377. doi: 10.1051/0004-6361:20011569
- Franceschini, A., Rodighiero, G., y Vaccari, M. (2008). Extragalactic optical-infrared background radiation, its time evolution and the cosmic photon-photon opacity. *Astronomy and Astrophysics*, 487(3), 837-852. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809691> doi: 10.1051/0004-6361:200809691
- Galante, C. A. . (2021). *Investigación sobre la variabilidad de blazares en radio* (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/126216>.
- Gaskell, C. M. (2009, Jul). What broad emission lines tell us about how active galactic nuclei work. *New Astronomy Reviews*, 53(7-10), 140–148. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.newar.2009.09.006> doi: 10.1016/j.newar.2009.09.006
- Ghisellini, G. (2013). Radiative processes in high energy astrophysics. *Lecture Notes in Physics*. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00612-3> doi: 10.1007/978-3-319-00612-3
- Ghisellini, G., y Madau, P. (1996, 05). On the origin of the -ray emission in blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 280(1), 67-76. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/280.1.67> doi: 10.1093/mnras/280.1.67
- Gilmore, R. C., Somerville, R. S., Primack, J. R., y Domínguez, A. (2012, Apr). Semi-analytic modelling of the extragalactic background light and consequences for extragalactic gamma-ray spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422(4), 3189–3207. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20841.x> doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.20841.x
- Ginzburg, V. L., y Syrovatsk, S. I. (1969). Developments in the theory of synchrotron radiation and its reabsorption. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*

- sics*, 7(1), 375-420. Descargado de <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.07.090169.002111> doi: 10.1146/annurev.aa.07.090169.002111
- González, M. M., Patricelli, B., Fraija, N., y García-González, J. A. (2019, abril). Reconcilement of VHE γ -ray/X-ray correlation studies in Mrk 421 and breakdown at high fluxes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(3), 2944-2953. doi: 10.1093/mnras/stz109
- Hauser, M. G., y Dwek, E. (2001). The cosmic infrared background: Measurements and implications. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39(1), 249-307. Descargado de <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.39.1.249> doi: 10.1146/annurev.astro.39.1.249
- Hazard, C., Mackey, M. B., y Shimmings, A. J. (1963, marzo). Investigation of the Radio Source 3C 273 By The Method of Lunar Occultations. *Nature*, 197(4872), 1037-1039. doi: 10.1038/1971037a0
- H.E.S.S. Collaboration, Abdalla, H., Abramowski, A., Aharonian, F., Ait Benkhali, F., Akhperjanian, A. G., ... Zywucka, N. (2017). Measurement of the ebl spectral energy distribution using the vhe spectra of h.e.s.s. blazars. *Astronomy & Astrophysics*, 606, A59. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731200> doi: 10.1051/0004-6361/201731200
- Horan, D., Acciari, V. A., Bradbury, S. M., Buckley, J. H., Bugaev, V., Byrum, K. L., ... Walters, R. (2009, abril). Multiwavelength Observations of Markarian 421 in 2005-2006. *The Astrophysical Journal*, 695(1), 596-618. doi: 10.1088/0004-637X/695/1/596
- Hovatta, T., Petropoulou, M., Richards, J. L., Giannios, D., Wiik, K., Baloković, M., ... Readhead, A. C. S. (2015, abril). A combined radio and GeV γ -ray view of the 2012 and 2013 flares of Mrk 421. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448(4), 3121-3131. doi: 10.1093/mnras/stv220
- Hoyle, F., y Fowler, W. A. (1962, 08). On the Nature of Strong Radio Sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 125(2), 169-176. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/125.2.169> doi: 10.1093/mnras/125.2.169
- Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M. A. R., Makiya, R., Niino, Y., y Totani, T. (2013, mayo). Extragalactic Background Light from Hierarchical Galaxy Formation:

- Gamma-Ray Attenuation up to the Epoch of Cosmic Reionization and the First Stars. *The Astrophysical Journal*, 768(2), 197. doi: 10.1088/0004-637X/768/2/197
- Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., Shaffer, D. B., y Green, R. (1989, octubre). VLA Observations of Objects in the Palomar Bright Quasar Survey. *Astronomical Journal*, 98, 1195. doi: 10.1086/115207
- Kembhavi, A. K., y Narlikar, J. V. (1999). *Quasars and active galactic nuclei : an introduction*.
- Kneiske, T. M., y Dole, H. (2010). A lower-limit flux for the extragalactic background light. *Astronomy and Astrophysics*, 515, A19. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912000> doi: 10.1051/0004-6361/200912000
- Krennrich, F., Bond, I. H., Bradbury, S. M., Buckley, J. H., Carter-Lewis, D. A., Cui, W., ... Weekes, T. C. (2002, agosto). Discovery of Spectral Variability of Markarian 421 at TeV Energies. *The Astrophysical journal*, 575(1), L9-L13. doi: 10.1086/342700
- Larionov, V. M., Jorstad, S. G., Marscher, A. P., Raiteri, C. M., Villata, M., Agudo, I., ... Yuan, W. (2008, diciembre). Results of WEBT, VLBA and RXTE monitoring of 3C 279 during 2006-2007. *The Astrophysical Journal*, 492(2), 389-400. doi: 10.1051/0004-6361:200810937
- Lico, R., Giroletti, M., Orienti, M., Gómez, J. L., Casadio, C., D'Ammando, F., ... Sokolovsky, K. V. (2014, noviembre). Very Long Baseline polarimetry and the γ -ray connection in Markarian 421 during the broadband campaign in 2011. *Astronomy & Astrophysics*, 571, A54. doi: 10.1051/0004-6361/201424341
- Longair, M. (2011). *High energy astrophysics*. Cambridge University Press. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=KGe3FVbDNk4C>
- Macomb, D. J., Akerlof, C. W., Aller, H. D., Aller, M. F., Bertsch, D. L., Bruhweiler, F., ... Zweerink, J. (1995a, agosto). Multiwavelength Observations of Markarian 421 During a TeV/X-Ray Flare. *The Astrophysical journal*, 449, L99. doi: 10.1086/309646
- Macomb, D. J., Akerlof, C. W., Aller, H. D., Aller, M. F., Bertsch, D. L., Bruhweiler, F., ... Zweerink, J. (1995b, agosto). Multiwavelength Observations of Markarian

- 421 During a TeV/X-Ray Flare. *The Astrophysical journal*, 449, L99. doi: 10.1086/309646
- Mannheim, K. (1993, marzo). The proton blazar. *Astronomy and Astrophysics*, 269, 67-76.
- Mannheim, K., y Biermann, P. L. (1992, enero). Gamma-ray flaring of 3C 279 : a proton-initiated cascade in the jet ? *Astronomy & Astrophysics*, 253, L21-L24.
- Marscher, A. P., Jorstad, S. G., D’Arcangelo, F. D., Smith, P. S., Williams, G. G., Larionov, V. M., . . . Ryle, W. T. (2008, abril). The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- γ -ray outburst. *Nature*, 452(7190), 966-969. doi: 10.1038/nature06895
- Mastichiadis, A., y Kirk, J. G. (1996). *Variability in the synchrotron self-compton model of blazar emission*.
- Mastichiadis, A., y Kirk, J. G. (1997, abril). Variability in the synchrotron self-Compton model of blazar emission. *Astronomy & Astrophysics*, 320, 19-25.
- Max-Moerbeck, W., Hovatta, T., Richards, J. L., King, O. G., Pearson, T. J., Readhead, A. C. S., . . . Zensus, J. A. (2014, 09). Time correlation between the radio and gamma-ray activity in blazars and the production site of the gamma-ray emission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(1), 428-436. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1749> doi: 10.1093/mnras/stu1749
- Meliani, Z., Sauty, C., Tsinganos, K., Trussoni, E., y Cayatte, V. (2010). Relativistic spine jets from schwarzschild black holes - application to agn radio-loud sources. *Astronomy and Astrophysics*, 521, A67. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912920> doi: 10.1051/0004-6361/200912920
- Michelson, P. F., Atwood, W. B., y Ritz, S. (2010, julio). Fermi Gamma-ray Space Telescope: high-energy results from the first year. *Reports on Progress in Physics*, 73(7), 074901. doi: 10.1088/0034-4885/73/7/074901
- Michelson, P. F., Atwood, W. B., y Ritz, S. (2010, Jun). Fermi gamma-ray space telescope: high-energy results from the first year. *Reports on Progress in Physics*, 73(7), 074901. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/73/7/074901> doi: 10.1088/0034-4885/73/7/074901

- Mortlock, D. J., Warren, S. J., Venemans, B. P., Patel, M., Hewett, P. C., McMahon, R. G., ... et al. (2011, Jun). A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$. *Nature*, 474(7353), 616–619. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1038/nature10159> doi: 10.1038/nature10159
- Muriel, H., Donzelli, C., Rovero, A. C., y Pichel, A. (2015). The bl-lac gamma-ray blazar pks 0447-439 as a probable member of a group of galaxies at $z = 0.343$. *Astronomy and Astrophysics*, 574, A101. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425050> doi: 10.1051/0004-6361/201425050
- Nalewajko, K. (2013, 01). The brightest gamma-ray flares of blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430(2), 1324-1333. Descargado de <https://doi.org/10.1093/mnras/sts711> doi: 10.1093/mnras/sts711
- Netzer, H. (2013). *The physics and evolution of active galactic nuclei*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781139109291
- Nilsson, K., Lindfors, E., Takalo, L. O., Reinthal, R., Berdyugin, A., Sillanpää, A., ... Zaprudin, B. (2018, diciembre). Long-term optical monitoring of TeV emitting blazars. I. Data analysis. *Astronomy & Astrophysics*, 620, A185. doi: 10.1051/0004-6361/201833621
- Osorio, J. M. . (2022). *Estudio de la correlación entre rayos-x y rayos- de tev en blazares* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J., De Marco, B., Giommi, P., Hickox, R. C., ... et al. (2017, Aug). Active galactic nuclei: what's in a name? *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25(1). Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/s00159-017-0102-9> doi: 10.1007/s00159-017-0102-9
- Peceur, N. W., Taylor, A. R., y Kraan-Korteweg, R. C. (2020, junio). The optical polarization of the blazar PKS 2155-304 during an optical flare in 2010. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 495(2), 2162-2169. doi: 10.1093/mnras/staa1333
- Planck Collaboration, Akrami, Y., Argüeso, F., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., ... Zonca, A. (2018, noviembre). Planck intermediate results. LIV. The Planck multi-frequency catalogue of non-thermal sources. *Astronomy & Astrophysics*, 619, A94. doi: 10.1051/0004-6361/201832888

- Punch, M., Akerlof, C. W., Cawley, M. F., Chantell, M., Fegan, D. J., Fennell, S., ... Wilson, C. (1992, agosto). Detection of TeV photons from the active galaxy Markarian 421. *Nature*, *358*(6386), 477-478. doi: 10.1038/358477a0
- Rajput, Bhoomika, Stalin, C. S., y Rakshit, Suvendu. (2020). Long term variability of blazars. *Astronomy and Astrophysics*, *634*, A80. Descargado de <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936769> doi: 10.1051/0004-6361/201936769
- Rebillot, P., Badran, H., Blaylock, G., Bradbury, S., Buckley, J., Carter-Lewis, D., ... Sillanpaa, A. (2008, 12). Multiwavelength observations of the blazar markarian 421 in 2002 december and 2003 january. *The Astrophysical Journal*, *641*, 740. doi: 10.1086/500653
- Recami, E., Castellino, A., Maccarrone, G. D., y Rodonò, M. (1986, enero). Considerations about the apparent “superluminal expansions” observed in astrophysics. *Nuovo Cimento B Serie*, *93B*(2), 119-144. doi: 10.1007/BF02722327
- Rybicki, G., y Lightman, A. (2008). *Radiative processes in astrophysics*. Wiley. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=eswe2StAspsC>
- Salpeter, E. E. (1964, agosto). Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects. *The Astrophysical Journal*, *140*, 796-800. doi: 10.1086/147973
- Sanchez, D. A., y Deil, C. (2013, enero). Enrico : A Python Package to Simplify Fermi-LAT Analysis. En *International cosmic ray conference* (Vol. 33, p. 2784).
- Sanders, D. B., Phinney, E. S., Neugebauer, G., Soifer, B. T., y Matthews, K. (1989, diciembre). Continuum Energy Distributions of Quasars: Shapes and Origins. *The Astrophysical Journal*, *347*, 29. doi: 10.1086/168094
- Schneider, P. (2014). *Extragalactic astronomy and cosmology: An introduction*. Springer Berlin Heidelberg. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=kcrHBAAAQBAJ>
- Seyfert, C. K. (1943, enero). Nuclear Emission in Spiral Nebulae. *The Astrophysical Journal*, *97*, 28. doi: 10.1086/144488
- Shukla, A., Chitnis, V. R., Vishwanath, P. R., Acharya, B. S., Anupama, G. C., Bhattacharjee, P., ... Singh, B. B. (2012, mayo). Multiwavelength study of the TeV blazar Mrk 421 during a giant flare. *Astronomy & Astrophysics*, *541*, A140. doi: 10.1051/0004-6361/201118569

- Sikora, M., y Madejski, G. (2000, may). On pair content and variability of subparsec jets in quasars. *The Astrophysical Journal*, 534(1), 109–113. Descargado de <https://doi.org/10.1086%2F308756> doi: 10.1086/308756
- Slipher, V. M. (1913, enero). The radial velocity of the Andromeda Nebula. *Lowell Observatory Bulletin*, 1, 56-57.
- Somerville, R. S., Gilmore, R. C., Primack, J. R., y Domínguez, A. (2012, Apr). Galaxy properties from the ultraviolet to the far-infrared: cold dark matter models confront observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423(3), 1992–2015. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20490.x> doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.20490.x
- Stecker, F. W., Malkan, M. A., y Scully, S. T. (2006, septiembre). Intergalactic Photon Spectra from the Far-IR to the UV Lyman Limit for $0 < z < 6$ and the Optical Depth of the Universe to High-Energy Gamma Rays. *The Astrophysical Journal*, 648(2), 774-783. doi: 10.1086/506188
- Terasranta, H., Tornikoski, M., Mujunen, A., Karlamaa, K., Valtonen, T., Henelius, N., ... Koenonen, P. (1998, noviembre). Fifteen years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 132, 305-331. doi: 10.1051/aas:1998297
- Terasranta, H., Tornikoski, M., Valtaoja, E., Urpo, S., Nesterov, N., Lainela, M., ... Valtonen, M. (1992, julio). Ten years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 94, 121-173.
- Tompkins, W. F. (1999). *Applications of likelihood analysis in gamma-ray astrophysics* (Tesis Doctoral no publicada). STANFORD UNIVERSITY.
- Tosti, G., Fiorucci, M., Luciani, M., Efimov, Y. S., Shakhovskoy, N. M., Valtaoja, E., ... Sobrito, G. (1998, noviembre). Radio, optical and photopolarimetric observations of Markarian 421 around the great 1996-97 outburst. *Astronomy & Astrophysics*, 339, 41-51.
- Ulrich, M.-H., Maraschi, L., y Urry, C. M. (1997, enero). Variability of Active Galactic Nuclei. *Annual Review of Astron and Astrophys*, 35, 445-502. doi: 10.1146/annurev.astro.35.1.445

- Urry, C. M., y Padovani, P. (1995, Sep). Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, *107*, 803. doi: 10.1086/133630
- Véron-Cetty, M. P., y Véron, P. (2000, enero). The emission line spectrum of active galactic nuclei and the unifying scheme. *Astronomy and Astrophysics Reviews*, *10*, 81-133. doi: 10.1007/s001590000006
- Wagner, S. J., y Witzel, A. (1995, enero). Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects. *Annual Review of Astron and Astrophys*, *33*, 163-198. doi: 10.1146/annurev.aa.33.090195.001115
- Wolfe, A. M. (1978, enero). *Bl lac objects*.
- Zola, S., Valtonen, M., Bhatta, G., Goyal, A., Debski, B., Baran, A., ... Blay, P. (2016, octubre). A Search for QPOs in the Blazar OJ287: Preliminary Results from the 2015/2016 Observing Campaign. *Galaxies*, *4*(4), 41. doi: 10.3390/galaxies4040041