



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

**ESTUDIO ESPECTRAL DE LLAMARADAS
IDENTIFICADAS EN UNA MUESTRA DE BLAZARES
OBSERVADOS POR FERMI-LAT**

Miguel Enrique Toralla Muralles

Asesorado por PhD. José Rodrigo Sacahui Reyes

Guatemala, julio 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**ESTUDIO ESPECTRAL DE LLAMARADAS
IDENTIFICADAS EN UNA MUESTRA DE
BLAZARES OBSERVADOS POR FERMI-LAT**

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

MIGUEL ENRIQUE TORALLA MURALLES
ASESORADO POR PHD. JOSÉ RODRIGO SACAHI REYES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, JULIO 2023

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



CONSEJO DIRECTIVO INTERINO

Director	MSc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Representante docente	Arqta. Ana Verónica Carrera Vela
Representante docente	M.A. Pedro Peláez Reyes
Representante egresados	Lic. Urías Amitaí Guzmán García
Representante de estudiantes	Elvis Enrique Ramírez Mérida
Representante de estudiantes	Oscar Eduardo García Orantes
Secretario Académico	MSc. Edgar Damián Ochoa Hernández

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN PRIVADO DE
EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO**

Examinador	PhD. Enrique Pazos Avalos
Examinador	MSc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu
Examinador	PhD. Juan Adolfo Ponciano Castellanos

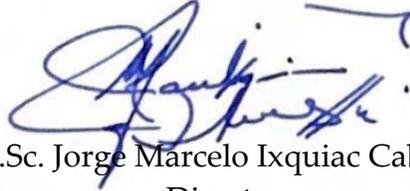
Ref. D.DTG. 003-2023
Guatemala 11 de agosto de 2023

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 espectral de llamaradas identificadas en una muestra de blazares observados por Fermi-LAT”**, presentado por el estudiante universitario Miguel Enrique Toralla Muralles, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Director

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO ESPECTRAL DE LLAMARADAS IDENTIFICADAS EN UNA MUESTRA DE BLAZARES OBSERVADOS POR FERMI-LAT

Tema que fue sugerido por el Departamento de Investigación de Ciencias Físicas y Matemáticas y aprobado por la dirección de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas.


Miguel Enrique Toralla Muralles

Guatemala 08 de junio de 2023

*Ingeniero Rodolfo Samayoa
Jefe Departamento de Física
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas*

Presente.

Estimado ingeniero Samayoa, por este medio quiero hacer de su conocimiento que el estudiante **MIGUEL ENRIQUE TORALLA MURALLES**, identificado con **CUI 2975779050101**, estudiante regular de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la carrera de licenciatura en Física, ha finalizado su trabajo de Ejercicio Profesional Supervisado en su modalidad de 6 meses, realizado en el Instituto de Investigación en Ciencias Físicas y Matemáticas, desarrollando el proyecto “Estudio espectral de llamaradas identificadas en una muestra de blazares observados por Fermi-LAT”, del cual se produjo un documento final **el cual apruebo después de haberlo leído detenidamente.**

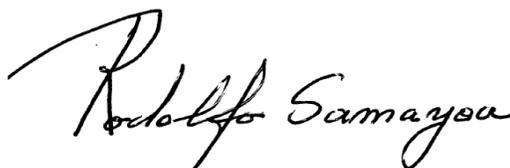
Sin otro particular, agradezco su atención,



Dr. José Rodrigo Sacahui Reyes
Profesor Titular
jrsacahui@profesor.usac.edu.gt

Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas

El jefe del Departamento de Física de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor **Dr. José Rodrigo Sacahui Reyes** al trabajo de graduación del estudiante **Miguel Enrique Toralla Muralles**, quien se identifica con el carné no. **2975779050101**, titulado **“Estudio espectral de llamaradas identificadas en una muestra de blazares observados por Fermi-LAT”** procede a la autorización del mismo.



Ing. José Rodolfo Samayoa Dardón
Jefe Departamento de Física



Guatemala, 7 de agosto del 2023

AGRADECIMIENTOS

La universidad es una etapa en la vida llena de dedicación y esfuerzo, esto no únicamente por parte de nosotros, los estudiantes. Existe un sin fin de personas que nos han brindado su ayuda de distintas maneras, para así, permitirnos alcanzar nuestras metas. Con todas ellas estoy sumamente agradecido.

Para comenzar, me gustaría agradecer a Rodrigo Sacahui, quien no solo hizo posible este trabajo dedicándome su tiempo y compartiéndome su conocimiento, sino que también con su guía y consejo me ayudo a lo largo la carrera. Agradezco infinitamente a mis padres, Silvia y Sergio, de quienes jamás escuche un “pero” cuando necesité ayuda, quienes de forma incondicional me brindaron todo su apoyo y sabiduría. También quiero agradecer a mi novia Ester, quien siempre me ayudo y motivo a seguir creciendo como estudiante y sobre todo como persona. Y por supuesto, quiero agradecer todos mis compañeros por haber compartido todo este tiempo conmigo y hacer de la universidad algo que recordar con cariño.

Adicionalmente, me gustaría mencionar que este trabajo de graduación contó con el apoyo del **Proyecto Gestiona I+D 02-2021**.

No me cabe ninguna duda de que este logro no es solo mio y que no puedo agradecerles lo suficiente.

*A mis padres,
quienes con todo su esfuerzo
y dedicación me permitieron
llegar tan lejos.*

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. Núcleos Galácticos Activos	1
1.1. Componentes de un Núcleo Galáctico Activo	2
1.1.1. El Agujero Negro como Mecanismo Central	2
1.1.2. Disco de Acreción	4
1.1.3. Toroide	4
1.1.4. Región de Emisión de Líneas Anchas y Región de Emisión de Líneas Angostas	5
1.1.5. Chorros Centrales	6
1.2. Modelo de Unificación	7
1.2.1. Modelo de Unificación por Orientación	8
1.3. Clasificación de Núcleos Galácticos Activos	9
1.3.1. Galaxias Seyfert	10
1.3.2. Núcleos Galácticos Activos de Baja Luminosidad	11
1.3.3. Radio Galaxias	12
1.3.4. Cuásares	13
1.3.5. Otras clasificaciones de AGNs	14
1.3.5.1. AGNs Libres de Líneas de Emisión	14
1.3.5.2. Fuentes Ultra Luminosas de Rayos X	14
1.3.5.3. Galaxias Ultra Luminosas en Infrarrojo	15
1.4. Variabilidad en Núcleos Galácticos Activos	15

1.5. Blazares	15
1.5.1. Características de los Blazares	16
1.5.2. Tipos de Blazares	16
1.6. Distribución espectral de energía	17
1.6.1. Comportamiento Espectral	19
1.6.2. Procesos Radiativos	19
1.6.2.1. Emisión Sincrotrón	19
1.6.2.2. Efecto Compton Inverso	20
1.6.2.3. Efecto Compton Auto Inducido	20
1.6.3. Modelos radiativos en AGNs	20
1.6.3.1. Modelo Leptónico	20
1.6.3.2. Modelo Hadrónico	21
1.7. Llamaradas	21
1.7.1. Perfil Temporal en Llamaradas	23
2. Telescopio de Gran Área y el Software de Análisis	25
2.1. Telescopio de Gran Área	25
2.1.1. Descripción Técnica	26
2.1.2. Funcionamiento	27
2.1.2.1. Convertidor-Seguidor de Precisión	28
2.1.2.2. Calorímetro	28
2.1.2.3. Escudo de Anticoincidencia	29
2.2. Fermi Science Tools	29
2.2.1. Requisitos	30
2.3. Enrico	30
3. Metodología	31
3.1. Curvas de Luz	31
3.2. Reducción de los Datos	31
3.3. Análisis de relación	32
4. Muestra	33
4.1. Tercer Catálogo de Núcleos Galácticos Activos por FERMI-LAT	33
4.2. Selección de Objetos	33
4.2.1. 3C279	34
4.2.2. 3C66A	35
4.2.3. PKS2233-148	36

4.2.4.	OJ 287	37
4.2.5.	PKS 0447-439	38
4.2.6.	PKS 0537-441	39
4.2.7.	PKS 2155-304	40
4.2.8.	PMN J2345-1555	41
5.	Resultados	43
5.1.	Comportamiento Temporal	43
5.1.1.	3C66A	44
5.1.2.	PKS 0447-439	45
5.1.3.	PKS 0537-441	46
5.1.4.	PKS 2155-304	47
5.1.5.	PKS 2233-148	48
5.1.6.	3C279	50
5.1.7.	PMN J2345-1555	51
5.1.8.	OJ287	52
5.2.	Comportamiento espectral y energético	53
5.3.	Espectro y posibles relaciones	58
5.3.1.	Duración	58
5.3.2.	Simetría	59
5.3.3.	Flujo máximo	60
5.4.	Discusión	61
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Representación componentes de un AGN	3
1.2. Representación de toroide grumoso.	5
1.3. Modelo de unificación por inclinación	8
1.4. Galaxia Seyfert: Messier 77.	10
1.5. LINER: M104.	11
1.6. Cuásar más distante: ULAS J1120+0641	14
1.7. Ejemplo de SED	17
1.8. Clasificación de SED	18
1.9. Emisión Sincrotrón	19
1.10. Curva de luz de llamarada presente en 3C 279	21
1.11. Observación de llamaradas en distintas energías.	22
2.1. Telescopio espacial de rayos gamma	26
2.2. Esquema de funcionamiento de Fermi-LAT	28
2.3. Curva de luz de 3C 273 generada por FermiTools	29
4.1. Curva de luz de 3C279.	34
4.2. Distribución de flujo de 3C 279	34
4.3. Curva de luz de 3C66A.	35
4.4. Distribución de flujo de 3C66A	35
4.5. Curva de luz de PKS2233-148.	36
4.6. Distribución de flujo de PKS 2233-148	36
4.7. Curva de luz de OJ 287.	37
4.8. Distribución de flujo de OJ287	37
4.9. Curva de luz de PKS 0447-439.	38
4.10. Distribución de flujo de PKS 0447-439	38
4.11. Curva de luz de PKS 0537-441.	39
4.12. Distribución de flujo de PKS 0537-441	39
4.13. Curva de luz de PKS 2155-304.	40

4.14. Distribución de flujo de 2155-304	40
4.15. Curva de luz de PMN J2345-1555.	41
4.16. Distribución de flujo de PMN J2345-1555	41
5.1. Ajuste a llamarada encontrada en 3C66A	44
5.2. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 0447-439	45
5.3. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 0537-441	46
5.4. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 2155-304	47
5.5. Ajuste a la primera llamarada encontrada en PKS 2233-148	48
5.6. Ajuste a la segunda llamarada encontrada en PKS 2233-148	49
5.7. Ajuste a llamarada encontrada en 3C279	50
5.8. Ajuste a llamarada encontrada en PMN J2345-1555	51
5.9. Ajuste a llamarada encontrada en OJ287	52
5.10. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en 3C66A	53
5.11. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PKS 0447-439	54
5.12. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PKS 0537-441	54
5.13. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PKS 2155-304	55
5.14. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PKS 2233-148 en el periodo temporal comprendido entre 375985414.69 y 377020921.31 METs	55
5.15. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PKS 2233-148 en el periodo temporal comprendido entre 360797984.20 y 361574614.17 METs	56
5.16. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en 3C279	56
5.17. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en PMN J2345-1555	57
5.18. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada obser- vada en OJ287	57
5.19. Análisis de regresión: índice espectral \sim duración	58
5.20. Análisis de regresión: índice espectral \sim duración	59
5.21. Análisis de regresión: índice espectral \sim flujo máximo	60

5.22. Distribución de duración de llamadas 61

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Esquema de unificación	7
5.1. Tabla de dimensionales para parámetros obtenidos de ajustes y valores calculados.	43
5.2. Parámetros obtenidos del ajuste a 3C66A.	44
5.3. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a 3C66A.	44
5.4. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0447-439.	45
5.5. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0447-439.	45
5.6. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0537-441.	46
5.7. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0537-441.	46
5.8. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 2155-304.	47
5.9. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 2155-304.	47
5.10. Parámetros obtenidos del ajuste a la primera llamada detectada en PKS 2233-148.	48
5.11. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a la primera llamada detectada en PKS 2233-148.	48
5.12. Parámetros obtenidos del ajuste a la segunda llamada detectada en PKS 2233-148.	49
5.13. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a la segunda llamada detectada en PKS 2233-148.	49
5.14. Parámetros obtenidos del ajuste a 3C279.	50
5.15. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a 3C279.	50
5.16. Parámetros obtenidos del ajuste a PMN J2345-1555.	51

5.17. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PMN J2345-1555.	51
5.18. Parámetros obtenidos del ajuste a OJ287.	52
5.19. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a OJ287.	52
5.20. Índices espectrales obtenidos a través de un modelo logaritmo para- bólico.	53
5.21. Resultados de ajuste lineal: índice espectral duración.	58
5.22. Resultados de ajuste lineal: índice espectral simetría.	59
5.23. Resultados de ajuste lineal: índice espectral simetría.	60

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio del comportamiento espectral de llamadas observadas en una muestra de blazares con el fin complementar los resultados de un análisis temporal.

Específicos

1. Caracterizar temporalmente las llamadas en base al criterio presentado por Nalewajko (2013).
2. Encontrar una caracterización espectral de las llamadas.
3. Explorar la existencia de una relación entre las características temporales y espectrales de las llamadas.

INTRODUCCIÓN

Los núcleos galácticos activos (AGNs por sus siglas en inglés) son regiones compactas en el centro de algunas galaxias. Emiten grandes cantidades de radiación la cual no puede ser asociada a procesos estelares. Los núcleos galácticos activos están compuestos por distintos elementos, siendo el más importante de ellos, un agujero negro súper masivo situado en su centro. Estos objetos se clasifican según sus distintas propiedades observacionales las cuales pueden ser explicadas por distintos modelos. El modelo más aceptado es el modelo de unificación por inclinación, este modelo clasifica a los AGNs utilizando dos parámetros: la inclinación del toroide respecto a la línea de visión y la fuente de luminosidad. Una clase de AGNs descrita en el marco de este modelo y la de mayor importancia para este trabajo son los blazares, estos se caracterizan por poseer un chorro orientado hacia la línea de visión del observador, además, exhiben una alta luminosidad y una emisión no térmica de rápida variabilidad a lo largo de todo el espectro electromagnético.

Una de las principales herramientas para el estudio de estos objetos es el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi. Este telescopio fue lanzado el 11 de junio de 2008 y es capaz de observar en un rango de energía que va desde los 8 keV hasta más de 300 GeV. Este telescopio está constituido por dos instrumentos de observación: El Telescopio de Gran Área (LAT por sus siglas en inglés) y El Monitor de Destellos de Rayos Gamma (GBM por sus siglas en inglés). Dado que una de las funciones principales de Fermi-LAT es el monitoreo de fuentes variables, este es ideal para estudiar el comportamiento de los blazares.

En este trabajo se utilizaron los datos obtenidos por LAT para estudiar el comportamiento temporal y espectral de llamaradas observadas en distintos blazares, donde se entiende como llamarada a los aumentos bruscos en el flujo observado en estos objetos. Con esto, el propósito es poder caracterizar el flujo de las llamaradas como una función del tiempo y poder explorar la existencia de relaciones de dependencia entre distintas características temporales y energéticas. Para identificar estas

llamaras se utilizó la definición dada por Nalewajko (2013). Una vez identificadas, realizaron ajustes espectrales y temporales. Este estudio se realiza con la intención de contribuir en la comprensión de la naturaleza de las llamaras en los blazares, un campo abierto en el área de la astrofísica.

1. Núcleos Galácticos Activos

En general, el término de núcleo activo galáctico o galaxia activa (AGN por sus siglas en inglés), se refiere a la existencia de un fenómeno energético en el núcleo o región central de algunas galaxias (aproximadamente 100 pc), la cual no puede ser directamente asociada a estrellas (Peterson, 1997). Según Netzer (2013) hay dos posibles definiciones para un AGN: una definición física y una definición observacional. La definición física considera que un AGN es un objeto extra galáctico que contiene un agujero negro masivo en su centro, el cual, mediante procesos de acreción produce radiación. La definición observacional considera que un objeto es un AGN si cumple con alguna de las siguientes condiciones:

1. Contener una región compacta en el centro que emite significativamente más que lo que se espera de los procesos típicos estelares de esa galaxia,
2. mostrar un proceso de emisión del continuo característico de procesos no estelares,
3. su espectro contiene fuertes emisiones de líneas típicas de campos de radiación no estelar o
4. mostrar líneas características o variaciones en el continuo.

Debido a sus propiedades observacionales, los espectros característicos de los núcleos galácticos activos son fácilmente distinguibles a lo largo de todas las longitudes de onda. En el caso de las emisiones en rayos gamma, distintas observaciones han mostrado que únicamente una fracción menor al 10% de los AGNs emiten a estas energías y que aquellos que lo hacen son altamente variables a lo largo de todo el espectro, además, se ha observado que la emisión en rayos gamma presente en estos objetos se caracteriza por ser altamente colimada (Netzer, 2013).

Los núcleos galácticos activos pueden ser clasificados dependiendo la intensidad con la que emiten radio, estas clasificaciones son: radio ruidosos y radio callados;

estos también pueden ser clasificados según su orientación (como podrá verse en secciones posteriores).

1.1. Componentes de un Núcleo Galáctico Activo

El modelo con mayor aceptación es llamado modelo por orientación (Urry, 2003), el cual explica las propiedades observacionales de los diferentes AGNs basado en la orientación respecto al observador y propone que estos están compuestos por los siguientes elementos (ver figura 1.1):

1. Un agujero negro súper masivo con una masa mayor a $10^5 M_{\odot}$ ¹,
2. un disco de acreción,
3. nubes libres de polvo de alta densidad situada a una distancia de 0.01 hasta 1 parsec del agujero negro (región de emisión de líneas anchas),
4. un toroide formado de polvo y de dimensiones desde el centro de 0.1 a 10 parsecs,
5. gas ionizado de baja densidad y baja velocidad que se extiende fuera del toroide (región de emisión de líneas angostas) y,
6. chorros con salida perpendicular al disco de acreción y que están asociados con la emisión de rayos gamma.

(Netzer, 2015)

1.1.1. El Agujero Negro como Mecanismo Central

Los agujeros negros (identificado en el área central de la figura 1.1) son considerados fenómenos en los que se curva de manera extrema el espacio-tiempo. Su comportamiento es descrito por la relatividad general y, de acuerdo con el modelo que posee mayor aceptación, las únicas propiedades que estos poseen son: masa, carga y momento angular Netzer (2013).

¹El símbolo M_{\odot} se refiere a masas solares y es equivalente a 1.989×10^{30} kg.

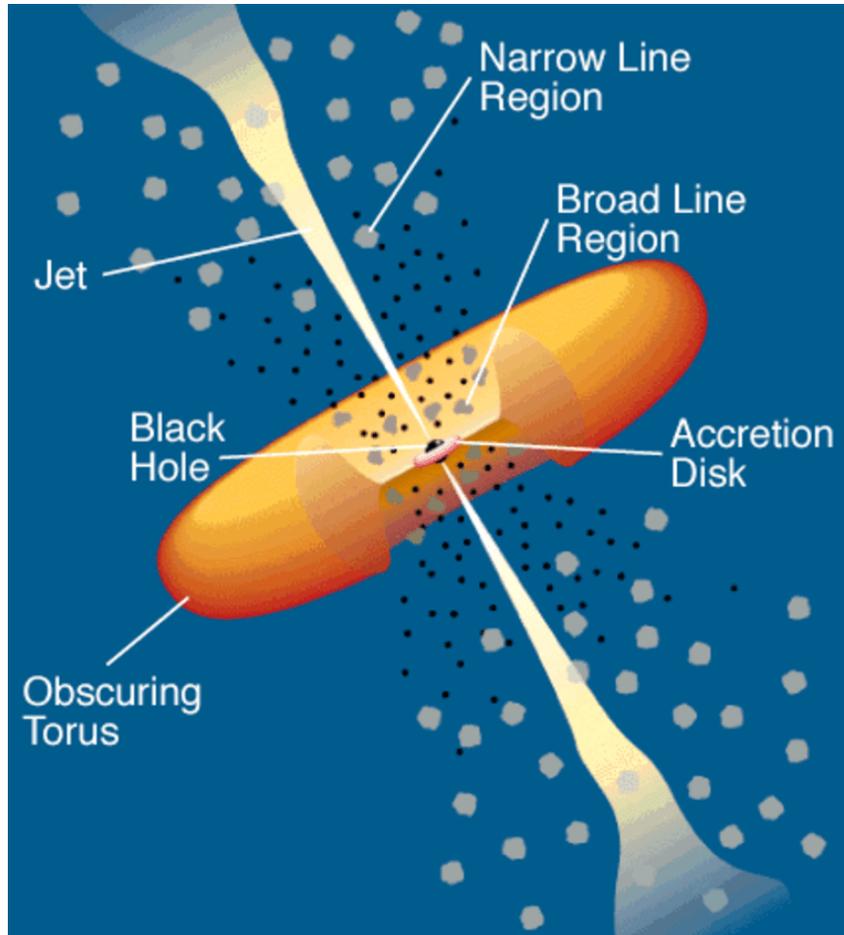


Figura 1.1. Representación artística de los distintos elementos que componen un AGN. Imagen por C.M. Urry & P. Padovani (2010).

A lo largo del tiempo se ha intentado explicar de distintas maneras la radiación proveniente de los núcleos galácticos activos con distintos modelos. Con observaciones realizadas a objetos de tipo AGN que se encontraban cosmológicamente distantes, se notó que su luminosidad no podía ser explicada como aquella proveniente de un cúmulo denso de estrellas, uno de estos objetos fue 3C 273 cuya luminosidad inferida es de aproximadamente de un millón de veces la de nuestra galaxia en una región con dimensiones del orden de días luz (Beckmann and Shrader, 2013). Dada la necesidad de una explicación a la gran cantidad de radiación producida por los núcleos galácticos activos en regiones compactas (menores a un parsec cúbico), se da lugar al modelo del mecanismo central. Este modelo consiste en un disco de acreción caliente que se sitúa al rededor de un agujero negro súper masivo. Aquí, la energía es generada por la caída de materia en el agujero negro debido a la acción de la gravedad, es decir, por procesos de acreción (Peterson, 1997).

1.1.2. Disco de Acreción

Un disco de acreción (ver región central de la figura 1.1), es material en forma de disco, en su mayoría compuesto de gas y polvo, el cual se encuentra orbitando alrededor de algún objeto astronómico compacto. La acreción es el fenómeno detrás de los procesos de radiación observados en los núcleos galácticos activos. En este proceso la materia que forma al disco de acreción cae hacia el agujero negro lo que resulta en el paso de energía potencial gravitacional a radiación electromagnética.

A medida que la materia cae al agujero negro, la fricción entre los distintos elementos en el disco de acreción produce un incremento en la temperatura lo que resulta en radiación de cuerpo negro. Las altas temperaturas que se alcanzan generan emisiones que van desde el infrarrojo hasta los rayos X. Adicionalmente, este incremento en la temperatura provoca la ionización de la materia en el disco. Esto, genera la aparición de campos magnéticos que aceleran partículas las cuales al colisionar con fotones de bajas energías producen electrones de altas energías (Wilkins, 2013).

Los discos de acreción por lo regular son clasificados según su forma y esta forma depende de factores como la fuerza de los campos magnéticos, la tasa de acreción y la presencia de chorros. Los modelos más aceptados proponen las siguientes geometrías:

- 1 Ópticamente delgados y geoméricamente gruesos,
- 2 ópticamente delgados y geoméricamente delgados y
- 3 una combinación de un disco de acreción delgado externo y un disco de acreción grueso interno.

(Beckmann and Shrader, 2013; Netzer, 2013; Peterson, 1997)

1.1.3. Toroide

Generalmente, los modelos de unificación (estos serán abordados en la sección 1.2.1) para los núcleos galácticos activos asumen que existe una estructura toroidal compuesta de gas ionizado, gas molecular caliente y polvo y que esta estructura se sitúa a los alrededores del disco de acreción. Los toroides se sitúa a una distancia entre 0.1 y 10 pc del agujero negro central, poseen densidades de gas entre $10^4 - 10^7$ partículas cm^{-3} y se mueven a velocidades del orden de 1000 km s^{-1} .

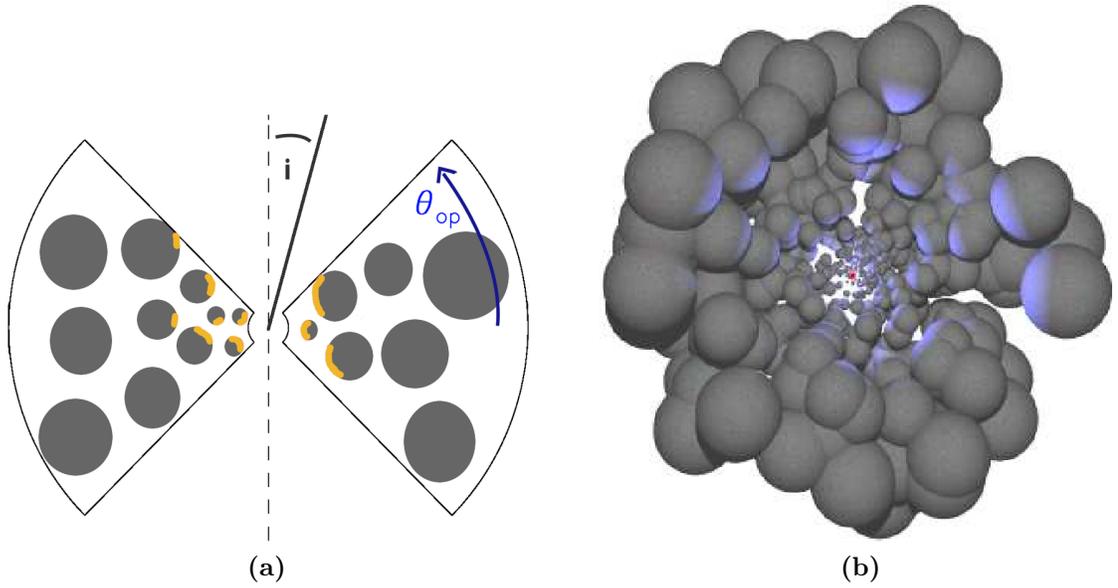


Figura 1.2. (a) Dibujo de un toroide grumoso. Las áreas en amarillo representan las superficies que están siendo directamente radiadas. (b) Representación en 3 dimensiones de la distribución de grumos en el modelo de toroide grumoso. Imágenes obtenidas en Schartmann et al. (2008).

Entre los modelos de toroides más aceptados podemos mencionar 2: el modelo de toroide continuo y el modelo de toroide grumoso. El modelo de toroide continuo asume que el gas se extiende de manera continua en dirección radial a en todo el toroide y que debido a esto, la temperatura decrece como una función de la distancia al agujero negro central por lo que el polvo más caliente se encuentra en las partes más internas del toroide. Por otro lado, en el modelo de toroide grumoso la temperatura no disminuye de manera monótonica con la distancia, esto dado que algunos grumos que se encuentran mas lejos del centro aún siguen estando expuestos a la fuente primaria de radiación, ver figura 1.2 (Beckmann and Shrader, 2013; Netzer, 2013; Schartmann et al., 2008).

1.1.4. Región de Emisión de Líneas Anchas y Región de Emisión de Líneas Angostas

Las regiones de emisión de líneas anchas (o BLR por sus siglas en inglés) se encuentran situadas una distancia de entre 0.1-1 pc del agujero negro central, es decir, dentro del radio interno del toroide. Estas regiones están formadas por

nubes de polvo y gas que poseen una gran densidad columnar² ($\sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$), una alta densidad ($\sim 10^{10}$ partículas cm^{-3}) y velocidades de $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$. Estudios realizados indican que esta región se encuentra a temperaturas del $\sim 10^4 \text{ K}$ y que la densidad de electrones se encuentra entre 10^{15} y 10^{16} partículas m^{-3} (Netzer, 2013; Lu et al., 2019; Carroll and Ostlie, 2007).

Las denominadas como regiones de emisión de líneas angostas (o NLR por sus siglas en inglés) son regiones de baja densidad columnar ($\sim 10^{20-21} \text{ cm}^{-2}$), baja densidad ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) y que se mueven con velocidades de $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$. Estas regiones compuestas de polvo y gas se encuentran a una distancia aproximada de 3 pc (más allá del disco de acreción). En estas regiones se estima que la densidad de electrones es de 10^{10} m^{-3} y la temperatura de $\sim 10^4 \text{ K}$. Estas regiones contienen una mayor cantidad de masa que las regiones de emisión de líneas anchas (Netzer, 2013; Lu et al., 2019; Carroll and Ostlie, 2007).

1.1.5. Chorros Centrales

Los Chorros (visibles en la esquina superior izquierda y esquina inferior derecha de la figura 1.1), también conocidos como jets, están constituidos por radiación y partículas que son eyectadas desde el núcleo central de un AGN a velocidades relativistas. Estas partículas son aceleradas alejándose del núcleo ya sea en una única dirección o en dos direcciones opuestas, donde estas ganan energía mediante el mecanismo de Blandford–Znajek³. Los jets presentan alta colimación por lo que estos pueden extenderse distancias que superan distancias de $\sim 1000 \text{ kpc}$.

Hirovani (2000) indica que existen dos posibles candidatos para las partículas contenidas en los jets. El primero, plasma constituido por protones y electrones relativistas; el segundo, plasma constituido por pares electrón-positrón. Hirovani (2000) encontró que, para los chorros observados en los objetos M87, 3C 279 y 3C 345, la materia contenida era plasma por pares.

Si bien la naturaleza detrás de su composición y los mecanismos por los que se producen son desconocidos, se consideran 3 categorías de posibles modelos para explicar los jets:

²La densidad columnar es una medida de que tanta materia se encuentra entre el observador y el objeto observado.

³Mecanismo mediante el cual se extrae energía de un agujero negro que se encuentra rotando.

- 1 El primero es se basa en presión térmica. Este modelo asume que existen dos canales antiparalelos que se propagan de manera adiabática desde la vecindad del agujero negro.
- 2 El segundo modelo involucra una radiación que puede sobreponerse a la gravedad a lo largo de ciertas direcciones y que produce los jets por medio de presión radiativa.
- 3 El tercer modelo propone que los jets son producto de tensiones hidromagnéticas producidas por discos de acreción magnéticos.

(Carroll and Ostlie, 2007; Beckmann and Shrader, 2013; Netzer, 2013)

1.2. Modelo de Unificación

Radio Ruidoso	Tipo de AGN	Subtipo	Absorción de rayos X	Lineas de Balmer Anchas	Lineas de Balmer Angostas	Producción de rayos gamma
		WLRG	Sí	Sí	Sí	No
	Radio Galaxía	BLRG	No	Sí	Sí	Pocos
		FR I/II	No	Algunas	Sí	No
Radio Ruidoso	Cuásar	Tipo 1	No	Sí	Sí	Algunos
	Cuásar	Tipo 2	Sí	No	Sí	No
	Blazar	RSRQ	No	Sí	Sí	Sí
		BL Lac	No	No	No	Sí
	Seyfert 1		<10 %	Sí	Sí	No
	Seyfert 1.5		~30 %	Sí	Sí	No
Radio Callado	Seyfert 2		>90 %	No	Sí	No
	NLS1		<10 %	Sí	Sí	Pocos
	ULIRGs		Sí	Sí	Sí	No
	LINER		Sí	No	Sí	No

Tabla 1.1. Esquema de unificación basado en distintos parámetros observacionales. Seyfert 1.5 son una subclase que posee características intermedias entre las galaxias Seyfert 1 y 2, NLS1 se refiere a galaxias Seyfert de tipo I con líneas de emisión angostas, ULIRGs son galaxias ultra luminosas en infrarrojo, LINER son regiones de líneas de emisión de baja ionización nuclear. Tabla obtenida en Beckmann and Shrader (2013).

Cuando nos referimos a los modelos de unificación, estos son modelos que se basan en la morfología de los objetos, donde el objetivo es utilizar el menor número de parámetros para poder explicar las observaciones, aquí se asume que la diversidad de AGNs es mucho menor a la que observamos y que las diferencias entre objetos son causadas por parámetros que dependen del observador (Peterson, 1997; Netzer,

2013).

Los modelos de unificación pueden ser separados en dos categorías: la unificación por infrarrojo, ultravioleta y rayos X (unificación IR-optical-UV-X-ray) y unificación por radio. La primera categoría trata de explicar las diferencias que existen entre AGNs de tipo I y AGNs de tipo II considerando propiedades del toroide. En la segunda categoría se busca explicar las diferencias entre distintos AGNs utilizando propiedades tanto del toroide como del jet (Netzer, 2015).

1.2.1. Modelo de Unificación por Orientación

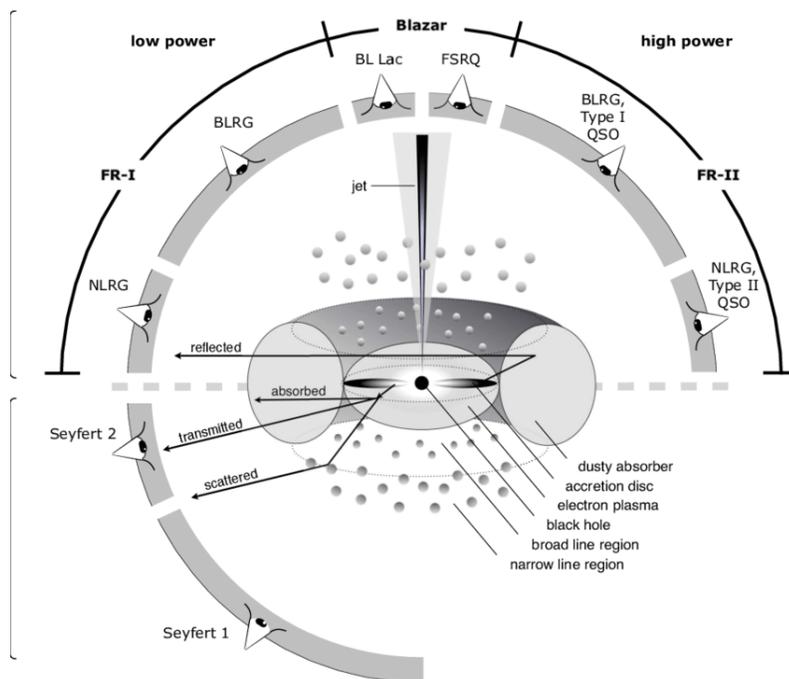


Figura 1.3. Representación del modelo de unificación por inclinación. Aquí la clasificación depende del ángulo de visión y no de otras características de los AGNs (Beckmann and Shrader, 2013). Imagen por Marie-Luise Menzel.

Uno de los modelos de unificación más sencillos, conocido como modelo de unificación por orientación, trata de explicar las distintas clases de AGNs mediante únicamente 2 parámetros, la inclinación del toroide respecto al observador y la fuente de emisión. Aquí, se piensa que los procesos de absorción, reflexión y dispersión que sufre la radiación emitida se da lugar en el toroide, el disco de la galaxia albergadora o dentro de las regiones de emisión de líneas anchas.

1.3. Clasificación de Núcleos Galácticos Activos

En la década de 1940, Carl Seyfert, astrónomo estadounidense, encontró los primeros indicios de que algunas galaxias eran anfitrionas de algún componente adicional de alta emisión en su centro. Seyfert obtuvo el espectro de 6 galaxias las cuales mostraban un comportamiento distinto al observado en espectros estelares. Años después, en 1959, Lodewijk Woltjer señalaba que la emisión observada en las regiones centrales (~ 100 pc) de estas galaxias requeriría una masa del orden de 10^8 masas solares. Idea que posteriormente (1963) fue tomada por Fred Hoyle y William Fowler, quienes sugerían que en el centro de estas galaxias existían objetos de tipo estelar de gran masa que emitían mayormente por procesos de acreción. Un año más tarde, surgió la idea de que lo que residía en el centro de estas galaxias no era una estrella supermasiva sino un agujero negro. El modelo que considera a un agujero negro supermasivo en el centro de los núcleos galácticos activos permite explicar no solo las altas emisiones observadas, sino también pequeñas regiones de emisión. (Beckmann and Shrader, 2013)

La clasificación de los AGNs se basa en observaciones, la física que describe los procesos de acreción y los procesos de emisión de líneas y la suposición de que una gran cantidad de las propiedades observadas en los objetos dependen de la luminosidad y la inclinación de su fuente de emisión (más detalles en la sección 1.2.1). Estos objetos se clasifican en base a:

- La intensidad observada en sus líneas de emisión, es decir, si presentan líneas débiles o fuertes.
- Que tipo de líneas se observan, esto es, si se observan líneas anchas o delgadas.
- Que tan ionizado se encuentra el gas que emite las líneas.
- Que tan fuerte es su emisión en radio.
- Que tan fuerte es su emisión en rayos-X.
- Si podemos observar radiación no térmica y a cuales energías.
- Si existe evidencia de oscurecimiento central

(Netzer, 2013).

Algunas de las clasificaciones de AGNs son: Galaxias Seyfert, LINERs, Radio Galaxias y Cuásares.

1.3.1. Galaxias Seyfert



Figura 1.4. Imagen obtenida a través del Telescopio Espacial Hubble de la galaxia Seyfert Messier 77, también conocida como NGC 1068. Imagen por NASA/ESA/A. van der Hoeven

Las galaxias Seyfert son el tipo de núcleos galácticos activos que se observa con mayor frecuencia. Estas galaxias pueden ser clasificadas por sus propiedades espectrales. Dos maneras de clasificarlas son: una clasificación óptica y una clasificación por rayos-X.

Bajo la clasificación óptica para las galaxias Seyfert tenemos galaxias Seyfert 1 y galaxias Seyfert 2. En las de la primera clase las líneas de Balmer⁴ son más anchas que las líneas prohibidas⁵ que se observan, estos objetos presentan poca o nada de obscuración de su fuente central lo que permite poder ser observado en la mayoría de longitudes de onda. A su vez, presentan líneas de emisión bastante anchas las cuales se encuentra en el rango de entre 1000 y 2000 km s⁻¹. Las galaxias Seyfert pertenecientes a la segunda clase, tanto las líneas de Balmer como las líneas prohibidas presentan una anchura similar, además, estas galaxias presentan completa obscuración de su fuente central con respecto a la línea de visión en UV, óptico

⁴Líneas de emisión presentes en el espectro del hidrógeno. Estas líneas son observadas en la región visible del espectro y tienen lugar cuando el electrón en el átomo de hidrógeno transiciona de un nivel $n \geq 3$ a un nivel $n = 2$, siendo n el número cuántico principal.

⁵Son líneas de emisión brillantes que no se observan de manera habitual en gases.

y el infrarrojo cercano. Estos objetos presentan fuertes líneas angostas de emisión de entre 300 y 1000 km s⁻¹. Otra diferencia que se puede encontrar entre estas dos clases es que a comparación de las galaxias Seyfert 1, en las galaxias Seyfert 2 se observa que la radiación de el núcleo es menos dominante en comparación con el resto de la galaxia, esto pueden ser explicados por obscuración de la región central. Se considera que el toroide es el responsable de estas diferencias y que ellas son causadas debida a su simetría axial.

Cuando tratamos de diferenciar las galaxias Seyfert por medio de rayos X, nuevamente tenemos dos tipos donde la distinción se realiza en base a la absorción de rayos X suaves (energías mucho menores a los 5 keV). Aquí, se asume que la diferencia entre las Seyfert 1 y las Seyfert 2 se debe a la cantidad de materia cerca del agujero negro central que absorbe la radiación. De esta manera podemos distinguir a las galaxias Seyfert de tipo 1 como aquellas que presentan poca absorción de rayos X blandos y como Seyfert 2 a aquellas que presentan una fuerte absorción (Beckmann and Shrader, 2013; Netzer, 2015, 2013).

Según Peterson (1997), las galaxias Seyfert son consideradas como galaxias radio silenciosas.

1.3.2. Núcleos Galácticos Activos de Baja Luminosidad



Figura 1.5. Ejemplo de LINER: galaxia M104 observada por el Telescopio Espacial Hubble. Imagen por HST/NASA/ESA

Las regiones nucleares de líneas de emisión de baja ionización (LINERs por sus siglas en inglés) son un tipo de AGN de baja luminosidad. Estos objetos muestran un espectro óptico dominado por líneas de emisión de baja ionización y líneas de emisión de alta ionización poco marcadas. El espectro de estos objetos está dominado por procesos estelares de la galaxia anfitriona y no por la emisión producida por su núcleo (Márquez et al., 2017; Beckmann and Shrader, 2013).

Los LINERs son detectados en un tercio de las galaxias que presentan una magnitud absoluta de 15.5. Ambos, los AGNs que muestran alta ionización y los LINERs, se pueden detectar en galaxias con propiedades similares: luminosidad, tamaño, contenido de hidrógeno, color óptico y masa estelar contenida en la galaxia. Para dos galaxias similares, un LINER presenta una luminosidad que es entre 1 y 5 órdenes de magnitud menor en comparación con una galaxia con alta ionización (Netzer, 2013).

1.3.3. Radio Galaxias

Según Peterson (1997) las radio galaxias son fuentes fuertes de radio. Estas pueden clasificarse como radio galaxias de líneas anchas (BLRGs) y radio galaxias de líneas angostas (NLRGs). Las galaxias anfitrionas de estos objetos son comúnmente galaxias espirales y son consideradas la contra parte radio ruidosa de las galaxias Seyfert.

Las radio galaxias pueden ser clasificadas por la morfología de su emisión basado en el esquema de Fanaroff-Riely. Según Beckmann and Shrader (2013), existen dos tipos básicos distintos de radio galaxias: FR-I (Fanaroff-Riley de tipo I) y FR-II (Fanaroff-Riley de tipo II). Esta clasificación se hace basada en la luminosidad en radio que se observa en estos objetos. Las primeras muestran una menor luminosidad en comparación con las segundas. Aquí se puede hacer una distinción de las clases basados en un valor para la luminosidad de $L = 10^{32} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ a una frecuencia de 175 MHz. La luminosidad de las radio galaxias FR-I se encuentra por debajo de este valor y las radio galaxias FR-II poseen una luminosidad superior.

1.3.4. Cuásares

Los cuásares son objetos que presentan fuertes líneas de emisión y que se encuentran a grandes distancias. Estos objetos fueron llamados objetos cuasi-estelares debido a que al ser observados en óptico estos se asemejan a estrellas azules (Beckmann and Shrader, 2013). Según Schmidt and Green (1983), los cuásares son galaxias Seyfert con una magnitud absoluta superior a 23. Según D’Onofrio et al. (2012) un cuásar es un objeto que muestra un exceso de emisiones UV y que presenta fluctuaciones erráticas en su intensidad, además, estos objetos muestran líneas de emisión permitidas anchas y líneas de emisión permitidas y prohibidas, tanto anchas como angostas. Según Peterson (1997) los cuásares son objetos que poseen las siguientes propiedades:

- 1 Son objetos de tipo estelar los cuales son identificados como fuentes de radio,
- 2 muestran un flujo que varía con el tiempo,
- 3 muestran un alto flujo en UV,
- 4 se encuentran en corrimientos al rojo grandes.

Estos objetos se observan muy azules en comparación con las galaxias. Su emisión presenta una joroba observada en el espectro de los cuasares. Esta joroba puede observarse a longitudes de onda que van de 100 a 400 nm . Esta joroba no puede ser atribuida a la luz producida por las estrellas pertenecientes a la galaxia en donde se encuentra este objeto.(Beckmann and Shrader, 2013).

Según Beckmann and Shrader (2013), los cuásares son el tipo de AGN más luminoso de todos. Esta alta luminosidad es la que permite poder detectar estos objetos a grandes distancias. Se han detectado más de 40 cuásares a una distancia $z > 6$ donde ULAS J1120+0641 siendo el más lejano (más lejano a abril 2023) se encuentra a una distancia $z = 7.085$.

Los cuásares radio callados son aquellos cuásares que no presentan un chorro. Se considera que aproximadamente un 90 % de los cuásares son del tipo radio callados, es decir, que no presentan un jet y que no son muy brillantes en radio. En comparación con los cuásares radio callados, los cuásares radio ruidosos son objetos que presentan una alta luminosidad y una fuerte emisión en radio además de ser más masivos. Se considera que únicamente el 10 % de los cuásares son del tipo ra-

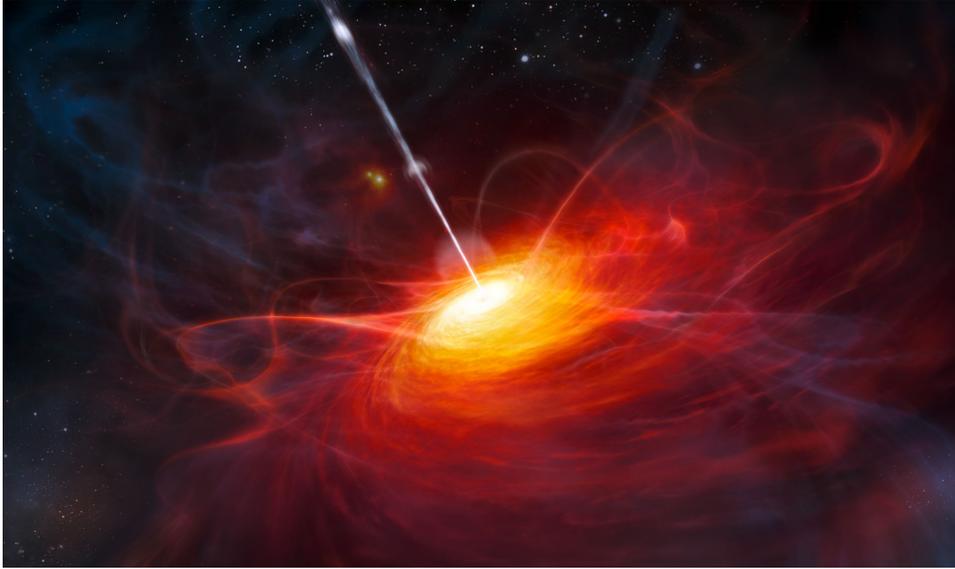


Figura 1.6. Representación artística de ULAS J1120+0641, el cuás más distante observado hasta la fecha. Imagen por ESO/M. Kornmesser

dio ruidoso. Ambos tipos de objetos presentan un flujo variable, emisiones de líneas anchas y un fuerte componente en el UV (Beckmann and Shrader, 2013).

1.3.5. Otras clasificaciones de AGNs

1.3.5.1. AGNs Libres de Líneas de Emisión

Esta subclase de AGNs presenta líneas de emisión muy débiles y en algunos casos carecen de estas. Estos objetos pueden identificarse por la presencia de una fuente central de radiación de carácter no estelar y en algunas ocasiones variabilidad en el continuo (Netzer, 2015).

1.3.5.2. Fuentes Ultra Luminosas de Rayos X

Las fuentes ultra luminosas de rayos X (ULX) son objetos cuya luminosidad en rayos X excede los 10^{39} erg s^{-1} y los cuales no se encuentran en el centro de sus galaxias anfitrionas. los ULXs son fuentes variables que son observadas con regularidad en galaxias jóvenes que poseen un fuerte componente de formación estelar (Beckmann and Shrader, 2013).

1.3.5.3. Galaxias Ultra Luminosas en Infrarrojo

Las galaxias típicas emiten en infrarrojo debido a su contenido de polvo y las estrellas que contienen. Existe una fracción de galaxias que presentan una emisión en infrarrojo que excede la emisión esperada de manera significativa, esto es, luminosidades que superan valores de $10^{11} L_{\odot}$. Estas galaxias son llamadas LIGs, galaxias luminosas en infrarrojo. Aquellas galaxias que exceden luminosidades de $10^{12} L_{\odot}$ son conocidas como galaxias ultra luminosas en infrarrojo, ULIRGs. Debe mencionarse que estos objetos son más abundantes a distancias más lejanas (Beckmann and Shrader, 2013).

1.4. Variabilidad en Núcleos Galácticos Activos

Se entiende como variabilidad de un AGN a la propiedad de mostrar cambios o variaciones en el flujo observado. Los núcleos galácticos activos muestran variaciones en su flujo en todas las longitudes de onda en las que han sido estudiados. Estas variaciones se muestran aperiódicas y con una amplitud que no es constante. Si bien el origen físico de dichas variaciones es desconocido, se cree que estas se deben a la inestabilidad presente en el disco de acreción o bien tasas variables de acreción (Peterson, 2001). Según Netzer (2013), las observaciones indican que la amplitud de las variaciones es debida a la masa de el agujero negro presente en el AGN. Los núcleos galácticos activos que albergan un agujero negro de una masa menor muestran variaciones mayores de la amplitud en todo el espectro comparado con aquellos objetos con agujeros negros de una masa mayor. Según Kushwaha et al. (2017); Uttley et al. (2005), variabilidad es de una naturaleza multiplicativa no lineal.

En Ajello et al. (2017) se propone utilizar análisis por bloques bayesianos para poder determinar la variabilidad de las fuentes observadas (fuentes con energías mayores a 10 GeV). Se encontró que aproximadamente 163 fuentes eran variables con un nivel de confianza mayor al 99 %.

1.5. Blazares

Según Beckmann and Shrader (2013); Bianchi et al. (2012), los blazares son una clase de cuásar donde estos presentan un chorro relativista que apunta aproximadamente sobre la línea de visión del observador (con ángulos menores a 15° según

indica Lioudakis et al. (2018)). Estos son fuentes de emisión desde el radio hasta energías de TeV, caracterizados por una emisión altamente variable a lo largo de todo el espectro electromagnético, además de estar polarizada. Según Netzer (2013), los blazares son cuasares radio ruidosos altamente variables y fuertes emisores de rayos Gamma.

1.5.1. Características de los Blazares

Según Netzer (2013), un blazar puede ser identificado como un AGN que posee una o más de las siguientes propiedades:

- 1 Una emisión en rayos γ intensa y altamente variable.
- 2 Una emisión intensa y variable en radio con un espectro plano y, ocasionalmente, movimiento superlumínico⁶.
- 4 Una distribución de energía espectral (o SED por sus en ingles) de dos picos, un pico a bajas frecuencias en las energías de radio a rayos X y un pico en altas frecuencias en las energías de rayos X a rayos γ , ver figura 1.7.
- 5 Líneas de emisión angostas débiles e intensidad altamente variables.

Otras características adicionales que vale la pena mencionar son que todos los blazares son fuentes de radio y que normalmente estos objetos se encuentran en galaxias espirales con una tasa de formación estelar alta (Peterson, 1997; Beckmann and Shrader, 2013).

1.5.2. Tipos de Blazares

Los blazares pueden ser divididos en dos tipos: BL Lacertae (BL-Lac) y FRSQs (radio cuasares de espectro plano). Los FRSQs se dividen en dos: OVV (cuasares variables ópticamente violentos) y HPQ (cuasares altamente polarizados). (Beckmann and Shrader, 2013)

En el caso de los cuasares variables ópticamente violentos, tenemos objetos radio ruidosos que presentan variaciones en el continuo anormalmente grandes en escalas de tiempo relativamente pequeñas (del orden de 1 día). En adición a esto, estos objetos muestran una alta polarización. (Peterson, 1997). Según D'Onofrio

⁶Movimiento que aparenta velocidades mayores a la velocidad de la luz en el vacío.

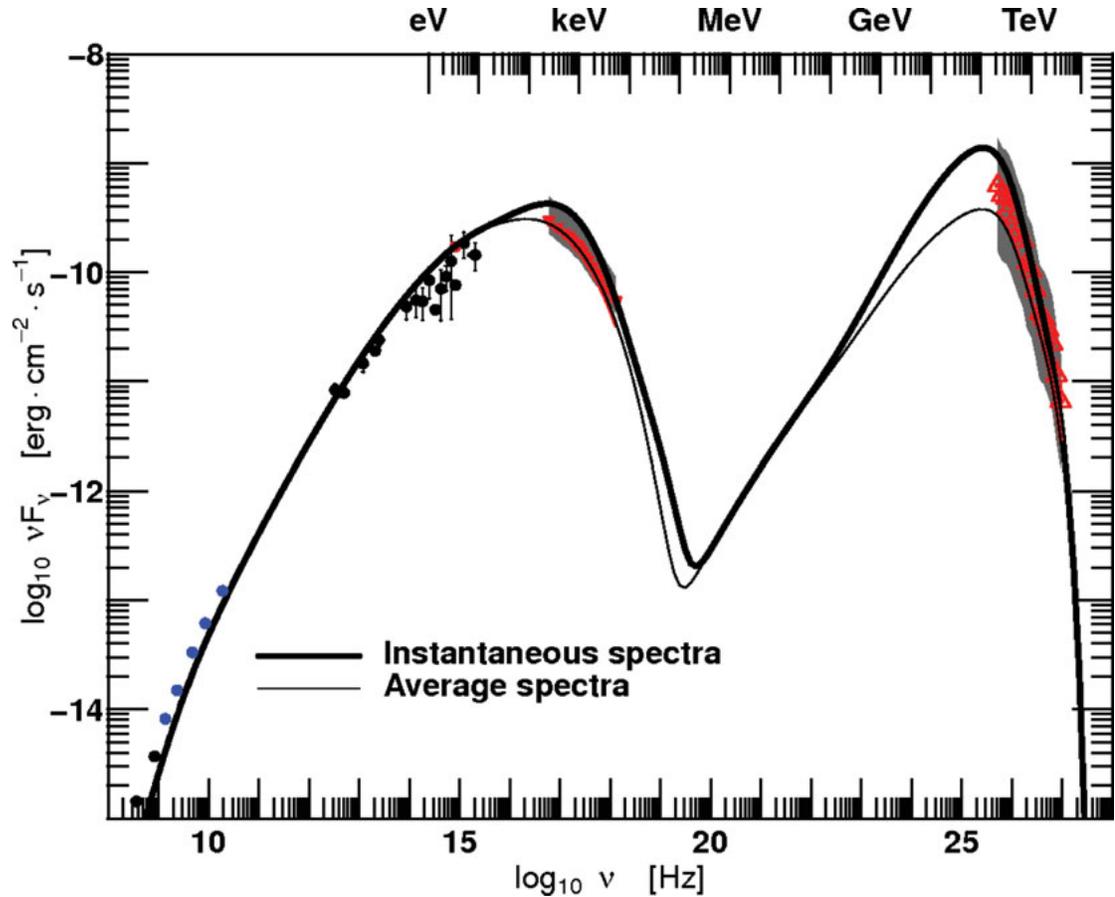


Figura 1.7. SED de PKS2155-304 para un periodo de alta actividad en 2006. Aquí se pueden observar dos picos en el SED. Imagen por Helene et al. (2012).

et al. (2012), los objetos de tipo OVV son fuentes poderosas de radio en los cuales la emisión luz visible puede variar drásticamente en periodos cortos de tiempo, esto es, hasta un 50 % en menos de un día. Estos objetos se encuentran a mayores distancias.

Los objetos de tipo BL Lac se caracterizan por la ausencia líneas de emisión o absorción fuertes además de ser altamente lumínicos y polarizados a lo largo de todo el espectro (D’Onofrio et al., 2012). Más información referente a estos objetos puede encontrarse en la sección 4.1.

1.6. Distribución espectral de energía

Una distribución espectral de energía (SED por sus siglas en inglés) es un gráfico del flujo de energía de un objeto como una función de la longitud de onda o la frecuencia. Cada objeto astronómico presenta diferencias en sus SED, en particular

la de los AGNs presenta una distribución espectral de energía dominada por emisión no térmica y con una forma en donde es posible identificar dos jorobas (ver figura 1.7), la primera situándose a bajas energías (desde radio hasta UV) se asocia a emisión sincrotrón, mientras que la segunda, a altas energías (rayos X hasta rayos γ), es comúnmente explicada mediante dos modelos distintos: el modelo leptónico y el modelo hadrónico (Blandford et al., 2019; Böttcher et al., 2013).

Basado en la localización de su pico o máximo y como se puede ver en la figura 1.9, una distribución de energía espectral puede ser clasificada como LSP (Low Synchrotron Peak) si presenta un pico situado en frecuencias menores a 10^{14} Hz; ISP (Intermediate Synchrotron Peak) si presenta un pico situado entre 10^{14} Hz y 10^{15} Hz; HSP (High Synchrotron Peak) si presenta un pico situado en frecuencias mayores a 10^{15} Hz (Rajput et al., 2020).

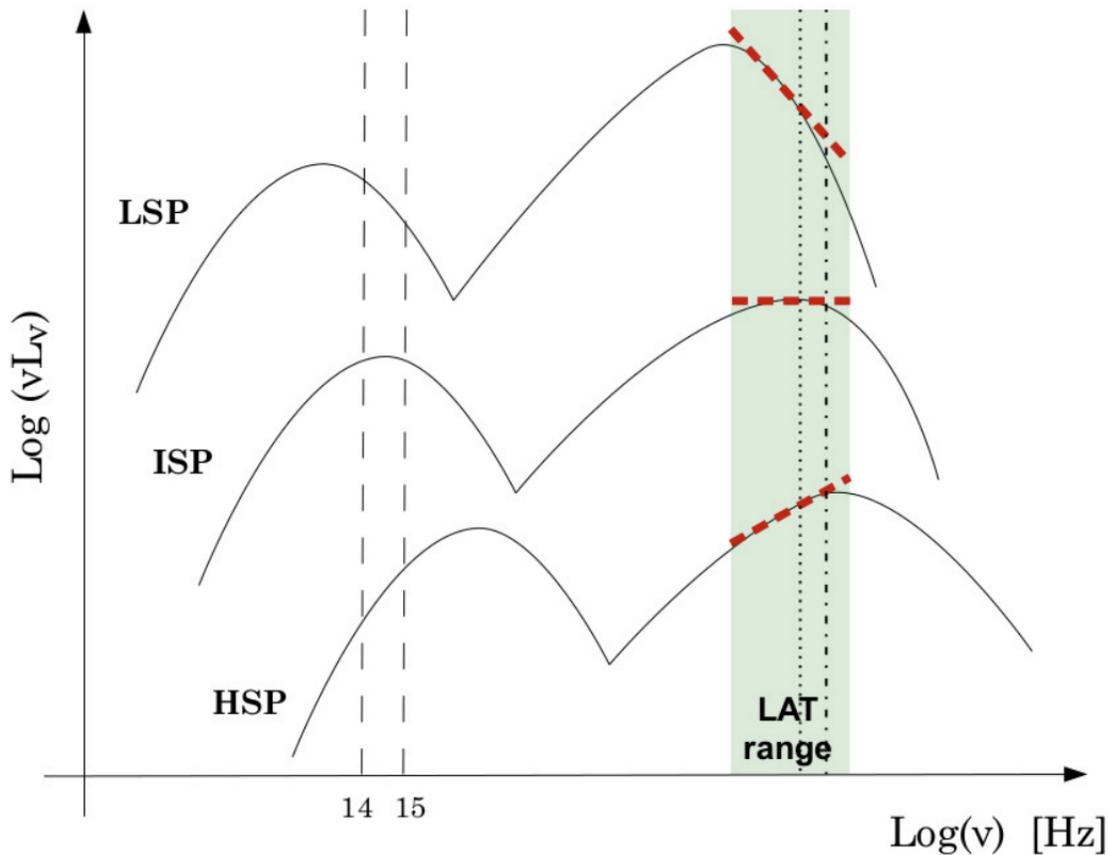


Figura 1.8. Clasificación de SED. La curva superior corresponde a LSP, la curva intermedia corresponde a ISP, la curva inferior corresponde a HSP. El área verde corresponde al rango de energía observado por Fermi-LAT. Imagen obtenida en (Lico et al., 2017)

1.6.1. Comportamiento Espectral

Si bien es usual describir las distribuciones espectral de energía con un modelo de ley de potencia para energías que van desde 0.1 GeV hasta 300 GeV (Brown et al., 2019), estudios previos (Jorge, 2019) han mostrado que el modelo logaritmo parabólico es el que mejor describe los periodos de alta actividad en blazares . El modelo logaritmo parabólico es de la siguiente forma:

$$F(E) = K(E/E_1)^{-(a+b\text{Log}(E/E_1))},$$

donde E_1 es una energía de referencia fijada a 1 keV, por lo que el modelo es determinado únicamente por 3 parámetros. El parámetro a indica el índice fotónico a una energía E_1 . b por otro lado, mide la curvatura de la parábola. Por último, K indica la amplitud de la parábola (Massaro et al., 2004).

1.6.2. Procesos Radiativos

1.6.2.1. Emisión Sincrotrón

Este tipo de emisión ocurre cuando partículas cargadas moviéndose a velocidades relativistas son aceleradas en un campo magnético. Las partículas cargadas cambian su dirección dado que el campo magnético ejerce una fuerza perpendicular a su dirección de movimiento.

La energía de los fotones emitidos son una función de la energía original de la partícula cargada, la fuerza del campo magnético y el ángulo que existe entre el campo magnético y el camino de la partícula (Beckmann and Shrader, 2013).

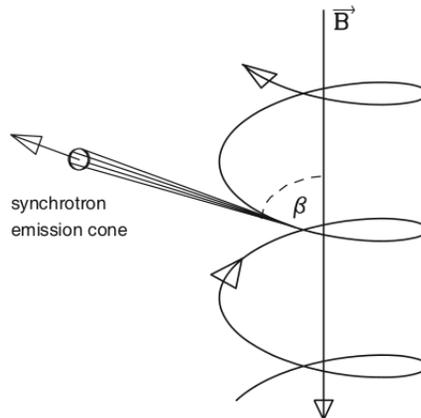


Figura 1.9. Emisión sincrotrón. Imagen por Beckmann and Shrader (2013).

1.6.2.2. Efecto Compton Inverso

El efecto Compton se da como resultado de la interacción de una partícula cargada con un fotón. En esta interacción la partícula gana parte de la energía del fotón.

Cuando se considera una partícula cargada moviéndose a una velocidad relativista, la interacción entre dicha partícula y un fotón puede resultar en un efecto contrario al efecto Compton, esto es, un fotón gana energía. Esto es conocido como el efecto Compton inverso.

1.6.2.3. Efecto Compton Auto Inducido

El efecto Compton auto inducido o SSC es un proceso en el cual los fotones que ganan energía por medio de un efecto Compton inverso, son producidos por emisión sincrotrón. Estos fotones son dispersados por la misma población de partículas cargadas que es responsable de la emisión sincrotrón.

1.6.3. Modelos radiativos en AGNs

Actualmente existen dos tipos de modelos distintos para poder explicar el origen de los fotones de altas energías, es decir rayos-X y rayos γ : los modelos leptónicos y los modelos hadrónicos. El modelo leptónico asume que las partículas responsables de la emisión son electrones y positrones mientras que el modelo hadrónico propone que mayormente son hadrones, principalmente protones, las partículas son responsables de dichas emisiones Böttcher et al. (2013); Kellermann (2013).

1.6.3.1. Modelo Leptónico

Los modelos leptónicos son los modelos más aceptados para la explicación de la emisión en bajas energías y emisión de altas energías observadas en los chorros de AGNs.

Este tipo de modelos propone que la componente de bajas energías del SED (la joroba izquierda, cuyas energías pueden ir desde radio hasta óptico) es explicado por emisión sincrotrón de los electrones y positrones en el chorro.

Por otro lado, se considera que la segunda joroba puede explicarse mediante la dispersión de fotones de baja energía a más altas energías mediante el efecto Compton inverso. Se cree que los fotones de bajas energías provienen del disco de

acreción o de la misma población de electrones. Estos fotones son llevado a altas energías mediante el efecto Compton auto inducido (o SSC del inglés Synchrotron Self Compton).

1.6.3.2. Modelo Hadrónico

Los modelos hadrónicos son otro tipo de modelos utilizados para explicar la emisión en rayos γ observada en los AGNs. En estos modelos se asume que los chorros están en parte compuestos por protones los cuales se mueven a velocidades relativistas. Acá, se propone que la radiación de altas energías es producida a través de producción de fotón-piόν y radiación sincrotrón de protones y muones (Mücke et al., 2003).

Este tipo de modelo, a diferencia del modelo leptónico, predice la emisión de neutrinos desde la región de emisión de los rayos gamma como un resultado del decaimiento de los muones y piones esperados (Böttcher et al., 2013).

1.7. Llamaradas

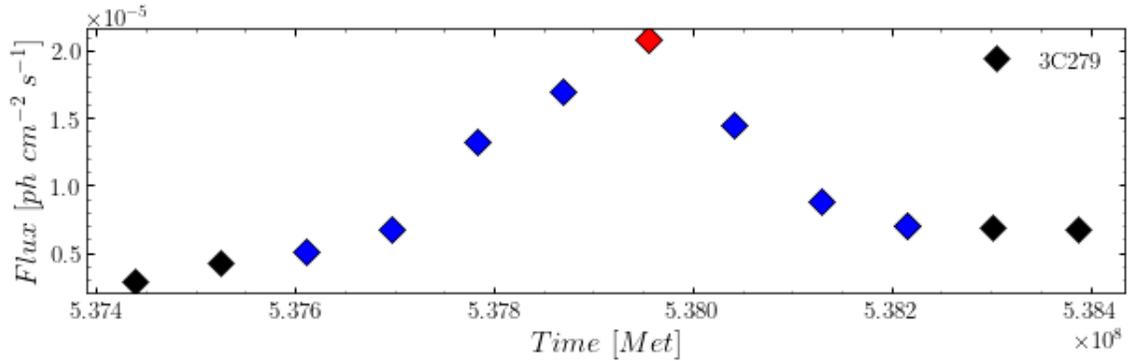


Figura 1.10. Llamara observada en el blazar 3C 279, identificada bajo la definición dada por Nalewajko (2013). Los puntos azules representan los puntos correspondientes a la llamarada, el punto rojo indica su máximo.

Las llamaradas son aumentos en el flujo observado en los chorros de AGNs, en particular para este trabajo, blazares. Una de las características más importantes en el estudio de los blazares es la presencia de llamaradas o ráfagas. De estas es posible estudiar su comportamiento temporal y espectral y así poder comprender los mecanismos responsable del aumento del flujo.

En este trabajo se utiliza la definición de llamarada dada por Nalewajko (2013), esta indica que una llamarada consiste en un periodo continuo de tiempo, asociado

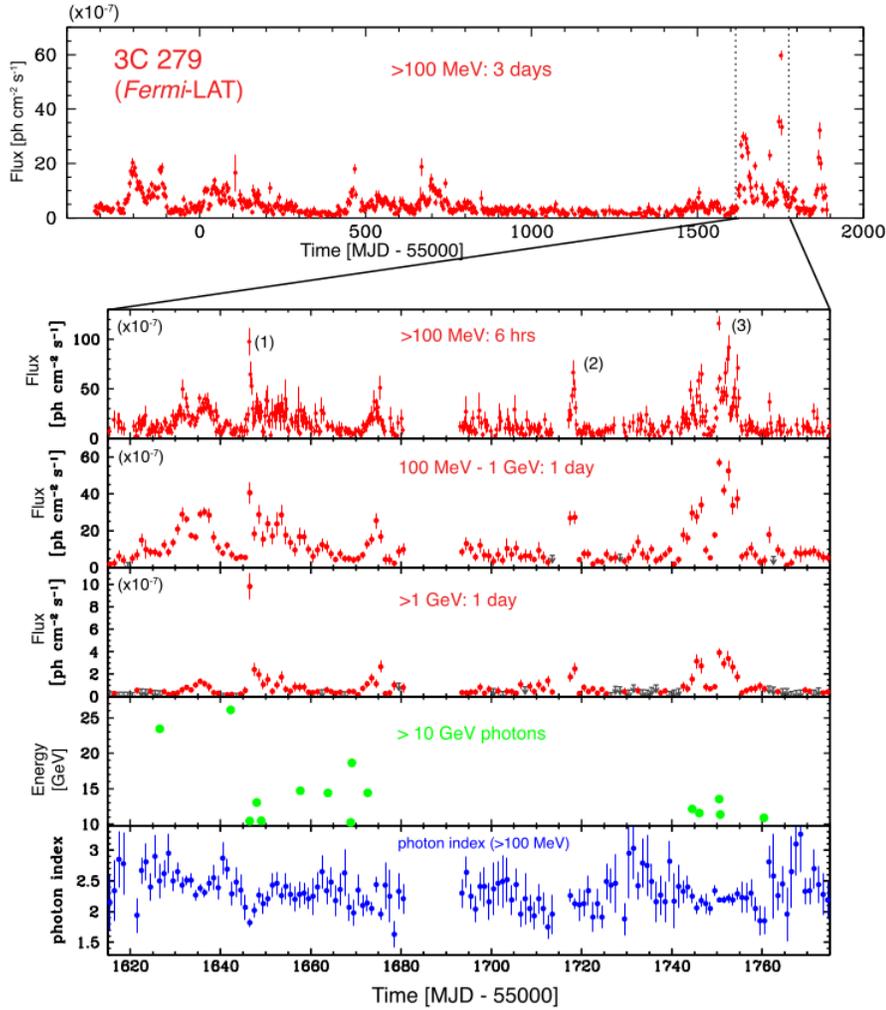


Figura 1.11. Identificación de llamaradas en rayos gamma en distintas energías. Imagen extraída de Hayashida, et al. (2015a).

con un flujo máximo (o pico), durante el cual el flujo excede la mitad del valor del flujo pico (ver figura 2.3).

Los procesos físicos que originan estas llamaradas son poco conocidos, algunos autores proponen origen leptónico, otros proponen origen hadrónico por lo que es importante realizar estudios acerca de las mismas (más información en la sección 1.6.1). En el caso de las bandas que van desde radio hasta luz en el espectro visible, el proceso que mejor explica la emisión es la emisión sincrotrón. En el caso de la emisión de rayos gamma, esta emisión es mejor explicada por procesos de Compton inverso producido por los mismos electrones relativistas que producen la emisión sincrotrón (Hayashida et al., 2015a).

Como se fue demostrado por Hayashida et al. (2015a), es posible identificar y

estudiar las llamaradas a distintas energías. En el caso de los rayos gamma, estas energías pueden ir desde 20 MeV hasta 300 GeV. En el caso particular del blazar 3C 279, un ejemplo de llamaradas pueden ser observadas en la figura 1.11.

Para un mejor estudio de las llamaradas se requiere de un monitoreo continuo por lo que observatorios con un alto ciclo de trabajo son importantes. En la banda de rayos gamma la misión espacial Fermi constituye la herramienta principal para el monitoreo de fuentes en estas energías.

1.7.1. Perfil Temporal en Llamaradas

El modelo utilizado para reproducir el perfil temporal del flujo de las llamaradas es el siguiente:

$$F(t) = F_0 + \frac{b}{e^{-(t-t_0)/t_{rise}} + e^{(t-t_0)/t_{fall}}}$$

Aquí, F_0 representa un nivel base para el flujo por debajo de la llamarada, b mide la amplitud de la llamarada, t_0 describe aproximadamente el momento en el que se alcanza el flujo máximo en la llamarada, t_{rise} y t_{fall} miden los tiempos de subida y de caída de la llamarada.

Este modelo ha sido utilizado en trabajos como Abdo et al. (2010) y Hayashida et al. (2015b) para ajustar la estructura temporal de curvas de luz en rayos Gamma. Además, este modelo tiene la característica de ser apropiado para estudiar tanto la duración como la simetría de llamaradas de manera individual.

El tiempo en que se alcanza exactamente el máximo de la llamarada se obtiene de manera sencilla derivando con respecto del tiempo la expresión anterior:

$$t_{pico} = t_0 + \frac{t_{rise}t_{fall}}{t_{rise} + t_{fall}} \ln \left(\frac{t_{fall}}{t_{rise}} \right).$$

Según Abdo et al. (2010), la duración total de las llamaradas se puede aproximar utilizando la siguiente expresión:

$$t_{total} \approx 2(t_{subida} + t_{caida}).$$

Abdo et al. (2010) también sugiere un criterio para describir la simetría de las

llamaradas. Este lo define de la siguiente manera:

$$\xi = \frac{t_{fall} - t_{rise}}{t_{rise} + t_{fall}},$$

donde ξ varia entre -1 y 1 para llamaradas completamente asimétricas a la derecha o a la izquierda, respectivamente. A partir de este parámetro es posible definir tres clases de llamaradas: simétricas con $-0.3 < \xi < 0.3$, moderadamente asimétricas con $-0.7 < \xi < -0.3$ o $0.3 < \xi < 0.7$ y notoriamente asimétricas con $-1 < \xi < -0.7$ y $0.7 < \xi < 1$.

2. Telescopio de Gran Área y el Software de Análisis

2.1. Telescopio de Gran Área

El telescopio de gran área (Fermi-LAT) es el principal instrumento a bordo de el telescopio espacial de rayos gamma, Fermi. Este se desarrolló gracias a una colaboración entre distintas instituciones de Francia¹, Italia², Japón³, Suiza⁴ y Estados Unidos⁵. El telescopio de gran área es un telescopio de producción de pares con un amplio rango de visión cubriendo aproximadamente un 20 % del cielo y es sensible a energías en el rango de 20 MeV y 300 GeV.

Los datos obtenidos por medio del Fermi-LAT son utilizados para:

- 1 Permitir una rápida notificación de destellos de rayos gamma de alta energía y monitoreo de fuentes variables.
- 2 Crear un catálogo de fuentes de altas energías.
- 3 Medir el espectro de fuentes de entre 20 MeV y más de 50 GeV.
- 4 Localizar fuentes entre 0.3 y 2 minutos de arco.
- 5 Obtener y mapear el espectro de distintas fuentes en energías de entre 20 MeV y 500 GeV.
- 6 Medir el fondo difuso de rayos gamma hasta energías de TeV.

¹Commissariat à l'Énergie Atomique, CNRS/Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

²Agenzia Spaziale Italiana, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Istituto Nazionale di Astrofisica

³Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology; High Energy Accelerator Research Organization (KEK); Japan Aerospace Exploration Agency

⁴K. A. Wallenberg Foundation, Swedish Research Council, National Space Board

⁵NASA, Department of Energy

7 Explorar en busca de posibles candidatos a materia oscura.



Figura 2.1. Ilustración del telescopio espacial de rayos Gamma. Imagen por Nasa.

Sección basada en Atwood et al. (2009).

2.1.1. Descripción Técnica

Este telescopio posee las siguientes características:

- Rango de energía: desde 20 MeV hasta más de 300 GeV.
- Resolución de la energía: menor a un 15 % para energías mayores a 100 MeV.
- Área efectiva: área efectiva máxima mayor a 8000 cm² para incidencia normal.

- Resolución angular para un único fotón: menor que 0.15° para una energía mayor a 10 GeV, menor que 3.5° para una energía de 100MeV
- Campo de visión: 2.4 estereorradianes⁶.
- Determinación de la posición de la fuente: menor a 0.5 arcominutos para fuentes con altas latitudes.
- Sensibilidad de fuentes puntuales: 6×10^{-9} ph cm⁻² s⁻¹ para energías mayores a 100 MeV.
- Precisión temporal: menor a 10 microsegundos, relativo a el tiempo del satélite.
- Rechazo del Fondo: contaminación residual menor al 10 % para energías entre 100 MeV y 300 GeV.
- Tiempo muerto: menor a 100 microsegundos por evento.

Información obtenida de (Myers, 2019)

Fermi-LAT es un telescopio de conversión de pares compuesto por un escudo de anticoincidencia, un convertidor-seguidor de precisión y un calorímetro.

2.1.2. Funcionamiento

El proceso por el cual se realizan las mediciones permite distinguir los rayos gamma de rayos cósmicos, además de permitir determinar la dirección de los fotones incidentes. Aquí, la radiación incidente tiene su primer contacto con un escudo de anticoincidencia que es sensible a las partículas cargadas, posteriormente pasa por varias capas delgadas compuestas por materiales de un alto número atómico. Estas capas son llamadas láminas de conversión ya que al poseer núcleos pesados estas facilitan la conversión del rayo gamma a un par positrón-electrón. Una vez realizada la conversión, se registra la trayectoria de las partículas mediante detectores de seguimiento. Por último la energía es medida por el calorímetro. La energía y dirección de origen de los rayos gamma son inferidos de la trayectorias y energía del par electrón-positrón (Myers, 2019).

⁶El estereorradián, con simbolo *sr*, es la unidad de medida de los ángulos solidos en el sistema internacional de unidades.

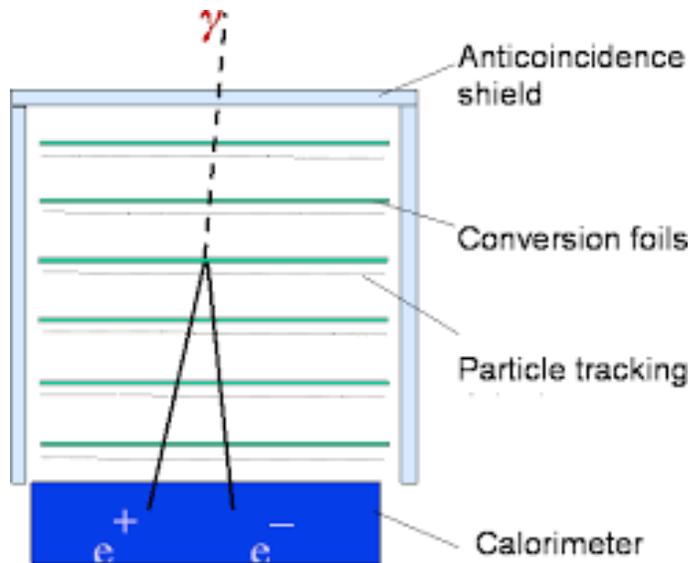


Figura 2.2. Esquema de funcionamiento y disposición de los componentes de Fermi-LAT. Imagen obtenida en Myers (2019)

2.1.2.1. Convertidor-Seguidor de Precisión

El convertidor-seguidor está compuesto por láminas de conversión y detectores de seguimiento. Las láminas de conversión constan de 16 planos de materiales con un número atómico alto, en estas se realiza la conversión de pares. Intercalados con las láminas se encuentran detectores de movimiento que son sensibles a la posición de las partículas por lo que son capaces de registrar su trayectoria (Atwood et al., 2009).

2.1.2.2. Calorímetro

Un calorímetro es un instrumento utilizado para medir distintas propiedades térmicas como el calor o la capacidad calorífica. Para Fermi-LAT, el calorímetro tiene dos funciones principales. La primera es medir la energía acumulada debido los pares positrón-electrón generados por el fotón incidente. La segunda es generar un perfil del desarrollo de los pares para poder discriminar el fondo y estimar las fluctuaciones de pérdida de energía.

El calorímetro está compuesto por módulos y su vez cada módulo está compuesto por 96 cristales de cesio de yodo activado con talio. Cada cristal está óptimamente aislado y están dispuestos en arreglos de 8 capas de 12 cristales (Atwood et al., 2009).

2.1.2.3. Escudo de Anticoincidencia

El escudo de anticoincidencia (también llamado ACD) es un detector cuyo propósito es rechazar el fondo compuesto por partículas cargadas. El ACD es capaz de detectar partículas cargadas en el campo de visión de Fermi-LAT con una eficiencia de 0.9997 (Atwood et al., 2009).

2.2. Fermi Science Tools

Las Fermi Science Tools, también llamadas Fermitools o únicamente Science-Tools, son un conjunto de herramientas que provee el centro de soporte científico de Fermi (FSSC) con el fin de facilitar el análisis de datos pertenecientes a Fermi-LAT y El Monitor de Destellos Rayos Gamma. Estas herramientas pueden ser instaladas mediante el gestor de paquetes **conda** utilizando el canal **fermi_dev_externals** (Asercion, 2019). Las Fermitools son una colección de herramientas disponibles a través de línea de comando (Sanchez and Deil, 2013).

En el presente trabajo se realizó utilizando Fermitools versión 2.08. Más información acerca de la reducción de datos realizada puede encontrarse en la sección 3.2.

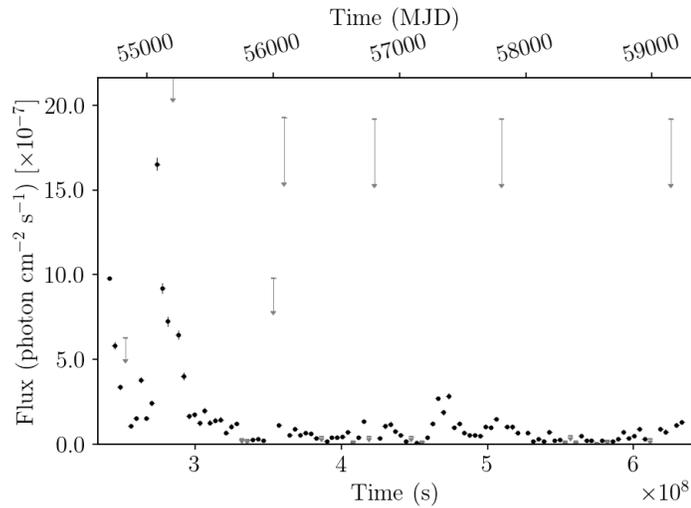


Figura 2.3. Ejemplo de una curva de luz generada por las Fermitools. En la figura puede observarse la curva de luz con episodios de 45 días para 3C 273. La curva de luz muestra observaciones que van desde 4 de agosto de 2008 15:43:36 UTC y el 9 de febrero de 2021 22:39:49 UTC.

2.2.1. Requisitos

Para poder hacer uso de este software de análisis se requiere sistema operativo Mac OS o Linux y una distribución de Anaconda⁷ con Python 3⁸.

2.3. Enrico

Enrico es un paquete escrito en Python cuyo objetivo es facilitar el análisis de datos obtenidos a través de Fermi-LAT. Mediante instrucciones de línea de comando, este paquete permite desarrollar un análisis completo, añade características en las Fermitools y simplifica su uso. Sus principales características son:

- Utiliza las Fermitools para realizar análisis mediante instrucciones de líneas de comando que simplifican el proceso.
- Genera los archivos de los modelos xml, los archivos de tipo FITS y gráficos con calidad de publicación.
- Hace uso de archivos de configuración lo que ayuda con la reproducibilidad de los resultados.
- Genera gráficos de control para asegurar la fiabilidad del análisis.

Dado que Enrico está escrito en Python, el código fuente es portátil y este no depende ni de la arquitectura del procesador ni de la versión de las Fermitools. (Sanchez and Deil, 2013)

⁷<https://www.anaconda.com/>

⁸<https://www.python.org/>

3. Metodología

3.1. Curvas de Luz

Una curva de luz es una gráfica en donde se muestra la evolución del brillo o flujo de un objeto astronómico como una función del tiempo. Las unidades que se utilizarán en este trabajo son, para el flujo, fotones por unidad de área por unidad de tiempo ($\text{ph cm}^2 \text{s}^{-1}$); para el tiempo, días julianos modificados (MJD).

Los puntos de las curvas de luz mostradas fueron obtenidos mediante el software de análisis Fermitools, la serie de instrucciones Enrico y datos de observaciones realizadas por Fermi-LAT para energías de entre 100 MeV y 300 GeV y para una ventana temporal de 10 años que van desde el 1 de septiembre del 2008 hasta el 9 de febrero de 2021. Posteriormente, mediante el lenguaje de Python, se realizaron las gráficas correspondientes.

3.2. Reducción de los Datos

Se analizaron datos para distintos blazares observados por Fermi-LAT, en particular se requirió que estos objetos presentaran un valor de fluencia alta en rayos gamma con el fin de tener una buena estadística. Los datos utilizados se encuentran en el rango de energías de 100 MeV a 300 GeV y estos corresponden a las observaciones realizadas entre el 4 de agosto de 2008 15:43:36 UTC y el 9 de febrero de 2021 22:39:49 UTC. Las curvas de luz y las distribuciones de energía espectral se construyeron utilizando el software de análisis Fermitools versión 2.08 con la ayuda de las instrucciones de líneas de comando provistas por Enrico.

De las curvas de luz obtenidas se identificaron distintas llamaradas bajo la definición dada por Nalewajko (2013) (revisar sección 1.7) con apoyo del lenguaje de programación Python. Una vez identificadas las llamaradas, se genera la curva de luz considerando únicamente la ventana temporal que contiene a la llamarada,

utilizando episodios de un menor tamaño (1 día o 3 días) con la intención de mejorar la resolución y obtener un mejor detalle del comportamiento.

Luego de identificar las llamaradas, se procede a obtener el perfil temporal de las llamaradas ajustando el modelo descrito en la sección 1.7.1. Utilizando los parámetros obtenidos, es posible calcular distintas características temporales y energéticas como lo son la duración, la simetría y el flujo máximo.

Para la construcción de las distribuciones de energía espectral se utilizó el modelo descrito en la sección 1.6.1. Este ajuste se realiza por medio las Fermitools y con ayuda de las instrucciones de línea de comando Enrico. De este proceso nos es posible obtener el índice espectral correspondiente a cada llamarada. Cada SED se construye en base a la ventana temporal correspondiente a la llamarada identificada.

3.3. Análisis de relación

Durante la exploración de dependencia entre las características temporales y energéticas con el comportamiento espectral, se asumió que de existir una relación esta debía ser lineal. Es por esto que se realizaron los siguientes ajustes lineales:

- índice espectral - duración
- índice espectral - simetría
- índice espectral - flujo máximo.

Para poder validar los resultados, se realizó la siguiente prueba de hipótesis con una significancia de 0.05:

$$H_0 : \text{parámetro} = 0$$

$$H_1 : \text{parámetro} \neq 0,$$

donde H_0 es la hipótesis nula y H_1 es la hipótesis alterna. Se obtuvieron los p-valor¹ para cada uno de los parámetros a través del análisis de regresión. Acá se falla en el rechazo de la hipótesis alterna si y solo si el p-valor es menor que la significancia.

¹El p-valor puede entenderse como la probabilidad de que, dado el resultado observado, la hipótesis nula sea correcta.

4. Muestra

4.1. Tercer Catálogo de Núcleos Galácticos Activos por FERMI-LAT

Esta sección esta basada en Ackermann et al. (2015).

Un catálogo es una lista de objetos astronómicos que comparten alguna característica como el origen, morfología, herramientas de observación, etc. El Tercer catálogo de núcleos galácticos activos detectados por FERMI-LAT (3LAC) es un subconjunto de los objetos presentados en el tercer catálogo de fuentes observadas por FERMI-LAT (3FGL). El catálogo 3LAC contiene 1591 objetos considerados como AGNs con alto nivel de confianza.

Del total de objetos en este catálogo tenemos que:

- 467 son clasificados como radio cuásares de espectro plano,
- 632 son clasificados como objetos de tipo BL Lac,
- 460 con blazares de tipo desconocido,
- 32 son AGNs no clasificados como blazares.

4.2. Selección de Objetos

Mediante exploración visual se hizo una selección entre los objetos más brillantes pertenecientes al tercer catálogo de núcleos galácticos activos detectados por FERMI-LAT. Los objetos incluidos en el estudio son presentados a continuación junto con sus curvas de luz.

4.2.1. 3C279

El blazar 3C279, clasificado como FSRQ y OVV, es uno de los más observados y estudiados, esta localizado a una ascensión recta de $12^{\text{h}} 56^{\text{m}} 11.17^{\text{s}}$ y una declinación de $-5^{\circ} 47' 21.23''$, posee una masa aproximada de $10^{8.9 \pm 0.5} M_{\odot}$ y un corrimiento al rojo $z = 0.538$. 3C279 radía en todo el espectro electromagnético desde radio hasta rayos Gamma, donde, en distintas escalas temporales, muestra una fuerte variabilidad en todas estas longitudes de onda. Este es uno de los blazares más conocidos y estudiado debido a que es uno de los objetos más brillantes en rayos Gamma (Qian et al., 2019).

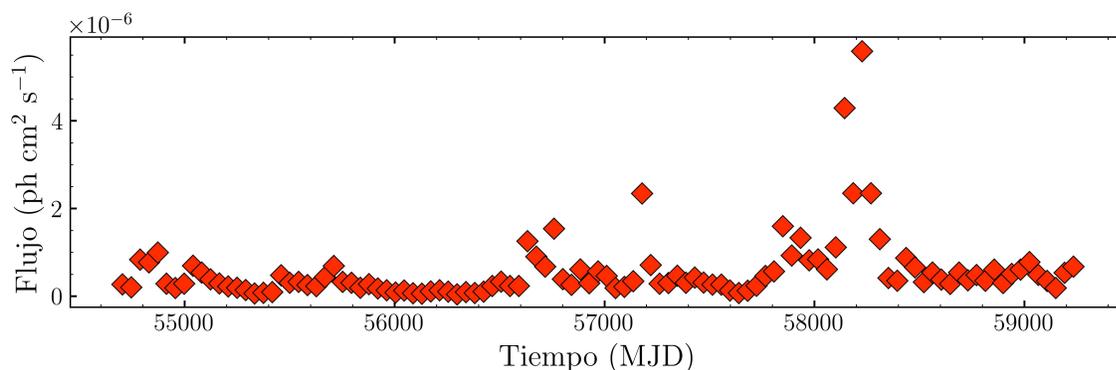


Figura 4.1. Curva de luz de 3C279.

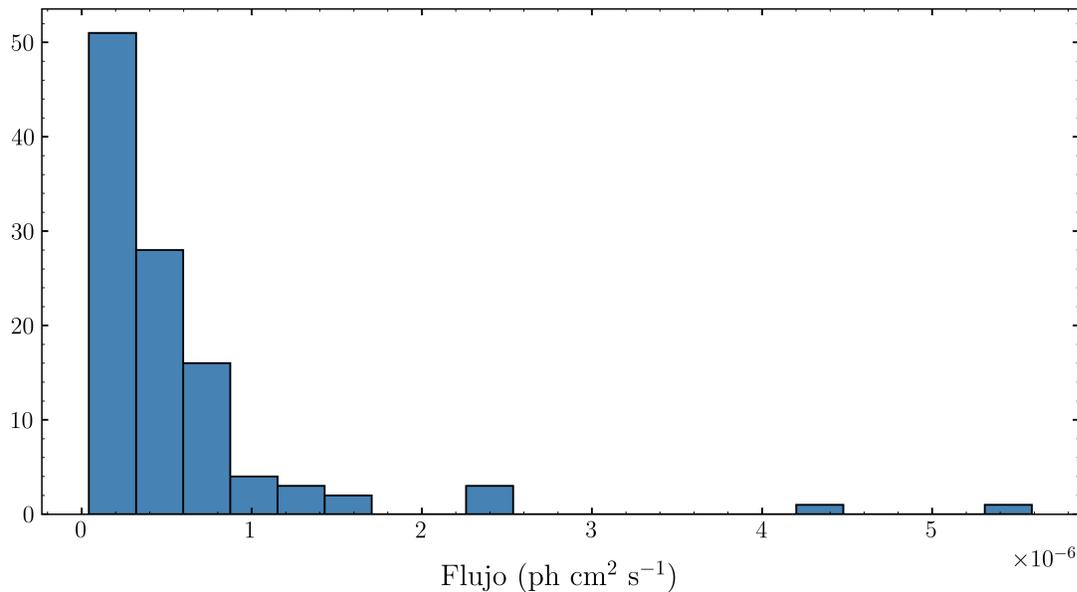


Figura 4.2. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para 3C 279

4.2.2. 3C66A

El blazar 3C66A es clasificado como un objeto tipo BL Lac con la característica de ser un objeto con un pico debido a sincrotrón a frecuencias intermedias. Este objeto se encuentra a una distancia de aproximada de $z = 0.444$ con un límite inferior para la estimación de $z \geq 0.33$ (Otero-Santos et al., 2020). Este objeto está localizado a una ascensión recta de $2^{\text{h}} 29^{\text{m}} 39.61^{\text{s}}$ y una declinación de $42^{\circ} 02' 7.79''$ Gaia Collaboration (2018).

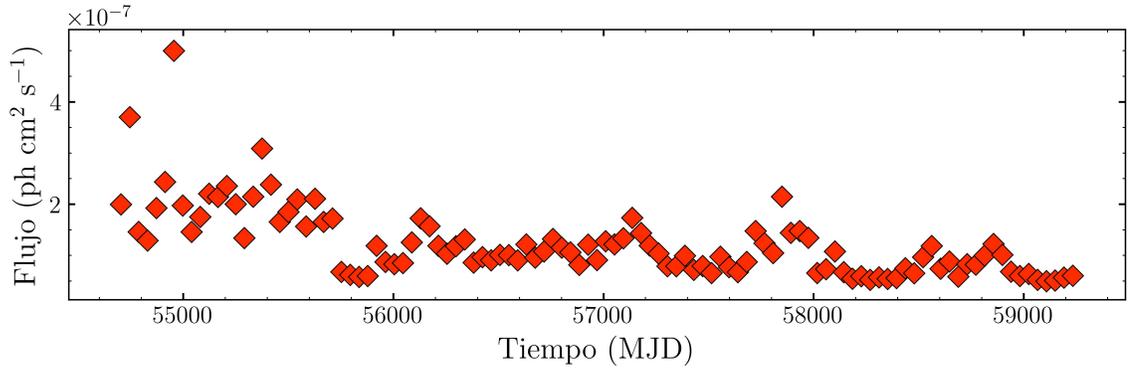


Figura 4.3. Curva de luz de 3C66A.

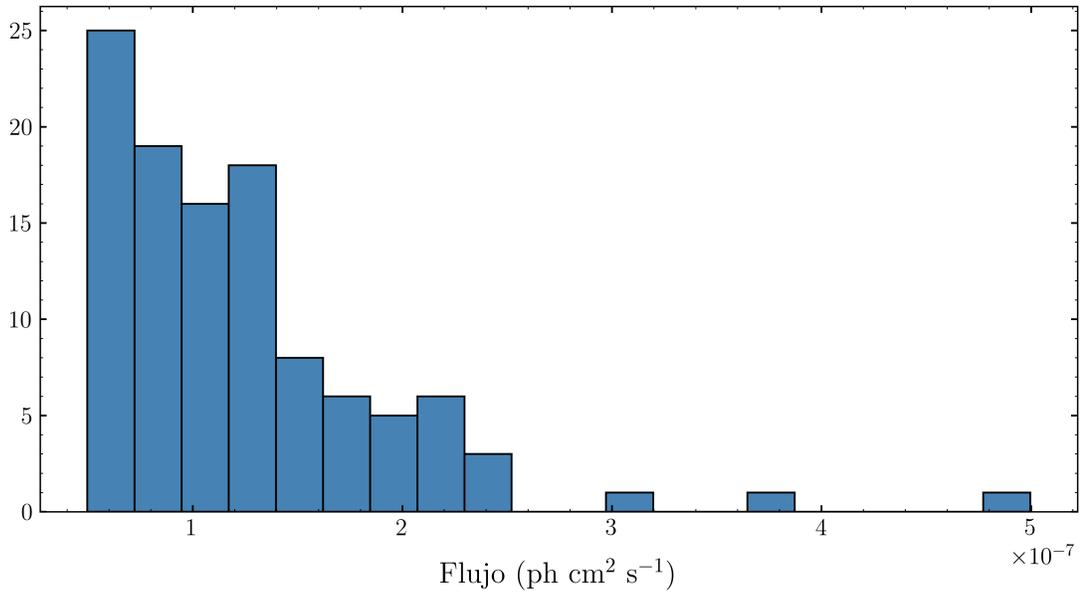


Figura 4.4. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para 3C66A

4.2.3. PKS2233-148

PKS2233-148 es un blazar de tipo BL Lac donde no se ha observado evidencia de variabilidad. Este presenta un corrimiento al rojo de $z = 0.325$ con una cota superior asociada a la mediación de 0.609. En este objeto se observa una distribución espectral de energía dominada por emisión sincrotrón (Whiting et al., 2002). PKS2233-148 se encuentra localizado a una ascensión recta de $22^{\text{h}} 36^{\text{m}} 34.08^{\text{s}}$ y una declinación de $-14^{\circ} 33' 22.18''$ (Fey et al., 2004).

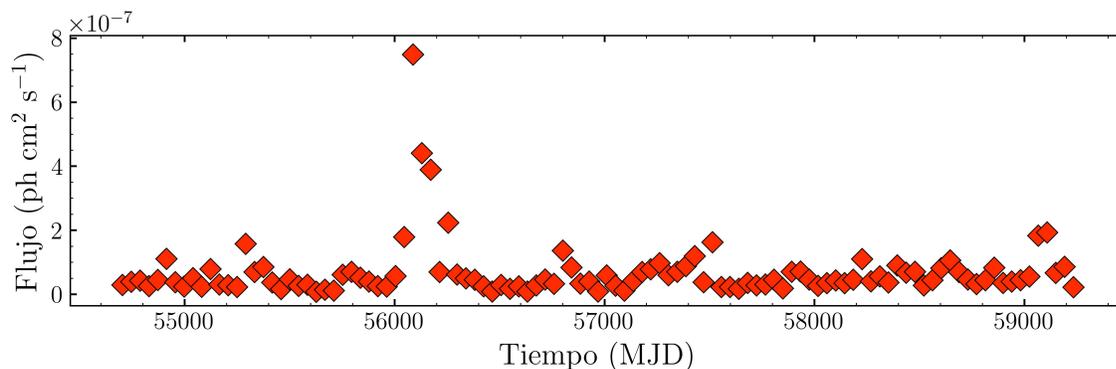


Figura 4.5. Curva de luz de PKS2233-148.

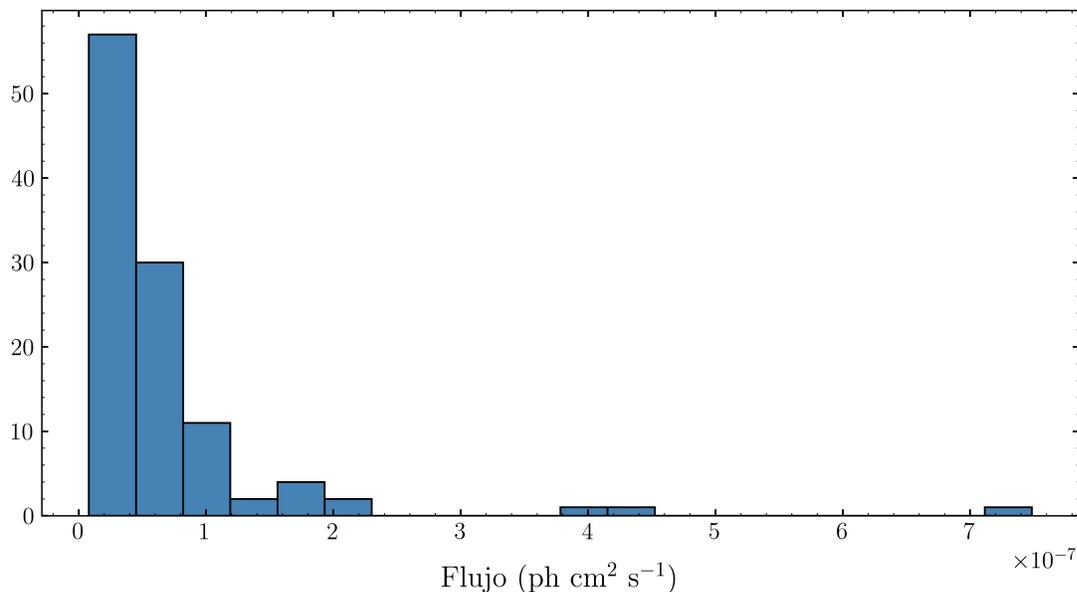


Figura 4.6. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para PKS 2233-148

4.2.4. OJ 287

OJ 287 es un blazar de tipo BL Lac altamente estudiado y cuyo espectro ha sido medido tanto en radio, rayos X y la banda óptica. Este blazar destaca por su emisión periódica (con un período cercano a los 12 años) la cual se cree es debido la presencia de un sistema binario de agujeros negros súper masivos (Sinitsyna and Sinitsyna, 2022). OJ 287 se encuentra localizado a una ascensión recta de $8^{\text{h}} 54^{\text{m}} 48.87^{\text{s}}$ y una declinación de $20^{\circ} 6' 30.63''$ (Gaia Collaboration, 2020).

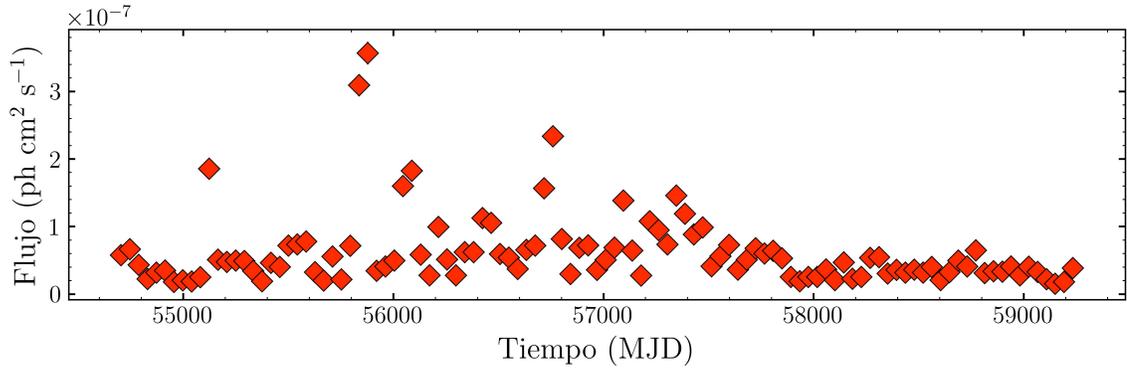


Figura 4.7. Curva de luz de OJ 287.

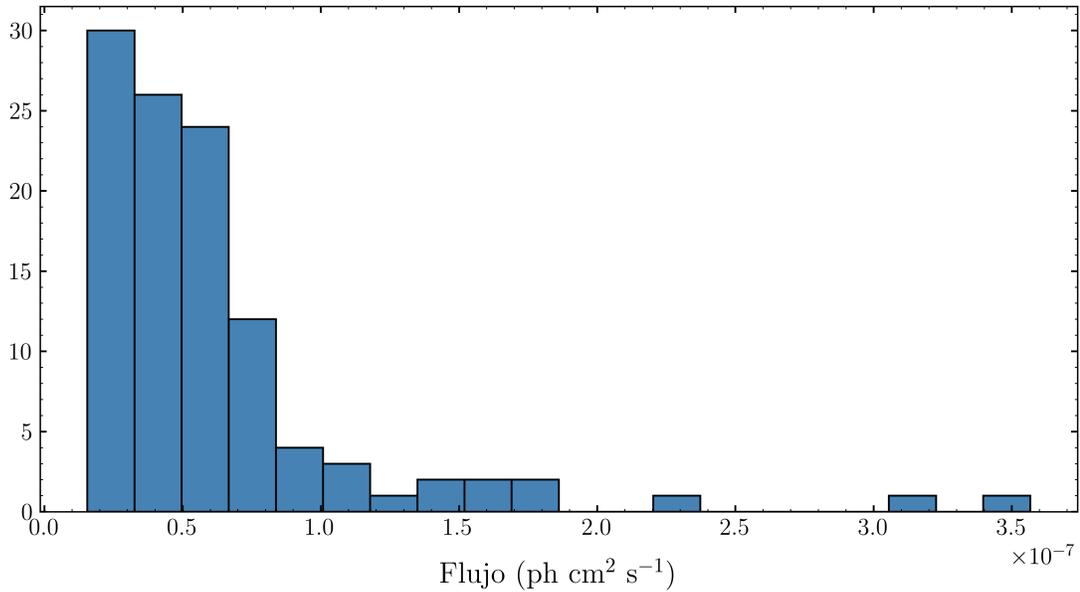


Figura 4.8. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para OJ287

4.2.5. PKS 0447-439

PKS 0447-439 es un blazar de tipo BL Lac. Este objeto es uno de las fuentes más brillantes observadas por FERMI-LAT presentado llamas en la banda óptica y en rayos γ . Este objeto se encuentra a una distancia de $z = 0.107$ y está localizado en una ascensión recta de $4^{\text{h}} 49^{\text{m}} 24.69^{\text{s}}$ y una declinación de $-43^{\circ} 50' 8.96''$ (Gaia Collaboration, 2020; Zhou et al., 2014; Craig and Fruscione, 1997; Jankowsky and Wagner, 2020).

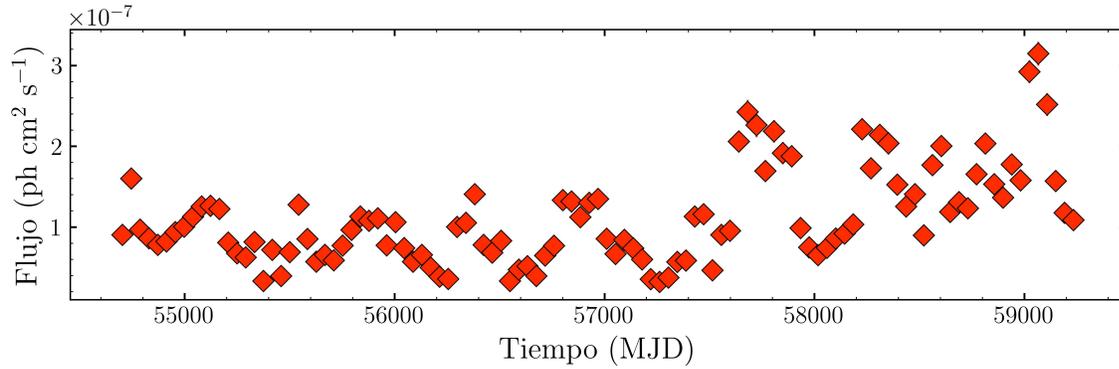


Figura 4.9. Curva de luz de PKS 0447-439.

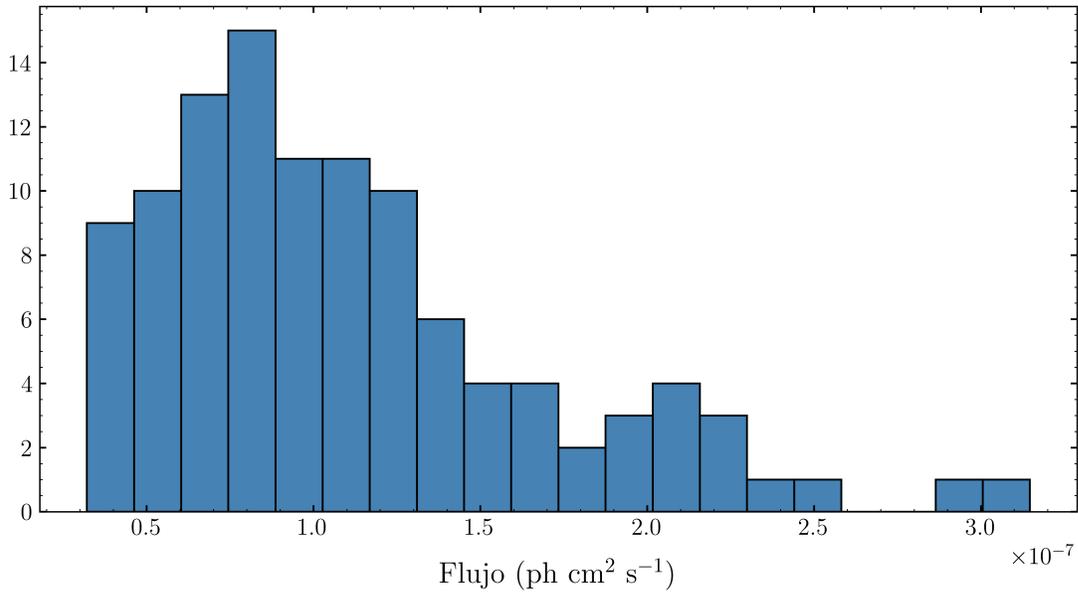


Figura 4.10. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para PKS 0447-439

4.2.6. PKS 0537-441

Este objeto presenta características intermedias entre un BL Lac y un OVVQ, además, es uno de los blazares más estudiados del hemisferio sur. Este blazar ha sido observado en energías que van desde el radio hasta los GeV mostrando alta luminosidad y variabilidad (Wang et al., 2019; Sandrinelli et al., 2016). PKS 0537-441 se encuentra a una distancia de $z = 0.892$ (Mao, 2011) y localizado a una ascensión recta de $5^{\text{h}} 38^{\text{m}} 50.36^{\text{s}}$ y una declinación de $-44^{\circ} 5' 8.94''$ (Gaia Collaboration, 2020).

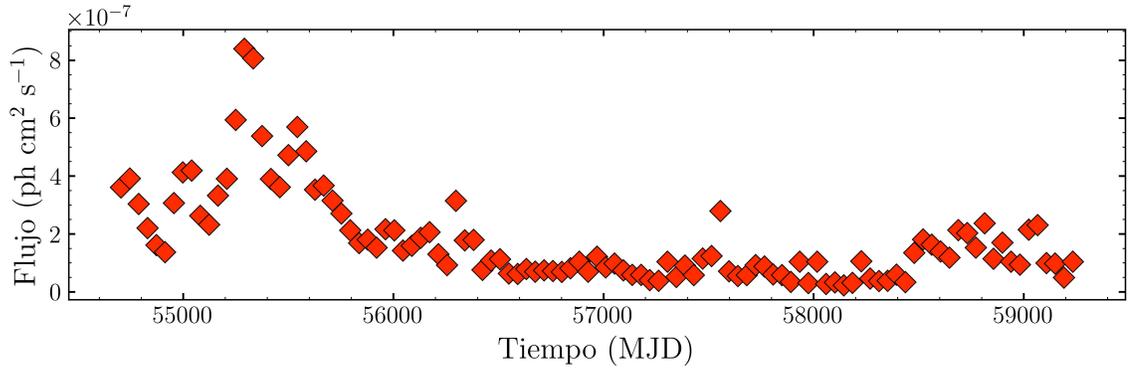


Figura 4.11. Curva de luz de PKS 0537-441.

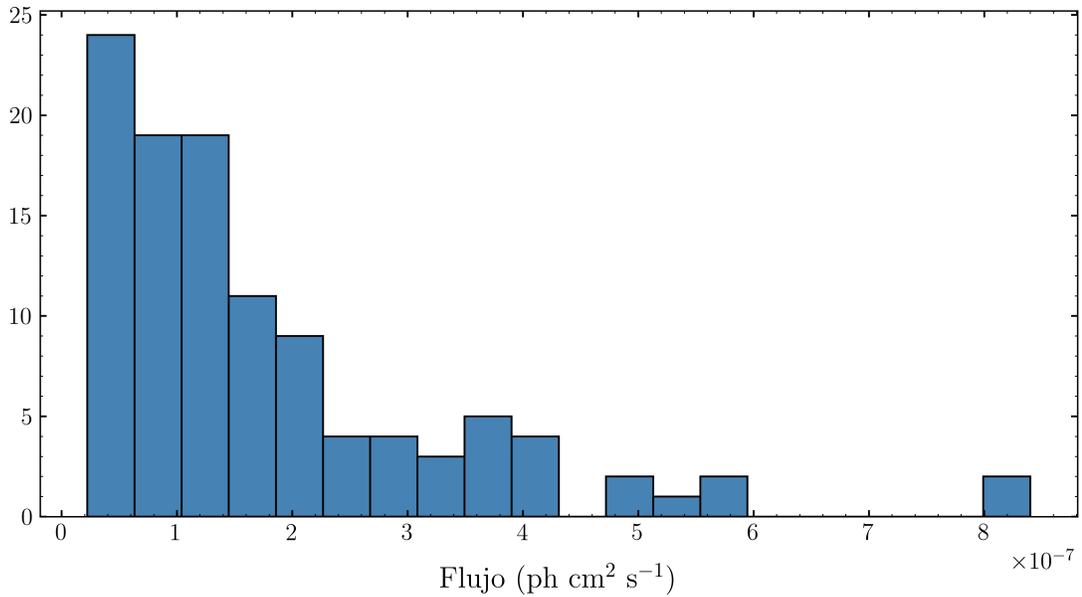


Figura 4.12. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para PKS 0537-441

4.2.7. PKS 2155-304

PKS 0537-441 se encuentra a una distancia de $z = 0.116$ (Ganguly et al., 2013) y localizado a una ascensión recta de $21^{\text{h}} 58^{\text{m}} 52.06^{\text{s}}$ y una declinación de $-30^{\circ} 13' 32.11''$ (Gaia Collaboration, 2020). Este objeto fue descubierto mediante observaciones en radio y clasificado como un BL Lac (Gao et al., 2021). Este objeto se caracteriza por una alta presencia de llamaradas en energías que van desde los rayos X hasta los TeV (Kapanadze, 2021).

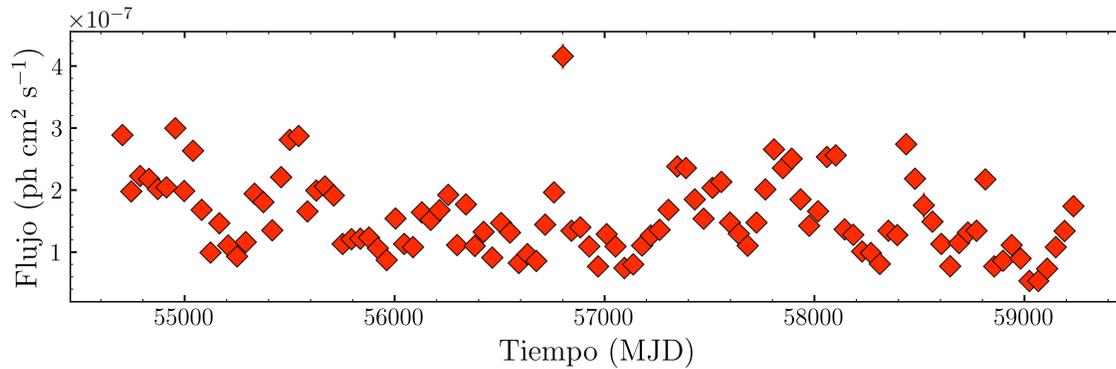


Figura 4.13. Curva de luz de PKS 2155-304.

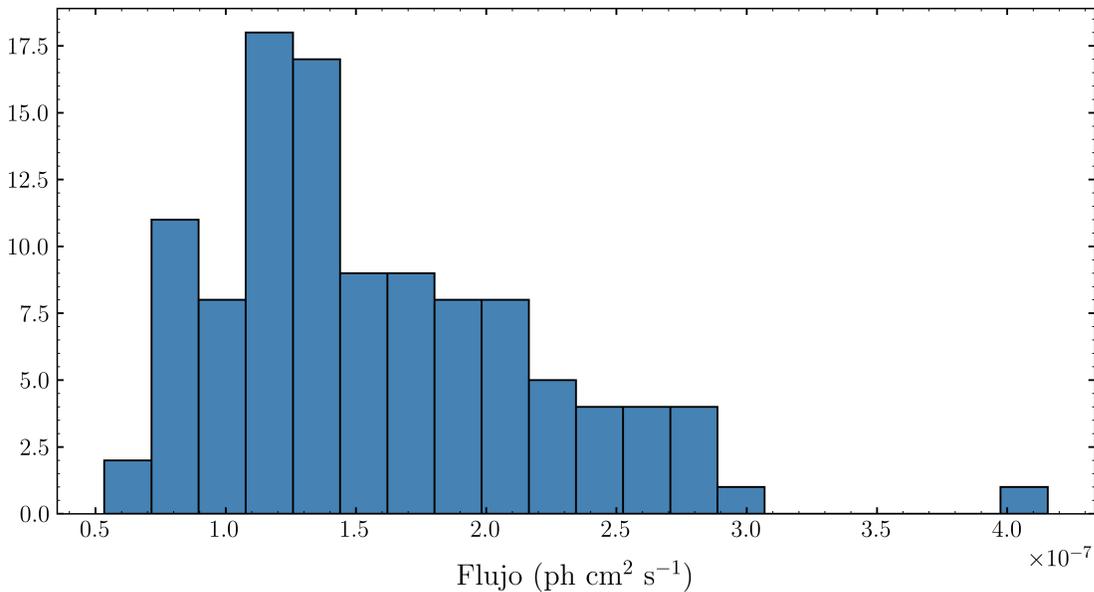


Figura 4.14. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para PKS 2155-304

4.2.8. PMN J2345-1555

Este es un objeto es un blazar de tipo BL Lac situado a una distancia de $z = 0.621$, localizado en una ascensión recta de $23^{\text{h}} 45^{\text{m}} 12.40^{\text{s}}$ y una declinación de $-15^{\circ} 55' 8.00''$. Este objeto posee una alta variabilidad a lo largo de todo el espectro lo que ha permitido la detección de llamaradas en distintas energías (Jiang et al., 2020)

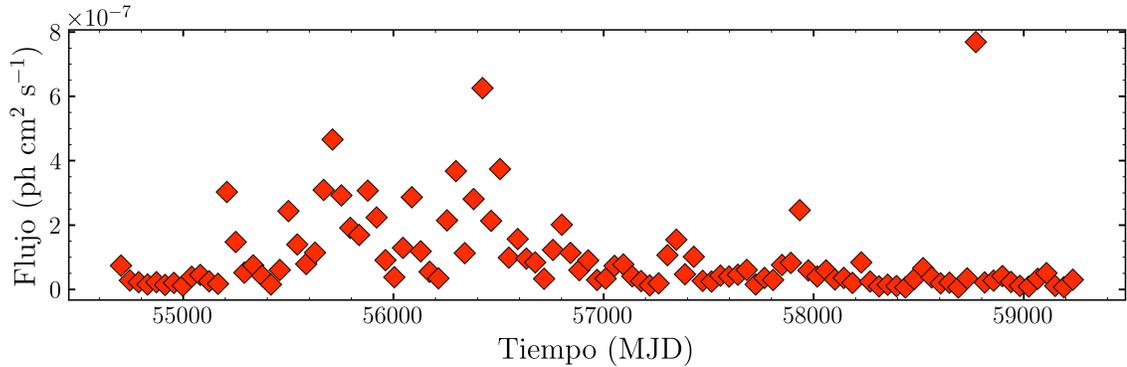


Figura 4.15. Curva de luz de PMN J2345-1555.

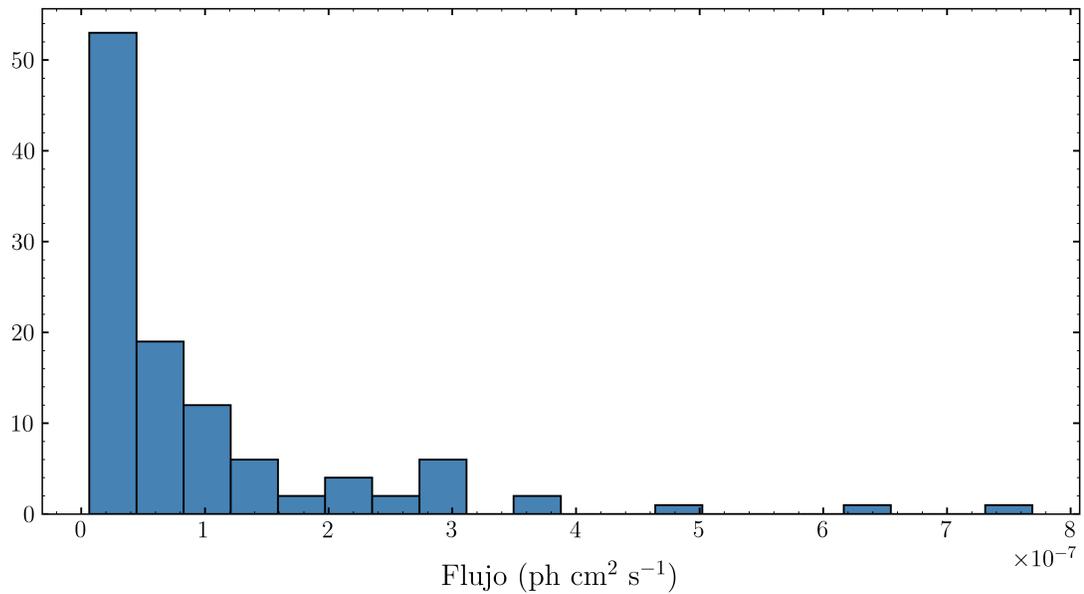


Figura 4.16. Distribución de flujos observados en un rango de energías entre 100 MeV y 300 GeV y una ventana temporal entre el 4 de agosto de 2008 y el 9 de febrero de 2021 para PMN J2345-1555

5. Resultados

5.1. Comportamiento Temporal

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos al ajustar el modelo 1.7.1 a las llamaradas identificadas. Las dimensionales para los parámetros obtenidos y los valores que se calculan a partir de estos se presentan en la tabla 5.1. De acá en adelante, estas dimensionales corresponden a las magnitudes físicas indicadas a continuación.

Parámetro	dimensional
t_0	MJD
t_{fall}	días
t_{rise}	días
b	ph cm ² s ⁻¹
F_0	ph cm ² s ⁻¹
t_{pico}	MJD
t_{total}	días
simetría	adimensional

Tabla 5.1. Tabla de dimensionales para parámetros obtenidos de ajustes y valores calculados.

5.1.1. 3C66A

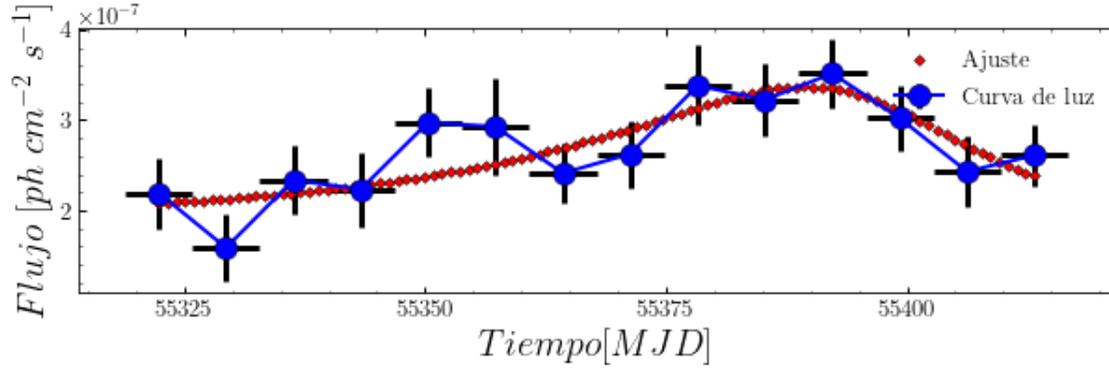


Figura 5.1. Ajuste a llamarada encontrada en 3C66A

Parámetro	Valor
t_0	55396.54 ± 12.63 MJD
t_{fall}	10.22 ± 7.70 días
t_{rise}	26.17 ± 30.04 días
b	$(26.15 \pm 7.57) \times 10^{-8}$
F_0	$(19.19 \pm 6.00) \times 10^{-8}$

Tabla 5.2. Parámetros obtenidos del ajuste a 3C66A.

Magnitud	Valor
t_{pico}	55398 ± 20
t_{total}	70 ± 60
simetría	-0.4 ± 0.5

Tabla 5.3. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a 3C66A.

Fue posible identificar una llamarada en el objeto 3C66A en un intervalo de tiempo que inicia en 94827583.05 y finaliza en 302680174.94 METs. La llamarada presenta una asimetría moderada indicando que el tiempo de subida es ligeramente mayor que el tiempo de caída. Además, esta llamarada aparenta ser de una larga duración.

5.1.2. PKS 0447-439

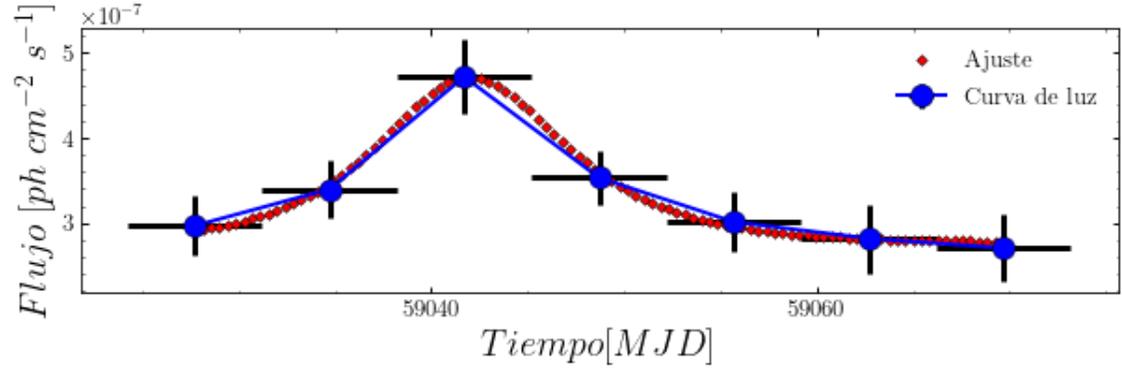


Figura 5.2. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 0447-439

Parámetro	Valor
t_0	59041.84 ± 2.52
t_{fall}	4.56 ± 1.48
t_{rise}	4.23 ± 1.16
b	$(38.64 \pm 2.43) \times 10^{-8}$
F_0	$(277.41 \pm 6.61) \times 10^{-9}$

Tabla 5.4. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0447-439.

Magnitud	Valor
t_{pico}	59042.0 ± 2.7
t_{total}	18 ± 4
simetría	0.04 ± 0.21

Tabla 5.5. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0447-439.

En el caso del objeto PKS 0447-439 fue posible identificar una llamada bien definida. Esta inicia en 614971714.25 y finaliza en 618595987.44 METs. Esta llamada presenta un comportamiento simétrico, con tiempos de subida y caída muy similares, además de ser de una breve duración.

5.1.3. PKS 0537-441

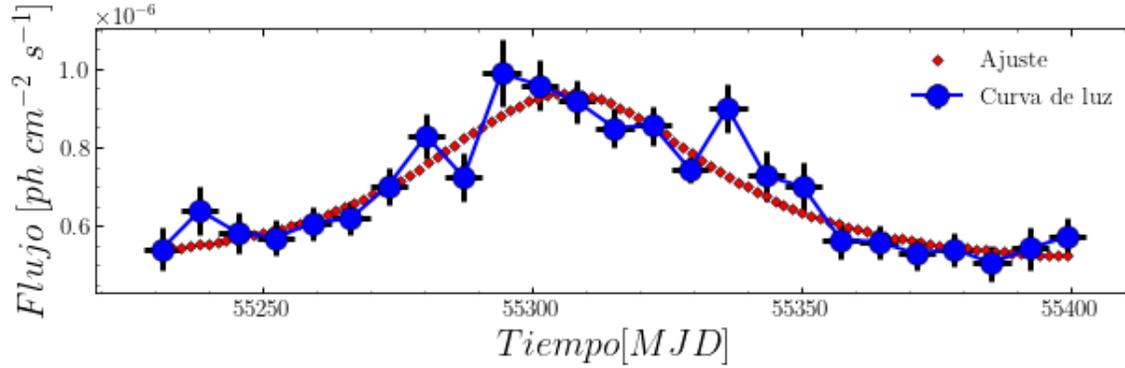


Figura 5.3. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 0537-441

Parámetro	Valor
t_0	55306.41 ± 7.63
t_{fall}	23.13 ± 6.59
t_{rise}	22.95 ± 5.39
b	$(8.60 \pm 7.61) \times 10^{-8}$
F_0	$(50.72 \pm 3.22) \times 10^{-8}$

Tabla 5.6. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0537-441.

Magnitud	Valor
t_{pico}	55306 ± 2.7
t_{total}	92 ± 17
simetría	0.00 ± 0.18

Tabla 5.7. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 0537-441.

En el objeto PKS 0537-441 se identificó una llamara en el intervalo temporal con cota inferior 286974991.15 y cota superior 301472083.88 METs. La llamarada identificada presenta un comportamiento simétrico en donde el tiempo de caída es ligeramente menor al tiempo de subida. Esta llamara presenta una alta duración.

5.1.4. PKS 2155-304

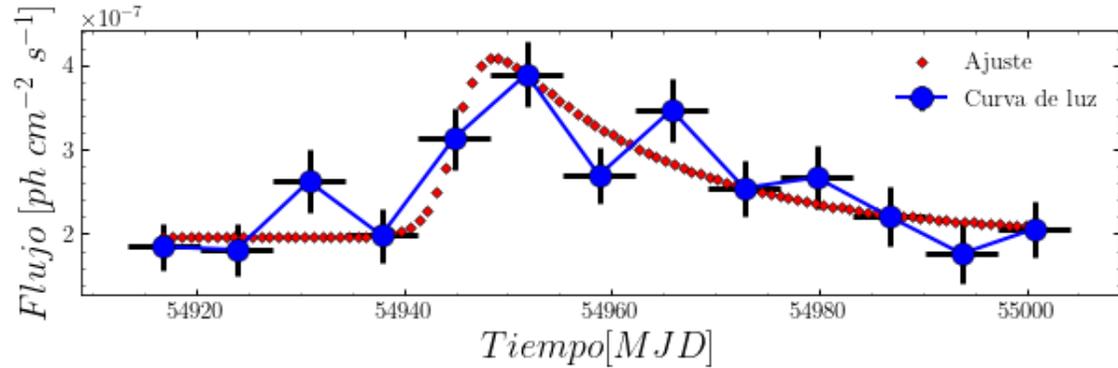


Figura 5.4. Ajuste a llamarada encontrada en PKS 2155-304

Parámetro	Valor
t_0	54945.35 ± 4.60
t_{fall}	17.43 ± 7.76
t_{rise}	1.47 ± 6.77
b	$(2.79 \pm 1.02) \times 10^{-7}$
F_0	$(19.69 \pm 1.78) \times 10^{-8}$

Tabla 5.8. Parámetros obtenidos del ajuste a PKS 2155-304.

Magnitud	Valor
t_{pico}	54949 ± 9
t_{total}	38 ± 21
simetría	0.8 ± 0.7

Tabla 5.9. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PKS 2155-304.

La llamarada identificada en el objeto PKS 2155-304 presenta un comportamiento fuertemente asimétrico. En esta, el tiempo de subida es considerablemente menor que el tiempo de caída. Además, es posible observar que esta llamarada es de una duración media. El intervalo temporal en que fue posible observar estos comportamientos inicia en 259792942.27 y finaliza en 266437443.11 METs.

5.1.5. PKS 2233-148

En el caso particular de PKS 2233-148, fue posible identificar 2 llamaradas distintas en intervalos temporales mutuamente excluyentes.

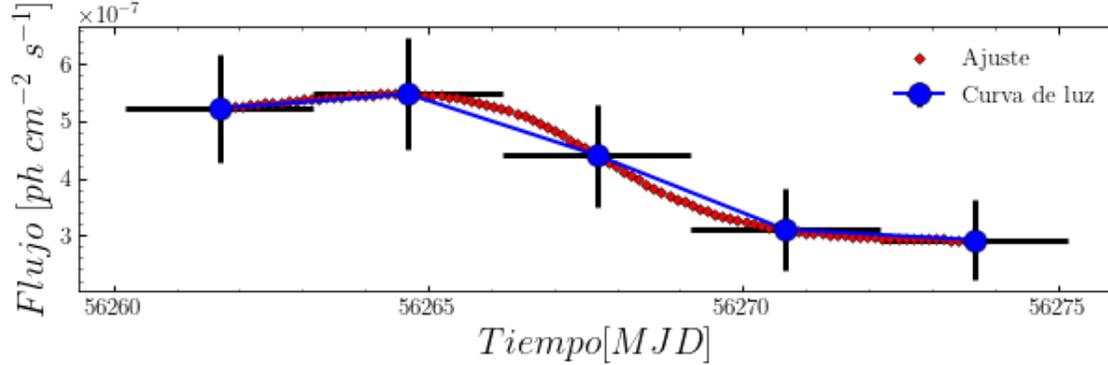


Figura 5.5. Ajuste a la primera llamarada encontrada en PKS 2233-148

Parámetro	Valor
t_0	$56267.49 \pm 8.42 \times 10^{-13}$
t_{fall}	$1.16 \pm 5.97 \times 10^{-13}$
t_{rise}	$17.41 \pm 1.69 \times 10^{-11}$
b	$3.26 \times 10^{-7} \pm 9.53 \times 10^{-20}$
F_0	$2.89 \times 10^{-7} \pm 1.55 \times 10^{-8}$

Tabla 5.10. Parámetros obtenidos del ajuste a la primera llamarada detectada en PKS 2233-148.

Magnitud	Valor
t_{pico}	$56264.50 \pm 1.70 \times 10^{-12}$
t_{total}	37.16 ± 3.40
simetría	-0.87 ± 1.30

Tabla 5.11. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a la primera llamarada detectada en PKS 2233-148.

La primera llamara fue observada entre 375985414.69 y 377020921.31 METs. Esta llamarada presenta alta asimetría en donde el tiempo de subida es un orden de magnitud superior al tiempo de caída. Adicional a esto, esta llamarada presenta un tiempo de duración medio.

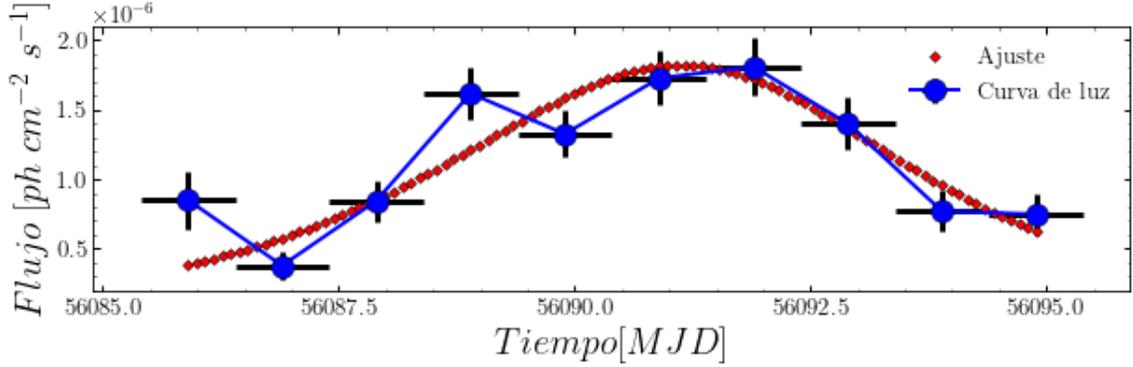


Figura 5.6. Ajuste a la segunda llamarada encontrada en PKS 2233-148

Parámetro	Valor
t_0	56091.28 ± 2.15
t_{fall}	2.12 ± 1.34
t_{rise}	2.43 ± 2.99
b	$3.65 \times 10^{-6} \pm 2.00 \times 10^{-6}$
F_0	$-1.24 \times 10^{-8} \pm 1.15 \times 10^{-6}$

Tabla 5.12. Parámetros obtenidos del ajuste a la segunda llamarada detectada en PKS 2233-148.

Magnitud	Valor
t_{pico}	56091.10 ± 2.70
t_{total}	9.00 ± 7.00
simetría	-0.10 ± 0.70

Tabla 5.13. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a la segunda llamarada detectada en PKS 2233-148.

La segunda llamara 5.6 fue observada entre 360797984.20 y 361574614.17 METs. A diferencia de la llamarada mostrada en la figura 5.5, esta llamarada se muestra simétrica y de una duración breve.

5.1.6. 3C279

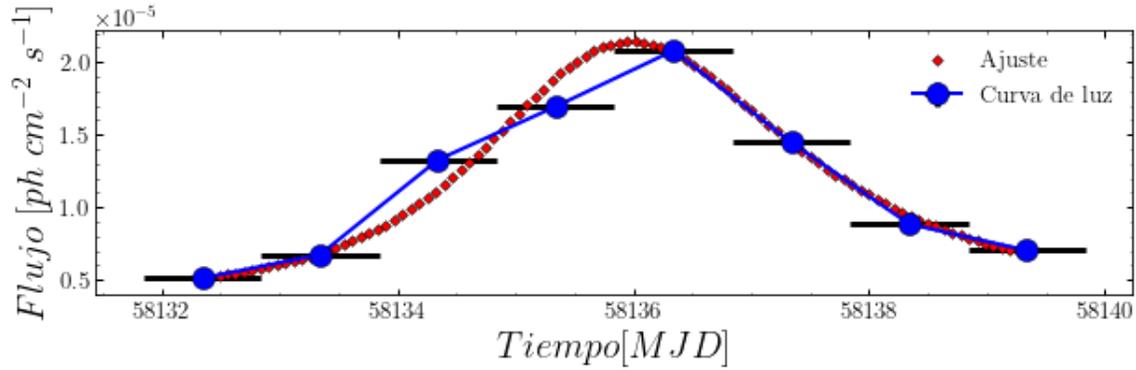


Figura 5.7. Ajuste a llamarada encontrada en 3C279

Parámetro	Valor
t_0	58135.77 ± 0.33
t_{fall}	1.39 ± 0.17
t_{rise}	0.95 ± 0.27
b	$(33.82 \pm 2.3) \times 10^{-6}$
F_0	$(40.71 \pm 8.36) \times 10^{-7}$

Tabla 5.14. Parámetros obtenidos del ajuste a 3C279.

Magnitud	Valor
t_{pico}	58136.00 ± 0.40
t_{total}	4.70 ± 0.60
$simetra$	0.19 ± 0.15

Tabla 5.15. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a 3C279.

3C279 presenta una llamarada simétrica y de baja duración. Esta llamarada fue observada en el intervalo temporal comprendido entre 537610740.23 y 538214785.76 METs.

5.1.7. PMN J2345-1555

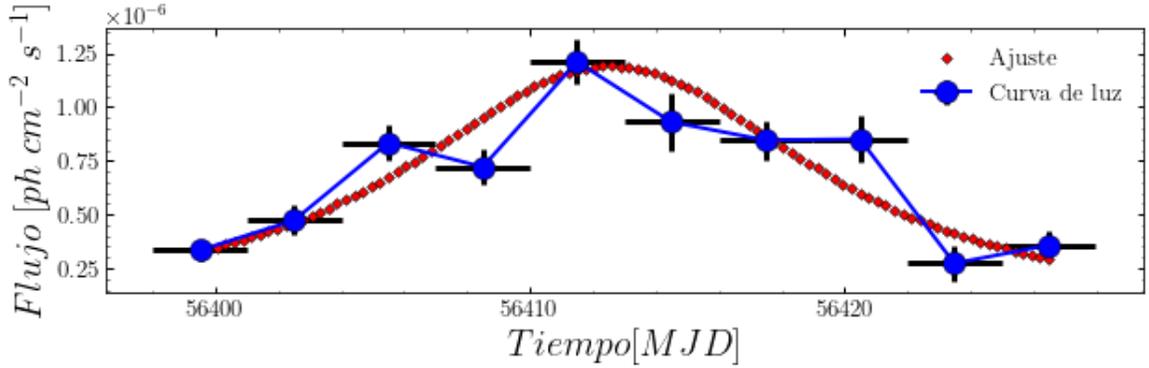


Figura 5.8. Ajuste a llamarada encontrada en PMN J2345-1555

Parámetro	Valor
t_0	56412.58 ± 3.12
t_{fall}	5.42 ± 3.20
t_{rise}	5.48 ± 2.70
b	$(21.12 \pm 4.51) \times 10^{-7}$
F_0	$(1.35 \pm 2.54) \times 10^{-7}$

Tabla 5.16. Parámetros obtenidos del ajuste a PMN J2345-1555.

Magnitud	Valor
t_{pico}	56413.00 ± 4.00
t_{total}	22.00 ± 8.00
simetría	0.00 ± 0.40

Tabla 5.17. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a PMN J2345-1555.

Se identificó una llamarada en el objeto PMN J2345-1555 en el intervalo temporal con cota inferior 387893740.86 y cota superior 390223630.77 METs. Esta llamarada es simétrica (tiempos de caída y subida similares) y presenta una duración media.

5.1.8. OJ287

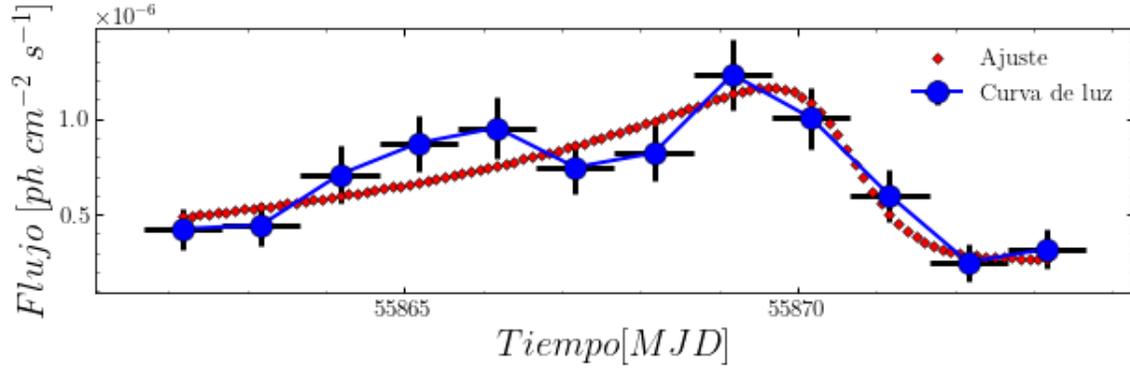


Figura 5.9. Ajuste a llamarada encontrada en OJ287

Parámetro	Valor
t_0	55870.60 ± 0.44
t_{fall}	0.40 ± 0.39
t_{rise}	5.07 ± 1.69
b	$(11.65 \pm 2.69) \times 10^{-7}$
F_0	$(26.89 \pm 8.77) \times 10^{-8}$

Tabla 5.18. Parámetros obtenidos del ajuste a OJ287.

Magnitud	Valor
t_{pico}	55869.70 ± 0.70
t_{total}	10.90 ± 3.50
simetría	-0.85 ± 0.14

Tabla 5.19. Valores calculados a partir de los parámetros obtenidos del ajuste a OJ287.

La llamarada identificada en el objeto OJ287 fue observada entre 341468527.23 y 342417741.63 METs. Esta llamarada presenta un comportamiento fuertemente asimétrico con predominancia en el tiempo de subida. Se encontró que esta llamarada es de duración corta.

5.2. Comportamiento espectral y energético

Se realizaron ajustes espectrales a cada uno de los objetos de la muestra en los intervalos temporales en los cuales fue posible identificar llamaradas. Todos los ajustes se realizaron utilizando el modelo logaritmo parabólico descrito en sección 1.6.1.

Objeto	α
3C66A	1.748 ± 0.051
PKS 0447-439	1.903 ± 0.035
PKS 0537-441	1.86 ± 0.016
PKS 2155-304	1.766 ± 0.036
PKS 2233-148 5.14	2.038 ± 0.101
PKS 2233-148 5.15	2.076 ± 0.045
3C279	2.094 ± 0.017
PMN J2345-1555	1.858 ± 0.055
OJ287	1.930 ± 0.059

Tabla 5.20. Índices espectrales obtenidos a través de un modelo logaritmo parabólico.

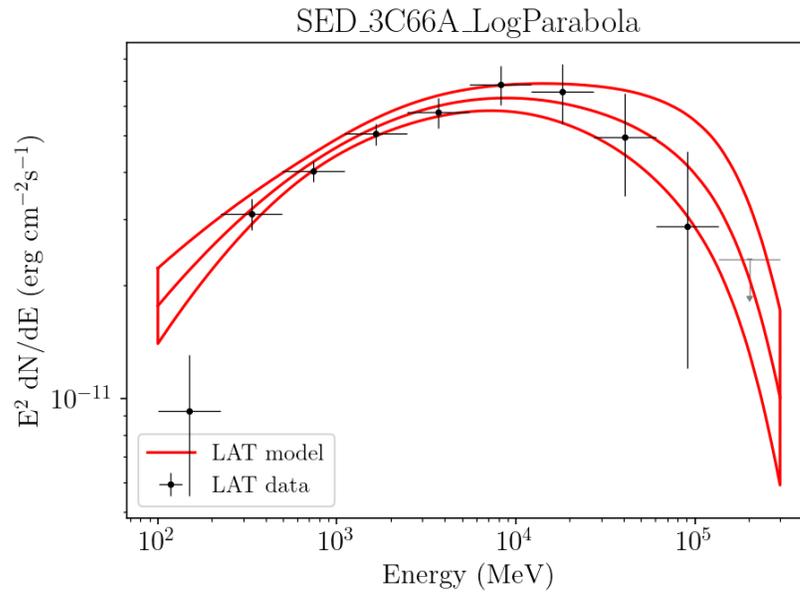


Figura 5.10. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en 3C66A

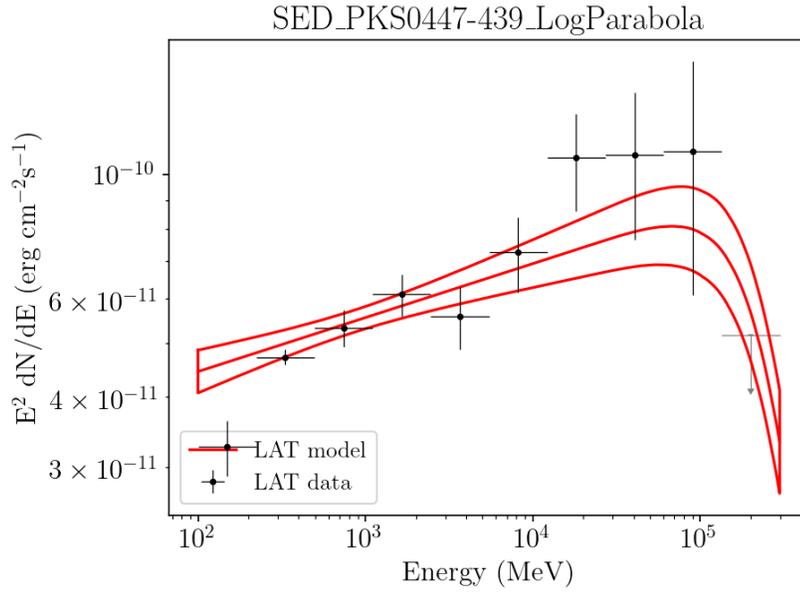


Figura 5.11. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PKS 0447-439

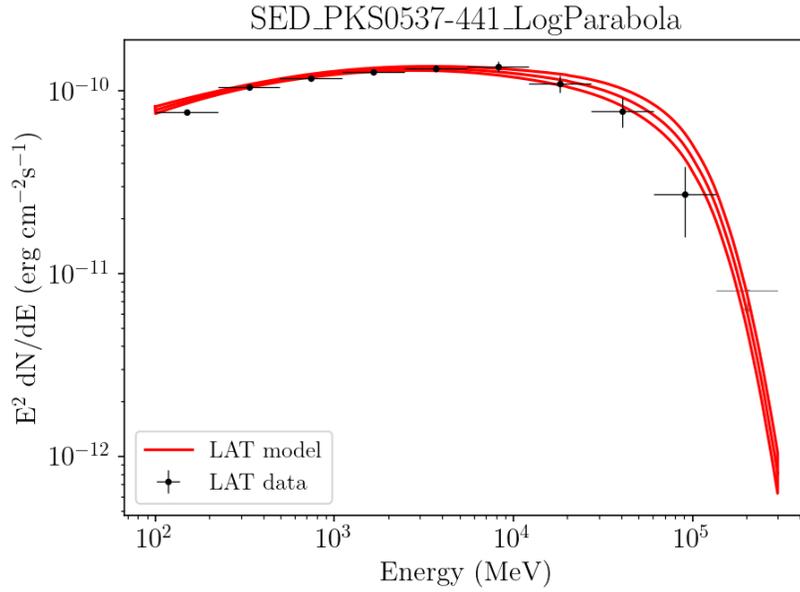


Figura 5.12. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PKS 0537-441

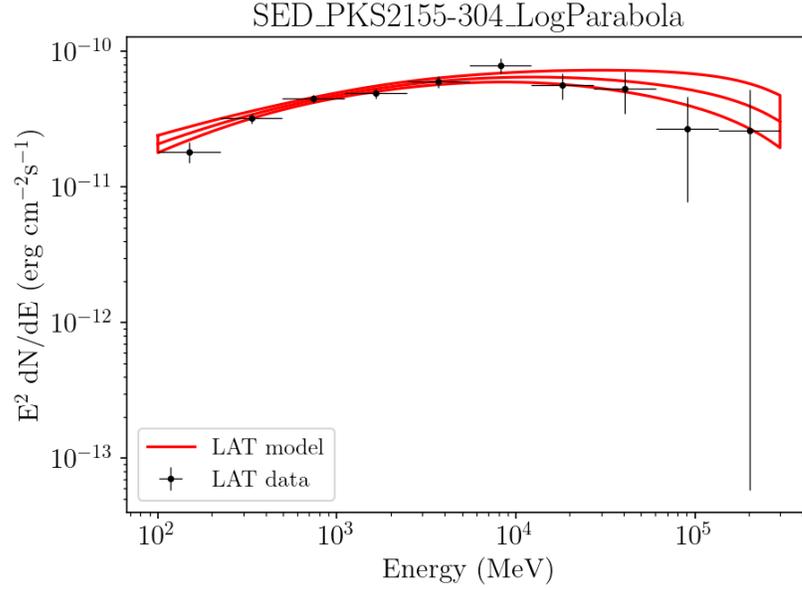


Figura 5.13. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PKS 2155-304

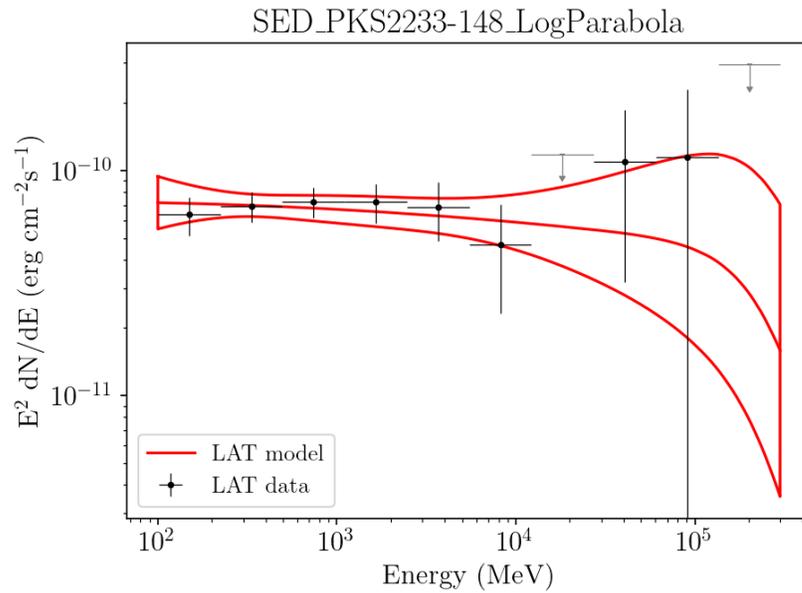


Figura 5.14. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PKS 2233-148 en el periodo temporal comprendido entre 375985414.69 y 377020921.31 METs

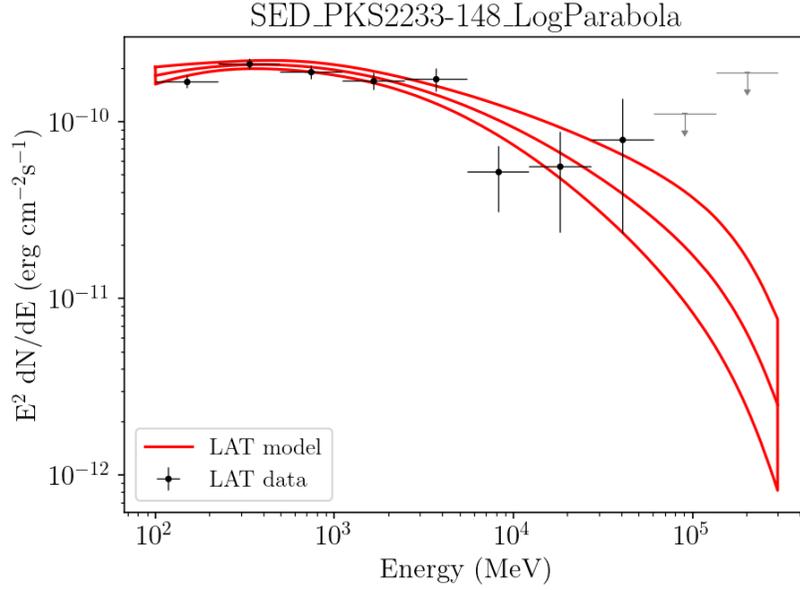


Figura 5.15. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PKS 2233-148 en el periodo temporal comprendido entre 360797984.20 y 361574614.17 METs

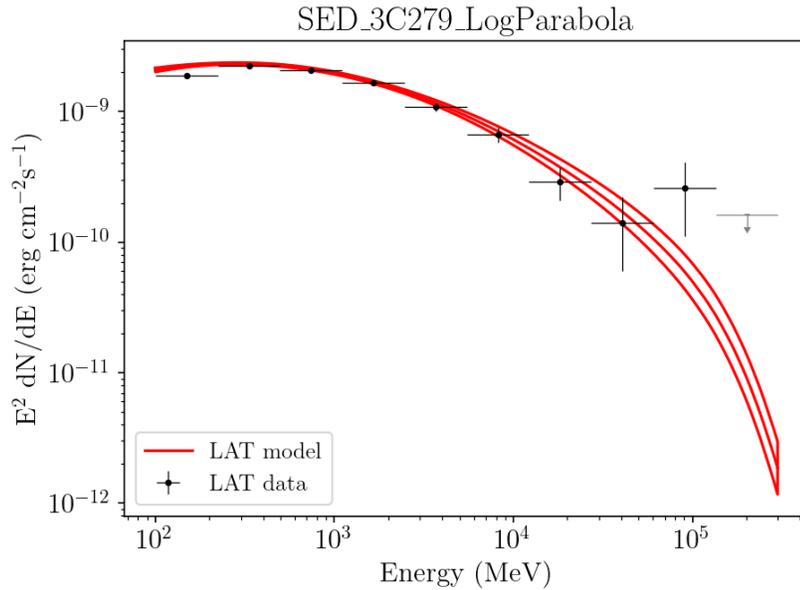


Figura 5.16. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en 3C279

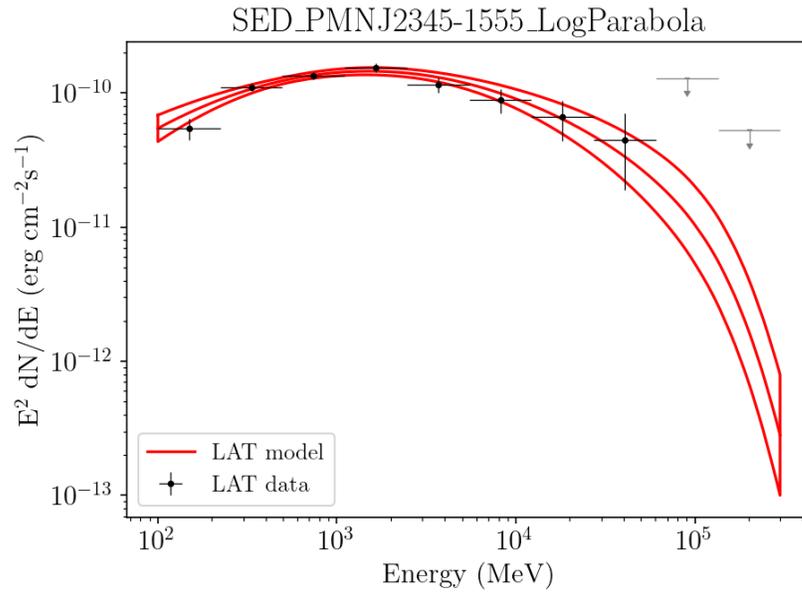


Figura 5.17. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en PMN J2345-1555

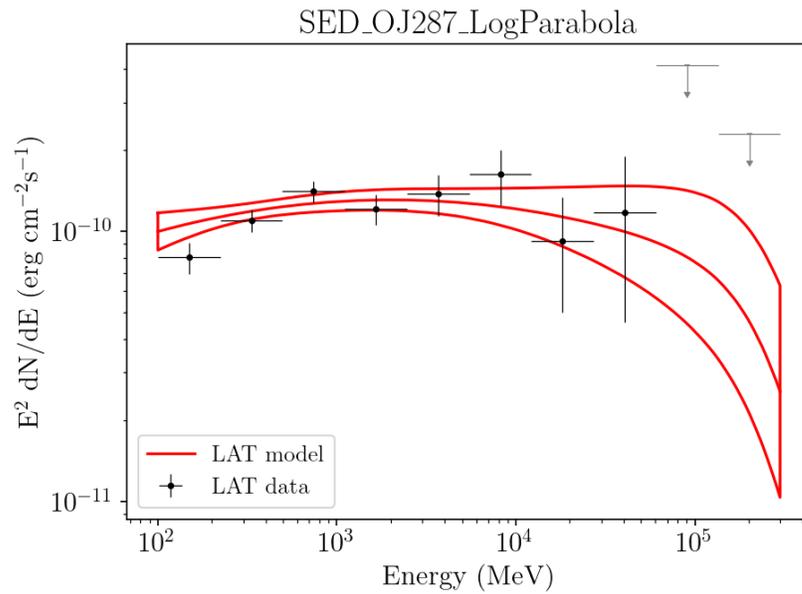


Figura 5.18. Distribución de energía espectral correspondiente a llamarada observada en OJ287

5.3. Espectro y posibles relaciones

Se realizó una exploración por posibles relaciones de dependencias del comportamiento espectral con distintas magnitudes de carácter temporal (duración y simetría) y energéticas (flujo máximo). Bajo el supuesto de que la dependencia es de tipo lineal, a continuación se muestran los resultados obtenidos al estudiar estos posibles vínculos.

5.3.1. Duración

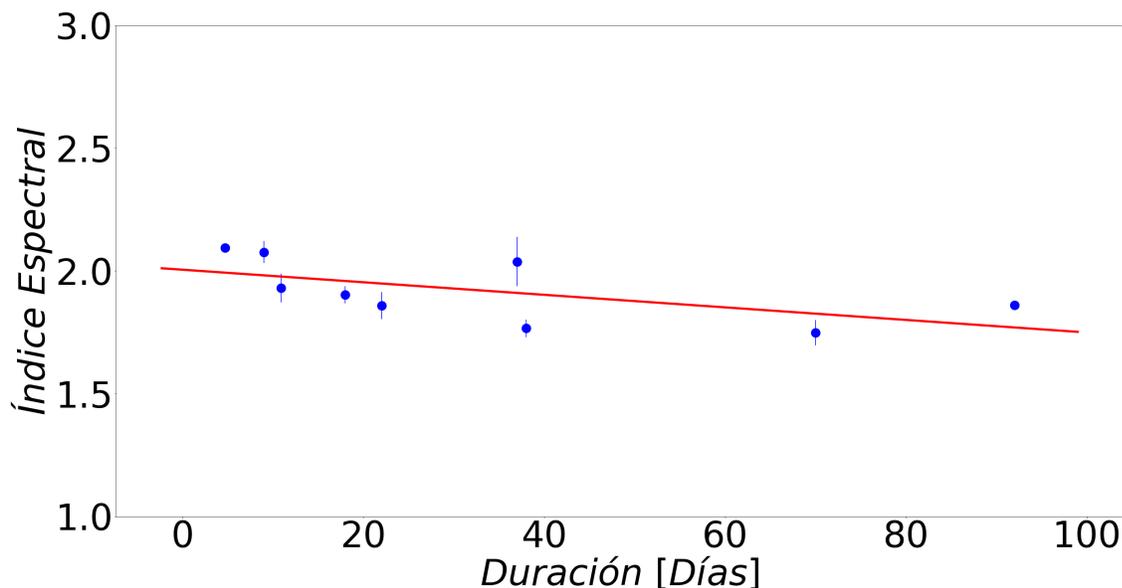


Figura 5.19. Comparación entre el índice espectral y la duración de las llamadas.

	Estimación	Error Estándar	p-valor
intercepto	2.004892	0.056595	3.71e-09
duración	-0.002556	0.001294	0.0888

Tabla 5.21. Resultados de ajuste lineal: índice espectral duración.

Se realizó un ajuste lineal (ver figura 5.19) entre el índice espectral y el tiempo de duración de la llamadas correspondientes. Los resultados de este ajuste están presentes en la tabla 5.21. De lo obtenido, se puede observar que para una significancia de 0.05 y un $p - valor = 0.0888$, no existe suficiente evidencia estadística para poder confirmar que existe una relación de dependencia lineal entre ambas magnitudes.

5.3.2. Simetría

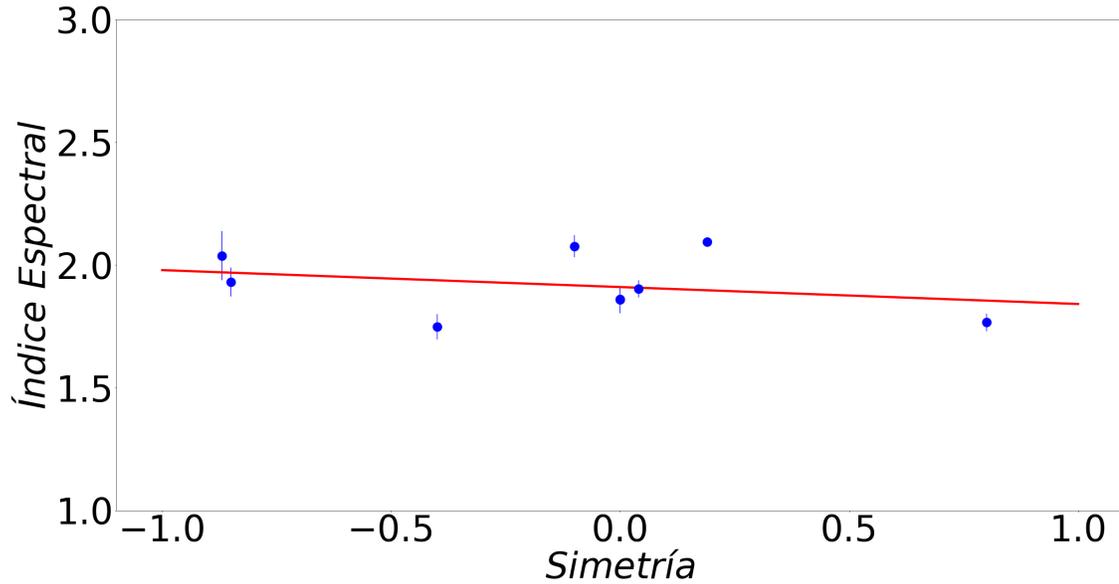


Figura 5.20. Comparación entre el índice espectral y simetría presente en las llamadas.

	Estimación	Error Estándar	p-valor
intercepto	1.91010	0.04507	1.06e-09
simetría	-0.06900	0.08864	0.462

Tabla 5.22. Resultados de ajuste lineal: índice espectral ~ simetría.

Se realizó un ajuste lineal (ver figura 5.20) entre el índice espectral y la simetría de la llamadas respectivas. Los resultados de este ajuste están presentes en la tabla 5.22. Se encontró que, para una significancia de 0.05, no existe suficiente evidencia estadística para poder afirmar que existe una relación de dependencia lineal entre el índice espectral y la simetría. Esto queda evidenciado al contrastar la significancia con el p-valor correspondiente.

5.3.3. Flujo máximo

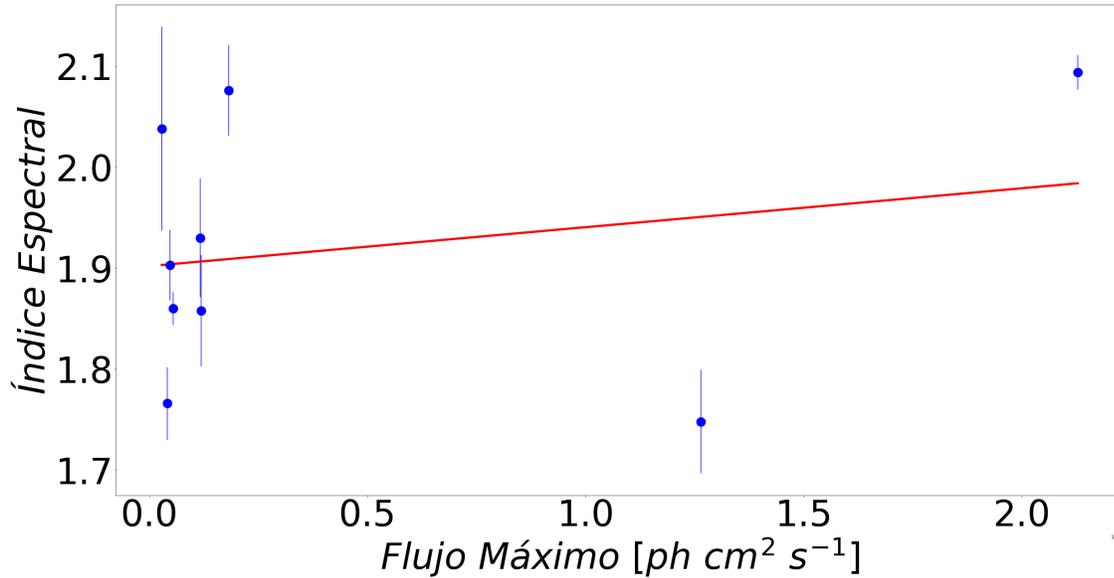


Figura 5.21. Comparación entre el índice espectral y el flujo máximo alcanzado por las llamaradas.

	Estimación	Error Estándar	p-valor
intercepto	1.902	5.224e-02	3.06e-09
flujo máximo	3.855e+03	6.295e+03	0.56

Tabla 5.23. Resultados de ajuste lineal: índice espectral simetría.

Se realizó un ajuste lineal (ver figura 5.20) entre el índice espectral y el flujo máximo observado en las llamaradas. Se encontró que esta relación tiene un intercepto de aproximadamente 1.9, siendo este estadísticamente significativo. En el caso de la pendiente, se obtuvo un valor de $(3.855 \pm 6.295) \times 10^3$, sin embargo si se considera una significancia de 0.05, no existe suficiente evidencia para concluir que este parámetro es significativamente distinto de 0. Estos resultados pueden observarse en la tabla 5.23

5.4. Discusión

De los objetos estudiados, fue posible identificar y caracterizar temporalmente 9 llamaradas en 8 blazares distintos. La llamarada de mayor duración fue identificada en PKS 0537-441 con una duración al rededor de los 92 días, por otro lado, la llamarada con menor duración, alrededor de 4.70 días, se identificó en 3C279. El tiempo de duración medio para la muestra se encuentra alrededor de los 33.51 días. Se encontró que la mayoría de las llamaradas estuvieron por debajo de los 20 días de duración, y las llamaradas de duración media y larga se encontraron en proporciones iguales, 5.22.

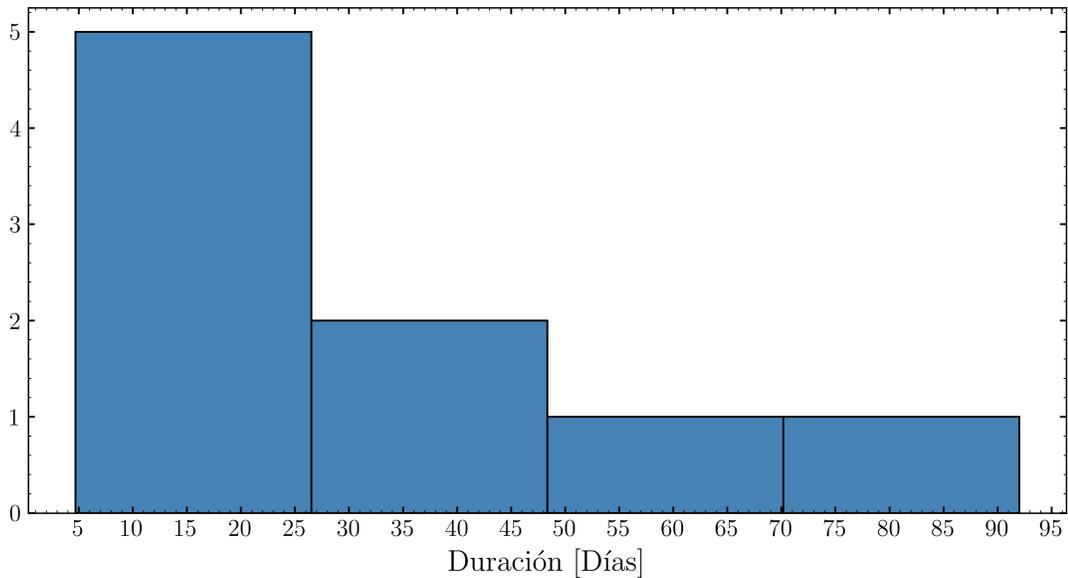


Figura 5.22. Distribución de duración de las llamaradas identificadas.

Otro de los parámetros de carácter temporal que se obtuvo fue la simetría. En este caso se encontró que la mayoría de objetos en la muestra se comportan de manera simétrica. Los objetos cuyo comportamiento se puede clasificar como simétrico son PKS 0447-439, PKS 0537-441, PKS 2233-148, 3C279, PMN J2345-1555. El valor medio que se obtuvo para este parámetro se encuentra alrededor de -0.132. PKS 2233-148 fue el objeto que presentó la mayor asimetría entre todas los objetos de toda la muestra.

PKS 2233-148 es el único objeto en el cual se pudieron identificar dos llamaradas distintas. Estas llamaradas, a pesar de observarse en el mismo objeto, poseen características distintas. La primera, comprendida entre 286974991.15 y 301472083.88 METs muestra uno de los valores más altos de asimetría de la muestra, por otro

lado la segunda, observada entre 614971714.25 y 618595987.44 METs se caracteriza por presentar un nivel muy alto de simetría.

En el caso de los ajustes espectrales, se encontró que todos los objetos se comportan de manera similar. En este aspecto, se obtuvieron índices espectrales similares lo que indica una emisión energética de una misma naturaleza, acá el mayor valor (≈ 2.094) obtenido corresponde a la llamarada estudiada en 3C279 y el valor mínimo (≈ 1.748) corresponde a la llamarada estudiada en 3C66A. El valor medio del índice espectral para esta muestra se encuentra alrededor de 1.92. Por otro lado, el flujo máximo medio se encuentra al rededor de 4.42×10^{-06} y los valores máximo y mínimo son 2.13×10^{-05} y 2.87×10^{-07} , observados en 3C279 y PKS 2233-148 respectivamente.

Por último, se estudiaron las posibles relaciones que pudieran existir entre el índice espectral y la duración, simetría y flujo máximo obtenidos de las llamaradas identificadas en las muestras. Acá, se asumió que la posible relación es de tipo lineal. Se realizaron 3 ajustes lineales, uno por cada posible relación. Se encontró que, en los 3 casos, no es posible concluir que exista dicha relación. Para obtener estos resultados, realizaron pruebas de hipótesis con una significancia de 0.05 y se hizo una comparación con los p-valores respectivos.

CONCLUSIONES

1. Se encontró que la caracterización temporal de las llamaradas es independiente del objeto, es decir, un mismo objeto puede presentar llamaradas con comportamientos muy distintos como es el caso de PKS 2233-148, o bien, distintos objetos pueden presentar llamaradas con comportamientos similares. A pesar de esto, para la muestra estudiada, se encontró que las llamaradas con duración menor a 30 días son más comunes (ver figura 5.22).
2. Se encontró que el comportamiento espectral en las diferentes llamaradas es similar. Esto sugiere que la naturaleza de emisión de los distintos objetos es la misma.
3. Se exploró la existencia de relaciones de dependencia lineal entre el índice espectral (comportamiento espectral) y distintos parámetros temporales (perfil temporal). No se encontró evidencia que permita afirmar que existe algún tipo de relación lineal entre el índice espectral y la duración, el índice espectral y la simetría o el índice espectral y el flujo máximo.

RECOMENDACIONES

1. Para poder reproducir los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda ser capaz de utilizar algún lenguaje de programación como Python. Además, se recomienda estar familiarizado con el uso de Anaconda, Fermitools y Enrico, para esto se puede utilizar la documentación disponible en los sitios web correspondientes.
2. Para poder ampliar la cantidad de llamadas y la diversidad de objetos para realizar el estudio, se recomienda aumentar la cantidad de puntos de flujo que conforman las curvas de luz a utilizar. Esto requiere un mayor tiempo y poder de computo.
3. Para poder explorar otros posibles tipos de relaciones entre parámetros espectrales y temporales, se recomienda tener una mayor cantidad de llamadas identificadas, esto para poder identificar posibles comportamientos no identificables con los datos disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdo, A., Ackermann, M., Ajello, M., Antolini, E., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., Bastieri, D., Bechtol, K., Bellazzini, R., et al. (2010). Gamma-ray light curves and variability of bright fermi-detected blazars. *The Astrophysical Journal*, 722(1):520.
- Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., Bastieri, D., Gonzalez, J. B., Bellazzini, R., Bissaldi, E., and et al. (2015). The third catalog of active galactic nuclei detected by the fermi large area telescope. *The Astrophysical Journal*, 810(1):14.
- Ajello, M., Atwood, W., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., Bastieri, D., Bellazzini, R., Bissaldi, E., Blandford, R., Bloom, E., et al. (2017). 3fhl: The third catalog of hard fermi-lat sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 232(2):18.
- Asercion, J. (2019). Understanding and using the Fermitools. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #233*, volume 233 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 381.05.
- Atwood, W., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Band, D., Barbiellini, G., et al. (2009). The large area telescope on the fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2):1071.
- Beckmann, V. and Shrader, C. (2013). *Active galactic nuclei*. John Wiley & Sons.
- Bianchi, S., Maiolino, R., and Risaliti, G. (2012). AGN Obscuration and the Unified Model. *Advances in Astronomy*, 2012:782030.
- Blandford, R., Meier, D., and Readhead, A. (2019). Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57:467–509.

- Böttcher, M., Reimer, A., Sweeney, K., and Prakash, A. (2013). Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars. *The Astrophysical Journal*, 768(1):54.
- Brown, M. J. I., Duncan, K. J., Landt, H., Kirk, M., Ricci, C., Kamraj, N., Salvato, M., and Ananna, T. (2019). The spectral energy distributions of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489(3):3351–3367.
- Carroll, B. W. and Ostlie, D. A. (2007). *An introduction to modern astrophysics; 2nd ed.* Addison-Wesley, San Francisco, CA.
- Craig, N. and Fruscione, A. (1997). Optical Identification of Joint EUVE and ROSAT Detections in the Southern Hemisphere: Soft Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 114:1356.
- D’Onofrio, M., Marziani, P., and Sulentic, J. W. (2012). *Fifty years of quasars: from early observations and ideas to future research*, volume 386. Springer Science & Business Media.
- Fey, A. L., Ma, C., Arias, E. F., Charlot, P., Feissel-Vernier, M., Gontier, A. M., Jacobs, C. S., Li, J., and MacMillan, D. S. (2004). The Second Extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-EXT.1. *The Astronomical Journal*, 127(6):3587–3608.
- Gaia Collaboration (2018). VizieR Online Data Catalog: Gaia DR2 (Gaia Collaboration, 2018). *VizieR Online Data Catalog*, page I/345.
- Gaia Collaboration (2020). VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020). *VizieR Online Data Catalog*, page I/350.
- Ganguly, R., Lynch, R. S., Charlton, J. C., Eracleous, M., Tripp, T. M., Palma, C., Sembach, K. R., Misawa, T., Masiero, J. R., Milutinovic, N., Lackey, B. D., and Jones, T. M. (2013). A census of quasar-intrinsic absorption in the Hubble Space Telescope archive: systems from high-resolution echelle spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(2):1233–1264.
- Gao, Q.-G., Lu, F.-W., Qin, L.-H., Li, H.-Z., Ma, J., Ren, J.-Y., Zhao, H.-R., and Yi, T.-F. (2021). Possible properties of TeV spectra in PKS 2155-304. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(3):073.
- Hayashida, M., Nalewajko, K., Madejski, G., Sikora, M., Itoh, R., Ajello, M., Blandford, R., Buson, S., Chiang, J., Fukazawa, Y., et al. (2015a). Rapid variability

- of blazar 3c 279 during flaring states in 2013- 2014 with joint fermi-lat, nustar, swift, and ground-based multi-wavelength observations. *The Astrophysical Journal*, 807(1):79.
- Hayashida, M., Nalewajko, K., Madejski, G., Sikora, M., Itoh, R., Ajello, M., Blandford, R., Buson, S., Chiang, J., Fukazawa, Y., et al. (2015b). Rapid variability of blazar 3c 279 during flaring states in 2013- 2014 with joint fermi-lat, nustar, swift, and ground-based multi-wavelength observations. *The Astrophysical Journal*, 807(1):79.
- Helene, S., Zech, A., Boisson, C., Krawczynski, H., Fallon, L., de Gouveia Dal Pino, E., Hinton, J., Inoue, S., Neronov, A., and White, R. (2012). Prospect on intergalactic magnetic field measurements with gamma-ray instruments. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 8.
- Hirovani, K. (2000). Composition of active galactic nuclei jets: pair-plasma dominance in the 3c 345 and 3c 279 jets. *arXiv: Astrophysics*.
- Jankowsky, F. and Wagner, S. (2020). ATOM observations of continuing record flares of BL Lac objects BL Lacertae and PKS 0447-439. *The Astronomer's Telegram*, 13956:1.
- Jiang, Y., Hu, S.-M., Chen, X., Shao, X., and Huo, Q.-H. (2020). Locations of optical and γ -ray emitting regions and variation phenomena of PMN J2345-1555. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(3):3757–3769.
- Jorge, B. A. A. (2019). Estudio de ráfagas de rayos gamma en blazares, observadas por fermi-lat. Master's thesis, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Kapanadze, B. (2021). Enhanced X-Ray Activity of the southern TeV-Detected Blazar PKS 2155-304. *The Astronomer's Telegram*, 14865:1.
- Kellermann, K. I. (2013). Fifty Years of Quasars. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #221*, volume 221 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 208.05.
- Kushwaha, P., Sinha, A., Misra, R., Singh, K. P., and de Gouveia Dal Pino, E. M. (2017). Gamma-ray flux distribution and nonlinear behavior of four LAT bright AGNs. *The Astrophysical Journal*, 849(2):138.

- Lico, R., Giroletti, M., Orienti, M., Costamante, L., Pavlidou, V., D'Ammando, F., and Tavecchio, F. (2017). Exploring the connection between radio and GeV-TeV γ -ray emission in the 1FHL and 2FHL AGN samples. *Astronomy & Astrophysics*, 606:A138.
- Lioudakis, I., Romani, R., Filippenko, A., Kiehlmann, S., Max-Moerbeck, W., Readhead, A., and Zheng, W. (2018). Multiwavelength cross-correlations and flaring activity in bright blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(4):5517–5528.
- Lu, K.-X., Zhao, Y., Bai, J.-M., and Fan, X.-L. (2019). Reddening of the blr and nlr in agns from a systematic analysis of balmer decrement. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483(2):1722–1730.
- Mao, L. S. (2011). 2MASS observation of BL Lac objects II. *National Journal*, 16(8):503–529.
- Márquez, I., Masegosa, J., González-Martin, O., Hernández-García, L., Pović, M., Netzer, H., Cazzoli, S., and del Olmo, A. (2017). The AGN nature of LINER nuclear sources. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 4:34.
- Massaro, E., Perri, M., Giommi, P., Nesci, R., and Verrecchia, F. (2004). Log-parabolic spectra and particle acceleration in blazars. II. The BeppoSAX wide band X-ray spectra of Mkn 501. *The Astrophysical Journal*, 422:103–111.
- Mücke, A., Protheroe, R. J., Engel, R., Rachen, J. P., and Stanev, T. (2003). BL Lac objects in the synchrotron proton blazar model. *Astroparticle Physics*, 18(6):593–613.
- Myers, J. (2019). Fssc: Fermi data "data analysis "online documentation "fermi science tools.
- Nalewajko, K. (2013). The brightest gamma-ray flares of blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430(2):1324–1333.
- Netzer, H. (2013). *The physics and evolution of active galactic nuclei*. Cambridge University Press.
- Netzer, H. (2015). Revisiting the unified model of active galactic nuclei. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53:365–408.

- Otero-Santos, J., Acosta-Pulido, J. A., Becerra González, J., Raiteri, C. M., Lario-
nov, V. M., Peñil, P., Smith, P. S., Ballester Niebla, C., Borman, G. A., Carnerero,
M. I., Castro Segura, N., Grishina, T. S., Kopatskaya, E. N., Larionova, E. G.,
Morozova, D. A., Nikiforova, A. A., Savchenko, S. S., Troitskaya, Y. V., Troitsky,
I. S., Vasilyev, A. A., and Villata, M. (2020). Quasi-periodic behaviour in the op-
tical and γ -ray light curves of blazars 3C 66A and B2 1633+38. *Monthly Notices
of the Royal Astronomical Society*, 492(4):5524–5539.
- Peterson, B. M. (1997). *An introduction to active galactic nuclei*. Cambridge Uni-
versity Press.
- Peterson, B. M. (2001). Variability of Active Galactic Nuclei. In Aretxaga, I., Kunth,
D., and Mújica, R., editors, *Advanced Lectures on the Starburst-AGN*, page 3.
- Qian, S. J., Britzen, S., Krichbaum, T. P., and Witzel, A. (2019). Possible evidence of
a supermassive black hole binary with two radio jets in blazar 3C279. *Astronomy
and Astrophysics*, 621:A11.
- Rajput, B., Stalin, C., and Rakshit, S. (2020). Long term γ -ray variability of blazars.
Astronomy & Astrophysics, 634:A80.
- Sanchez, D. A. and Deil, C. (2013). Enrico : A Python Package to Simplify Fermi-
LAT Analysis. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 33 of *Interna-
tional Cosmic Ray Conference*, page 2784.
- Sandrinelli, A., Covino, S., and Treves, A. (2016). Gamma-Ray and Optical Oscil-
lations in PKS 0537-441. *The Astrophysical Journal*, 820(1):20.
- Schartmann, M., Meisenheimer, K., Camenzind, M., Wolf, S., Tristram, K., and
Henning, T. (2008). Three-dimensional radiative transfer models of clumpy tori
in seyfert galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 482(1):67–80.
- Schmidt, M. and Green, R. F. (1983). Quasar evolution derived from the Palo-
mar bright quasar survey and other complete quasar surveys. *The Astrophysical
Journal*, 269:352–374.
- Sinitsyna, V. Y. and Sinitsyna, V. G. (2022). Gamma-ray emission from supermas-
sive black hole binary OJ 287. In *European Physical Journal Web of Conferences*,
volume 260 of *European Physical Journal Web of Conferences*, page 11047.

- Urry, M. (2003). The AGN Paradigm for Radio-Loud Objects. In Collin, S., Combes, F., and Shlosman, I., editors, *Active Galactic Nuclei: From Central Engine to Host Galaxy*, volume 290 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 3.
- Uttley, P., McHardy, I. M., and Vaughan, S. (2005). Non-linear X-ray variability in X-ray binaries and active galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359(1):345–362.
- Wang, L., Zhou, L., Xu, G., and Li, X. (2019). Optical/NIR quasi-periodic oscillations of the blazar PKS 0537-441 with the weighted wavelet Z-transform technique. In *Advances in Materials, Machinery, Electronics III: 3rd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2019)*, volume 2073 of *American Institute of Physics Conference Series*, page 020080.
- Whiting, M., Oshlack, A., and Webster, R. (2002). Near Infrared Micro-variability of Radio-loud Quasars. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 19(2):222–227.
- Wilkins, D. (2013). Shedding light on black holes - stanford university.
- Zhou, Y., Yan, D., Dai, B., and Zhang, L. (2014). Emitting electron spectra and acceleration processes in the jet of PKS 0447-439. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66(1):12.