



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

VARIABILIDAD FOTOPOLARIMÉTRICA DEL BLÁZAR
TIPO IBL S5 0716+714

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

ANDRÉS VÁZQUEZ AVIÑA

TUTOR

DRA. ERIKA MARÍA BENÍTEZ LIZAOLA



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A la vida.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Dra. Erika M. Benitez Lizaola por todo el tiempo dedicado a este trabajo. Sin su supervisión, enseñanza y guía hubiera sido imposible de realizar.

A Brenda Enriquez, que soportó, estuvo y me empujó a realizar esta tesis. Sin duda fue un pilar fundamental del proceso. Estuvo en los momentos más difíciles, siempre me impulsó a seguir y tuvo la capacidad de motivarme y hacerme entender que sí podía, que sí puedo. Gracias.

A todos mis amigos que estuvieron a lo largo de los años de la carrera, en clases, en las horas libres y en las fiestas. A los que siguen ahí, también es para ellos.

A mi familia que siempre estuvo al pendiente y me dio los medios para poder terminar mi carrera y concluir esta etapa tan increíble. Agradecerle a Kiyomi por estar en todas las noches de desvelo ahí a lado sin importar la hora.

Resumen

Los núcleos activos de galaxias, en inglés Active Galactic Nuclei (AGN) son objetos en cuyo centro habitan agujeros negros supermasivos, en inglés Super Massive Black Holes (SMBH) con masas entre 10^6 y $10^9 M_{\odot}$. El gran brillo en los AGN se explica mediante el modelo estándar que propone un proceso de acreción de material hacia el centro de la galaxia, donde se hospeda el SMBH. La acreción de material se produce a través de un disco de acreción geoméricamente delgado, el cual rodea al SMBH, y que permite la caída de material hacia el centro del SMBH. La acreción de material produce que el disco emita fuertemente en las bandas del UV y los rayos-X. Pero además, el material (estrellas, gas y polvo) que cae al núcleo y que proviene de la galaxia anfitriona al AGN, sirve de combustible y es el responsable de encender la actividad tipo AGN.

Dentro de la familia de AGN encontramos a los blázares, los cuales presentan propiedades extremas ya que muestran la emisión más variable observada tanto en flujo como en polarización desde el radio hasta los rayos-X y rayos gamma (nota: en éstas dos últimas bandas se espera detectar polarización variable con los futuros polarímetros de altas energías). Una propiedad importante de los blázares es que son AGN con jet (o jettted AGN) de acuerdo a la terminología propuesta recientemente por Padovani et al. (2017). La emisión polarizada y variable que estudiamos en esta tesis tiene su origen en la emisión producida por el jet, la cual domina por efectos relativistas respecto a la que se produce en los alrededores del disco de acreción. Esta emisión variable es también polarizada debido a que las partículas en el jet se mueven en un medio magnetizado.

En esta tesis se analizaron datos fotopolarimétricos en la banda R del óptico

obtenidos durante ~ 12 años del blázar de tipo intermedio (IBL) S5 0716+714, el cual es conocido por ser uno de los blázares más variables en su tipo. Los datos fueron adquiridos con el telescopio de 84cm y el instrumento *POLIMA* en el OAN-SPM en México como parte de un monitoreo de blázares emisores de rayos gamma o blázares TeV. Mostramos los resultados generales de nuestro estudio utilizando primero todos los puntos en la curva de luz. Encontramos que durante el tiempo del monitoreo el blázar estuvo activo, teniendo una magnitud máxima $R_{mag} = 11.85 \pm 0.01 \text{ mag}$ el 22 de enero de 2015 (MJD 57044.0) y una magnitud mínima $R_{mag} = 14.63 \pm 0.054 \text{ mag}$ el 11 de marzo de 2008 (MJD 54772.0). En el grado de polarización se observó un valor máximo de $(28.539 \pm 0.3) \%$ el 16 de enero de 2009 (MJD 55124.0) y un valor mínimo de $(0.46 \pm 0.4) \%$ el 20 de octubre de 2009 (MJD 55124.0). En el EVPA, del inglés *Electric Vector Position Angle*, observamos un giro de $704^\circ \pm 2 \%$ en un periodo de 5 años.

Posteriormente, nos enfocamos particularmente en cuatro estados de flujo máximo (de aquí en adelante, del inglés *flares*) ocurridos en 2011, mostrando un flujo máximo de $47.92 \pm 0.71 \text{ mJy}$ de una región emisora de $1.8 \times 10^{-3} \text{ pc}$; en el 2015 se registro un flujo máximo de $56.36 \pm 0.52 \text{ mJy}$ de una región de 8.84×10^{-3} ; en 2016 el flujo alcanzó un valor de $52.45 \pm 0.51 \text{ mJy}$ con una región emisora de $1.45 \times 10^{-3} \text{ pc}$ y en el 2020 el flujo máximo observado fue de $53.52 \pm 0.51 \text{ mJy}$, proveniente de una región emisora de $8.9 \times 10^{-4} \text{ pc}$.

El comportamiento variable de tres de estos flares (2011, 2015 y 2020) confirman las predicciones hechas por el reciente modelo de inestabilidades de Kink (Zhang et al., 2016), propuesto por Zhang y colaboradores en 2016, en tanto que el flare de 2016 parece originarse a choques turbulentos ocurridos dentro del jet relativista.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Nomenclatura	XI
1. Introducción	1
1.1. Galaxias y Núcleos Activos de Galaxias	1
1.1.1. Galaxias Seyfert	8
1.1.2. Cuásares	8
1.1.3. Radio Galaxias	9
1.1.4. Blázares	10
1.1.5. Objetivos	10
2. El Fenómeno blázar	11
2.1. El modelo del Jet relativista	12
2.1.1. Movimiento superlumínico	13
2.1.2. Amplificación Doppler	15
2.1.3. Direccionamiento Doppler	16
2.2. Distribución espectral de energía	17
2.2.1. La variabilidad en los blázares	20
2.3. El blázar S5 0716+714	23
3. Monitoreo del blázar S5 0716+714	26

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VI
3.1. Observaciones	28
3.1.1. Procesamiento de los datos	29
3.1.2. Corrección por ambigüedad	30
3.1.3. Análisis estadístico	30
4. Análisis de resultados	34
4.1. Variaciones del ciclo completo.	34
4.2. Estados de máxima actividad	36
5. Conclusiones y trabajo futuro	42
5.1. Trabajo Futuro	46

Índice de figuras

1.1. Diagrama de Hubble de clasificación de las galaxias. (Hubble, 1936)	2
1.2. Galaxias peculiares mostrando colas de marea y/ó puentes de gas como resultado de su interacción. Tomado (Duc and Renaud, 2013).	4
1.3. Radio galaxia M87, es un RLAGN. Recientemente el telescopio Event Horizon Telescope o EHT estudió el centro de M87 detectando la sombra del SMBH (ver Goddi et al., 2019)	6
1.4. Imagen de la radio galaxia Cygnus A. En rojo se aprecia la emisión detectada en las bandas del radio, en azul la emisión difusa detectada en rayos X. Esta es una de las radio galaxias mejor estudiadas debido a su bajo valor de corrimiento al rojo $z=0.056$, que equivale a una distancia de ~ 251 Mpc para un valor de $H_0=69.6$. La masa del SMBH es $\sim 2.5 \times 10^9 M_\odot$ (Tadhunter et al., 2003).	7
1.5. Ejemplo de las clases de Faranoff-Riley. (a) M 84 (FR I); (b) 3C 334 (FR II), ambas observadas con el VLA a 4.9 GHz. (Laing, 2016)	9
2.1. El jet relativista de un blázar apunta con un ángulo muy pequeño respecto a la visual del observador. Imagen tomada del sitio https://www.nasa.gov/content/fermi-gamma-ray-space-telescope	12
2.2. Diagrama que ejemplifica el movimiento superlumínico. Imagen tomada de Kolb (Kolb, 2010)	14

2.3. Velocidad aparente vs ángulo de orientación, para varios valores de la velocidad intrínseca. En rosa: $\beta = 0.5$, $\gamma = 1.15$; gris: $\beta = 0.9$, $\gamma = 2.3$; azul: $\beta = 0.95$, $\gamma = 3.2$; verde: $\beta = 0.98$, $\gamma = 5.0$; morado: $\beta = 0.99$, $\gamma = 7.1$; amarillo: $\beta = 0.995$, $\gamma = 10.0$; café: $\beta = 0.998$, $\gamma = 15.8$; naranja: $\beta = 0.999$, $\gamma = 22.4$ 15

2.4. La SED de S5 0716+714 modelada con datos multifrecuencias colectados durante el máximo en enero de 2015 por MAGIC Collaboration et al. (2018). Los puntos grises se tomaron de la base de datos ubicada en <http://www.asdc.asi.it>, la línea azul es la emisión de un nódulo y la roja de un choque recolimado, la interacción entre ambos se presenta en verde. Los puntos rojos son datos obtenidos con el telescopio *MAGIC*. En negro se muestra el ajuste final sumando las tres componentes. Del análisis del flare, estos autores proponen que la emisión de rayos gamma durante este flare se produce por choques en el jet (que suponen helicoidal) que sale del núcleo, cercanamente seguida por el flare observado en óptico y el de rayos-X. 19

2.5. Foto del telescopio de rayos gamma *MAGIC* o Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope, que opera desde 2004 y que está instalado en el Observatorio Roque de Los Muchachos, en la isla de la Palma, en España. Este telescopio detecta rayos gamma de muy alta energía, es decir, con energías mayores a 10 GeV. Los blázares son conocidos por ser emisores de rayos gamma, dominando por número el brillo del cielo en estas bandas del espectro electromagnético. Ver detalles en <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/telescopios-y-experimentos/magic-telescopes> 20

2.6. Variabilidad en el grado o porcentaje P (%) de polarización (arriba) y en el EVPA (abajo) observada en el blázar S5 0716+71 en octubre del 2011 (ver Falomo et al., 2014). 22

2.7. Mapas adquiridos con el interferómetro en radio Very Long Baseline Array o <i>VLBA</i> a 43 GHz que muestran los estados de actividad de S5 0716+714 en distintas épocas. Los mapas muestran variaciones en la intensidad de la emisión en radiofrecuencias. Mostramos algunas épocas que coinciden con las fechas donde hemos observado estados de mayor actividad de S5 0716+714 como resultado del análisis de los datos del monitoreo en el OAN-SPM presentados en esta tesis.	25
3.1. Imagen del edificio y del telescopio de 84cm en el OAN-SPM.	27
3.2. Imagen del telescopio espacial de rayos gamma <i>Fermi</i> lanzado en 2008.	27
3.3. Imagen de S5 0716+714 obtenida durante el monitoreo en el OAN-SPM con el telescopio de 84 cm y el instrumento <i>POLIMA</i> en la banda R del óptico. El objeto esta marcado entre dos líneas horizontales. Los círculos verdes muestran la posición de las estrellas estándares fotométricas que se utilizan para la calibración del flujo. Los flujos se calibraron con las estrellas estándares 3, 5 y 6. La fotometría se realizó con un radio de apertura de 7".	28
3.4. Curva de luz de S5 0716+714 obtenida en un lapso de 12 años, de finales del 2007 a principios del 2020. El panel superior, color magenta, muestra el flujo en mJy de la banda R. En azul se muestran las variaciones de la magnitud en la banda R. En rojo se muestran las variaciones en el grado de polarización y en verde las variaciones del ángulo de posición, EVPA, corregido por ambigüedad. En la mayoría de los puntos no se alcanzan a observar los errores, debido a que son más pequeños que el tamaño de los símbolos utilizados en la figura.	33
4.1. Variaciones observadas durante cuatro temporadas de observación: octubre y noviembre 2010 y luego marzo y abril de 2011. El flare ocurre en marzo, donde los datos indican que el objeto inicia muy brillante y en los siguientes días va disminuyendo su brillo.	37

4.2. Del lado izquierdo, se aprecia la gráfica de correlación entre la magnitud de la banda R del óptico y el EVPA, para la cual obtuvimos un coeficiente de correlación $P=0.905$. Del lado derecho se se muestra la correlación (moderada) obtenida entre la magnitud y el $P(\%)$, esta vez con un coeficiente $P=0.7941$. Estas gráficas de correlación toman en cuenta únicamente los puntos después del máximo, que son los puntos en los meses de marzo y abril del 2011. Podríamos sugerir que el origen de la variabilidad observada en marzo y abril es común. 38

4.3. Variaciones observadas durante tres temporadas, en octubre y diciembre de 2014 y luego tenemos solo dos puntos en enero de 2015. No obstante, hubo un gran cambio en el brillo en un poco más de un mes. Aún cuando son dos puntos, pudimos detectar un máximo de brillo en este flare. 39

4.4. Variaciones observadas durante el flare de 2016. 40

4.5. Actividad observada en octubre de 2019, y luego en enero y febrero de 2020. Es evidente que enero de 2020 ocurrió otro flare. 41

5.1. Modelo propuesto por Marscher en 2008, para la estructura interna del jet en un BL Lac. En donde, un choque se propaga en dirección del jet a lo largo de una línea en espiral. Se usa una escala logarítmica, de la distancia en términos del radio de Schwarzschild (R_S) para ilustrar la propagación del choque en distintas escalas. (Marscher et al., 2008) 44

Nomenclatura

- **AGN:** Active Galactic Nuclei
- **blázar:** BL Lac+FSRQ
- **BL Lac:** BL Lacertae
- **BLR:** Broad Line Region
- **EVPA:** Electric Vector Position Angle
- **IBL:** Intermediate peak BL Lac
- **IDV:** Intra Day Variability
- **FSRQ:** Flat Spectrum Radio Quasar
- **jetted AGN:** AGN con jet
- **NLR:** Narrow Line Region
- **POLIMA:** Polarizador Óptico de Imagen
- **QSO:** Quasi-Stellar Object
- **RLAGN:** Radio Loud AGN
- **RQAGN:** Radio Quiet AGN
- **RLQSO:** Radio Loud Quasar
- **RQQSO:** Radio Quiet Quasar
- **SED:** Spectral Energy Distribution
- **SMBH:** Super Massive Black Hole

Capítulo 1

Introducción

1.1. Galaxias y Núcleos Activos de Galaxias

Las galaxias son conocidas por ser sistemas constituidos por estrellas, gas y polvo los cuales se encuentran ligados por gravedad. Existen morfológicamente varios tipos de galaxias, las cuales deben su forma a diferentes procesos evolutivos. Entre los tipos morfológicos más conocidos tenemos las galaxias Elípticas, que son sistemas donde los bulbos son tri-axiales (pueden ser oblatos o prolatos), las Lenticulares (las cuales tienen bulbo y disco pero no brazos, ejemplo la galaxia del Sombrero), las Espirales (tienen bulbo, disco y brazos) y las irregulares. Edwin Hubble propuso el primer esquema de clasificación general para las galaxias donde se pueden apreciar las diferencias morfológicas que son las que definen sus distintos tipos (ver imagen 1.1).

Entre la población de galaxias del Universo se ha observado una clase de objetos conocidos como Núcleos Activos de Galaxias (del inglés, Active Galactic Nuclei) en adelante AGN. Estos objetos se caracterizan por tener una gran luminosidad concentrada en una región del tamaño del sistema solar, es decir, son tan brillantes que lo único que vemos es su brillo central. En un inicio se intentó explicar el brillo mediante procesos asociados a la evolución estelar. No obstante, estos procesos no son lo suficientemente eficientes como para generar las grandes luminosidades centrales observadas ($L \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$) en las bandas del óptico (Peterson, 2003)

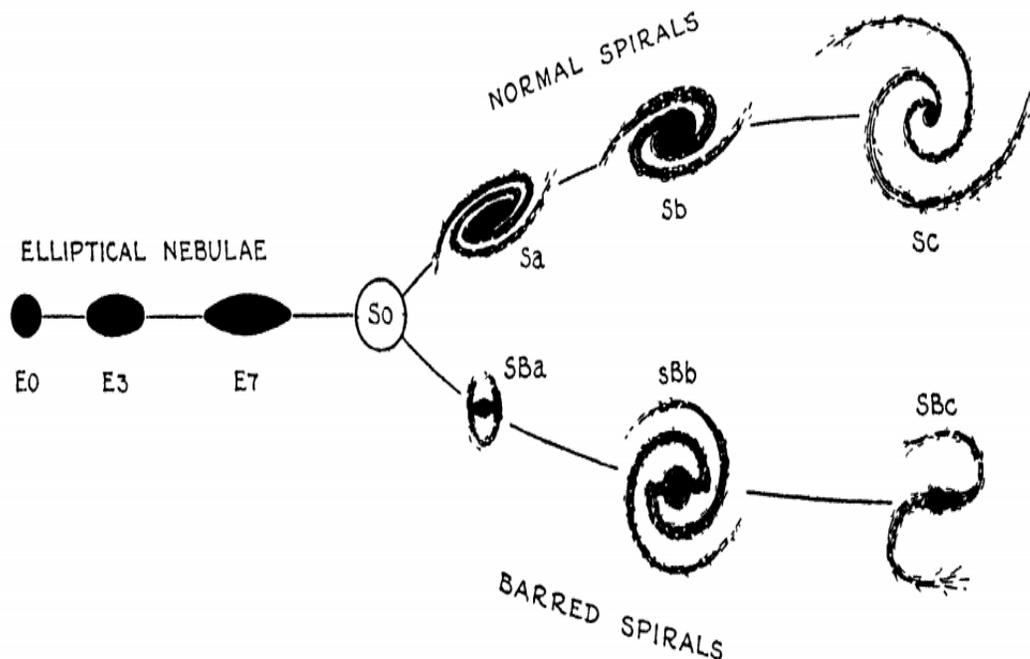


Figura 1.1: Diagrama de Hubble de clasificación de las galaxias. (Hubble, 1936)

La historia de los AGN se remonta a principios del Siglo XX, cuando se realizaron las primeras observaciones espectroscópicas en la banda del óptico. Los primeros resultados fueron muy impactantes en ese momento, y llamaron mucho la atención de la comunidad astronómica. El primero en realizar observaciones relacionadas al fenómeno AGN fue Edward Fath, que en 1909 realizó un estudio espectral sobre ciertos objetos brillantes, como Messier 77 (M77) y Messier 81 (M81), (Fath, 1909). En su estudio encontró que estos objetos presentaban líneas anchas de emisión provenientes de su centro, (Shields, 1999). Para 1918, el astrónomo estadounidense Herbert Curtis observó el primer chorro de material ó jet proveniente del objeto M87 (Curtis, 1918), catalogada en ese entonces como una nebulosa espiral. Los primeros indicios de que los objetos observados por Fath y Curtis eran galaxias, los dio el astrónomo estadounidense Carl Seyfert en 1943, cuando publicó su estudio sobre una muestra de seis galaxias espirales, actualmente conocidas como Galaxias Seyfert, que presentaron líneas de emisión anchas y de alta ionización (Seyfert, 1943).

Para explicar la gran luminosidad en los AGN se propuso en los años sesentas del

siglo XX un modelo conocido actualmente como el modelo estándar de los AGN (ver Salpeter, 1964; Zel'dovich, 1964). Dicho modelo explica que los AGN son el resultado de un proceso de acreción de material hacia el centro galáctico donde habita un objeto súper masivo. El material acretado (conocido como “alimento del monstruo”) es proporcionado por la galaxia anfitriona que alberga en su núcleo al AGN. El objeto central y masivo, dada su gravedad, induce la acreción de gas, polvo y estrellas (éstas últimas son “desgarradas” por fuerzas de marea antes de ser devoradas por la máquina central (Peterson, 2003).

En general, entre los tipos morfológicos más comunes de las galaxias anfitrionas que albergan a los AGN encontramos a las galaxias espirales (del inglés Spirals, S) de tipo temprano, es decir, tipo Sa o Sb con o sin barra, a las galaxias de tipo elíptico (del inglés Ellipticals, E) y a las lenticulares (del inglés Lenticulars, L o también se denotan como S0). No obstante, las galaxias definidas como peculiares también albergan AGN. Este tipo de galaxias se caracterizan por mostrar signos de interacción o fusión entre galaxias, las cuales suelen evidenciarse mediante la presencia de plumas o puentes gaseosos, ver Fig 1.2. Existen numerosos trabajos en la literatura que proponen que las fusiones galácticas son procesos muy importantes para promover la acreción de material hacia el SMBH y encenderlo (Kolb, 2010; Duc and Renaud, 2013).



Figura 1.2: Galaxias peculiares mostrando colas de marea y/o puentes de gas como resultado de su interacción. Tomado (Duc and Renaud, 2013).

Entre los hallazgos más importantes ocurridos en las últimas décadas en el campo de la Astrofísica Extragaláctica está la conexión entre la cinemática de las estrellas dentro de los bulbos galácticos con la masa de un objeto denotado actualmente como agujero negro supermasivo (Magorrian et al., 1998). En adelante, nos referiremos a ellos como “Super Massive Black Hole” (en adelante, SMBH), los cuales para los AGN presentan un rango de masas entre $M_{BH} \sim 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$.

Los SMBH se encuentran en los centros de galaxias que cuentan con estructuras tri-axiales o bulbos galácticos (e.g. Ferrarese and Merritt, 2000). La presencia de SMBH, en los centros de los AGN, explica la cantidad de energía emitida por medio de la conversión de energía potencial gravitacional en radiación. Esta conversión es producida por la acreción de material vía un disco de acreción, el cual es geoméricamente delgado pero ópticamente grueso (Laor, 1989). Observaciones realizadas en las bandas del óptico-UV muestran que los fotones emitidos por el disco de acreción tienen un máximo en el UV, región conocida como “Big Blue Bump” o BBB (Shields, 1978; Malkan and Sargent, 1982; Huang et al., 2000).

Usualmente, la emisión producida por el disco suele ajustarse con una colección de cuerpos negros a distintas temperaturas de acuerdo a un cierto radio, por lo que dicha emisión es el resultado de un proceso térmico. La emisión del disco es lo que genera el fenómeno AGN, es decir, si no hay acreción de material hacia el SMBH, no hay conversión de energía para encender el centro galáctico a altas luminosidades. Esto ha llevado a comprender que los AGN pueden estar encendidos, siempre y cuando estén acretando material, o de lo contrario, estarán apagados. En este último caso decimos que la galaxia se encuentra en una fase no-activa o “normal”, aunque puede ser que previamente haya pasado por una etapa AGN. Sin embargo, es importante remarcar que en la actualidad no existe consenso sobre cuales mecanismos físicos (por ejemplo fusiones galácticas o mergers) producen el encendido de la actividad AGN (ver Ellison et al., 2019, y referencias ahí citadas).

Los AGN conforman una colección de objetos que suele presentarse como el “AGN Zoo”. Esto debido a las características que muestran en distintas bandas del espectro electromagnético. De esta forma, los AGN se clasifican de acuerdo a su fenomenología. En primer lugar, de acuerdo a su emisión en radiofrecuencias suelen dividen en: AGN radio fuertes y AGN radio débiles o callados (del inglés, Radio Loud AGN, RLAGN y Radio Quiet AGN, RQAGN). La gran mayoría (el 90 %) pertenecen a la clasificación RQAGN, mientras que el resto son del tipo RLAGN.

Una clasificación más reciente divide a los AGN en objetos con jet (jetted AGN) o sin jet (Padovani et al. (2017)). El jet o chorro de material eyectado por la región central se observa solamente en los jetted AGN. Ver por ejemplo, la imagen de M87 que se muestra en la Fig. 1.3. M87 o Virgo A, es una galaxia elíptica gigante, ubicada en el centro del cúmulo de Virgo. La masa estimada del SMBH de M87 es $\sim 2.4 \times 10^9 M_{\odot}$.

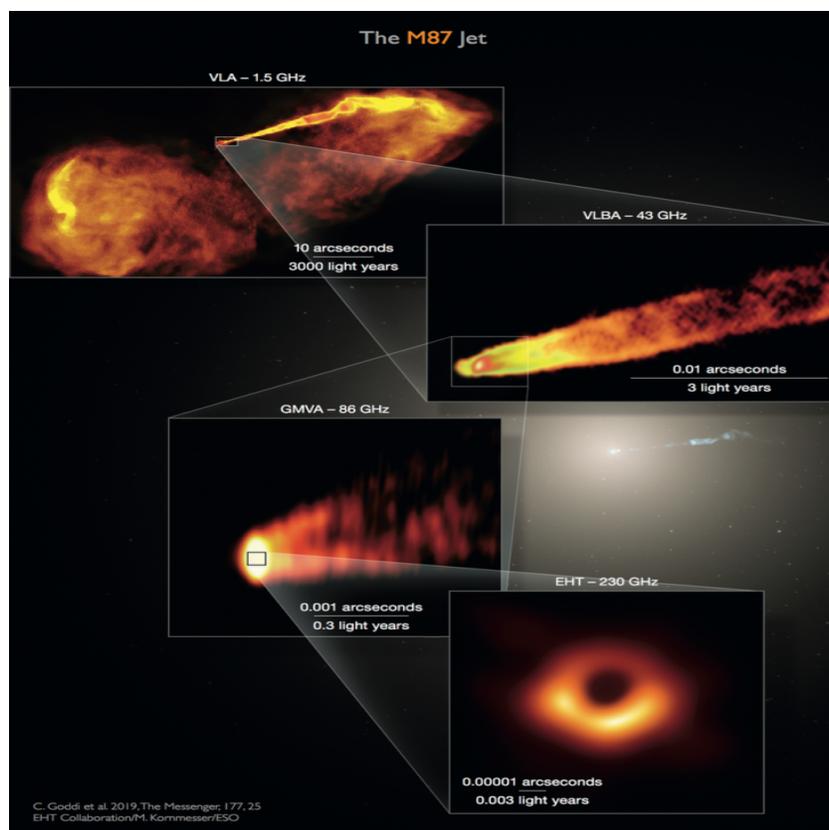


Figura 1.3: Radio galaxia M87, es un RLAGN. Recientemente el telescopio Event Horizon Telescope o EHT estudió el centro de M87 detectando la sombra del SMBH (ver Goddi et al., 2019)

Entre los objetos sin jet, i.e. los anteriormente conocidos como RQAGN encontramos a los cuásares radio callados (RQQSO) y las galaxias tipo Seyfert (Sy). Estas dos poblaciones son básicamente el mismo tipo de AGN sólo que tienen corrimientos al rojo muy distintos. Las Sy son la población cercana de los AGN, mientras que los cuásares en general (QSO) la lejana. Los QSO resultan objetos fundamentales para estudiar el Universo a un alto corrimiento al rojo, permitiendo estudiar la formación y evolución de las galaxias.

Entre los jetted AGN o RLAGN encontramos a las Radio Galaxias (de ahí el por qué de su nombre, son fuentes potentes en radio con jets o chorros de material eyectado sumamente luminosos un ejemplo de éstos, lo podemos ver en la figura 1.4) y a los objetos conocidos como blázares, los cuales describiremos con detalle en el capítulo 2.

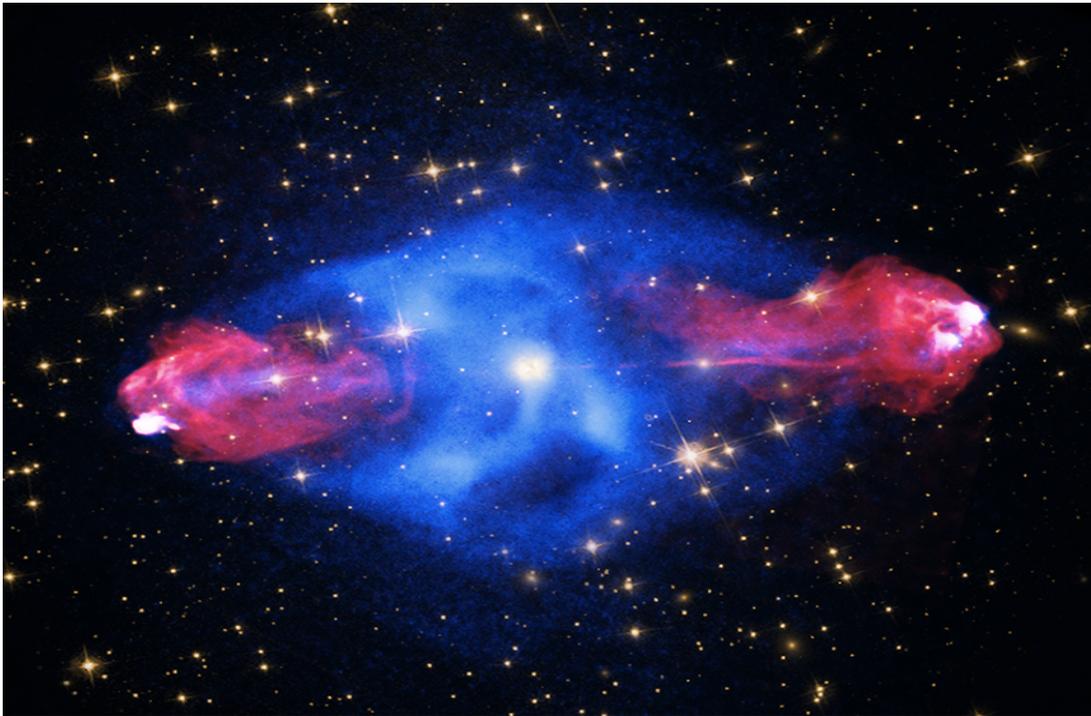


Figura 1.4: Imagen de la radio galaxia Cygnus A. En rojo se aprecia la emisión detectada en las bandas del radio, en azul la emisión difusa detectada en rayos X. Esta es una de las radio galaxias mejor estudiadas debido a su bajo valor de corrimiento al rojo $z=0.056$, que equivale a una distancia de ~ 251 Mpc para un valor de $H_0=69.6$. La masa del SMBH es $\sim 2.5 \times 10^9 M_\odot$ (Tadhunter et al., 2003).

1.1.1. Galaxias Seyfert

Descubiertas por Carl Seyfert (1943) (Seyfert, 1943), quien fue el primero en darse cuenta que había un grupo de galaxias con morfología espiral (S) que tenían características similares. Encontró que estas galaxias mostraban todas un núcleo extremadamente brillante y por tanto conformaban una nueva clase de objetos. Seyfert caracterizó a estas galaxias haciendo un estudio de espectroscopía en la banda del óptico. Descubrió que estas galaxias mostraban líneas de emisión muy intensas. Tiempo después se pudo mostrar que estas líneas estaban corridas al rojo y que eran producidas por fotones ionizantes generados durante el proceso de acreción (Peterson, 2003).

1.1.2. Cuásares

En 1963 el astrónomo holandés Marteen Schmidt descubrió el primer cuásar (nombre que viene del inglés quasi stellar radio source), conocido como 3C 273. Este objeto fue catalogado en el tercer catálogo de Cambridge con el número 273, de ahí su nombre (Schmidt, 1963). Los cuásares fueron descubiertos como resultado de los primeros estudios en radio del cielo, en los últimos años de la década de los 50s. Los cuásares resultan ser un tipo de AGN, extremadamente luminoso, en el cual un SMBH, con masas en el rango de $10^6 \sim 10^{10} M_{\odot}$ (Thorne et al., 1973), el cual está rodeado por un disco de acreción. La luminosidad de estos objetos llega a superar la luminosidad de la Vía Láctea ($15 \times 10^9 \sim 20 \times 10^9 L_{\odot}$) en un orden de 10^3 .

Como resultado de un estudio a un número considerable de cuásares, Schmidt logró identificar algunas de sus propiedades más importantes (ver Schmidt, 1975).

- Son objetos “star-like”, es decir, se ven como fuentes puntuales y al inicio identificados como fuentes potentes en radio. La muestra de Schmidt consiste solamente de RLAGN.
- Tiene un flujo continuo variable al menos en la banda del óptico.
- Son muy intensos en el UV, es decir, son objetos puntuales muy azules.
- Tienen líneas de emisión intensas.

- Tiene un fuerte corrimiento al rojo.

Es importante notar que no todos los AGNs comparten estas características, pues estas propiedades no necesariamente se observan en los RQAGN. Estos objetos, como ya mencionamos, no son potentes en radio, ni tan variables, ni eyectan un chorro o jet desde su región central.

1.1.3. Radio Galaxias

Contienen un núcleo sumamente brillante y como su nombre lo indica. Muestran una alta emisión en las ondas de radio. Presentan un jet, que es un plasma conformado por electrones y protones, el cual se ha observado que se mueve con velocidades cercanas a la de la luz. Hay básicamente dos tipos importantes de radio galaxias, las tipo Faranoff-Riley I y las Faranoff-Riley II, ver figura 1.5. Esta clasificación está basada en la relación de la distancia, que hay entre las regiones de mayor brillo en lados opuestos de la galaxia central o cuásar, y la extensión total de la fuente. Las fuentes cuya relación es menor a 0.5 están en la clase I y las fuentes cuya relación es mayor entran en la clase II (Fanaroff and Riley, 1974). Otra diferencia importante es que las Faranoff-Riley I, muestran regiones de bajo brillo más alejadas de la galaxia que las regiones de alto brillo. Al contrario de las Faranoff-Riley II, que muestran las regiones de alto brillo más alejadas de la galaxia que las regiones de bajo brillo.

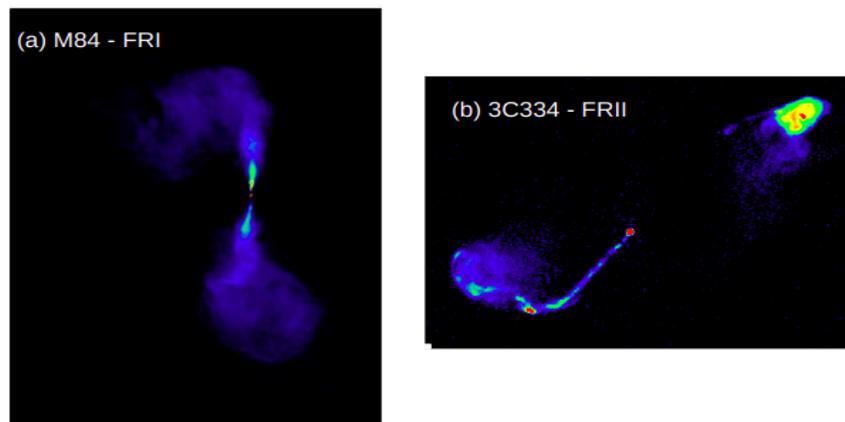


Figura 1.5: Ejemplo de las clases de Faranoff-Riley. (a) M 84 (FR I); (b) 3C 334 (FR II), ambas observadas con el VLA a 4.9 GHz. (Laing, 2016)

1.1.4. Blázares

Son jetted AGN que muestran las propiedades más extremas. Asociados a fenómenos violentos como son sus estallidos de brillo de hasta varias magnitudes, los jets asociados a los blázares se consideran como laboratorios ideales para estudiar procesos de aceleración muy energéticos. Son conocidos por ser variables en todas las longitudes de onda y con escalas temporales de variación que van desde minutos hasta años (e.g. Ulrich et al., 1997; Valtaoja et al., 1990). El jet de los blázares es el responsable de generar estas variaciones extremas. En el siguiente capítulo presentamos las características más relevantes del fenómeno blázar.

1.1.5. Objetivos

El objetivo de esta tesis es caracterizar la emisión variable de largo período observada en la banda R del óptico del objeto BL Lac catalogado como S5 0716+714, el cual es una fuente emisora de rayos- γ en TeV. Para ello usaremos la base de datos generada por el proyecto *Polarimetric Monitoring of Blazars at San Pedro Martir*, en el periodo comprendido entre el año 2007 al 2020. El análisis de los datos se realizará comprobando la validez de modelos teóricos propuestos en la literatura actual y de esta manera establecer el origen de las variaciones polarimétricas de este blázar.

Capítulo 2

El Fenómeno blázar

Como se mencionó en el capítulo 1, los blázares, son parte de la familia de los AGN. La palabra blázar, fue acuñada por el astrónomo Edward Spiegel en 1978 para unificar los nombres de las dos subclases de blázares, BL Lac y Cúasar (Angel and Stockman, 1980).

Los blázares son objetos con una fuerte emisión en multifrecuencias desde las bandas del radio y hasta la región de rayos gamma (algunos son conocidos como Blázares TeV). Debido a sus características, los blázares son catalogados como los AGN más extremos. En las bandas del radio se denominan como fuentes compactas (compact radio sources) que presentan emisión colimada en forma de chorro que se mueve a velocidades relativistas, llamado jet.

Los Blázares están clasificados en dos conjuntos, los BL Lac y los cúasares de alta variabilidad con espectro plano en las bandas del radio, i.e. son “Flat Spectrum Radio Quasars” ó FSRQ. Los BL Lac se caracterizan por no presentar líneas de emisión aunque algunos si las presentan pero son débiles. Esto implica que la emisión de los BL Lac que observamos se produce por el continuo no-térmico. Los FSRQ, por el contrario, presentan líneas de emisión intensas características de los QSOs sobrepuestas a la emisión del continuo no térmico (ver Angel and Stockman, 1980; Impey and Tapia, 1990; Ghisellini et al., 1998; Padovani et al., 2017).

2.1. El modelo del Jet relativista

El fenómeno blázar ha sido explicado exitosamente por el conocido modelo del jet relativista (Blandford and Payne, 1982). Este modelo explica la fenomenología blázar suponiendo que son objetos cuyo jet relativista forma un ángulo pequeño (menor a $\sim 20^\circ$) respecto al observador (e.g. Hovatta et al., 2009). Esta orientación (ver Figura 2.1) explica el gran brillo observado y también las variaciones extremas debido a que esta geometría da lugar a fenómenos relativistas muy conocidos en los blázares como son el movimiento superlumínico, y la amplificación y direccionalidad producida por efecto Doppler. A continuación menciono las características básicas de estos fenómenos.

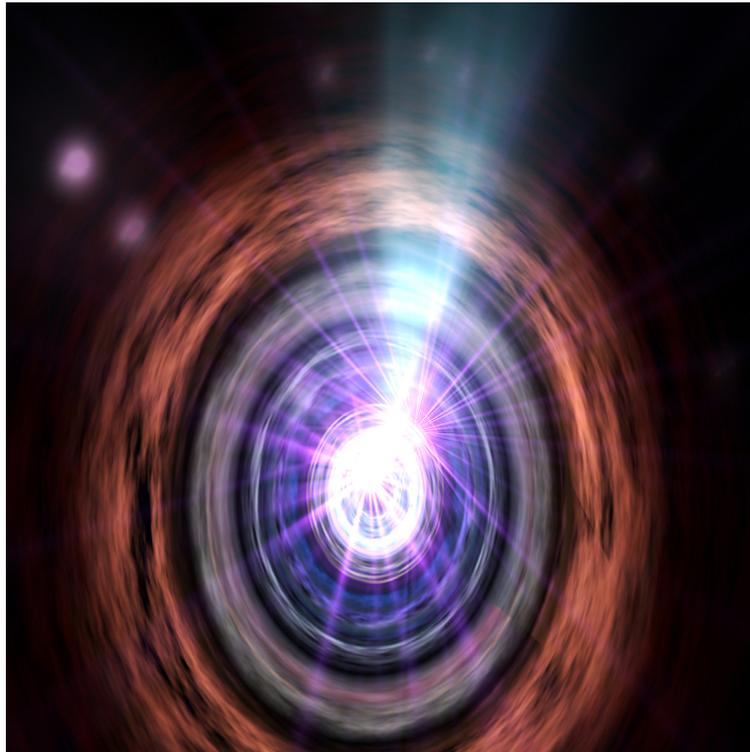


Figura 2.1: El jet relativista de un blázar apunta con un ángulo muy pequeño respecto a la visual del observador. Imagen tomada del sitio <https://www.nasa.gov/content/fermi-gamma-ray-space-telescope>

2.1.1. Movimiento superlumínico

Las partículas del jet se desplazan con velocidades aparentes mayores a la velocidad de la luz, respecto al objeto emisor. Este fenómeno es conocido como movimiento superlumínico y es el resultado de un efecto geométrico. Pues en realidad las partículas del jet nunca superan la velocidad de la luz.

La figura 2.2 es un diagrama esquemático de cómo se da el movimiento superlumínico. La fuente se mueve con una velocidad v , formando un ángulo θ con la línea de visión del observador. Si se emite un fotón en el punto (1) al tiempo $t = 0$, y un segundo fotón es emitido en el punto (2) al tiempo Δt , la fuente va a haber viajado una distancia $v\Delta t \sin(\theta)$, perpendicular a la línea de visión del observador. Entonces la diferencia de tiempo de los dos fotones al llegar al observador será:

$$\Delta t_{obs} = \Delta t(1 - \beta \cos \theta). \quad (2.1)$$

Esta diferencia se debe a que el fotón emitido en el punto 2 está más cerca del observador que el fotón emitido en el punto 1. La distancia entre el punto 1 y el 2, medido por el observador es:

$$\Delta r_{obs} = v\Delta t \sin \theta. \quad (2.2)$$

Y la velocidad aparente, medida por el observador será:

$$v_{app} = \frac{v \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}. \quad (2.3)$$

A partir de la ecuación 2.3 podemos deducir que si $v \approx c$ y θ es pequeño, entonces la velocidad aparente va a ser mayor que c , este fenómeno es lo que se conoce como movimiento superlumínico.

En la figura 2.3, se puede observar como la velocidad aparente aumenta conforme $v \rightarrow c$. También se puede apreciar como el máximo en la velocidad aparente se alcanza conforme el ángulo $\theta \rightarrow 0$

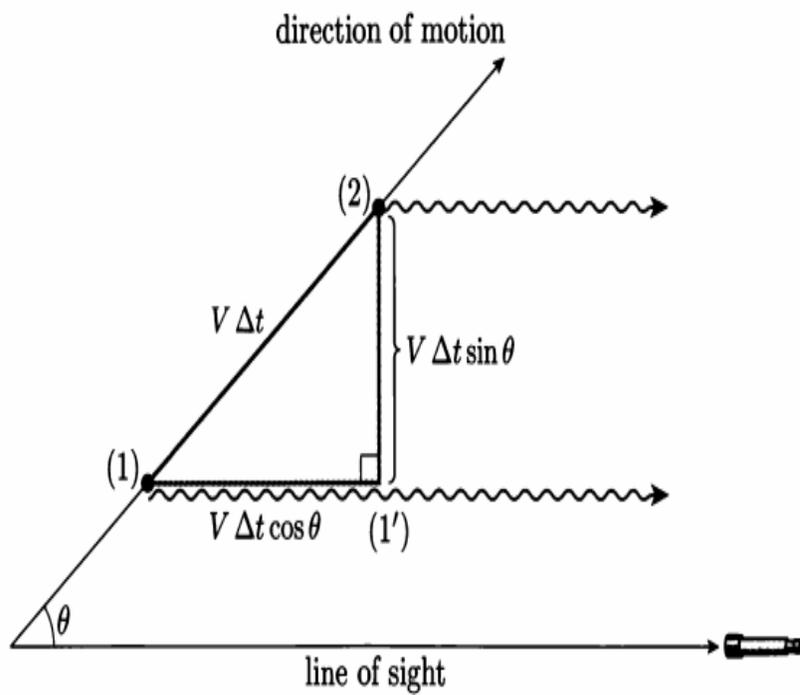


Figura 2.2: Diagrama que ejemplifica el movimiento superlumínico. Imagen tomada de Kolb (Kolb, 2010)

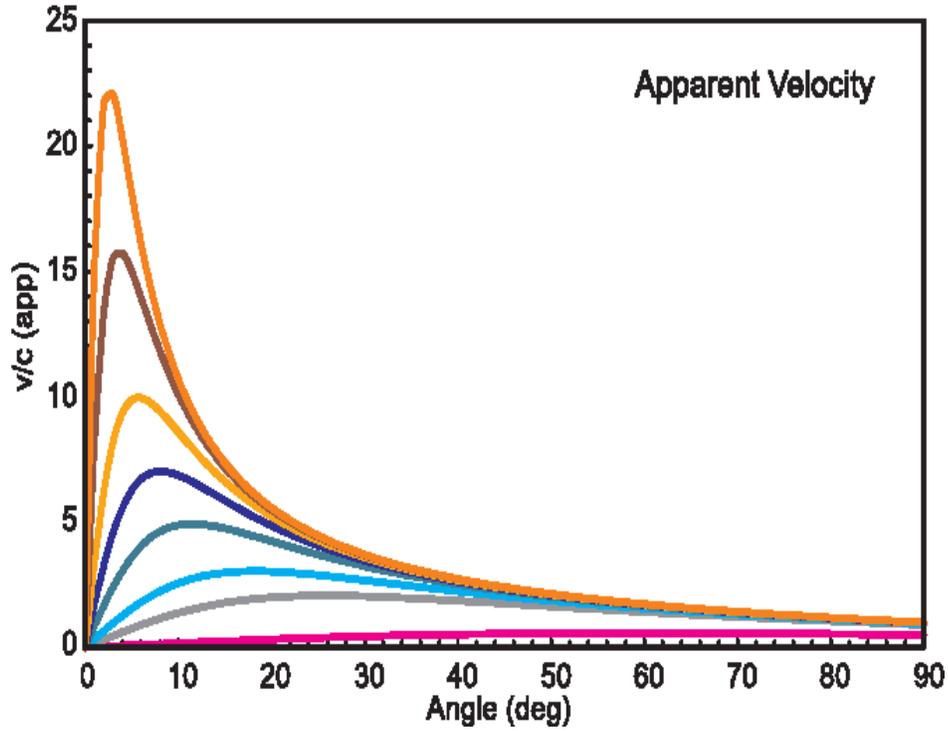


Figura 2.3: Velocidad aparente vs ángulo de orientación, para varios valores de la velocidad intrínseca. En rosa: $\beta = 0.5$, $\gamma = 1.15$; gris: $\beta = 0.9$, $\gamma = 2.3$; azul: $\beta = 0.95$, $\gamma = 3.2$; verde: $\beta = 0.98$, $\gamma = 5.0$; morado: $\beta = 0.99$, $\gamma = 7.1$; amarillo: $\beta = 0.995$, $\gamma = 10.0$; café: $\beta = 0.998$, $\gamma = 15.8$; naranja: $\beta = 0.999$, $\gamma = 22.4$.

2.1.2. Amplificación Doppler

Debido a que el jet viaja a velocidades relativistas, los fotones emitidos por éste, son afectados por el efecto conocido como Amplificación Doppler. Este efecto afecta la luminosidad aparente, de una fuente que se mueve a velocidades relativistas, que recibe el observador, haciendo que la fuente se vea más brillante de lo que realmente es. Qué tanto aumenta la luminosidad relativa de la fuente, se puede cuantificar mediante el factor Doppler que es:

$$\delta = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}. \quad (2.4)$$

Que depende directamente de la velocidad del fluido β y del ángulo θ , entre la línea de visión del observador y la dirección de propagación del fluido y γ , el factor

de Lorentz del fluido. El factor Doppler permite realizar las transformaciones adecuadas para la frecuencia y la luminosidad, medidas desde el marco de referencia del observador y el marco de referencia del fluido (George B. Rybicki, 1985).

La frecuencia medida desde el sistema de referencia del observador se verá afectada directamente proporcional al factor Doppler. Su transformación para pasar del marco de referencia del fluido al marco de referencia del observador, es:

$$\nu = \delta\nu'. \quad (2.5)$$

La ecuación 2.4 determina la transformación de la radiación entre el sistema del jet y el del observador. Suponiendo que $J(\nu)$ es la intensidad específica observada del material, debido a la invariancia de $\frac{J(\nu)}{\nu^3}$, la relación entre la intensidad observada y la intensidad en el marco en reposo del material, está dada por la siguiente ecuación:

$$J(\nu) = \delta^3 J'(\nu'). \quad (2.6)$$

2.1.3. Direccionamiento Doppler

Otro efecto relativista presente en los jets de los AGNs, es el direccionamiento Doppler. Este efecto determina el cambio en la dirección de propagación de la radiación entre el marco de referencia de la fuente y el del observador. Imaginemos dos sistemas de referencia, uno en reposo K y otro que se mueve a una velocidad \vec{v} , K' . En el sistema K' una partícula se desplaza a una velocidad \vec{u} , formando un ángulo θ' con respecto a \vec{v} . Entonces, las componentes de \vec{u} paralelas y perpendiculares a \vec{v} son:

$$u_{\parallel} = \frac{u'_{\parallel} + v}{1 + \frac{vu'_{\parallel}}{c^2}}, \quad (2.7)$$

$$u_{\perp} = \frac{u'_{\perp}}{\gamma \left(1 + \frac{vu'_{\perp}}{c^2}\right)}. \quad (2.8)$$

Y la tangente del ángulo θ en el marco de referencia del observador:

$$\tan \theta = \frac{u_{\perp}}{u_{\parallel}} = \frac{u' \sin \theta'}{\gamma(u' \cos \theta' + v)}. \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 se conoce como *fórmula de aberración*, donde $u' \equiv |\vec{u}'|$. Un caso interesante es cuando $u' = c$, porque:

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta'}{\gamma(u' \cos \theta' + v/c)}, \quad (2.10)$$

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta'}{1 + (v/c) \cos \theta'}. \quad (2.11)$$

Considerando el caso de emisión isotrópica, el direccionamiento por efecto Doppler tiene un máximo cuando $\theta' = \frac{\pi}{2}$

$$\tan \theta = \frac{c}{\gamma c}, \quad (2.12)$$

$$\sin \theta = \frac{1}{\gamma}. \quad (2.13)$$

En el caso de velocidades relativistas $\gamma \gg 1$, $\sin \theta \sim \theta$, donde $\theta \sim \frac{1}{\gamma}$ (Rybicki and Lightman, 1979)

2.2. Distribución espectral de energía

Para estudiar la distribución espectral de energía (del inglés Spectral Energy Distribution, en adelante, SED) de los blázares es necesario realizar (idealmente) observaciones cuasi-simultáneas y en todas las frecuencias posibles. La SED de los blázares presenta dos picos o jorobas de emisión ubicados a distintas frecuencias. En la Figura 2.5 se muestra la SED de S5 0716+714 obtenida durante un flare (incremento de brillo) ocurrido en enero 2015. Estos máximos de emisión presentan componentes de baja y alta energía cada una mostrando un máximo o pico de emisión. La primer

joroba se produce por radiación sincrotrón (Rees, 1967; Marscher and Gear, 1985) y se observa en longitudes de onda que van desde el infrarrojo (IR) hasta el ultravioleta (UV) o rayos X (e.g. Sasada et al., 2012). Es importante mencionar que de acuerdo a la localización del primer pico de emisión en la SED, los objetos BL Lac se clasifican en BL Lac de baja, intermedia y alta energía (del inglés, Low-energy-peaked BL Lac o LBL, intermediate-peaked BL Lac o IBL y High-peaked BL Lac o HBL (Padovani and Giommi, 1995). De acuerdo a esta clasificación, los picos en la primera joroba para cada clase se ubican en la SED en los siguientes rangos de frecuencia:

- LBL: $10^{13-14} Hz$
- IBL: $10^{15-16} Hz$
- HBL: $10^{17-18} Hz$

La emisión de la segunda joroba, la cual se observa en la región de altas energías de la SED, suele presentar un máximo a partir de los rayos X hasta los rayos- γ , en algunos casos se observa en las bandas de los TeV. El origen de esta segunda joroba es un poco más controvertido. Originalmente los llamados modelos leptónicos funcionan para explicar adecuadamente a la mayoría de los blázares tipo BL Lac (i.e. en estos modelos los jets son solamente de electrones). En estos modelos se ajusta la segunda joroba con emisión producida por Compton Inverso (del inglés, IC) (Ghisellini and Tavecchio, 2009). Los modelos leptónicos más exitosos son los conocidos como (del inglés, Synchrotron Self-Compton, en adelante SSC) y su posterior dispersión por IC de fotones producidos inicialmente por los electrones que emiten el sincrotrón. Estos modelos ajustan el máximo observado en la segunda joroba de la SED a que se produce en las bandas de los rayos-X y hasta los rayos gamma (Marscher and Gear, 1985; Maraschi et al., 1992). No obstante, para ajustar la SED de los blázares tipo FSRQ suelen funcionar con modelos que además incluyen fotones producidos externamente al jet (por ejemplo, fotones producidos por el disco de acreción o la región de líneas anchas o BLR del AGN). Estos modelos se conocen en la literatura como modelos con *External Compton* o SSC+IC+EC (e.g. Begelman et al., 1987).

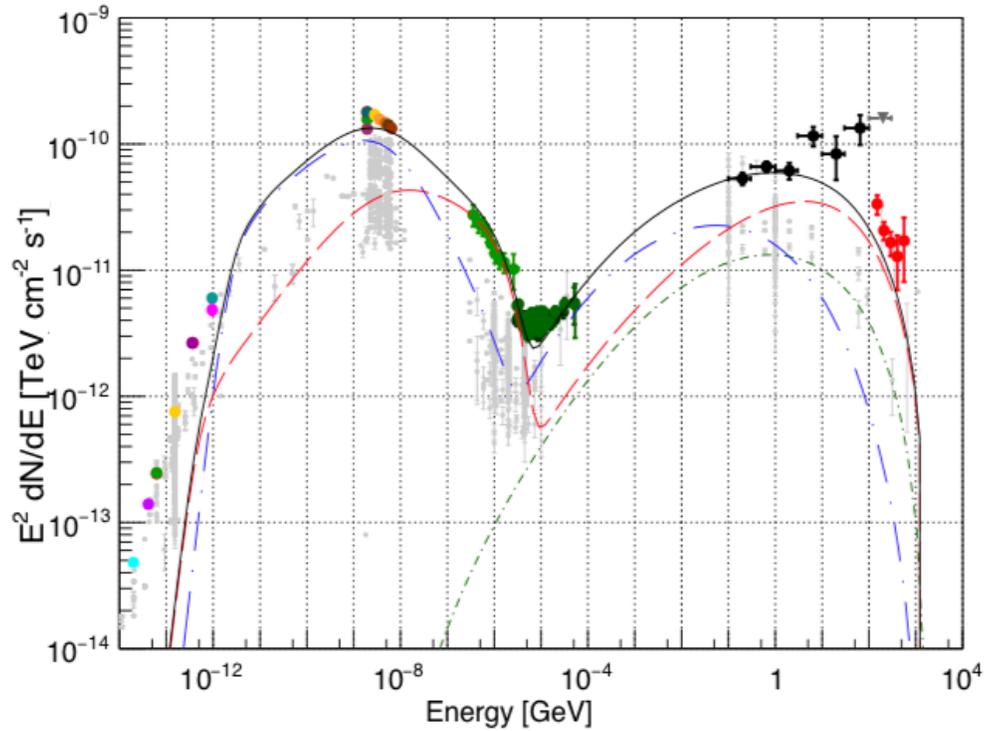


Figura 2.4: La SED de S5 0716+714 modelada con datos multifrecuencias colectados durante el máximo en enero de 2015 por MAGIC Collaboration et al. (2018). Los puntos grises se tomaron de la base de datos ubicada en <http://www.asdc.asi.it>, la línea azul es la emisión de un nódulo y la roja de un choque recolimado, la interacción entre ambos se presenta en verde. Los puntos rojos son datos obtenidos con el telescopio *MAGIC*. En negro se muestra el ajuste final sumando las tres componentes. Del análisis del flare, estos autores proponen que la emisión de rayos gamma durante este flare se produce por choques en el jet (que suponen helicoidal) que sale del núcleo, cercanamente seguida por el flare observado en óptico y el de rayos-X.



Figura 2.5: Foto del telescopio de rayos gamma *MAGIC* o Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope, que opera desde 2004 y que está instalado en el Observatorio Roque de Los Muchachos, en la isla de la Palma, en España. Este telescopio detecta rayos gamma de muy alta energía, es decir, con energías mayores a 10 GeV. Los blázares son conocidos por ser emisores de rayos gamma, dominando por número el brillo del cielo en estas bandas del espectro electromagnético. Ver detalles en <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/telescopios-y-experimentos/magic-telescopes>

El segundo enfoque para explicar la joroba de altas energías, proviene de los modelos hadrónicos, donde es necesario que los protones en el jet sean acelerados a velocidades ultrarelativistas. La emisión es producto de la producción de pares o por radiación sincrotrón generada por protones (Aharonian, 2000).

2.2.1. La variabilidad en los blázares

Una de las características que convierte a los blázares en objetos sumamente interesantes es que presentan variabilidad en distintas escalas temporales, desde minutos (microvariabilidad), hasta años (e.g. Ulrich et al., 1997). También presentan emisión de luz altamente polarizada y variaciones en el ángulo y grado de polarización (e.g.

Andruchow et al., 2011; Sorcia et al., 2013).

La variabilidad extrema de los blázares suele analizarse considerando distintas escalas de tiempo, las cuales dependen del periodo en el cual se presenta. La primera se conoce como variabilidad de largo periodo (del inglés, Long Term Variability, LTV) que ocurre de meses a años; la segunda es la variabilidad de corto periodo (Short Term Variability, STV), que ocurre en períodos de días a meses; y por último la microvariabilidad (o intra-night Variability) que ocurre en escalas temporales de algunos minutos-horas, i.e. dentro de la misma noche (e.g. Wagner and Witzel, 1995).

Las variaciones observadas en los blázares son impredecibles por lo que resulta todo un reto descifrar los mecanismos que las producen. Entre los modelos propuestos en la literatura para explicar las variaciones de brillo (fotométricas) están los relacionados con la inyección, aceleración y enfriamiento de las partículas en el jet relativista. En estos procesos pueden existir eventos que incluyen choques y ondas producidas por eventos turbulentos en el jet.

También hay modelos que explican la variabilidad observada con variaciones ocurridas en la geometría del jet (ver Raiteri et al., 2017). Otra gran propiedad de la variabilidad es que suele producirse en distintas regiones emisoras, siendo las más rápidas asociadas a las regiones más internas del jet, mientras que las más lentas se asocian a la emisión a lo largo del jet en escalas de algunos parsecs.

Otra característica importante que distingue a los blázares es su emisión altamente polarizada y variable. En particular la polarización se ha estudiado desde las bandas del radio hasta el UV (Landoni et al., 2014) quedando para futuras misiones los polarímetros que están siendo diseñados para trabajar en los rayos-X y los rayos gamma. Estos observatorios abrirán la nueva ventana de la física extrema de la radiación de altas energías, donde se estudiará la producción de neutrinos, rayos cósmicos y procesos de aceleración en jets de AGN (ver Rani, 2019).

En principio, la variabilidad polarimétrica suele explicarse con procesos relacionados a la emisión sincrotrónica de electrones (suponemos un modelo leptónico) producida por un campo magnético parcialmente ordenado. Modelos más detallados explican dichas variaciones mediante procesos asociados con la intensa aceleración de las par-

tículas en el jet. En particular, entre los procesos más comunes se encuentran las variaciones debidas a choques en el jet, variaciones producidas por inestabilidades de kink o por choques turbulentos (e.g. Böttcher and Dermer, 2010; Chandra et al., 2015; Zhang et al., 2017).

Otro tipo de modelos incluyen procesos globales asociados a la evolución del jet para explicar la variabilidad polarimétrica, por ejemplo, las variaciones pueden deberse a cambios en morfología del jet como tener un jet doblado Raiteri et al. (2010) o uno con estructura helicoidal Marscher et al. (2008). Recientemente se ha encontrado que variaciones en el porcentaje de polarización (ver figura 2.6) y del EVPA pueden ser el resultado de variaciones en la emisión sincrotrónica del jet relativista originadas por un campo magnético con estructura helicoidal Zhang et al. (2016).

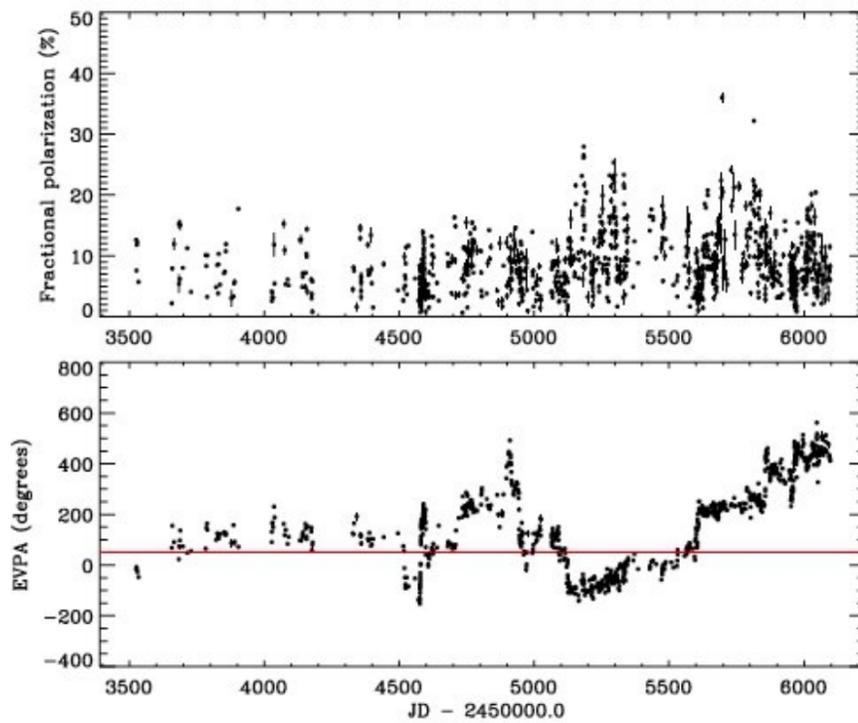


Figura 2.6: Variabilidad en el grado o porcentaje P (%) de polarización (arriba) y en el EVPA (abajo) observada en el blázar S5 0716+71 en octubre del 2011 (ver Falomo et al., 2014).

2.3. El blázar S5 0716+714

El objeto BL Lac S5 0716+714 es considerado como uno de los blázares más variables. La emisión del continuo en las bandas del óptico no muestra líneas de emisión por lo que la estimación de su corrimiento al rojo es complicada. No obstante, Nilsson et al. (2008) estima un valor de $z=0.31\pm 0.08$ basado en la detección fotométrica de la galaxia anfitriona. Posteriormente, Danforth et al. (2013) estima un rango entre $0.2315 < z < 0.3407$ el cual obtiene estudiando el espectro UV de nubes en el camino entre el blázar y el observador, conocidas como sistemas Lyman alfa.

Como todos los blázares, es una fuente emisora en multifrecuencias. En 2008 fue detectada por el telescopio de rayos gamma *MAGIC* como un candidato a emisor de rayos gamma en el rango de los TeV (Anderhub et al., 2009). Este objeto ha sido clasificado como un intermediate-peaked BL Lac o blázar de tipo intermedio (IBL). Esto debido a que su primer pico de emisión de la SED varía entre 10^{14-15} Hz.

Recientemente se ha confirmado que presenta IDV en las bandas del óptico, incluyendo este mismo de variabilidad en observaciones de polarimetría óptica (ver Bhatta et al., 2016). Adicionalmente, observaciones en las bandas del radio con el Very Long Base Interferometer (VLBI) de S5 716+714 muestran que la emisión de radio continuo está dominada por un núcleo brillante, que en ocasiones presenta eyección de componentes con movimientos superlumínicos con velocidades aparentes que llegan a $\sim 25c$ (Bach et al. 2005, 2006; Rastorgueva et al. 2009; Jorstad et al. 2017; Lister et al. 2019). Por ejemplo, uno de los monitoreos realizado con el interferómetro Very Long Base Array o VLBA por el grupo de Boston University (see Jorstad and Marscher, 2016; Jorstad et al., 2017) confirma este comportamiento en S5 0716+714. En la Fig 2.7 se muestran algunos mapas de intensidad de flujo y polarización y puede observarse en algunos de ellos la eyección ocasional de nódulos proveniente del núcleo compacto.¹ La selección de mapas en la figura 2.7 se hizo tomando en cuenta las

¹En esta tesis usamos algunos de los mapas obtenidos con el VLBA del blázar S5 0715+714 los cuales se obtuvieron en el VLBA-BU blázar Monitoring Program (VLBA-BU-blázar; <http://www.bu.edu/blazars/BEAM-ME.html>), el cual es apoyado por la NASA a través del Fermi Guest Investigator Program. El VLBA es un instrumento del National Radio Astronomy Observatory. The National Radio Astronomy Observatory es una instalación de la National Science Foundation operado por Associated Universities, Inc.

épocas donde el blázar mostró elevada actividad en las bandas del óptico, tratando de coincidir con las fechas óptimas. En todos ellos hay evidencia de variabilidad tanto del continuo como en la polarización en las bandas del radio. Los estudios con el *VLBA* permiten analizar la cinemática del jet y observar su evolución en el tiempo, incluyendo la observación real de nuevos nódulos de material que son arrojados desde la fuente central hacia el jet relativista.

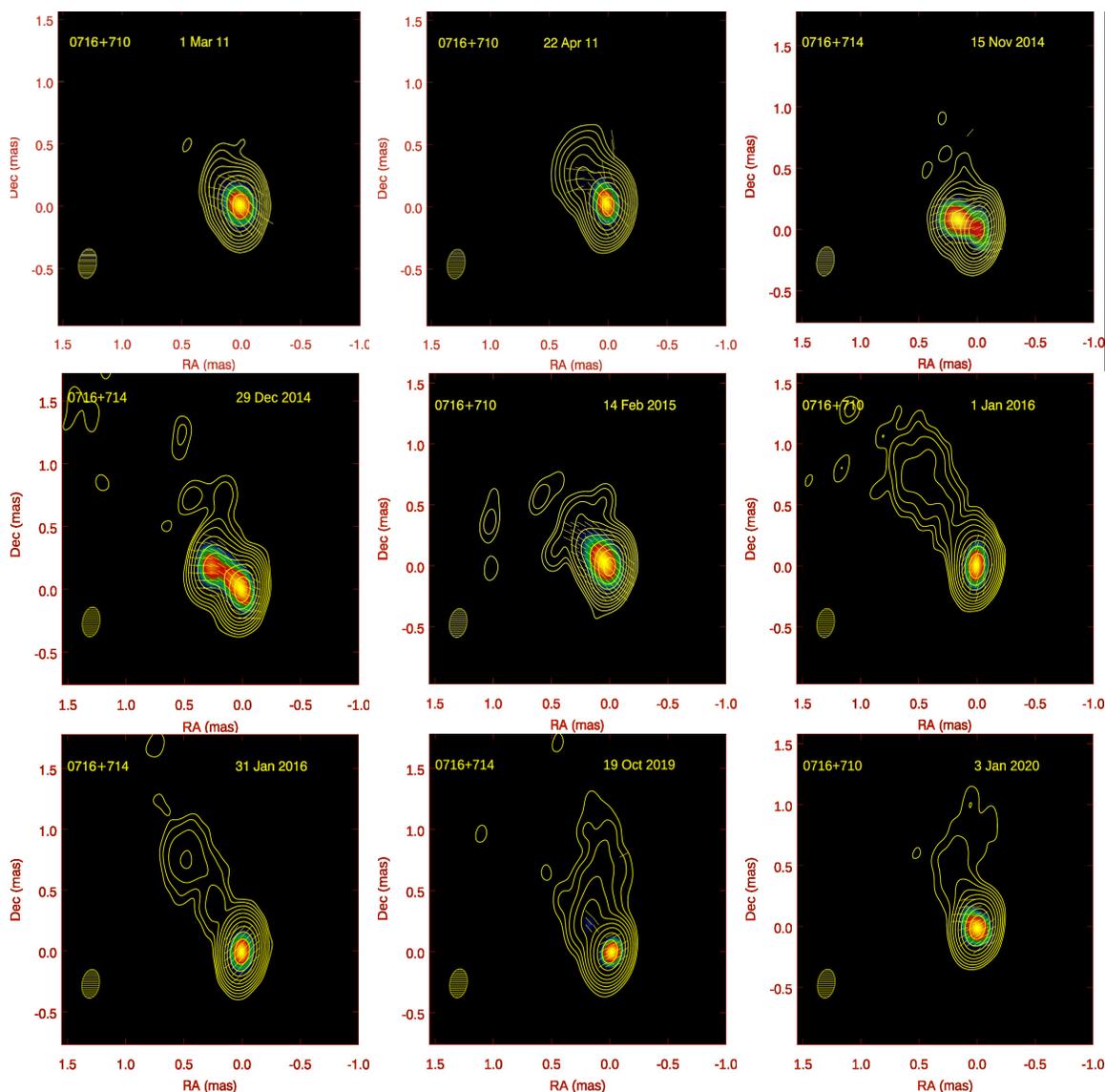


Figura 2.7: Mapas adquiridos con el interferómetro en radio Very Long Baseline Array o *VLBA* a 43 GHz que muestran los estados de actividad de S5 0716+714 en distintas épocas. Los mapas muestran variaciones en la intensidad de la emisión en radiofrecuencias. Mostramos algunas épocas que coinciden con las fechas donde hemos observado estados de mayor actividad de S5 0716+714 como resultado del análisis de los datos del monitoreo en el OAN-SPM presentados en esta tesis.

Capítulo 3

Monitoreo del blázar S5 0716+714

El proyecto *Polarimetric Monitoring of Blazars at San Pedro Mártir*¹ inició formalmente sus primeras observaciones en octubre del 2007 en las instalaciones del Observatorio Astronómico Nacional ubicado en la sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México (OAN-SPM), figura 3.1.

El objetivo del proyecto era estudiar una muestra de 40 blázares emisores de rayos gamma en las bandas de los TeV o blázares TeV, realizando observaciones en colaboración con el proyecto *GLAST-AGILE support Program*, que es coordinado por el *Whole Earth Blazar Telescope* (WEBT). El consorcio GASP-WEBT inició igualmente operaciones en 2007 con el fin de contribuir con observaciones multifrecuencias desde tierra al catastro del cielo realizado con el telescopio espacial de rayos Gamma *FERMI LAT* (figura 3.2), el cual fue lanzado al espacio en agosto de 2008. El objetivo principal del proyecto GASP-WEBT fue dar seguimiento específicamente a objetos tipo blázar detectados en las bandas de los rayos gamma por *FERMI*. Las observaciones del consorcio GASP-WEBT han contribuido desde entonces al avance del estudio de los blázares utilizando sus propiedades de variabilidad multifrecuencias.

¹<http://haro.astrossp.unam.mx/blazars/>

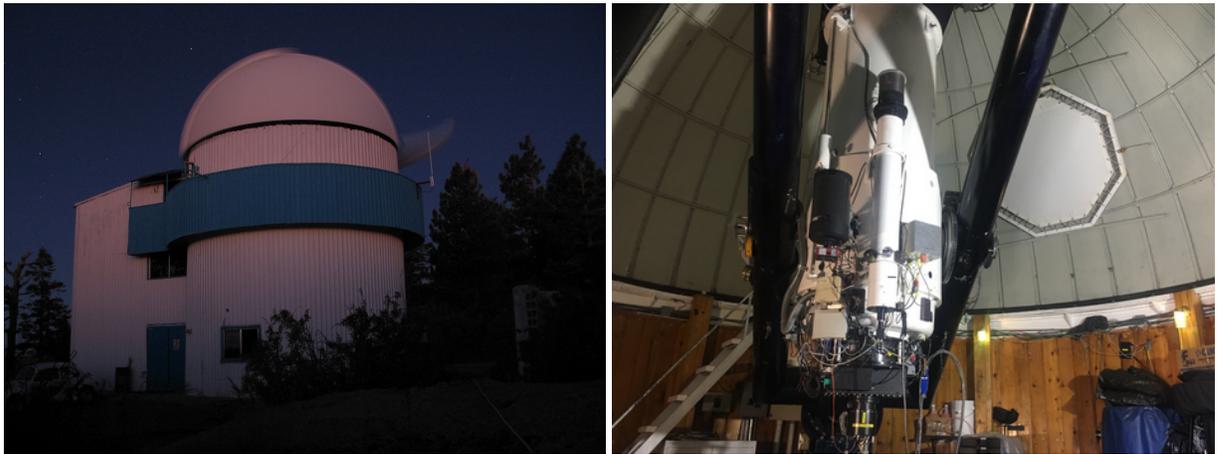


Figura 3.1: Imagen del edificio y del telescopio de 84cm en el OAN-SPM.



Figura 3.2: Imagen del telescopio espacial de rayos gamma *Fermi* lanzado en 2008.

3.1. Observaciones

Los datos analizados en esta tesis fueron obtenidos con el telescopio Ritchey-Chrétien que tiene un diámetro de 0.84m y un secundario f/15. Utilizamos el instrumento *POLIMA* que es un polarizador de imagen directa y el filtro R del sistema Johnson-Cousins. Los datos abarcan del 20 de octubre del 2007 (MJD 54393) al 17 de febrero del 2020 (MJD 58896). Se tiene un total de 257 puntos de observación (ver tabla 3.1).

POLIMA consiste de un prisma Glan-Taylor rotativo controlado por un motor a pasos cuya precisión es de 0.1° . El prisma presenta una transmitancia de 90%, una razón de extinción entre los dos estados de polarización de 5×10^{-5} y un rango de longitud de onda de $215 - 2300 \text{ nm}$. Su campo de visión limpio de $(3 \times 3)'$ en el plano del cielo. La polarización instrumental encontrada es de $0.6\% \pm 0.5\%$ (ver detalles en Sorcia et al., 2013).

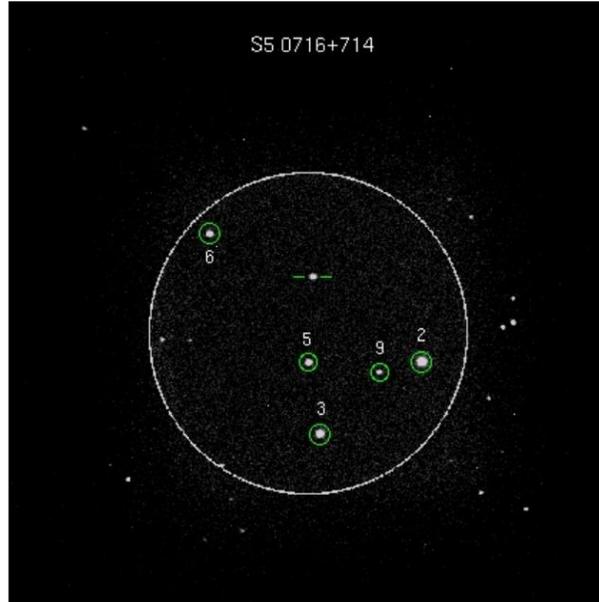


Figura 3.3: Imagen de S5 0716+714 obtenida durante el monitoreo en el OAN-SPM con el telescopio de 84 cm y el instrumento *POLIMA* en la banda R del óptico. El objeto está marcado entre dos líneas horizontales. Los círculos verdes muestran la posición de las estrellas estándares fotométricas que se utilizan para la calibración del flujo. Los flujos se calibraron con las estrellas estándares 3, 5 y 6. La fotometría se realizó con un radio de apertura de $7''$.

3.1.1. Procesamiento de los datos

Los datos obtenidos se procesaron utilizando el programa “Estandard” (el manual de usuario se puede consultar en la página web del proyecto, aquí lo explicamos a grandes rasgos.). Debido a que los detectores trabajan a temperaturas criogénicas, no se toman exposiciones de corriente oscura. Una vez pasada la puesta del Sol, se toman varios campos planos con el filtro R en las cuatro posiciones del polarizador, utilizando la secuencia 0° , 90° , 45° y 135° para la posición del prisma. El *Flat* es una imagen con iluminación uniforme para poder realizar una medición de las variaciones espaciales en la respuesta de los píxeles del *Charge-Coupled-Device* o CCD.

Los *Flats* se tomaron en las cuatro posiciones del polarizador en el filtro R, con un tiempo de exposición de 60 segundos. El *Bias*, que es una imagen sin tiempo de integración. Esta imagen representa el nivel del detector previo a cualquier detección. En cada posición del prisma, se restaron los Bias de los Flat (Flat - Bias). Para cada posición del prisma se combinaron las imágenes Flat, para obtener una imagen Flat promedio. Los Bias también se restaron de las imágenes del objeto y el resultado se multiplicó por el valor promedio de las imágenes Flat ya corregidas por Bias. Por último, la imagen del objeto se dividió entre la imagen Flat promedio.

Las magnitudes fotométricas, en la banda R, son determinadas mediante dos mediciones ortogonales:

$$\begin{aligned} f_1 &= f(0^\circ) + f(90^\circ), \\ f_2 &= f(45^\circ) + f(135^\circ), \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde $f(x)$ es el flujo medido en la posición x del polarímetro. Para calcular los parámetros de Stokes normalizados de cada observación:

$$q = \frac{f(0^\circ) - f(90^\circ)}{f(0^\circ) + f(90^\circ)}, \tag{3.2}$$

$$u = \frac{f(45^\circ) - f(135^\circ)}{f(45^\circ) + f(135^\circ)}. \tag{3.3}$$

Y sus respectivos errores, se obtienen:

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{2f_{135}}{(f_{45} + f_{135})^2} \sigma_{f_{45}}\right)^2 + \left(\frac{2f_{45}}{(f_{45} + f_{135})^2} \sigma_{f_{135}}\right)^2}, \quad (3.4)$$

$$\sigma_q = \sqrt{\left(\frac{2f_{90}}{(f_0 + f_{90})^2} \sigma_{f_0}\right)^2 + \left(\frac{2f_0}{(f_0 + f_{90})^2} \sigma_{f_{90}}\right)^2}. \quad (3.5)$$

Por último, para obtener el grado de polarización, p y el ángulo de polarización θ :

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (3.6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right). \quad (3.7)$$

3.1.2. Corrección por ambigüedad

Los datos polarimétricos, para el ángulo de posición del vector eléctrico (EVPA), se corrigieron para evitar la ambigüedad de 180° , siguiendo el procedimiento usado por Sorcia en, (Sorcia et al., 2013), que describiremos brevemente a continuación. Se tomaron en cuenta las incertidumbres del EVPA, suponiendo que la diferencia entre valores adyacentes debe ser menor a $\frac{\pi}{2}$. Esta diferencia se define como:

$$|\Delta\theta_n| = |\theta_{n+1} - \theta_n| - \sqrt{\sigma(\theta_{n+1})^2 + \sigma(\theta_n)^2} \quad (3.8)$$

donde θ_{n+1} y θ_n son los $n + 1$ y n -ésimo ángulo de polarización, $\sigma(\theta_{n+1})$ y $\sigma(\theta_n)$ los errores respectivos. Entonces:

Si $\Delta\theta_{n+1} < -\pi/2$, sumamos π a θ_{n+1} .

Si $\Delta\theta_{n+1} > \pi/2$ sumamos $-\pi$ a θ_{n+1} .

3.1.3. Análisis estadístico

Las magnitudes observadas en la banda R fueron transformadas a unidades de flujo en mJy, utilizando la siguiente ecuación:

$$F_{obs} = K_0 \times 10^{-0.4mR}, \quad (3.9)$$

donde $K_0 = 3.08 \times 10^6$ mJy para una longitud de onda $\lambda = 640nm$ que es la longitud pico del filtro R.

Para realizar el análisis estadístico en los datos, calculamos tres parámetros importantes. La amplitud de las variaciones $Y\%$ calculada según lo publicado por Heidt (1996), para las densidades de flujo, con la expresión:

$$Y(\%) = \frac{100}{\langle S \rangle} \sqrt{(S_{max} - S_{min})^2 - 2\sigma_c^2}, \quad (3.10)$$

donde S_{max} y S_{min} son los valores máximo y mínimo de la densidad de flujo respectivamente. $\langle S \rangle$ es el valor promedio y $\sigma_c^2 = \sigma_{max}^2 + \sigma_{min}^2$. Los valores σ_{max} y σ_{min} , corresponden a los errores asociados a S_{max} y S_{min} respectivamente. La variabilidad es descrita por el índice de fluctuación μ definido por:

$$\mu = 100 \frac{\sigma_s}{\langle S \rangle} \%, \quad (3.11)$$

donde σ_s es el error promedio. El tercer parámetro calculado fue el índice de variabilidad fraccional de la fuente, \mathcal{F} , definido como:

$$\mathcal{F} = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}}. \quad (3.12)$$

En la figura 3.4 se muestra la curva de luz de S5 0716+714 con los 257 puntos obtenidos en el lapso de 12 años.

Realizando una inspección visual de la curva de luz es claro notar las variaciones de largo periodo en los parámetros observados. Estas variaciones se van a analizar a detalle en el siguiente capítulo.

Tabla 3.1: Ejemplo de los datos obtenidos en las observaciones para la polarización y fotometría en la banda R de S5 0716 + 714.

MJD	p(%)	ϵ_p	$\theta(^{\circ})$	ϵ_{θ}	R (mag)	ϵ_R	Flujo (mJy)	ϵ_{Flujo}
54393.0	11.235	0.250	90.06	0.74	12.26	0.011	38.42	0.39
54396.0	8.655	0.835	67.95	2.80	12.93	0.020	20.73	0.38
54397.0	10.101	0.325	102.45	0.99	12.64	0.012	27.07	0.30
54416.0	5.187	0.105	107.43	0.95	12.99	0.010	19.61	0.18
54417.0	2.673	0.343	50.17	3.82	13.06	0.015	18.39	0.25
...								

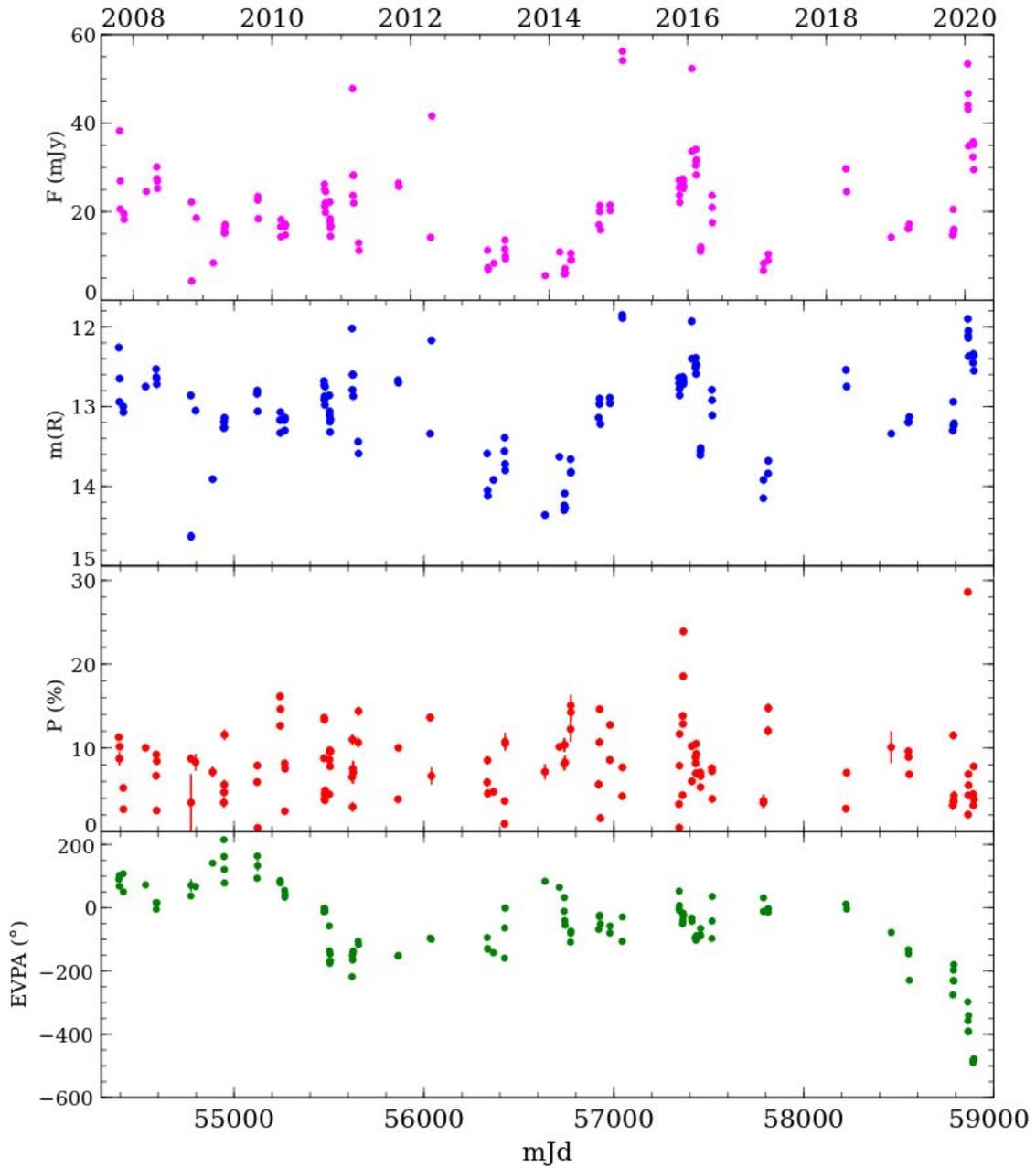


Figura 3.4: Curva de luz de S5 0716+714 obtenida en un lapso de 12 años, de finales del 2007 a principios del 2020. El panel superior, color magenta, muestra el flujo en mJy de la banda R. En azul se muestran las variaciones de la magnitud en la banda R. En rojo se muestran las variaciones en el grado de polarización y en verde las variaciones del ángulo de posición, EVPA, corregido por ambigüedad. En la mayoría de los puntos no se alcanzan a observar los errores, debido a que son más pequeños que el tamaño de los símbolos utilizados en la figura.

Capítulo 4

Análisis de resultados

El análisis de la curva de luz fotopolarimétrica se realizó inicialmente considerando visualmente las variaciones en el flujo observadas. Para un análisis más detallado, se seleccionaron periodos alrededor de puntos donde se detectaron estados de máxima actividad en el flujo. Para su identificación, se eligieron aquellos que están 3σ por encima del valor del flujo promedio $F = 43.47 \pm 0.3$ mJy. Se encontraron cuatro estados de actividad que cumplen con este criterio. Estos ciclos serán analizados individualmente en la sección 4.2

4.1. Variaciones del ciclo completo.

La curva de luz muestra que durante el tiempo del monitoreo el objeto ha mostrado gran actividad tanto en flujo como en porcentaje de polarización $P(\%)$ y EVPA. Estimamos el promedio del flujo considerando el total de observaciones de la curva de luz y obtenemos que $F=21.6 \pm 0.3$ mJy, con una desviación estándar 10.9 mJy, que en magnitud el promedio corresponde a $R_{mag} = 13.01 \pm 0.02$ mag y la desviación estándar de la magnitud es de 0.58. El flujo máximo observado, fue de 56 ± 0.6 mJy ($R_{mag} = 11.85 \pm 0.01$ mag) el día 22 de enero del 2015 (MJD 57044.0), mientras que el mínimo fue de 4.5 ± 0.2 mJy ($R_{mag} = 14.63 \pm 0.06$ mag) el día 11 de marzo del 2008 (MJD 54773.0). Esto implica un cambio $\Delta F = 51.9 \pm 0.7$ mJy, ($R_{mag} = 2.8 \pm 0.05$ mag) en un lapso de 7 años.

El promedio del porcentaje de polarización de todas las observaciones, fue de $(8.08 \pm 0.42)\%$ presentando una desviación estándar de 4.41% . El valor máximo observado se vio el día 16 de enero del 2020 (MJD 55124.0) y fue de $(28.5 \pm 0.4)\%$. El valor mínimo observado corresponde al día 20 de octubre del 2009 (MJD 55124.0) y tuvo un valor de $(0.5 \pm 0.4)\%$. Esto significa que hubo una variación $\Delta P = (28.1 \pm 0.6)\%$ en un lapso de 11 años.

En cuanto al EVPA el valor promedio es de $-69^\circ \pm 1.6^\circ$. Teniendo una desviación estándar de 141.6° . La mayor rotación fue de $704^\circ \pm 2\%$ en un periodo de 5 años (2015-2020).

Se estimó la mínima escala temporal de variabilidad del flujo, siguiendo el método descrito en (Sorcía et al., 2013):

$$\tau = \frac{dt}{\ln(F_1/F_2)} \quad (4.1)$$

donde dt es el intervalo que hay entre todos los pares de mediciones F_1 y F_2 , tal que $F_1 > F_2$. Esta escala es calculada para todos los pares que cumplan que $F_1 - F_2 > \sigma_1 F_1 + \sigma_2 F_2$, donde σ_i son los errores medidos. Después de calcular todos los valores posibles entre pares de flujos, se busca el valor mínimo. El error asociado a la mínima escala es:

$$\sigma(\tau_\nu) = \frac{\tau_\nu}{\log(F_1/F_2)} \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 F_1}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 F_2}{F_1}\right)^2} \quad (4.2)$$

Con esto, obtuvimos un valor, para la escala mínima temporal de variabilidad, de 0.7 ± 0.5 días, i.e. ~ 15 horas. Con este valor podemos estimar un límite superior para el tamaño de la región emisora, usando:

$$r \leq \frac{ct_{min}\delta}{1+z} \quad (4.3)$$

Para este cálculo, usamos $\delta \sim 10$, valor presentado en (Raiteri et al., 2021). Con estos valores, el límite superior del tamaño de la región emisora es de:

$$r \leq 4 \times 10^{-3} pc$$

En la tabla 4.1 se pueden observar los parámetros mencionados anteriormente, para cada uno de los periodos de mayor actividad y que son en los que enfocaremos nuestro análisis. En la tabla 4.1, Y (%) muestra la amplitud de las variaciones, μ el índice de las fluctuaciones y, finalmente, F es el índice de la variabilidad fraccional.

Tabla 4.1: Tabla con los parámetros derivados de las observaciones en los periodos en donde ocurren los estados de mayor actividad del blázar. Para la magnitud, no se pusieron los valores de los parámetros estadísticos debido a su naturaleza logarítmica.

Fecha outburst	Parámetro	Promedio	Máx.	Mín.	Δ_{max}	Y (%)	μ (%)	F
01/03/2011	R (mag)	12.8 ± 0.2	12.0 ± 0.1	13.6 ± 0.3	1.6 ± 0.2	...	...	...
	F (mJy)	24.9 ± 0.7	47.9 ± 0.7	11.2 ± 0.4	36.6 ± 0.6	147	1.8	0.6
	P (%)	8.6 ± 0.5	14.4 ± 0.3	3 ± 0.1	11.5 ± 0.3	130.8	9	0.7
	EVPA(°)	-148.2 ± 7	-106 ± 1	-218.1 ± 3	112.1 ± 4	-75.5	-1.8	-0.3
22/01/2015	R (mag)	12.7 ± 0.3	11.9 ± 0.2	13.2 ± 0.1	1.4 ± 0.3	...	...	...
	F (mJy)	28.3 ± 0.3	56.4 ± 0.5	15.9 ± 0.2	40.3 ± 0.5	142.4	1.1	0.6
	P (%)	8.2 ± 0.5	14.6 ± 0.7	1.6 ± 0.1	13 ± 0.8	157.8	4.6	0.8
	EVPA(°)	-55.7 ± 4	-24 ± 1	-106.3 ± 4	82.4 ± 5	-147.2	-3.1	-0.6
23/01/2016	R (mag)	12.8 ± 0.2	11.9 ± 0.3	13.7 ± 0.1	1.7 ± 0.4	...	...	...
	F (mJy)	25.6 ± 0.7	52.3 ± 0.5	10.5 ± 0.2	41.8 ± 0.5	163	1	0.7
	P (%)	9.4 ± 0.3	23.9 ± 0.7	0.5 ± 0.1	23.4 ± 0.8	248.4	3.7	0.9
	EVPA(°)	-42.6 ± 2	61.2 ± 1	-102.7 ± 3	163.7 ± 4	-383	-4	-4
16/01/2020	R (mag)	12.6 ± 0.2	11.9 ± 0.1	13.3 ± 0.1	1.4 ± 0.2	...	...	...
	F (mJy)	30.2 ± 0.3	53.5 ± 0.5	14.7 ± 0.2	38.7 ± 0.7	128.3	1	0.6
	P (%)	6.6 ± 0.5	28.6 ± 0.3	2.1 ± 0.1	26.6 ± 0.4	400.7	5.2	0.9
	EVPA(°)	-338.6 ± 6	-145.5 ± 4	-490.1 ± 2	344.6 ± 6	-101.8	-0.5	-0.5

4.2. Estados de máxima actividad

En esta sección analizaremos los registros de las fechas cercanas a los cuatro estados de mayor actividad (flares) y que hemos definido con anterioridad como los puntos que sobrepasan el criterio de tener un flujo por arriba de 3σ , del valor promedio.

1 de marzo de 2011

El primero de marzo del 2011, se registró un flujo de 47.9 ± 0.7 mJy. Este día, el porcentaje de polarización P (%) = $6.5\% \pm 0.1\%$ con un EVPA de $38.1^\circ \pm 2.19^\circ$. En la gráfica 4.1, se puede observar el estado de actividad del blázar en dos temporadas de observación. Es interesante ver como decae el brillo de la fuente desde marzo y hasta abril. Podemos decir que ambas temporadas registran un mismo estado de actividad.

En la figura 4.2 puede verse como ambas temporadas registran una misma tendencia a mostrar correlaciones negativas con el EVPA y el P(%). Se tiene un registro dos días después (3 de marzo de 2011) de 23.8 ± 0.3 mJy. Esto implica un cambio de 24.1 ± 1 mJy en el flujo.

Este flare se encontró en el ciclo que abarca del 4 de octubre del 2010 hasta el 4 de abril del 2011. En este ciclo, hay un $\Delta R_{(Mag)} = 1.56$ mag, existiendo un periodo entre el máximo y mínimo de 34 días. La escala mínima de variabilidad, del flujo, en este ciclo fue de 2.85 días.

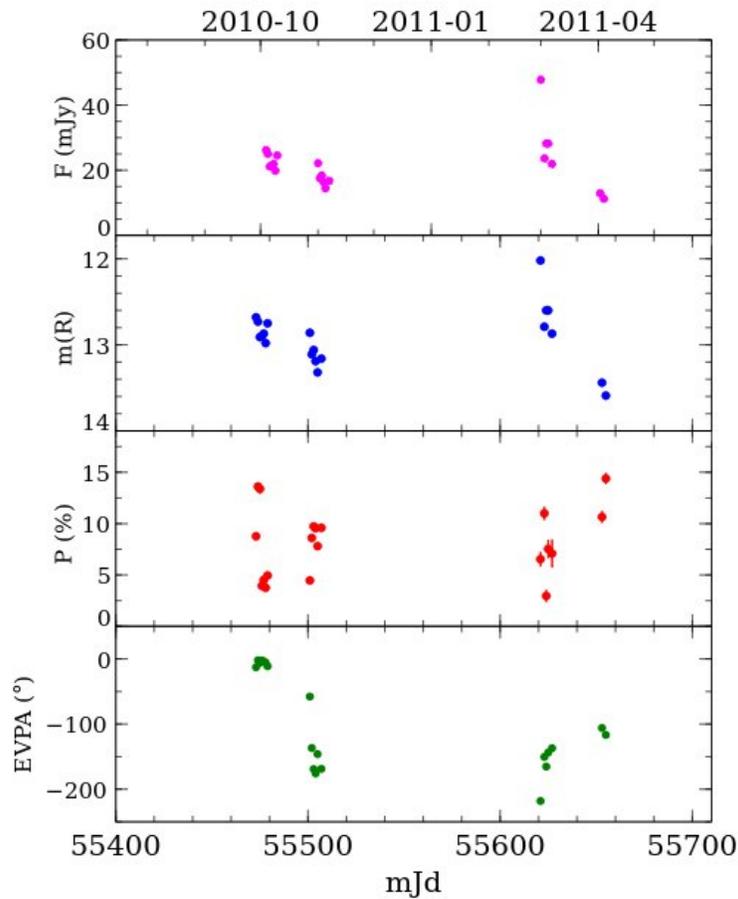


Figura 4.1: Variaciones observadas durante cuatro temporadas de observación: octubre y noviembre 2010 y luego marzo y abril de 2011. El flare ocurre en marzo, donde los datos indican que el objeto inicia muy brillante y en los siguientes días va disminuyendo su brillo.

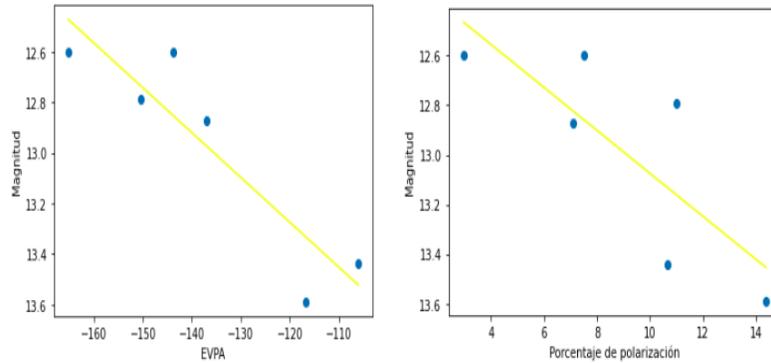


Figura 4.2: Del lado izquierdo, se aprecia la gráfica de correlación entre la magnitud de la banda R del óptico y el EVPA, para la cual obtuvimos un coeficiente de correlación $P=0.905$. Del lado derecho se muestra la correlación (moderada) obtenida entre la magnitud y el $P(\%)$, esta vez con un coeficiente $P=0.7941$. Estas gráficas de correlación toman en cuenta únicamente los puntos después del máximo, que son los puntos en los meses de marzo y abril del 2011. Podríamos sugerir que el origen de la variabilidad observada en marzo y abril es común.

22 de enero de 2015

En el 2015, se registró uno de los mayores flares de este blázar. Se tiene un registro de flujo máximo de 56.4 ± 0.5 mJy, ver figura 4.3 que equivale al punto de máximo brillo reportado a la fecha del blázar en la banda R. El día en el que este flare se registró, el grado o porcentaje de polarización medida fue de $P(\%) = 4.2\% \pm 0.2\%$ y el EVPA = $74^\circ \pm 0.1^\circ$.

Este flare se presenta en el ciclo que comprende del 24 de noviembre de 2014 al 23 de enero de 2015. En este ciclo se presentó una magnitud máxima de 11.84 y una mínima de 13.2. Esto representa un $\Delta R_{mag} = 1.36$, en un periodo de 114 días. Este ciclo presentó una escala mínima de variabilidad de 13.61 días.

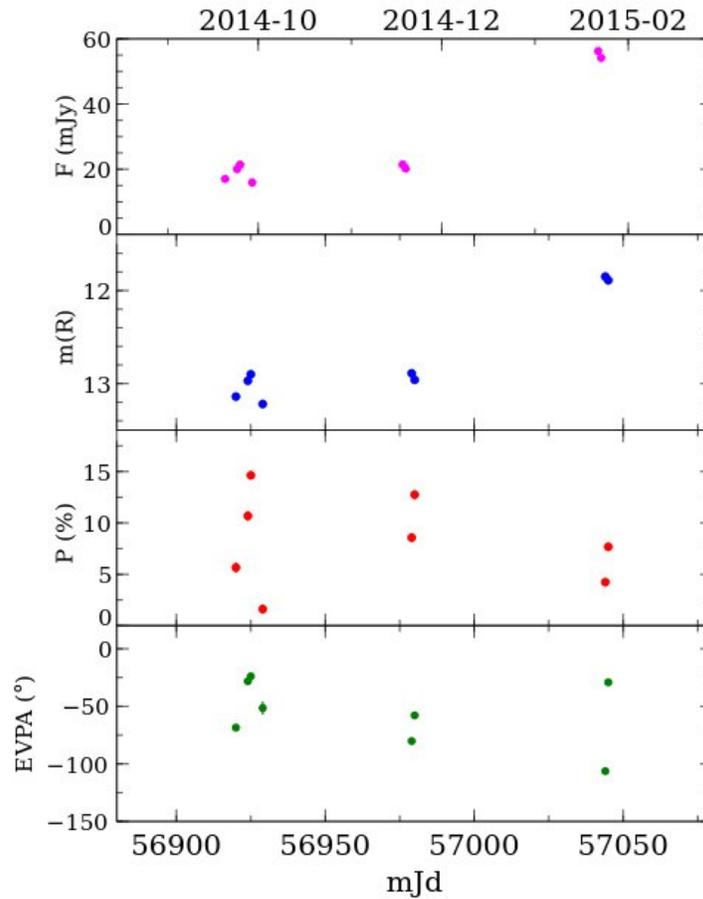


Figura 4.3: Variaciones observadas durante tres temporadas, en octubre y diciembre de 2014 y luego tenemos solo dos puntos en enero de 2015. No obstante, hubo un gran cambio en el brillo en un poco más de un mes. Aún cuando son dos puntos, pudimos detectar un máximo de brillo en este flare.

23 de enero de 2016

A principios del 2016 se registró otro estallido de brillo, con un flujo máximo de 52.5 ± 0.5 mJy, con un $EVPA = -32.7^\circ \pm 1.32^\circ$ y con el grado de polarización $P(\%) = 10.2\% \pm 0.3\%$.

El ciclo de este flare, comprende del 17 de noviembre de 2015 al 10 de marzo de 2016. En este periodo se observó una magnitud máxima de 11.9 y una mínima de 13.6, esto representa un cambio de 1.7 magnitudes en un lapso de 45 días. La escala mínima de variabilidad en este ciclo fue de 2.27 días.

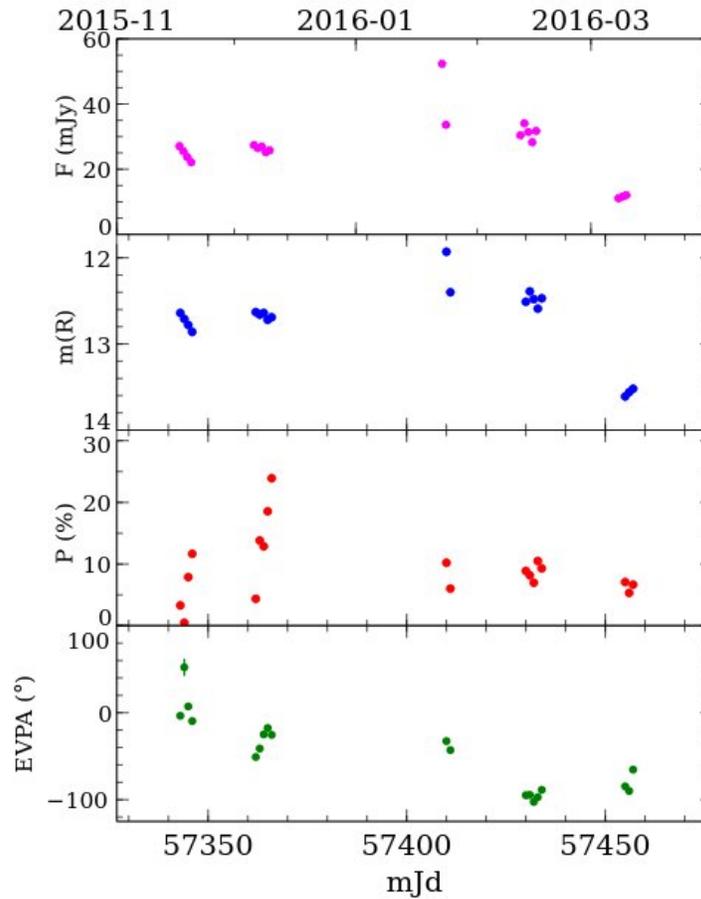


Figura 4.4: Variaciones observadas durante el flare de 2016.

16 de enero de 2020

A principios del 2020 se registró nuevamente otro estallido, con un flujo de 53.5 ± 0.5 mJy. El porcentaje de polarización $P(\%) = 28.5\% \pm 0.3\%$ y el EVPA $= 62.1^\circ \pm 0.2^\circ$.

Este ciclo va del 24 de octubre de 2019 al 17 de febrero del 2020. En este periodo de observación, se registró una magnitud máxima de 11.90 y una mínima de 13.29, siendo una diferencia de 1.39 magnitudes en un lapso de 78 días. La escala mínima de variabilidad para este ciclo fue de 1.39 días.

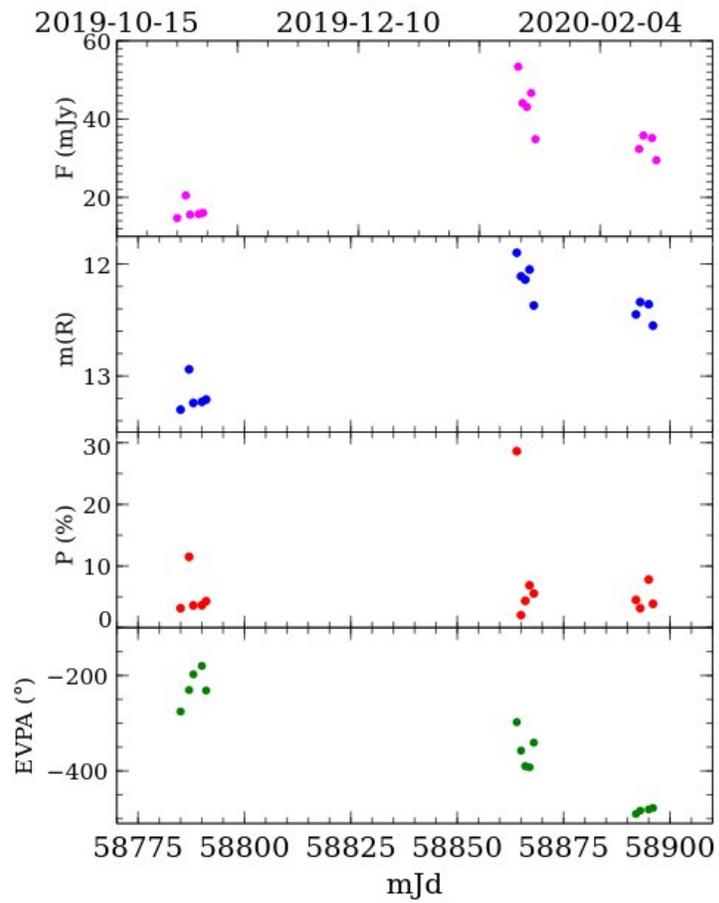


Figura 4.5: Actividad observada en octubre de 2019, y luego en enero y febrero de 2020. Es evidente que enero de 2020 ocurrió otro flare.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

En esta tesis presentamos los resultados obtenidos del análisis de datos colectados desde el 20 de octubre de 2007 (MJD 54393) hasta el 17 de febrero de 2020 (MJD 58896), del blázar S5 0716+714. Durante este periodo de tiempo se obtuvieron un total de 257 observaciones fotométricas y polarimétricas en la banda R del óptico. En términos generales, las curvas de luz obtenidas muestran gran variabilidad así como estados de mayor actividad o flares. Dichas variaciones se presentan tanto en el flujo, como en ángulo de posición del vector eléctrico EVPA y en el grado de polarización $P(\%)$. En estos 12 años de observación, el valor máximo del grado de polarización fue de $28.5\% \pm 0.3\%$ y el mínimo fue de $0.5\% \pm 0.4\%$, existiendo un período de 11 años entre estas dos observaciones. En cuanto al EVPA, presentó una rotación total de $704^\circ \pm 2^\circ$ en un periodo de 5 años (2015-2020). El máximo global en el flujo fue de $56.2 \pm 0.5 \text{ mJy}$ ($R_{mag} = 11.85 \pm 0.01 \text{ mag}$) y el mínimo fue de $4.49 \pm 0.2 \text{ mJy}$ ($R_{mag} = 14.63 \pm 0.05 \text{ mag}$) con una separación de 7 años entre ambas observaciones.

En particular mostramos los resultados del análisis detallado de datos alrededor de épocas cercanas a la aparición de cuatro flares (estados activos) los cuales detectamos en las siguientes fechas: 1 de marzo de 2011 presentando un flujo máximo de $47.9 \pm 0.7 \text{ mJy}$ y una escala mínima de variabilidad de 2.85 días, correspondiente a una región emisora de $1.8 \times 10^{-3} \text{ pc}$. El 22 de enero de 2015, el flujo máximo fue de $56.4 \pm 0.5 \text{ mJy}$ con una escala mínima de variabilidad de 13.61 días correspondiente a un región emisora de $8.84 \times 10^{-3} \text{ pc}$. El 23 de enero de 2016, el flujo máximo fue de

$52.45 \pm 0.48 \text{ mJy}$ y una escala mínima de variabilidad de 2.27 días que corresponde a una región emisora de $1.45 \times 10^{-3} \text{ pc}$. Por último, el 16 de enero de 2020 se observó un flujo máximo de $53.52 \pm 0.51 \text{ mJy}$ y una escala de variabilidad de 1.39 días corresponde a una región emisora de $8.9 \times 10^{-4} \text{ pc}$.

Como parte del análisis de resultados obtenidos durante los flares, revisamos en la literatura algunos modelos teóricos propuestos para explicar variabilidad. De manera especial revisamos los modelos de choques en el jet relativista propuestos por Marscher et al. (2008) y Graff et al. (2008). Estos modelos proponen que la región de emisión donde se produce la variabilidad tiene una cantidad significativa de energía cinética, que se puede convertir en energía no térmica de las partículas, mediante procesos de aceleración producida por choques dentro del jet. Los choques fuertes provocan una fuerte compresión del campo magnético en la región de emisión, especialmente en ambientes con una baja magnetización, necesarios para una aceleración eficiente por choques. En el caso de un choque laminar, se ha comprobado que el grado de polarización se elevaría entre 40% – 50% durante los flares (ver Hayashida et al., 2015). Sin embargo, aún cuando los modelos de aceleración por choques parecen ajustar bien las SED de varios blázares, como es el caso de OJ 287 (Kikuchi et al., 1988; Marscher et al., 2008, ver). éstos modelos no pueden considerarse como el único escenario posible. Esto es precisamente lo que ocurre con S5 0716+714, el cual muestra en nuestro estudio variabilidad del grado de polarización en el rango de 10% – 20%. Por lo tanto, concluimos que los modelos de aceleración por choques no funcionan para explicar la variabilidad observada en el grado de polarización, ver figura: 5.1.

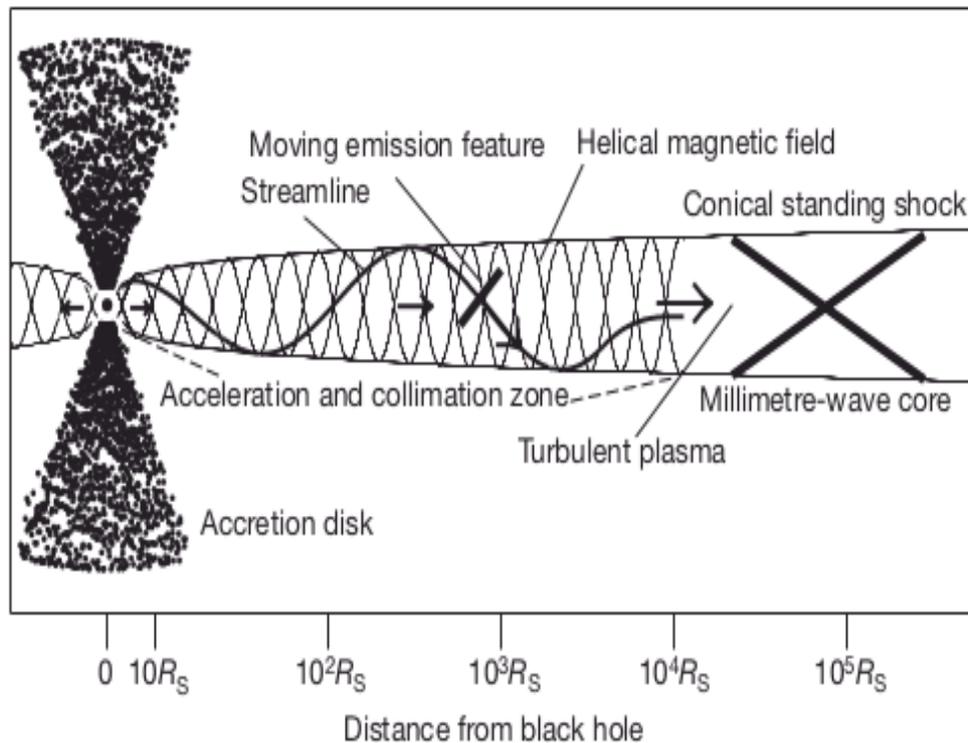


Figura 5.1: Modelo propuesto por Marscher en 2008, para la estructura interna del jet en un BL Lac. En donde, un choque se propaga en dirección del jet a lo largo de una línea en espiral. Se usa una escala logarítmica, de la distancia en términos del radio de Schwarzschild (R_S) para ilustrar la propagación del choque en distintas escalas. (Marscher et al., 2008)

Otra alternativa para explicar el origen de la variabilidad polarimétrica la encontramos en un modelo presentado recientemente por Zhang et al. (2016). En este trabajo los autores muestran, mediante simulaciones magnetohidrodinámicas relativistas, que los giros o rotaciones del EVPA son producidos por las inestabilidades de Kink¹. Estas simulaciones predicen fuertes flares con giros en el ángulo de polarización (EVPA) o flares más débiles con grandes cambios en el grado de la polarización P (%) ver figuras, 4.1, 4.3 y 4.5.

Para los flares observados en 2011, 2015 y 2020 encontramos que las predicciones hechas en el modelo de inestabilidades de Kink ajustan las observaciones. En las

¹Tipo de inestabilidad magnetohidrodinámica que se desarrolla a veces en una columna delgada de plasma que transporta una corriente eléctrica elevada. Si en un punto de dicha columna empieza a surgir un codo, la densidad de líneas magnéticas en el interior de dicho codo es mayor que en el exterior, lo que produce un aumento en su curvatura y por lo tanto una inestabilidad en el plasma.

figuras donde mostramos el comportamiento polarimétrico de estos tres flares, se pueden observar giros bastante pronunciados en el ángulo de polarización. En el 2011 ocurrió un giro de 112° en un periodo de 10 días. Para el 2015 la variación fue de 82° en un día. En el 2020 el giro fue de 344° en un periodo de dos meses. No obstante, es importante decir que el flare del 2015 es uno de los más estudiados en multifrecuencias. En dicho flare, el mejor ajuste que se obtiene de la SED es utilizando un modelo de choques pero suponiendo que el jet es helicoidal (ver MAGIC Collaboration et al., 2018).

Para el flare observado en 2016 las inestabilidades de Kink no funcionan para ajustar las observaciones. Una alternativa para explicar el flare de 2016 es suponer válido la ocurrencia de choques en múltiples direcciones, es decir, mediante modelos de choques turbulentos (e.g. Lemoine and Pelletier, 2017; Zhang et al., 2016). En este tipo de modelos, el grado de polarización se mantiene en su valor promedio, entre $10\% \sim 20\%$ sin giros en el EVPA (Achterberg et al., 2001; Kirk et al., 2000). Justo esto es lo que se observa en este flare. Al momento en el que se presenta el Flare el grado de polarización, que viene de un periodo de variación, se mantiene cerca de un 10% y no se observa un giro en el EVPA.

Finalmente, es importante mencionar que los procesos de aceleración en el jet relativista así como los asociados a la emisión fotopolarimétrica en S5 0716+714 son aún objeto de investigación. La complejidad radica en que distintas zonas emisoras a lo largo del jet emiten radiación producida por procesos distintos, tal y como lo hemos establecido claramente en el jet de este objeto con nuestros datos polarimétricos. Los estudios de este tipo resultan fundamentales para caracterizar el tamaño de la región emisora que produce la variabilidad y su conexión con estados de actividad observados en multifrecuencias. S5 0716+714 es uno de los blázares más conocidos por su gran variabilidad, no obstante nuestro estudio constituye el primero en su tipo en cuanto a ser un monitoreo fotopolarimétrico de largo período en las bandas del óptico.

5.1. Trabajo Futuro

Como trabajo a futuro incluiremos el análisis de los parámetros de Stokes de todos los datos para saber si el jet tiene más de una componente de polarización variable (e.g., ver Sorcia et al., 2013). También se van a utilizar datos multibanda obtenidos desde el radio hasta los rayos gamma de S5 0716+714 cuasi-simultáneos a los datos obtenidos durante el monitoreo. Los datos que usaremos están disponibles en distintas bases de datos, como lo son por ejemplo los datos del satélite Swift/BAT² (Óptico-UV-rayos X suaves)³ y de Fermi/LAT⁴ (rayos gamma)⁵. Esto con la finalidad de ajustar la SED de este blázar en distintos estados de actividad y poder obtener parámetros del jet relativista tales como como la frecuencia pico sincrotrón, la intensidad del campo magnético, el ángulo de la visual al observador y el factor de Lorentz Γ , entre otros.

²Burst Alert Telescope

³<https://swift.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/sdc/ql?>

⁴Large Area Telescope

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

Bibliografía

- A. Achterberg, Y. A. Gallant, J. G. Kirk, and A. W. Guthmann. Particle acceleration by ultrarelativistic shocks: theory and simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(2):393–408, 12 2001. ISSN 0035-8711. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04851.x. URL <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04851.x>.
- F. A. Aharonian. TeV gamma rays from BL Lac objects due to synchrotron radiation of extremely high energy protons. *A&A*, 5(7):377–395, Nov. 2000. doi: 10.1016/S1384-1076(00)00039-7.
- H. Anderhub, L. A. Antonelli, P. Antoranz, M. Backes, C. Baixeras, S. Balestra, J. A. Barrio, D. Bastieri, J. Becerra González, J. K. Becker, W. Bednarek, A. Berdyugin, K. Berger, E. Bernardini, A. Biland, R. K. Bock, G. Bonnoli, P. Bordas, D. Borla Tridon, V. Bosch-Ramon, D. Bose, I. Braun, T. Bretz, D. Britzger, M. Camara, E. Carmona, A. Carosi, P. Colin, S. Commichau, J. L. Contreras, J. Cortina, M. T. Costado, S. Covino, F. Dazzi, A. De Angelis, E. de Cea del Pozo, R. De los Reyes, B. De Lotto, M. De Maria, F. De Sabata, C. Delgado Mendez, A. Domínguez, D. Dominis Prester, D. Dorner, M. Doro, D. Elsaesser, M. Errando, D. Ferenc, E. Fernández, R. Firpo, M. V. Fonseca, L. Font, N. Galante, R. J. García López, M. Garczarczyk, M. Gaug, N. Godinovic, F. Goebel, D. Hadasch, A. Herrero, D. Hildebrand, D. Höhne-Mönch, J. Hose, D. Hrupec, C. C. Hsu, T. Jogler, S. Klepser, D. Kranich, A. La Barbera, A. Laille, E. Leonardo, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, M. López, E. Lorenz, P. Majumdar, G. Maneva, N. Mankuzhiyil, K. Mannheim, L. Maraschi, M. Mariotti, M. Martínez, D. Mazin, M. Meucci, J. M.

- Miranda, R. Mirzoyan, H. Miyamoto, J. Moldón, M. Moles, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, J. Ninkovic, R. Orito, I. Oya, R. Paoletti, J. M. Paredes, M. Pasanen, D. Pascoli, F. Pauss, R. G. Pegna, M. A. Perez-Torres, M. Persic, L. Peruzzo, F. Prada, E. Prandini, N. Puchades, I. Puljak, I. Reichardt, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, M. Rissi, A. Robert, S. Rügamer, A. Saggion, J. Sainio, T. Y. Saito, M. Salvati, M. Sánchez-Conde, K. Satalecka, V. Scalzotto, V. Scapin, T. Schweizer, M. Shayduk, S. N. Shore, A. Sierpowska-Bartosik, A. Sillanpää, J. Sitarek, D. Sobczynska, F. Spanier, S. Spiro, A. Stamerra, L. S. Stark, T. Suric, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, D. Tescaro, M. Teshima, D. F. Torres, N. Turini, H. Vankov, R. M. Wagner, C. Villforth, V. Zabalza, F. Zandanel, R. Zanin, and J. Zapatero. Discovery of very High Energy γ -Rays from the Blazar S5 0716+714. , 704(2):L129–L133, Oct. 2009. doi: 10.1088/0004-637X/704/2/L129.
- I. Andruchow, J. A. Combi, A. J. Muñoz-Arjonilla, G. E. Romero, S. A. Cellone, and J. Martí. Polarization and photometric observations of the gamma-ray blazar PG 1553+113. , 531:A38, July 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201016009.
- J. R. P. Angel and H. S. Stockman. Optical and infrared polarization of active extragalactic objects. , 18:321–361, Jan. 1980. doi: 10.1146/annurev.aa.18.090180.001541.
- M. C. Begelman, M. Sikora, P. Giommi, P. Barr, B. Garilli, I. M. Gioia, T. Maccacaro, D. Maccagni, and R. E. Schild. Inverse Compton Scattering of Ambient Radiation by a Cold Relativistic Jet: A Source of Beamed, Polarized X-Ray and Optical Observations of X-Ray–selected BL Lacertae Objects. , 322:650, Nov. 1987. doi: 10.1086/165760.
- G. Bhatta, Ł. Stawarz, M. Ostrowski, A. Markowitz, H. Akitaya, A. A. Arkharov, R. Bachev, E. Benítez, G. A. Borman, D. Carosati, A. D. Cason, R. Chanishvili, G. Damljanovic, S. Dhalla, A. Frasca, D. Hiriart, S. M. Hu, R. Itoh, D. Jableka, S. Jorstad, M. D. Jovanovic, K. S. Kawabata, S. A. Klimanov, O. Kurtanidze, V. M. Larionov, D. Laurence, G. Leto, A. P. Marscher, J. W. Moody, Y. Moritani, J. M.

- Ohlert, A. Di Paola, C. M. Raiteri, N. Rizzi, A. C. Sadun, M. Sasada, S. Sergeev, A. Strigachev, K. Takaki, I. S. Troitsky, T. Ui, M. Villata, O. Vince, J. R. Webb, M. Yoshida, and S. Zola. Multifrequency Photo-polarimetric WEBT Observation Campaign on the Blazar S5 0716+714: Source Microvariability and Search for Characteristic Timescales. , 831(1):92, Nov. 2016. doi: 10.3847/0004-637X/831/1/92.
- R. D. Blandford and D. G. Payne. Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. , 199:883–903, June 1982. doi: 10.1093/mnras/199.4.883.
- M. Böttcher and C. D. Dermer. Timing Signatures of the Internal-Shock Model for Blazars. , 711(1):445–460, Mar. 2010. doi: 10.1088/0004-637X/711/1/445.
- S. Chandra, H. Zhang, P. Kushwaha, K. P. Singh, M. Bottcher, N. Kaur, and K. S. Baliyan. Multi-wavelength Study of Flaring Activity in BL Lac Object S5 0716+714 during the 2015 Outburst. , 809(2):130, Aug. 2015. doi: 10.1088/0004-637X/809/2/130.
- H. D. Curtis. Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector. *Publications of Lick Observatory*, 13:9–42, Jan. 1918.
- C. W. Danforth, K. Nalewajko, K. France, and B. A. Keeney. A Fast Flare and Direct Redshift Constraint in Far-ultraviolet Spectra of the Blazar S5 0716+714. , 764(1):57, Feb. 2013. doi: 10.1088/0004-637X/764/1/57.
- P.-A. Duc and F. Renaud. Tides in Colliding Galaxies. *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, 861:327, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-32961-6_9.
- S. L. Ellison, A. Viswanathan, D. R. Patton, C. Bottrell, A. W. McConnachie, S. Gwyn, and J.-C. Cuillandre. A definitive merger-AGN connection at $z \sim 0$ with CFIS: mergers have an excess of AGN and AGN hosts are more frequently disturbed. , 487(2):2491–2504, Aug. 2019. doi: 10.1093/mnras/stz1431.
- R. Falomo, E. Pian, and A. Treves. An optical view of BL Lacertae objects. , 22:73, Sept. 2014. doi: 10.1007/s00159-014-0073-z.

- B. L. Fanaroff and J. M. Riley. The Morphology of Extragalactic Radio Sources of High and Low Luminosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167(1):31P–36P, 04 1974. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/167.1.31P. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/167.1.31P>.
- E. A. Fath. The Spectra of Some Spiral Nebulæ and Globular Star Clusters. , 21 (126):138–143, June 1909. doi: 10.1086/121907.
- L. Ferrarese and D. Merritt. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. , 539(1):L9–L12, Aug. 2000. doi: 10.1086/312838.
- A. P. L. George B. Rybicki. *Radiative processes in astrophysics*. Wiley-VCH, wiley edition, 1985.
- G. Ghisellini and F. Tavecchio. Canonical high-power blazars. , 397(2):985–1002, Aug. 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15007.x.
- G. Ghisellini, A. Celotti, G. Fossati, L. Maraschi, and A. Comastri. A theoretical unifying scheme for gamma-ray bright blazars. , 301(2):451–468, Dec. 1998. doi: 10.1046/j.1365-8711.1998.02032.x.
- C. Goddi, G. Crew, V. Impellizzeri, I. Martí-Vidal, L. D. Matthews, H. Messias, H. Rottmann, W. Alef, L. Blackburn, T. Bronzwaer, C. K. Chan, J. Davelaar, R. Deane, J. Dexter, S. Doeleman, H. Falcke, V. L. Fish, R. Fraga-Encinas, C. M. Fromm, R. Herrero-Illana, S. Issaoun, D. James, M. Janssen, M. Kramer, T. P. Krichbaum, M. De Laurentis, E. Liuzzo, Y. Mizuno, M. Moscibrodzka, I. Natarajan, O. Porth, L. Rezzolla, K. Rygl, F. Roelofs, E. Ros, A. L. Roy, L. Shao, H. J. van Langevelde, I. van Bemmell, R. Tilanus, P. Torne, M. Wielgus, Z. Younsi, J. A. Zensus, and Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA. *The Messenger*, 177:25–35, Sept. 2019. doi: 10.18727/0722-6691/5150.
- P. B. Graff, M. Georganopoulos, E. S. Perlman, and D. Kazanas. A Multizone Model

- for Simulating the High-Energy Variability of TeV Blazars. , 689(1):68–78, Dec. 2008. doi: 10.1086/592427.
- M. Hayashida, K. Nalewajko, G. M. Madejski, M. Sikora, R. Itoh, M. Ajello, R. D. Blandford, S. Buson, J. Chiang, Y. Fukazawa, A. K. Furniss, C. M. Urry, I. Hasan, F. A. Harrison, D. M. Alexander, M. Baloković, D. Barret, S. E. Boggs, F. E. Christensen, W. W. Craig, K. Forster, P. Giommi, B. Grefenstette, C. Hailey, A. Hornstrup, T. Kitaguchi, J. E. Koglin, K. K. Madsen, P. H. Mao, H. Miyasaka, K. Mori, M. Perri, M. J. Pivovarov, S. Puccetti, V. Rana, D. Stern, G. Tagliaferri, N. J. Westergaard, W. W. Zhang, A. Zoglauer, M. A. Gurwell, M. Uemura, H. Akitaya, K. S. Kawabata, K. Kawaguchi, Y. Kanda, Y. Moritani, K. Takaki, T. Ui, M. Yoshida, A. Agarwal, and A. C. Gupta. Rapid Variability of Blazar 3C 279 during Flaring States in 2013-2014 with Joint Fermi-LAT, NuSTAR, Swift, and Ground-Based Multiwavelength Observations. , 807(1):79, July 2015. doi: 10.1088/0004-637X/807/1/79.
- S. J. Heidt, J. & Wagner. Statistics of optical intraday variability in a complete sample of radio-selected BL Lacertae objects. , 305:42, Jan. 1996.
- T. Hovatta, E. Valtaoja, M. Tornikoski, and A. Lähteenmäki. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies. , 494(2):527–537, Feb. 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200811150.
- S. Huang, Y. yuan Zhou, and T. gui Wang. In the big blue bump in active galactic nuclei peaked around 1050 \AA ? *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 24(4):405–412, 2000. ISSN 0275-1062. doi: [https://doi.org/10.1016/S0275-1062\(00\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0275-1062(00)00071-0). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0275106200000710>.
- E. P. Hubble. *Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University Press, 1936.
- C. D. Impey and S. Tapia. The Optical Polarization Properties of Quasars. , 354:124, May 1990. doi: 10.1086/168672.

- S. Jorstad and A. Marscher. The VLBA-BU-BLAZAR Multi-Wavelength Monitoring Program. *Galaxies*, 4(4):47, Oct. 2016. doi: 10.3390/galaxies4040047.
- S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova, I. S. Troitsky, I. Agudo, C. Casadio, A. Foord, J. L. Gómez, N. R. MacDonald, S. N. Molina, A. Lähteenmäki, J. Tammi, and M. Tornikoski. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program. , 846(2):98, Sept. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/aa8407.
- S. Kikuchi, M. Inoue, Y. Mikami, H. Tabara, and T. Kato. A synchronous variation of polarization angle in OJ 287 in the optical and radio regions. , 190:L8–L10, Jan. 1988.
- J. G. Kirk, A. W. Guthmann, Y. A. Gallant, and A. Achterberg. Particle acceleration at ultrarelativistic shocks: An eigenfunction method. *The Astrophysical Journal*, 542(1):235–242, oct 2000. doi: 10.1086/309533. URL <https://doi.org/10.1086/309533>.
- U. Kolb. *Extreme Environment Astrophysics*. Cambridge University Press, 2010.
- R. Laing. Radio galaxies: physics and surveys. *PoS*, EXTRA-RADSUR2015:067, 2016. doi: 10.22323/1.267.0067.
- M. Landoni, R. Falomo, A. Treves, and B. Sbarufatti. Spectroscopy of BL Lacertae objects of extraordinary luminosity. , 570:A126, Oct. 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201424232.
- H. Laor, Ari & Netzer. Massive thin accretion discs. - I. Calculated spectra. , 238: 897–916, June 1989. doi: 10.1093/mnras/238.3.897.
- M. Lemoine and G. Pelletier. Particle acceleration at relativistic shock waves. 1792: 020006, Jan. 2017. doi: 10.1063/1.4968891.
- MAGIC Collaboration, M. L. Ahnen, S. Ansoldi, L. A. Antonelli, C. Arcaro, D. Baack, A. Babić, B. Banerjee, P. Bangale, U. Barres de Almeida, J. A. Barrio, J. Becerra

González, W. Bednarek, E. Bernardini, R. Ch Berse, A. Berti, W. Bhattacharyya, A. Biland, O. Blanch, G. Bonnoli, R. Carosi, A. Carosi, G. Ceribella, A. Chatterjee, S. M. Colak, P. Colin, E. Colombo, J. L. Contreras, J. Cortina, S. Covino, P. Cumaní, P. da Vela, F. Dazzi, A. de Angelis, B. de Lotto, M. Delfino, J. Delgado, F. di Pierro, A. Domínguez, D. Dominis Prester, D. Dorner, M. Doro, S. Einecke, D. Elsaesser, V. Fallah Ramazani, A. Fernández-Barral, D. Fidalgo, M. V. Fonseca, L. Font, C. Fruck, D. Galindo, S. Galozzi, R. J. García López, M. Garczarczyk, M. Gaug, P. Giammaria, N. Godinović, D. Gora, D. Guberman, D. Hadasch, A. Hahn, T. Hassan, M. Hayashida, J. Herrera, J. Hose, D. Hrupec, K. Ishio, Y. Konno, H. Kubo, J. Kushida, D. Kuveždić, D. Lelas, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, M. López, C. Maggio, P. Majumdar, M. Makariev, G. Maneva, M. Manganaro, K. Mannheim, L. Maraschi, M. Mariotti, M. Martínez, S. Masuda, D. Mazin, K. Mielke, M. Minev, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, A. Moralejo, V. Moreno, E. Moretti, T. Nagayoshi, V. Neustroev, A. Niedzwiecki, M. Nievas Rosillo, C. Nigro, K. Nilsson, D. Ninci, K. Nishijima, K. Noda, L. Nogués, S. Paiano, J. Palacio, D. Paneque, R. Paoletti, J. M. Paredes, G. Pedalletti, M. Peresano, M. Persic, P. G. Prada Moroni, E. Prandini, I. Puljak, J. R. Garcia, I. Reichardt, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, C. Righi, A. Rugliancich, T. Saito, K. Satalecka, T. Schweizer, J. Sitarek, I. Šnidarić, D. Sobczynska, A. Stamerra, M. Strzys, T. Surić, M. Takahashi, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, T. Terzić, M. Teshima, N. Torres-Albà, A. Treves, S. Tsujimoto, G. Vanzo, M. Vazquez Acosta, I. Vovk, J. E. Ward, M. Will, D. Zarić, Fermi-Lat Collaboration, D. Bastieri, D. Gasparrini, B. Lott, B. Rani, D. J. Thompson, MWL Collaborators, I. Agudo, E. Angelakis, G. A. Borman, C. Casadio, T. S. Grishina, M. Gurwell, T. Hovatta, R. Itoh, E. Järvelä, H. Jermak, S. Jorstad, E. N. Kopatskaya, A. Kraus, T. P. Krichbaum, N. P. M. Kuin, A. Lähteenmäki, V. M. Larionov, L. V. Larionova, A. Y. Lien, G. Madejski, A. Marscher, I. Myserlis, W. Max-Moerbeck, S. N. Molina, D. A. Morozova, K. Nalewajko, T. J. Pearson, V. Ramakrishnan, A. C. S. Readhead, R. A. Reeves, S. S. Savchenko, I. A. Steele, M. Tornikoski, Y. V. Troitskaya, I. Troitsky, A. A. Vasilyev, and J. A. Zensus. Multi-wavelength characterization of the blazar S5

- 0716+714 during an unprecedented outburst phase. , 619:A45, Nov. 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201832677.
- J. Magorrian, S. Tremaine, D. Richstone, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, S. M. Faber, K. Gebhardt, R. Green, C. Grillmair, J. Kormendy, and T. Lauer. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers. , 115(6):2285–2305, June 1998. doi: 10.1086/300353.
- M. A. Malkan and W. L. W. Sargent. The ultraviolet excess of Seyfert 1 galaxies and quasars. , 254:22–37, Mar. 1982. doi: 10.1086/159701.
- L. Maraschi, G. Ghisellini, and A. Celotti. A Jet Model for the Gamma-Ray-emitting Blazar 3C 279. , 397:L5, Sept. 1992. doi: 10.1086/186531.
- A. P. Marscher and W. K. Gear. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. , 298:114–127, Nov. 1985. doi: 10.1086/163592.
- A. P. Marscher, S. G. Jorstad, F. D. D’Arcangelo, P. S. Smith, G. G. Williams, V. M. Larionov, H. Oh, A. R. Olmstead, M. F. Aller, H. D. Aller, I. M. McHardy, A. Lähteenmäki, M. Tornikoski, E. Valtaoja, V. A. Hagen-Thorn, E. N. Kopatskaya, W. K. Gear, G. Tosti, O. Kurtanidze, M. Nikolashvili, L. Sigua, H. R. Miller, and W. T. Ryle. The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- γ -ray outburst. , 452(7190):966–969, Apr. 2008. doi: 10.1038/nature06895.
- K. Nilsson, T. Pursimo, A. Sillanpää, L. O. Takalo, and E. Lindfors. Detection of the host galaxy of S5 0716+714. , 487(2):L29–L32, Aug. 2008. doi: 10.1051/0004-6361:200810310.
- P. Padovani and P. Giommi. The Connection between X-Ray- and Radio-selected BL Lacertae Objects. , 444:567, May 1995. doi: 10.1086/175631.
- P. Padovani, D. M. Alexander, R. J. Assef, B. De Marco, P. Giommi, R. C. Hickox, G. T. Richards, V. Smolčić, E. Hatziminaoglou, V. Mainieri, and M. Sal-

- vato. Active galactic nuclei: what's in a name? , 25(1):2, Aug. 2017. doi: 10.1007/s00159-017-0102-9.
- B. M. Peterson. *An introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press, 2003.
- C. M. Raiteri, M. Villata, L. Bruschini, A. Capetti, O. M. Kurtanidze, V. M. Larionov, P. Romano, S. Vercellone, I. Agudo, H. D. Aller, M. F. Aller, A. A. Arkharov, U. Bach, A. Berdyugin, D. A. Blinov, M. Böttcher, C. S. Buemi, P. Calcidese, D. Carosati, R. Casas, W. P. Chen, J. Coloma, C. Diltz, A. di Paola, M. Dolce, N. V. Efimova, E. Forné, J. L. Gómez, M. A. Gurwell, A. Hakola, T. Hovatta, H. Y. Hsiao, B. Jordan, S. G. Jorstad, E. Koptelova, S. O. Kurtanidze, A. Lähteenmäki, E. G. Larionova, P. Leto, E. Lindfors, R. Ligustri, A. P. Marscher, D. A. Morozova, M. G. Nikolashvili, K. Nilsson, J. A. Ros, P. Roustazadeh, A. C. Sadun, A. Sillanpää, J. Sainio, L. O. Takalo, M. Tornikoski, C. Trigilio, I. S. Troitsky, and G. Umama. Another look at the BL Lacertae flux and spectral variability. Observations by GASP-WEBT, XMM-Newton, and Swift in 2008-2009. , 524:A43, Dec. 2010. doi: 10.1051/0004-6361/201015191.
- C. M. Raiteri, M. Villata, J. A. Acosta-Pulido, I. Agudo, A. A. Arkharov, R. Bachev, G. V. Baida, E. Benítez, G. A. Borman, W. Boschin, V. Bozhilov, M. S. Butuzova, P. Calcidese, M. I. Carnerero, D. Carosati, C. Casadio, N. Castro-Segura, W. P. Chen, G. Damjanovic, F. D'Ammando, A. di Paola, J. Echevarría, N. V. Efimova, S. A. Ehgamberdiev, C. Espinosa, A. Fuentes, A. Giunta, J. L. Gómez, T. S. Grishina, M. A. Gurwell, D. Hiriart, H. Jermak, B. Jordan, S. G. Jorstad, M. Joshi, E. N. Kopatskaya, K. Kuratov, O. M. Kurtanidze, S. O. Kurtanidze, A. Lähteenmäki, V. M. Larionov, E. G. Larionova, L. V. Larionova, C. Lázaro, C. S. Lin, M. P. Malmrose, A. P. Marscher, K. Matsumoto, B. McBreen, R. Michel, B. Mihov, M. Minev, D. O. Mirzaqulov, A. A. Mokrushina, S. N. Molina, J. W. Moody, D. A. Morozova, S. V. Nazarov, M. G. Nikolashvili, J. M. Ohlert, D. N. Okhmat, E. Ovcharov, F. Pinna, T. A. Polakis, C. Protasio, T. Pursimo, F. J. Redondo-Lorenzo, N. Rizzi, G. Rodriguez-Coira, K. Sadakane, A. C. Sadun, M. R.

- Samal, S. S. Savchenko, E. Semkov, B. A. Skiff, L. Slavcheva-Mihova, P. S. Smith, I. A. Steele, A. Strigachev, J. Tammi, C. Thum, M. Tornikoski, Y. V. Troitskaya, I. S. Troitsky, A. A. Vasilyev, and O. Vince. Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet. , 552(7685):374–377, Dec. 2017. doi: 10.1038/nature24623.
- C. M. Raiteri, M. Villata, D. Carosati, E. Benítez, S. O. Kurtanidze, A. C. Gupta, D. O. Mirzaqulov, F. D’Ammando, V. M. Larionov, T. Pursimo, J. A. Acosta-Pulido, G. V. Baida, B. Balmaverde, G. Bonnoli, G. A. Borman, M. I. Carnerero, W. P. Chen, V. Dhiman, A. Di Maggio, S. A. Ehgamberdiev, D. Hiriart, G. N. Kimeridze, O. M. Kurtanidze, C. S. Lin, J. M. Lopez, A. Marchini, K. Matsumoto, R. Mujica, M. Nakamura, A. A. Nikiforova, M. G. Nikolashvili, D. N. Okhmat, J. Otero-Santos, N. Rizzi, T. Sakamoto, E. Semkov, L. A. Sigua, L. Stiazzini, I. S. Troitsky, A. L. Tsai, A. A. Vasilyev, and A. V. Zhovtan. The dual nature of blazar fast variability: Space and ground observations of S5 0716+714. , 501(1):1100–1115, Feb. 2021. doi: 10.1093/mnras/staa3561.
- B. Rani. Radio Galaxies—The TeV Challenge. *Galaxies*, 7(1):23, Jan. 2019. doi: 10.3390/galaxies7010023.
- M. J. Rees. Studies in radio source structure-I. A relativistically expanding model for variable quasi-stellar radio sources. , 135:345, Jan. 1967. doi: 10.1093/mnras/135.4.345.
- G. B. Rybicki and A. P. Lightman. *Radiative processes in astrophysics*. 1979.
- E. E. Salpeter. Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects. , 140:796–800, Aug. 1964. doi: 10.1086/147973.
- M. Sasada, M. Uemura, Y. Fukazawa, K. S. Kawabata, R. Itoh, I. Sakon, K. Fujisawa, A. Kadota, T. Ohsugi, M. Yoshida, H. Yasuda, M. Yamanaka, S. Sato, and M. Kino. Multi-Wavelength Photometric and Polarimetric Observations of the Outburst of 3C 454.3 in 2009 December. , 64:58, June 2012. doi: 10.1093/pasj/64.3.58.

- M. Schmidt. 3c 273 : A star-like object with large red-shift. *Nature*, 197(4872): 1040–1040, 1963. doi: 10.1038/1971040a0.
- M. Schmidt. *Quasars*, page 283. University of Chicago Press, 1975.
- C. K. Seyfert. No. 671. Nuclear emission in spiral nebulae. *Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington*, 671:1–13, Jan. 1943.
- G. A. Shields. Thermal continuum from accretion disks in quasars. , 272(5655): 706–708, Apr. 1978. doi: 10.1038/272706a0.
- G. A. Shields. A Brief History of Active Galactic Nuclei. , 111(760):661–678, June 1999. doi: 10.1086/316378.
- M. Sorcia, E. Benítez, D. Hiriart, J. M. López, J. I. Cabrera, R. Mújica, J. Heidt, I. Agudo, K. Nilsson, and M. Mommert. Long-term Optical Polarization Variability of the TeV Blazar 1ES 1959+650. , 206(2):11, June 2013. doi: 10.1088/0067-0049/206/2/11.
- C. Tadhunter, A. Marconi, D. Axon, K. Wills, T. G. Robinson, and N. Jackson. Spectroscopy of the near-nuclear regions of Cygnus A: estimating the mass of the supermassive black hole. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 342(3):861–875, 07 2003. ISSN 0035-8711. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06588.x. URL <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06588.x>.
- K. S. Thorne, C. W. Misner, and J. A. Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- M.-H. Ulrich, L. Maraschi, and C. M. Urry. Variability of Active Galactic Nuclei. , 35:445–502, Jan. 1997. doi: 10.1146/annurev.astro.35.1.445.
- E. Valtaoja, L. Valtaoja, I. S. Efimov, and N. M. Shakhovskoi. Blazarlike Activity in the Low Polarization Quasar 3C 273. , 99:769, Mar. 1990. doi: 10.1086/115372.
- S. J. Wagner and A. Witzel. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects. , 33:163–198, Jan. 1995. doi: 10.1146/annurev.aa.33.090195.001115.

Y. B. Zel'dovich. The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy Upon Accretion. *Soviet Physics Doklady*, 9:195, Sept. 1964.

H. Zhang, W. Deng, H. Li, and M. Böttcher. Polarization Signatures of Relativistic Magnetohydrodynamic Shocks in the Blazar Emission Region. I. Force-free Helical Magnetic Fields. , 817(1):63, Jan. 2016. doi: 10.3847/0004-637X/817/1/63.

H. Zhang, H. Li, F. Guo, and G. Taylor. Polarization Signatures of Kink Instabilities in the Blazar Emission Region from Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations. , 835(2):125, Feb. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/835/2/125.