

MÁSTER EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Fotometría óptica de los objetos BL Lac 1ES 1959+650,
MRK 501 y OQ 530

Curso académico 2017/2018, Convocatoria de Octubre

Trabajo dirigido por:

Dr. José Bosch Bailach

Dr. Pere Blay Serrano



García-Gómez, Juan M

DNI: 22575288-Y

e-mail: yossua54@gmail.com

*¿Recuerdas M^a Jesús?, ¡qué alegría escuchar la descripción que nos hacía
Miguel de las bandas de Júpiter!*

*¿Recuerdas, Miguel?, ¡qué sorpresa me llevé cuando centraste M106 en el
campo visual! Fue aquella noche en la que los otros niños se fueron a tocar
timbres y tu no querías que te pusieran una multa...*

2017 – 2018

Agradecimientos

A Pepe Bosch, por saber tanto y compartirlo conmigo. A Pere Blay, por su dedicación a mi formación en Astrofísica. A Joanma Bullón, por crear y promover la observación astronómica amateur en Aras de los Olmos. A Alejandro Vera, por presentarme el cielo y la tierra de la observación astronómica. Al pueblo de Aras de los Olmos, por tener ese cielo y esa gente. A los aficionados del RETA, 2010, gracias a los cuales comenzamos a descubrir el cielo profundo. A la Universitat de València y en particular al Observatori Astronòmic de Aras de los Olmos, presidido por José Carlos Guirado, por haber podido usar las instalaciones y el instrumental para realizar este estudio. A Fernando Ballesteros por incluir este proyecto en el programa del Observatori. A Vicent Peris por habernos explicado el software PixInsight y a Oscar Brevià, Salvador Moros por su colaboración en el grupo de astronomía proam.

A mis suegros por su terraza. A mis padres por dejarme soñar. A M^a Jesús y Miguel, por las noches dedicadas a esta pasión.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetos del estudio	1
1.1.1. 1ES 1959+650	3
1.1.2. MRK 501	5
1.1.3. OQ 530	5
1.2. Objetivos	6
1.3. Contribuciones y colaboraciones	6
2. Objetos BL Lacertae	9
2.1. Núcleos activos de galaxia, Blazars y objetos BL Lac	9
2.2. Características de los BL Lacs	10

2.3. Procesos físicos y escenarios en BL Lacs	11
2.4. Parámetros físicos de agujeros negros	12
2.5. Variabilidad de BL Lacs	14
3. Métodos	19
3.1. Reducción de imágenes con PixInsight	19
3.2. Control de calidad de las imágenes	21
3.3. Fotometría de apertura	21
3.4. Fotometría diferencial	23
3.5. Transformación entre magnitudes de los sistemas estándar . .	25
3.6. Curvas de luz	25
3.7. Periodos de variabilidad	26
3.8. Cálculo de errores	26
4. Instrumentación y Datos de la Observación	29
4.1. Telescopio T50 del OAO	29
4.2. Adquisición de imágenes	30
4.3. Imágenes de calibración	31
4.4. Campos de observación	33
4.4.1. Campo de observación de 1ES 1959+650	33

4.4.2. Campo de observación de MRK 501	33
4.4.3. Campo de observación de OQ 530	34
5. Resultados	37
5.1. Reducción de imágenes	37
5.2. Análisis de la PSF	39
5.3. Fotometría de Apertura	44
5.4. Curvas de luz	46
5.5. Periodos de microvariabilidad	47
6. Discusión	55
6.1. Hallazgos en 1ES 1959+650	55
6.2. Hallazgos en MRK 501	59
6.3. Hallazgos en OQ 530	59
6.4. Limitaciones del estudio	60
7. Conclusiones y líneas futuras	61
7.1. Conclusiones	61
7.2. Líneas futuras	63
Bibliografía	65

Índice de figuras

1.1. Modelo de AGN	4
2.1. Precesión de Lense-Thirring en un BL Lac.	17
3.1. Residuo de una imagen de 1ES 1959+650 tras aplicar MTT	23
4.1. Staralt de los objetos BL Lac para 20/06/2018	32
4.2. Campo de 1ES 1959+650	33
4.3. Campo de MRK 501	35
4.4. Campo de OQ 530	35
5.1. Reducción de 1ES 1959+650 en canal R	38
5.2. Reducción de 1ES 1959+650 en canal V	39
5.3. Reducción de MRK 501 en canal R	40
5.4. Reducción de MRK 501 en canal V	40
5.5. Reducción de OQ 530 en canal R	41

5.6.	Reducción de MRK 501 en canal V	41
5.7.	FWHM de la PSF en V del campo 1ES 1959+650	42
5.8.	FWHM de la PSF en R del campo 1ES 1959+650	43
5.9.	FWHM de la PSF en V del campo MRK 501	43
5.10.	FWHM de la PSF en R del campo MRK 501	44
5.11.	FWHM de la PSF en V del campo OQ 530	45
5.12.	FWHM de la PSF en R del campo OQ 530	45
5.13.	Observaciones en V y R de 1ES 1959+650	48
5.14.	Observaciones en V y R de MRK 501	49
5.15.	Observaciones en V y R de OQ 530	50
5.16.	Espectro de frecuencias de 1ES 1959+560 en canal V	51
5.17.	Ajuste de 1ES 1950+650 en canal R a 3 senoidales	52
5.18.	Espectro de frecuencias de 1ES 1959+560 en canal R	52
5.19.	Ajuste de 1ES 1950+650 en canal R a 3 senoidales	53
6.1.	Masa del agujero negro de 1ES 1959+650 en función de χ	56
6.2.	Periodos de precesión de Lense-Tirring del disco de acreción 1ES 1959+650	57

Índice de tablas

4.1. Objetos estudiados 1ES1959+650 , MRK 501 y OQ 53	30
4.2. Observaciones durante junio de 2018.	31
4.3. Imágenes de calibración	32
4.4. Objeto 1ES 1959+650 y estrellas de referencia.	34
4.5. Objeto MRK 501 y estrellas de referencia.	34
4.6. Objeto OQ 530 y estrellas de referencia	34
5.1. Estadísticos de magnitudes estándar de los BL Lac en V y R	46
5.2. Periodos de variabilidad de 1ES 1959+650 y OQ 530	47

Acrónimos

- IES** Einstein IPC Slew *Survey*
- AGN** Núcleo Activo de Galaxia
- AGNs** Núcleos Activos de Galaxias
- CCD** Dispositivo de Carga Acoplada
- FSRQ** Flat Spectrum Radio Quasar
- FWHM** Full Width at Half Maximum (Anchura a media altura)
- GRBs** Gamma-ray bursts (Explosiones de rayos gamma)
- HBL** High-frequency peaked BL Lac
- HSP** High-synchrotron peaked BL Lac
- IBL** Intermediate-frequency peaked BL Lac
- IDV** Intra-Day Variability
- LBL** Low-frequency peaked BL Lac
- MTT** Multiscale Median Transform
- PSF** Point Spread Function (Función de dispersión de punto)
- SDSS** Sloan Digital Sky Survey
- SNR** Relación Señal/Ruido
- SSC** Synchrotron Self Compton

Resumen

Los objetos BL Lac son Núcleos Activos de Galaxias (AGNs) con uno de sus chorros relativistas apuntando hacia el observador. El brillo del chorro relativista es tan intenso que inunda la radiación procedente del BL Lac, enmascarando la contribución de otras componentes físicas del sistema, resultando en un espectro sin líneas espectrales, pero cuya distribución de energía presenta dos jorobas, debidas a radiación sincrotrón y dispersión Compton inverso. Los objetos BL Lac presentan variabilidad en diferentes escalas de brillo y tiempo, incluyendo microvariabilidades intradía. Estas rápidas variaciones del flujo son explicables necesariamente mediante un origen gravitacional a escalas relativistas. En este estudio se realizó la observación, reducción, fotometría diferencial y análisis de microvariabilidad de los objetos MRK 501, OQ 530 y 1ES 1959+650 para estudiar el posible origen de su microvariabilidad. Para nuestro estudio, se observaron durante 5 días los objetos BL Lac en los filtros V y R desde el Observatorio de Aras de los Olmos de la Universitat de València. La reducción de las imágenes se realizó mediante el software PixInsight. La fotometría se obtuvo por el método de apertura y la estandarización de las magnitudes se obtuvo de forma diferencial respecto a las estrellas de referencia del campo recogidas en el Frankfurt Quasar Monitoring. A partir de las curvas de luz obtenidas, se extrajeron las frecuencias principales de las curvas de luz en V y R para los objetos OQ 530 y 1ES 1959+650. En las curvas de luz del 12 de junio de 2018 del objeto 1ES 1959+650 se detectó una posible microvariabilidad con un quasi-periodo de 12100 ± 300 s en los canales V y R compatible con una precesión de Lense-Tirring de su disco de acreción. Esta posible microvariabilidad es compatible con un agujero negro de Kerr de masa $M = 2.6 \times 10^8 \pm 1 \times 10^7 M_{\odot}$ y radio

de horizonte de sucesos $r_+ = 550 \pm 20R_\odot$ con un ratio momento angular-masa $\chi = 0.99 \pm 0.01$ y cuyo disco de acreción con radio de estabilidad $r_{+E*} = 790 \pm 20R_\odot$ gira en el mismo sentido que el agujero negro. La metodología y análisis puesta a punto durante este proyecto puede ser de utilidad para futuros estudios de fotometría óptica de microvariabilidades de objetos BL Lac.

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo, se presenta brevemente la historia del descubrimiento de los objetos BL Lac, así como su relación con los Núcleo Activo de Galaxia (AGN) y sus características observables. Además, se realiza una pequeña introducción a los tres objetos de estudio: 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530. A continuación se definen los objetivos del trabajo y se explican las contribuciones y colaboraciones científicas que se han realizado. Para finalizar, se resume brevemente el resto del documento.

1.1. Motivación y objetos del estudio

Cuando en 1929 el astrónomo europeo Cuno Hoffmeister en el Observatorio Sonneberg identificó BL Lacertae como una estrella variable en la constelación Lacerta, no pudo imaginar que se trataba del arquetipo de los objetos conocidos más energéticos, junto con los Gamma-ray bursts (Explosiones de rayos gamma) (GRBs), del universo (27). En 1963 se observó en BL Lacertae una fuente puntual de radio-emisión polarizada de espectro plano, similar en altas y bajas frecuencias. Observaciones en el visible confirmaron la polarización de la emisión electromagnética, y lo más sorprendente, la ausencia de líneas de absorción o emisión en el espectro electromagnético.

A principios de la década de 1970, Jame E Gunn y John B Oke en Caltech propusieron que BL Lacertae era el núcleo de una galaxia elíptica gigante. Mediante el análisis espectral de su huésped, determinaron que la distancia del objeto BL Lac era de 1000 millones de años ($z = 0.069$) (30) y posteriormente confirmaron que se trataba de una galaxia lejana elíptica y gigante.

Yakov Zel'dovich, Igor Novikov, Eadiwn Slpeter y Donald Lyndenb-Bell demostraron a mitad de la década de 1970 que la única explicación posible de la procedencia de tran considerable radiación recibida con un espectro extraordinariamente plano era que el lejano objeto BL Lac fuera un agujero negro supermasivo en el centro de una galaxia hésped (27). Este agujero acreta gas, polvo y estrellas, procedente de su galaxia anfitriona que se arremolina en un disco de acreción alrededor del agujero negro. Cuando la materia alcanza su máxima temperatura cerca del horizonte de sucesos del agujero negro, se eyecta perpendicularmente al disco arrojados a través de chorros relativistas. Las líneas de campo magnético variable enrollan los chorros relativistas y polarizan su radiación electromagnética.

El modelo unificado actual (29) establece que los BL Lacs son AGNs (38) a distancias cosmológicas 1.1. Así pues, un AGN es una región compacta en el centro de una galaxia con una masa entre 10^6 y $10^{10}M_{\odot}$, que tiene una luminosidad en todo o parte del espectro electromagnético, mucho mayor de lo explicable mediante la producción estelar, el medio interestelar de gas y polvo y sus interacciones. Según los modelos actuales, la radiación de un AGN procede de diferentes componentes del agujero negro, el disco de acreción y de sus chorros relativistas y se extiende desde las ondas de radio hasta los rayos γ , recibiendo el observador diferentes contribuciones de las componentes según su orientación.

Si la orientación es tal que uno de los chorros del AGN apunta hacia el observador su espectro electromagnético está dominado por esta componente por lo que presenta ausencia de líneas espectrales lo que permite clasificarlo como el BL Lac. Así pues, el brillo del chorro inunda la radiación procedente del BL Lac, enmascarando la contribución de otras componentes físicas del sistema, resultando en el espectro sin líneas de emisión/absorción pero cuya

distribución espectral de energía presenta dos jorobas, posiblemente debidas a radiación sincrotrón y dispersión Compton inverso, en bajas y altas frecuencias, respectivamente.

La rápida dinámica de los fenómenos observables en los objetos BL Lac descarta su origen nuclear ya que sus variaciones estarían en las escalas temporales de miles de años. En efecto, la variabilidad observada en los objetos BL Lac tienen periodos de minutos, horas, días y años. Las rápidas escalas temporales de variación del flujo son explicables solo mediante un origen gravitacional a escalas relativistas.

1.1.1. 1ES 1959+650

1ES 1959+650 es un objeto BL Lac situado en el este de la constelación del Dragón. Con apariencia extensa formada por un núcleo brillante y un halo nebuloso de diámetro aparente $0.28' \times 0.22'$, este objeto tiene un desplazamiento al rojo $z = 0.047$ en una galaxia de elíptica rica en gas con una línea de polvo (35), posiblemente resultado de fusiones previas que se encuentra en la parte exterior del *cluster* de galaxias Zwicky 8452.

Tras su descubrimiento durante el 4.85 GHz Radio Survey en 1987, éste fue catalogado como fuente de radio de espectro plano (19; 32). En 1990, el Einstein IPC Slew *Survey* (1ES) identificó al objeto como una fuente de Rayos X y más tarde como fuente de Rayos γ y de neutrinos altamente energéticos.

El objeto 1ES 1959+650 presenta una magnitud óptica variable entre la 12^a-14^a magnitud. Debido a su espectro sin bandas y su polarización óptica, 1ES 1959+650 fue identificado como un objeto BL Lac y clasificado como High-frequency peaked BL Lac (HBL). La fuente de la actividad del AGN es un agujero negro supermasivo de masa $M = 3 \times 10^8 M_{\odot}$ en el centro de la galaxia huésped. Observaciones de alta resolución en radio detectaron dos chorros relativistas hacia el norte y el sur, siendo el del norte más amplio y prominente.

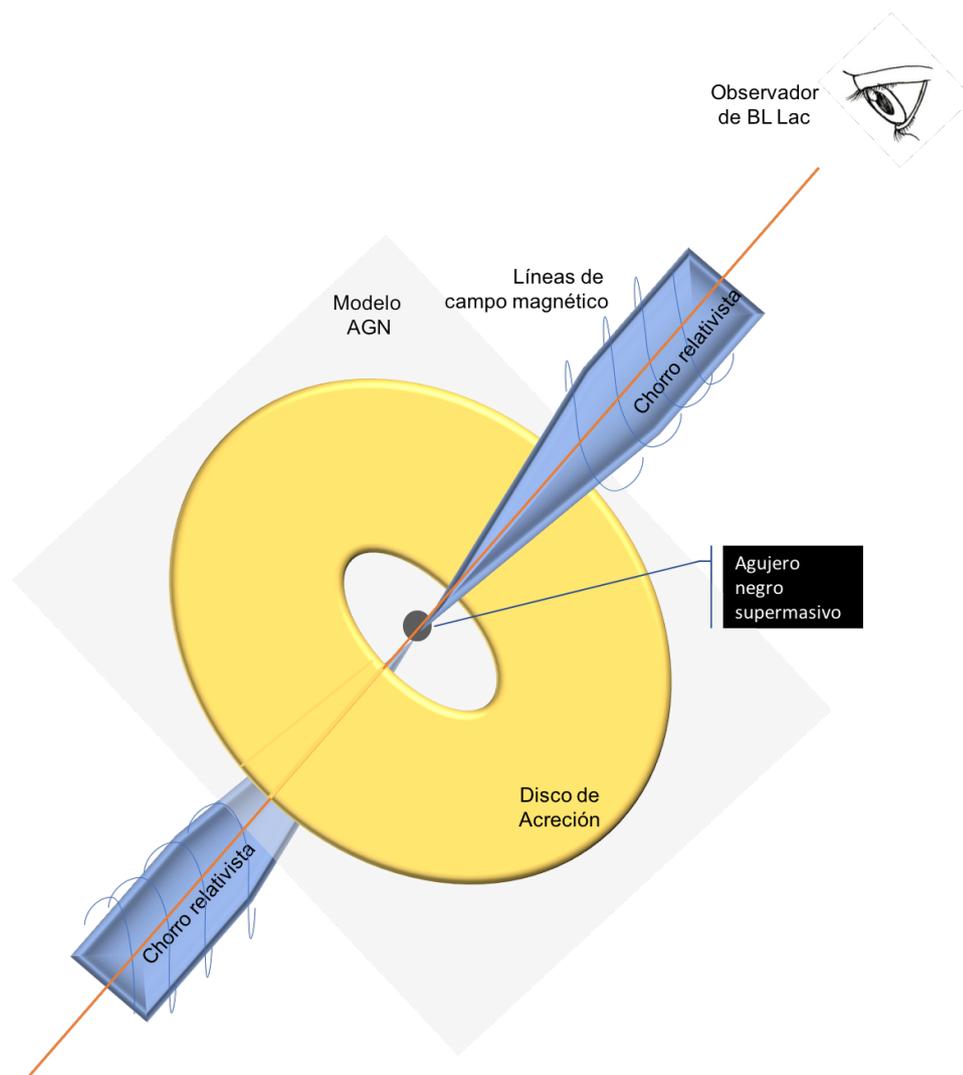


Figura 1.1: *Modelo de AGN y orientación de un BL Lac.*

1.1.2. MRK 501

El BL Lac MRK 501 es el cuasar más cercano a la Tierra. MRK 501 está situado en la constelación de Hércules, a una distancia de 137 Mpc ($z \approx 0.033$) en el supercluster *Great Wall*, aunque no se encuentra cercano a ningún gran clúster (39). El objeto está en el núcleo brillante de una galaxia espiral gigante extremadamente compacta pese a estar aislada, con un diámetro absoluto 180×150 miles de años luz y diámetro aparente $1.2' \times 1.0'$.

MRK 501 fue descubierto como fuente de radio en 1965 por el 4^o *Cambridge Survey of Radio Sources* (4C), y fue clasificado como una fuente de radio de espectro plano. En el caso de MRK 501, se encontró un espectro continuo, lo que llevó a la clasificación como un objeto BL Lac. Se identificó un chorro en radio que se extendía al menos $55mas$ desde el núcleo. También se identificó como fuente de emisiones infrarrojas (IRAS, 2MASX), rayos X (RX) y rayos gamma. La variabilidad de MRK 501 en el óptico es de baja amplitud situándose en un rango de magnitudes [13.0, 14.6].

MRK 501 fue clasificado como BL Lac de tipo HBL (31) y High-synchrotron peaked BL Lac (HSP) (1). Está considerado como uno de los quasars más prominentes y puede medirse prácticamente en todo el espectro electromagnético debido a su brillo. De hecho, es el blazar conocido más activo, con fuertes y rápidas variaciones en periodos de minutos (2) y el segundo objeto extragaláctico que se detectó en muy altas energías (>100 GeV) (33).

1.1.3. OQ 530

OQ 530 situado en el noreste de la constelación de Bootes fue catalogada como fuente de radio por el *Ohio State University* survey (40). A una distancia de 608 Mpc, con desplazamiento al rojo $z = 0.15248$ es un objeto con luz altamente polarizada, con variaciones cercanas a 6 magnitudes en el óptico en el rango [10.8, 16.5].

1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo fin de máster es la obtener la fotometría óptica mediante el Observatorio de Aras de los Olmos para estudiar fenómenos de microvariabilidad en los objetos BL Lac 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530.

Para ello será necesario la consecución de la siguiente serie de objetivos específicos:

- Adquirir series temporales de los campos de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 y las imágenes de calibración correspondientes.
- Reducir las imágenes adquiridas de los campos de los objetos BL Lac.
- Seleccionar las imágenes con una buena calidad para formar las series temporales de los objetos.
- Realizar fotometría de apertura de los objetos BL Lac y sus estrellas de referencia.
- Obtener magnitudes estándar de los objetos BL Lac mediante fotometría diferencial con las estrellas de referencia.
- Obtener las curvas de luz de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530.
- Calcular componentes principales senoidales de los objetos que presenten patrones de microvariabilidad periódica.
- Estimar parámetros físicos de los BL Lac compatibles con las observaciones de microvariabilidad obtenidas.

1.3. Contribuciones y colaboraciones

El presente estudio se presentará por José Bosch Bailach como ponencia en el Congreso estatal de astronomía que se celebró del 1 al 4 de noviembre

en Cuenca (7). Además, el estudio ha servido para establecer la colaboración con el grupo Pro-Am liderado por José Bosch y participado por Oscar Brevià, Salvador Moros, Vicent Peris y Alejandro Vera y que realiza actividad investigadora en el Observatorio de Aras de los Olmos de la Universitat de València.

Durante el proyecto, se han aplicado conceptos de las siguientes asignaturas del máster de astronomía y astrofísica:

- Los conceptos sobre galaxias elípticas y AGNs de los capítulos 1, 2 y 6 fueron introducidos en la asignatura 08 Astrofísica Galáctica de Lorena Nieves Seoane.
- Algunos conceptos generales sobre fuentes de radio incluidas en 1, 2 y 6 fueron estudiadas en la asignatura 11 Radioastronomía de Vicent Martínez.
- Los conceptos básicos sobre la física relativista en los que está basado en agujero negro de Kerr descrito en 2 se estudiaron en la asignatura 09 Cosmología de Bernabé Cedrés Expósito. de Nestor Sánchez.
- Los procesos y escenarios de altas energías en BL Lacs incluidas en 2 fueron introducidas en la asignatura 12 Astrofísica de Altas Energías de Pere Blay.
- La propuesta de observación utilizada en el capítulo 4 está basada en la asignatura 13 Práctica Observaciones de Vicent Martínez.
- La metodología de reducción de imágenes descrita en el capítulo 3 está basada en la asignatura 06 Análisis de Imágenes Astronómicas.
- Algunos conceptos básicos sobre órbitas utilizados en 5 fueron estudiados en la asignatura 03 Sistema Solar de Josep Trigo-Rodríguez.

Capítulo 2

Objetos BL Lacertae

Este capítulo comienza con la descripción de la estructura de los AGNs, las particularidades de los blazars y BL Lacs. A continuación se resumen los procesos físicos y escenarios que explican las observaciones de estos objetos. Tras definir los parámetros físicos de los componentes que constituyen los BL Lac, así como posibles explicaciones de la variabilidad que presentan.

2.1. Núcleos activos de galaxia, Blazars y objetos BL Lac

En la actualidad se asume que la energía de los AGN es producida por la acreción de masa en agujeros negros masivos ($[10^6, 10^{10}]M_{\odot}$). La rotación de la materia conforme cae al agujero negro provoca la formación del disco de acreción con forma toroidal. La acreción es un mecanismo altamente eficiente al convertir el 50 % materia en energía, lo que explica lo altamente energéticos que son estos objetos y la creación de chorros de partículas perpendiculares al disco de acreción. Además, se sabe que la fricción de la materia acretando en el agujero negro produce un intenso campo magnético en estos objetos (41).

El modelo unificado de AGN se compone de 1) un disco de acreción toroidal compuesto de gas y polvo que cae sobre el agujero negro, 2) un agujero

negro central supermasivo y 3) chorros de plasma eyectados perpendicularmente al disco de acreción.

Según este modelo, los blazars son una subclase especial de AGN con uno de sus chorros de partículas apuntando hacia el observador. Los blazars tienen luminosidades altísimas, siendo los AGNs más energéticos de todos cuanto conocemos. Dependiendo de las características de las líneas de emisión, los blazars se clasifican en dos subtipos: los Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ) y los BL Lac. Además, según la posición del máximo de radiación sincrotrón en la distribución espectral de energía, los objetos BL Lac se dividen a su vez en tres clases (31): Low-frequency peaked BL Lac (LBL) con el pico sincrotrón en la banda IR-óptico, Intermediate-frequency peaked BL Lac (IBL) con el pico sincrotrón en frecuencias ópticas-UV y High-frequency peaked BL Lac (HBL) con el pico de emisión sincrotrón en UV-RX.

2.2. Características de los BL Lacs

Los objetos BL Lac comparten muchas de las propiedades de la mayoría de AGNs, como son su espectro continuo no térmico y su variabilidad. Sin embargo, los BL Lacs tienen las siguientes características específicas:

- Los espectros son planos en radio.
- Los espectros se hacen más pronunciados en el infrarrojo y óptico por lo que no suelen tener exceso de ultravioleta.
- Tienen una amplia y rápida variación en radio, óptico y rayos X.
- La emisión óptica y en radio tiene una polarización variable y lineal. La polarización depende de la longitud de onda, alcanzando el 30 % en el óptico y su periodo de variabilidad suele ser de un día.
- El espectro continuo es suave y carente de líneas espectroscópicas relevantes, salvo la presencia a veces de alguna débil línea de absorción.

En la actualidad se conocen más 300 objetos BL Lac, mayoritariamente

procedentes de los *survey* en radio. Sin embargo, se han observado las galaxias huésped de únicamente unas decenas de ellas y siempre por debajo de $z < 0.2$, ajustándose bien al perfil de una galaxia elíptica mediante la ley de Vaucouleurs.

2.3. Procesos físicos y escenarios en BL Lacs

El flujo recibido de los AGNs no pueden explicarse por la energía $E = mc^2$ transformada por reacciones nucleares y es necesariamente explicado por la energía potencial gravitatoria $E = -\frac{GM^2}{R}$ de un objeto con una gran masa contenida en un volumen definido por un radio pequeño. La alta energía potencial gravitatoria de la materia acreetada en los AGNs se encuentra en estado de plasma caliente. Así pues, todas las moléculas del entorno se encuentran ionizadas y los electrones están libres, por lo que predominarán las interacciones electromagnéticas. En este estado se produce emisión no térmica a través de procesos elementales de emisión sincrotrón y *bremsstrahlung*, y modificación por dispersión Compton, emisiones y reemisiones. La emisión sincrotrón es la emisión de espectro continuo polarizado compuesto por la emisión de fotones por electrones a alta energía acelerados por intensos campos magnéticos que curvan su trayectoria helicoidalmente. Al ser radiación ciclotrón a velocidades relativistas, el máximo del espectro continuo depende del campo magnético y está en las longitudes de onda de los rayos X. La radiación de frenado, o emisión *bremsstrahlung* se produce por el frenado de electrones de alta energía al ser desviados por campos eléctricos de iones. La dispersión Compton que se produce en escenarios AGN es debida a la colisión de un fotón poco energético con un electrón acelerado (efecto Compton inverso) que le cede energía aumentando su longitud de onda y desviándolo. La emisión de radiación de rayos γ se producen en procesos más energéticos como son en colisiones y ondas de choque, transiciones nucleares y creación-aniquilación de pares materia-antimateria. Como resultado, se produce un complejo espectro continuo desde la región de las ondas de radio hasta los rayos X y rayos γ . que suele aproximarse por una simple ley de potencias.

Las distribuciones espectrales de energía de los objetos BL Lacs se ca-

racterizan por una estructura de dos jorobas. La de más baja frecuencia se atribuye a la emisión sincrotrón procedente de la radiación de electrones relativistas. La joroba en alta frecuencia es debida a la dispersión Compton inversa de fotones procedentes de la emisión sincrotrón (Synchrotron Self Compton (SSC)).

2.4. Parámetros físicos de agujeros negros

Los escenarios que producen la radiación características de los AGNs no son resolubles espacialmente, por lo que hay que estimar sus parámetros físicos de forma indirecta. Sea G es la constante de gravitación universal y velocidad de la luz c . Denotamos con M la masa del agujero negro en masas solares M_{\odot} . Definimos $m = \frac{GM}{c^2}$ como la masa *geometrizada* del agujero negro en unidades de longitud [L]. Sea L el momento angular del agujero negro y se define $a = \frac{L}{Mc}$ como el momento angular *geometrizado* del agujero negro, tal que $\chi = \frac{a}{m} = \frac{cL}{GM^2}$ es el ratio entre el momento angular a y la masa del agujero negro m .

Agujero negro de Schwarzschild: Un agujero negro de Schwarzschild es un modelo teórico en el que se asume que no existe rotación, por lo que su momento angular $L = 0$, no tiene carga eléctrica y no existen otras masas en su espacio-tiempo. El agujero negro de Schwarzschild se caracteriza por tres características principales (12): 1) Una singularidad puntual donde el espacio-tiempo tienen una curvatura infinita, 2) un horizonte de sucesos a un radio de Schwarzschild de la singularidad, 3) una esfera fotónica 1.5 veces más grande que el radio de Schwarzschild.

De la solución exacta a las ecuaciones de relatividad general de Einstein elaboradas por Karl Schwarzschild en 1916 (23), se obtiene que el radio del agujero negro sin rotación $L = 0$ es:

$$r_0 = 2m = \frac{2GM}{c^2} \tag{2.1}$$

Órbita estable más cercana al agujero negro de Schwarzschild:

Del estudio energético del agujero negro de Schwarzschild (23) se obtiene que el radio de la órbita estable más cercana que define el radio mínimo del disco de acreción que rota alrededor del agujero negro de Schwarzschild es:

$$r_{0E} = 6m = \frac{6GM}{c^2}, \quad (2.2)$$

Agujero negro de Kerr: Se denomina agujero negro de Kerr al modelo de agujero negro con velocidad de rotación distinta de cero, cuyo horizonte de sucesos tiene un radio (23):

$$r_+ = m + \sqrt{m^2 - a^2} \quad (2.3)$$

Cuando el momento angular es nulo, $a = 0$, esta expresión coincide con el radio del agujero negro de Schwarzschild $r_+(a = 0) = r_0$.

Agujero negro extremo de Kerr: Para que la *hipótesis de censura cósmica débil* sea cierta y exista un horizonte de sucesos¹, siempre se debe cumplir que $a < m$. Mediante el caso límite, definimos el radio del agujero negro extremo de Kerr para el caso donde $a \rightarrow m$

$$r_* = \lim_{a \rightarrow m} r_* = m = \frac{GM}{c^2} \quad (2.4)$$

Órbitas estables del agujero negro de Kerr: Las órbitas estables circulares del disco de acreción más cercanas a un agujero negro en rotación vienen dada por (4),

$$r_{+E} = m[3 + B \mp \sqrt{(3 - A)(3 + A + 2B)}], \quad (2.5)$$

¹La hipótesis de censura cósmica débil afirma que no pueden existir singularidades visibles para un observador situado en el infinito y por lo que éstas deben estar ocultas por el horizonte de sucesos de un agujero negro.

donde

$$A = 1 + (1 - \chi^2)^{1/3}[(1 + \chi)^{1/3} + (1 - \chi)^{1/3}], \quad (2.6)$$

$$B = (3\chi^2 + A^2)^{1/2}, \quad (2.7)$$

y donde los signos menos y más \mp indican los dos casos posibles: menos $-$ para el caso donde el disco de acreción orbita en el mismo sentido angular que la rotación del agujero negro y más $+$ para la rotación en sentido contrario.

Cabe destacar que en el caso donde el disco de acreción rota en el mismo sentido que el agujero negro, el mínimo radio de estabilidad se sitúa en $r_{+E} = m = r_*$ cuando $\chi = 1$, coincidiendo con el radio del horizonte de sucesos (ver ecuación 2.4). Así mismo, cuando $\chi = 0$, el radio de estabilidad $r_{+E} = 6m$, coincidiendo con el radio de órbita estable del agujero negro de Schwarzschild (ver ecuación 2.5). En el caso de sentido contrario de giro, el radio de estabilidad está en el rango $r_{+E} = [6m, 9m]$, dependiendo del momento angular $\chi = [0, 1]$.

Estimación del radio de estabilidad: Siguiendo el procedimiento descrito en (42), se puede asumir que en las cercanías del horizonte de sucesos del agujero negro, la materia alcanza una velocidad de la luz c y que gira en movimiento circular con periodo P , por lo que podemos estimar el radio de la órbita estable del agujero negro de Kerr como:

$$P = \frac{2\pi r_+}{c} \quad (2.8)$$

$$r_{+E*} = \frac{Pc}{2\pi(1+z)}, \quad (2.9)$$

corrigiendo por el desplazamiento al rojo del objeto z .

2.5. Variabilidad de BL Lacs

Los blazars, incluyendo los objetos BL Lac, se caracterizan por su alta luminosidad, rápidos cambios de flujo, polarización variable y emisión no

térmica de banda ancha, Así pues, una de las características observables más extremas de los blazars es su variabilidad de flujo, que se presenta con diversos órdenes de magnitud y escalas temporales (37; 14) en todo el espectro electromagnético, desde radio hasta rayos γ (5). Dependiendo de la escala temporal, se han descrito tres tipos de variabilidad: microvariabilidad (o variabilidad intradía, Intra-Day Variability (IDV)), variación corta (semanas) o variación prolongada (años). En particular, se han detectado variaciones intradía de minutos a días en los rangos ópticos (15), entre segundos días en rayos X (16), y rayos γ (1).

Marscher en (26) describe los chorros de los blazars mediante la interacción de un campo magnético helicoidal cerca del agujero negro, plasma turbulento en escalas de parsecs, y ondas de choque tanto estacionarias como móviles. La aceleración de partículas puede entonces ocurrir en múltiples etapas que involucran procesos de Fermi de segundo orden, reconexiones magnéticas, y pequeños saltos de energía en los frentes de choque. La variabilidad más extrema probablemente requiere factores de Lorentz excepcionalmente altos. Estos pueden resultar, por ejemplo, de turbulencias supersónicas, relativistas, o flujos ultra-relativistas propulsados desde sitios de reconexión magnética.

Cuando un blazar está en un estado de llamarada (14) la microvariabilidad es debida a la emisión procedente de los chorros de radiación no térmica impulsada por efecto Doppler (37; 20; 3). Sin embargo, cuando el blazar está en un estado calmado la microvariabilidad puede explicarse por inestabilidades en el disco de acreción (10; 9). Es de esperar que las regiones de emisión donde se produce la microvariabilidad sean volúmenes muy compactos y cercanos al agujero negro central. De esta forma, la mayoría de estudios asocian la fuente de microvariabilidad a procesos físicos en el disco de acreción y el chorro del blazar: aceleración de partículas, disipación de energía, geometría de campo magnético y el contenido del chorro (6). Aunque el origen y caracterización detallada de la microvariabilidad todavía no están del todo determinadas, algunos posibles mecanismos para explicarlos son (15; 42; 6): puntos calientes en el disco de acreción que gira alrededor de la fuente central; propagación de las ondas de choque por el chorro del blazar, lo que supondría observar retrasos en las variaciones de flujo entre las

bandas; por último microlentes, que puede ser descartada por la dependencia de la magnitud de la variación a la frecuencia de la onda electromagnética; entre otros. Otros autores, como Giannios *et al.* en (18) y Nalewajkom *et al.* en (28) propusieron las reconexiones magnéticas como origen de la microvariabilidad.

Por otra parte, un efecto relativista interesante debido al acoplamiento del momento angular del disco de acreción con el momento angular L del agujero negro del BL Lac, es el movimiento giroscópico del disco de acreción caracterizado por la precesión de Lense-Thirring (11). Asumiendo una órbita estable circular $e = 0$ de radio r_{+E} , podemos calcular la velocidad angular media de la precesión de Lense-Thirring como

$$\Omega_{LT} = \frac{2G^2 M^2}{c^3 r_{+E}^3} \chi \quad (2.10)$$

Tal como ilustra la Figura 2.1, este movimiento podría ser compatible con variaciones de los objetos BL Lac, ya que provocaría que la orientación del chorro relativista con el observador variara periódicamente.

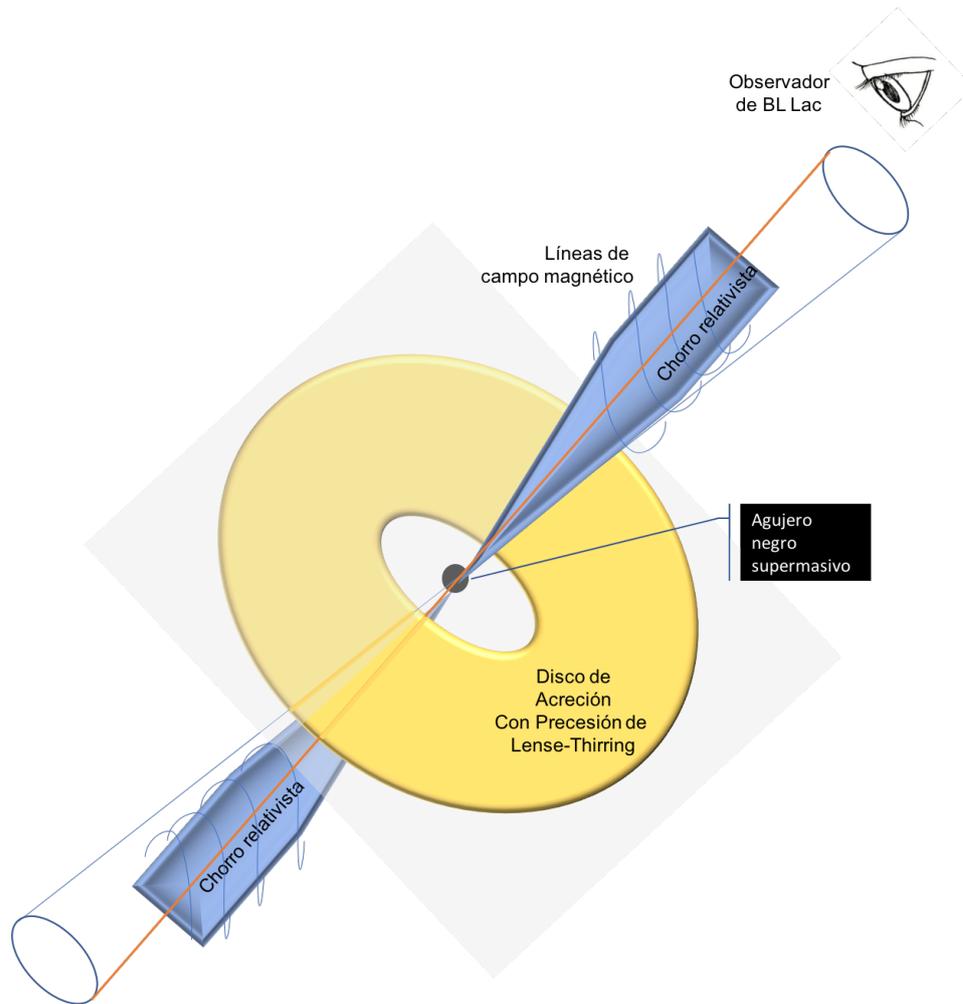


Figura 2.1: *Precesión de Lense-Thirring del disco de acreción de un BL Lac.*

Capítulo 3

Métodos

Este capítulo describe detalladamente los métodos utilizados en el procesamiento de los datos adquiridos durante el estudio. Así pues, revisaremos el procedimiento de fotometría para obtener las curvas de luz de los objetos BL Lac y las componentes principales de variabilidad que presentan. Por último, resumiremos el cálculo de errores utilizado en el estudio.

3.1. Reducción de imágenes con PixInsight

Las imágenes astronómicas en el rango óptico son registradas mediante un Dispositivo de Carga Acoplada (CCD). Durante el proceso de registro se producen efectos instrumentales, que deben corregirse antes de calcular imágenes calibradas en flujo. La reducción de imágenes realiza la corrección de los siguientes efectos:

- Nivel de bias (o nivel cero): Es una señal artificial independiente del tiempo de entre 10 y 100 veces la señal de lectura que se añade aditivamente a cada píxel para que el conversor analógico/digital de valores inferiores a cero.
- Dark current (o corriente de oscuridad o térmica): Es la carga adi-

tiva debida a electrones excitados por efecto térmico y por lo tanto dependiente de temperatura.

- Flat field (campo plano): Es el campo de respuesta multiplicativa de píxeles para una configuración instrumental específica debida a las variaciones de su tamaño y eficiencia cuántica, así como los efectos de motas de polvo en el instrumental y viñeteo.

Así pues, en la reducción de una imagen astronómica del campo del objeto de estudio debemos corregir los efectos aditivos de bias y corriente oscura y el efecto multiplicativo representado por el campo plano:

$$I_{cal,f,\delta t} = \frac{I_{raw,f,\delta t} - B - D_{\delta t}}{Fl_f}, \quad (3.1)$$

donde $I_{cal,f}$ es la imagen reducida del campo del objeto de estudio, $I_{raw,f}$ es la imagen cruda (*raw*) del campo del objeto de estudio adquirida en filtro f y con tiempo de adquisición t . B es la imagen master bias calculada como imagen compuesta (media) de las N_B imágenes bias adquiridas con el mismo instrumental mediante el obturador cerrado y tiempo de exposición 0. D_t es la imagen master dark calculada como imagen compuesta (media) de las N_D imágenes dark adquiridas con las mismas condiciones de adquisición que la imagen del objeto con tiempo t y corregidas de bias. Por último, Fl_f es la imagen master flat calculada como imagen compuesta (media) de las N_{Fl} imágenes flat adquiridas con el mismo filtro f con tiempos de exposición que obtengan valores máximo de intensidad en la imagen alrededor de la mitad del número máximo de cuentas y a las que se les ha corregido propiamente su bias y su corriente de oscuridad.

En el caso de no disponer de imágenes dark de los tiempos de exposición requeridos, se pueden calcular imágenes dark sintéticas mediante la tendencia lineal estimada a partir de todas las imágenes dark disponibles.

3.2. Control de calidad de las imágenes

La respuesta Point Spread Function (Función de dispersión de punto) (PSF) a la luz incidente de una estrella lejana de un sistema óptico circular es debida al patrón de interferencia de las ondas difractadas, que está formado por un disco central, llamado disco de Airy y una serie de anillos concéntricos de menos intensidad. Sin embargo, las condiciones de la atmósfera en el momento de la adquisición distorsiona la imagen de las estrellas y objetos. La visibilidad astronómica (*seeing*), mide el efecto distorsionador de la atmósfera. Estimamos el *seeing* de una estrella como la Full Width at Half Maximum (Anchura a media altura) (FWHM) de su PSF, medida en arcsec o píxeles. Para una fotometría profesional, un *seeing* de $\approx 1 \text{ arcsec}$ (2 píxeles para una escala de CCD de $0.540 \text{ arcsec/pxel}$) se considera una noche buena y para un telescopio de apertura $d = 500 \text{ mm}$, sería cercana a su resolución angular según la fórmula $\theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{d} \approx 0.9 \text{ arcsec}$. En nuestro estudio pro-am, nos conformaremos con imágenes un *seeing* medio de 6 píxeles ($\approx 3.3 \text{ arcsec}$).

El flujo medido para un objeto fuente *SRC* es la señal de fotoelectrones detectados en el área del objeto en la imagen $S = N_{SRC}$, siendo $N_{SNR} = S_0 g t$ una función de las cuentas S_0 generadas por segundo, la ganancia g en e^-/ADU y el tiempo total de exposición δt . El ruido σ del flujo medido se compone de ruido Poissoniano de la señal, ruido Poissoniano del fondo de cielo, ruido térmico y ruido de lectura. El ruido del flujo se suele aproximar a su mayor componente que es el ruido de la señal $\sigma = \sigma_{SRC}$, siendo $\sigma_{SRC} = \sqrt{N_{SRC}}$. Si la Relación Señal/Ruido (SNR), $SNR = \frac{N_{SRC}}{\sigma}$ es mayor de 5 se considera que el objeto ha sido detectado, mientras que $SNR > 10$ es el valor a partir del cual considerar que podemos realizar cálculos rigurosos con las medidas.

3.3. Fotometría de apertura

La fotometría de un objeto obtiene su magnitud instrumental m_I a partir de una imagen. La fotometría de apertura consiste en sumar el flujo medido procedente del objeto de estudio en un área centrada en su centro. Para

ello, es necesario determinar 1) el centro del objeto, 2) el radio de apertura, 3) el flujo del fondo de cielo en la región de apertura, y 4) la magnitud instrumental del objeto a partir del flujo medido.

El centro del objeto se obtiene por astrometría a partir de las coordenadas celestes del centro de la imagen, la fecha de adquisición y la posición celeste de estrellas y otros objetos en los catálogos públicos, como PPMXL, UCAC3, TYCHO-2, y Gaia DR2, accesibles a través del servidor VizieR. El algoritmo *Image Plate Solver v5.1* de Andrés del Pozo alinea las estrellas identificadas en la imagen con el campo del catálogo, obteniendo como resultado la matriz de referencia de la imagen, a partir de la cual se puede saber los valores ajustados de la rotación respecto del norte de la imagen, la focal y la resolución, así como el tamaño del campo visual y por supuesto las coordenadas celestes en los objetos del estudio y las estrellas de referencia.

El radio de apertura se establece aproximadamente a 3 veces el *seeing*¹ de la imagen (ver sección 3.2). De esta forma, asumiendo una excentricidad 0, aseguramos que el área de fotometría abarca completamente el disco de Airy y por lo tanto la mayor parte de la luz emitida por el objeto de estudio S_A .

El flujo del fondo de cielo debe substraerse del flujo del área de apertura para obtener la fotometría del objeto libre de otras contribuciones. Para ello, es necesario estimar el fondo de cielo. En el caso de objetos inscritos en galaxias como un AGN, es necesario substraer la contribución general del fondo de cielo y la del brillo de la galaxia que no proceda del objeto estudiado. En este estudio hemos calculado el fondo de cielo S_B en un anillo cuadrado a 60 píxeles del centro del objeto en la imagen residuo del ajuste de 8 capas de estructuras a diferentes escalas utilizando el algoritmo *Background modeling with Multiscale Median Transform*² de Vicent Peris y Andrés del Pozo (ver Figura 3.1). Como resultado, estimamos el flujo de un objeto en la imagen astronómica reducida como $S = S_A - S_B$.

¹FWHM de la PSF media de las estrellas del campo.

²[urlhttp://pixinsight.com/doc/scripts/AperturePhotometry/AperturePhotometry.html](http://pixinsight.com/doc/scripts/AperturePhotometry/AperturePhotometry.html)



Figura 3.1: Residuo de la imagen 17 del campo de 1ES 1959+650 tras sustraer 8 capas de estructuras con Multiscale Median Transform.

3.4. Fotometría diferencial

A partir del flujo S estimado por fotometría, podemos calcular la magnitud instrumental m_I de los objetos y estrellas del campo de una imagen como

$$m_I = -2.5 \log_{10}(S) + C, \quad (3.2)$$

donde C es una constante arbitraria que suele ponerse a un valor tal que $m_I > 0$ para todo objeto medido en la imagen.

La magnitud instrumental m_I de un objeto calculada mediante la ecuación 3.2 únicamente es comparable a otros objetos medidos en la misma imagen, por lo que no es comparable a las magnitudes del mismo objeto medido en otras imágenes del mismo observatorio. Esto es debido a que la imagen de un objeto se toma después de que la luz emitida sufra procesos de extinción interestelar y atmosférica por absorción y dispersión por el polvo y gas con el que interactúa.

Para poder comparar las medidas de un objeto con medidas realizadas en otro momento por el mismo observatorio es necesario calcular la magnitud extra-atmosférica (u observada) m_0 , que es la magnitud aparente en el borde exterior de la atmósfera de la Tierra. El método más comúnmente utilizado para el cálculo de m_0 es el ajuste lineal de $m_I = m_0 + kX$, donde k es el coeficiente de extinción de la noche de adquisición en el observatorio y X es la masa de aire en el momento de cada imagen. Si además se quiere comparar las medidas obtenidas con las de otros instrumentos, se deberán transformar las magnitudes observadas a magnitudes estándares m_s mediante su calibración con respecto al brillo y color conocido de estrellas estándares.

Una alternativa aceptable en proyectos pro-am es el cálculo de magnitudes estándares mediante fotometría diferencial m aprovechando la relación lineal entre magnitudes instrumentales y magnitudes estándares. Este método consiste en los siguiente pasos:

1. Calcular la magnitud instrumental $m_{o,I}$ del objeto en una imagen obtenida con filtro f .
2. En la misma imagen, calcular la magnitud instrumental $m_{r,I}$, donde $r \in R$ para un conjunto de estrellas de referencia R , de las que se conoce la magnitud estándar $m_{r,s}$ para el filtro f de la imagen.
3. Descartar la imagen si $\rho(m_{r,I}, m_{r,s}) < 0.98$, siendo ρ el coeficiente de correlación de Pearson entre las magnitudes instrumentales $m_{r,I}$ y las magnitudes estándar $m_{r,s}$.
4. Ajustar el modelo lineal $m_r = am_I + b$ que aproxima la relación de dependencia entre la magnitudes estándares $m_{r,s}$ de las estrellas de referencia $r \in R$ y sus magnitudes instrumentales en la imagen $m_{r,I}$.
5. Estimar la magnitud estándar del objeto $m_{o,s}$ a partir de su magnitud instrumental $m_{o,I}$ mediante la tendencia $m_r = am_I + b$ del modelo lineal.

3.5. Transformación entre magnitudes de los sistemas estándar

Hemos comprobado que la estandarización de las magnitudes observadas a un sistema fotométrico se realiza a través del brillo de estrellas estándares. En ocasiones no tenemos disponible las magnitudes estándar de las estrellas de referencia en el sistema fotométrico en el que hemos adquirido nuestra imágenes. Para estas ocasiones, encontraremos de gran utilidad las transformaciones entre los sistemas fotométricos más utilizados en los *surveys* internacionales. Específicamente, nos serán de utilidad las transformaciones entre los filtros $u'g'r'i'z'$ el sistema fotométrico Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y los filtros $UBVR_cI_c$ del sistema Johnson-Cousin.

Específicamente, en el *Frankfurt Quasar Monitoring* tenemos disponible para el campo del objeto OQ 530 la magnitud V y los colores $B - V$ y $U - B$ de las estrellas de referencia, sin embargo, no está disponible la magnitud R_c que hemos adquirido en nuestra serie. Karaali, Bilir y Tunçel propusieron en 2005 (22) la transformación para conocer el índice de color $g' - r'$ basándose en los colores $B - V$ y $U - B$ para estrellas en el rango de color $0.3 < B - V < 1.1$, Además, Jester et al. en 2005 (21) definieron la transformación para conocer la magnitud r' a partir de V y $B - V$. Conocido el índice de color $g' - r'$ y la magnitud r' es inmediato calcular el índice R mediante la transformación de Lupton en 2005.

$$g' - r' = 1.023(B - V) + 0,016 * (U - B) - 0,187 \quad (3.3)$$

$$r' = V - 0.42 * (B - V) + 0.11 \quad (3.4)$$

$$R = r' - 0.1837 * (g' - r') - 0.0971 \quad (3.5)$$

3.6. Curvas de luz

La curva de luz en filtro f de un objeto astronómico consistirá en la secuencia de magnitudes estándares $m_{o,s,f,t}$ en filtro f registradas en una fecha Juliana t . Podremos obtener nuestra propia curva de luz mediante la

aplicación de los métodos descritos en las secciones anteriores a una secuencia de imágenes del campo del objeto.

En este estudio obtendremos las curvas de luz en los filtros V y R del sistema fotométrico Johnson-Cousins de tres objetos BL Lac: 1ES 1859+650 en la fecha 2458282 JD, MRK 501 en la fecha 2458288 JD y OQ 530 durante las fechas 2458285 y 2458286 JD.

3.7. Periodos de variabilidad

Los objetos BL Lac se caracterizan por fulguraciones y variabilidades periódicas. Estas variaciones periódicas pueden darse a distintas escalas temporales en el rango de horas, días y años. El cálculo del periodo de las variaciones de un objeto BL Lac puede realizarse con relativa precisión determinando las frecuencias de las componentes senoidales principales de la curva de luz obtenida de la serie temporal fotométrica. Estas frecuencias serán las de mayor energía en el espectro de frecuencias obtenido mediante la transformada de Fourier, pudiendo ajustarse la curva de luz a una función $m(t) = Z + \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) + \epsilon$, donde Z es valor medio de la señal, f_i es la frecuencia de cada componente principal i con amplitud A_i y fase ϕ_i , quedando el residuo *epsilon* tras el ajuste.

El software Period04 realiza la transformada de Fourier en series temporales con muestreos irregulares y/o escasos ciclos. Además, detecta automáticamente las frecuencias de las componentes principales senoidales y ajusta la función trigonométrica a la serie temporal.

3.8. Cálculo de errores

Se ha utilizado la estimación de ratio señal-ruido $SNR = \frac{S}{\Delta S}$ calculada por PixInsign durante la fotometría de las estrellas y objetos para calcular el error de medida del flujo $\Delta S = \frac{F}{SNR}$. Además, se ha estimado el error de medida del periodo como el intervalo máximo entre dos medidas de cada

curva de luz. Como resultado, se ha obtenido $\Delta P = 300s$ para todas las curvas de luz.

En general, cuando conozcamos los errores de medida $\Delta x, \Delta y$ de las medidas x, y, \dots , la incertidumbre Δz de una cantidad dependiente $z = f(x, y)$ se puede calcular a partir de la expresión diferencial total de la función:

$$\epsilon_z = \left| \frac{\partial z}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial z}{\partial y} \Delta y \right| \quad (3.6)$$

Concretamente, por 3.2 y el valor ΔS , obtenemos $\Delta m_I = \frac{2.5 \log_{10} e}{SNR}$.

Además, se ha utilizado el cálculo de errores en el ajuste de los parámetros del modelo lineal $m_r = am_I + b$ utilizado para calcular las magnitudes estandar $m_{o,s}$ de los objetos de las imágenes. Para ello, se ha implementado el cálculo de los parámetros a y b , y sus errores Δa , Δb y el error de la tendencia $\Delta m_{o,I} = a\Delta m_I + M_I\Delta a + \Delta b$ mediante el procedimiento descrito en la sección 4.7.2 de (25) (página 98 y 99).

Capítulo 4

Instrumentación y Datos de la Observación

Este capítulo describe el instrumental utilizado durante la adquisición de las imágenes, qué imágenes se adquirieron durante las cinco noches de la monitorización, las imágenes de calibración utilizadas para la reducción de las imágenes y la descripción de los campos de observación de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530.

4.1. Telescopio T50 del OAO

La observación se realizó con el telescopio T50 del Observatorio de Aras de los Olmos de la Universitat de València (OAO), situado a una altura de 1250 m en la muela de Santa Catalina con coordenadas geográficas $39^{\circ}56'42.00''N - 1^{\circ}6'5.40''W$. T50 tiene un astrógrafo de configuración corregida Dall–Kirkham con una apertura de 508 mm, focal de 3454mm y relación focal $F/6.8$, modelo 20' CDK Optical Tube Assembly de la compañía PLANEWAVE Instruments. El instrumento utilizado para fotometría en el T50 es la cámara monocroma Proline PL16801 de 16.8 Mpx con sensor iluminado frontalmente Kodak KAF-16801 de 4096×4096 píxeles con un tamaño de $9\mu m$ por píxel (52.1mm de diagonal, $36.9' \times 36.9'$ de cam-

Tabla 4.1: *Ascensión recta (AR), Declinación (Dec), desplazamiento al rojo (z) y rango de magnitudes en el canal visual (m_V) de los objetos estudiados 1ES1959+650, MRK 501 y OQ 530.*

Objeto	AR	Dec	z	$D(Mpc)$	m_V
1ES1959+650	19 59 59.9	+65 08 55	0.047	189	[12.8,16.0]
MRK 501	16 53 52.2	+39 45 37	0.033	137	[13.0,14.6]
OQ 530	14 19 46.6	+54 23 14	0.152	608	[10.8,16.5]

po visual), enfriamiento termoelectrico de hasta $-60^{\circ}C$, ruido de lectura de $9e - (rms)$, no-linealidad menor del 1%, capacidad máxima de píxel de 100.000e-, corriente de oscuridad <0.08 e-/pixel/sec, eficiencia cuántica máxima Q(660nm) 70 % y transmisión de datos mediante USB 2.0. El astrógrafo está montado sobre una montura alemana en configuración ecuatorial controlada por un placa NTM-500 de ASTELCO. La distancia focal del sistema óptico fue de 3451 mm, obteniendo una resolución de $0.537926arcsec/px$. El software utilizado para el manejo del telescopio ha sido Maxim DL 5.

4.2. Adquisición de imágenes

Para realizar este estudio se eligieron tres objetos BL Lac catalogados en el *Frankfurt Quasar Monitoring* que por sus coordenadas de Ascensión Recta y Declinación estarán por debajo de una masa de aire $X = 1.5$ durante al menos 3 horas durante las noches de Junio de 2018. Así pues, se han seleccionado los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 con coordenadas celestes, corrimiento al rojo y rangos de magnitud visible recogidos en la Tabla 4.1.

La localización del observatorio astronómico de Aras de los Olmos tienen unas condiciones idóneas para la observación de los objetos BL Lac de la Tabla 4.1 durante las noches de finales de mayo y primeras semanas de junio de 2018. La Figura 4.1 obtenida con el simulador Startalt del IAC¹ muestra la extinción atmosférica de cada uno de los objetos para las noches de Junio de 2018. Tal como muestra la Tabla 4.2, se han adquirido 5 series de imágenes en los filtros V y R de Johnson-Cousins durante 5 noches de los objetos BL

¹<http://catserver.ing.iac.es/staralt/index.php>

Tabla 4.2: *Observaciones durante junio de 2018.*

Objeto	1ES1959+650	MRK 501	OQ 530	OQ 530	MRK 501
Inicio DD(UTC)	12(22:53)	13(21:59)	15(23:50)	17(00:49)	18(23:01)
JD-2458282	0.4539	1.4161	3.4931	4.5346	6.4594
Airmass	1.3114	1.046	1.2004	1.3652	1.0003
Fin DD(UTC)	13(03:48)	14(03:33)	16(02:25)	17(02:42)	19(01:25)
JD-2458282	0.6586	1.6484	3.6013	4.6126	6.5593
Airmass	1.1236	1.4458	1.7782	1.9130	1.1143
Canal R	75	80	43	30	35
Canal V	75	80	44	30	35

Lac 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530. Para el objeto 1ES1959+650 se ha adquirido durante una noche (12/06/2018) con una extinción atmosférica mínima de 1.11. MRK 501 se adquirió durante dos noches (13,18/06/2018), con una extinción atmosférica mínima de 1.00. El objeto OQ 539 se adquirió durante dos noches (15,17/06/2018) con una extinción atmosférica mínima de 1.20.

Todas las imágenes de los objetos fueron adquiridas con un tamaño de CCD de 4096×4096 con una representación de 16 bits (65536 niveles) en binning 1 y se realizaron con un tiempo de exposición de 60s a una temperatura de $-25^{\circ}C$.

4.3. Imágenes de calibración

La reducción (o calibración) de las imágenes de objetos BL Lac se ha realizado mediante el procedimiento descrito en la sección 3.1. Para ello, disponemos de las imágenes de calibración tomadas el 19 de junio de 2018 resumidas en la tabla 4.3.

Es importante darse cuenta que hay imágenes flat de tiempos de exposición (6s y 8s) para los que no disponemos de ningún dark con la misma exposición.

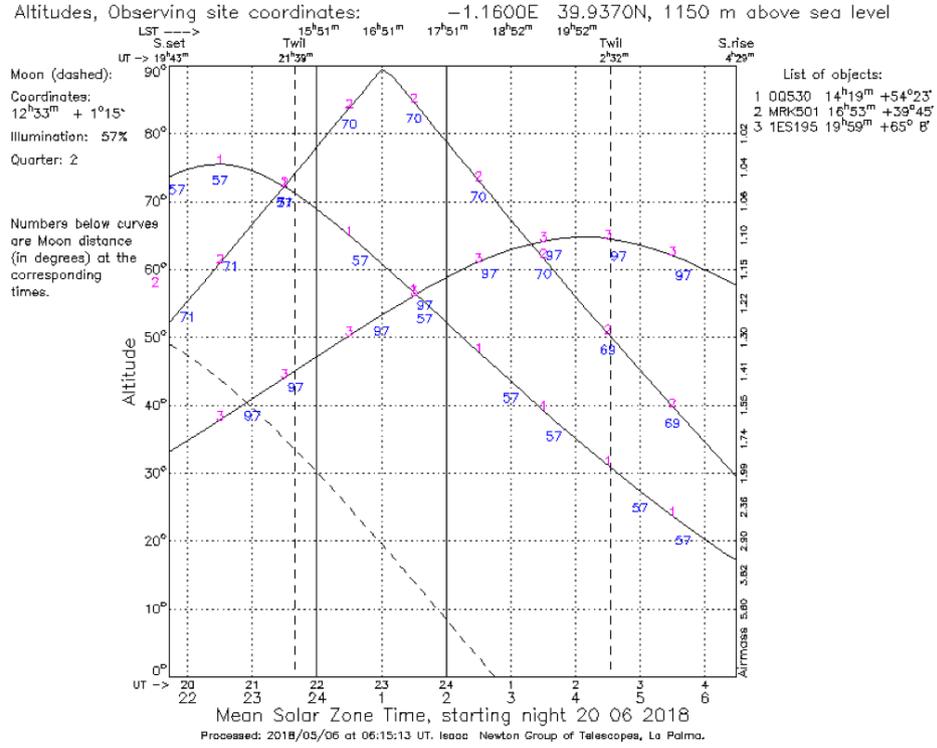


Figura 4.1: Gráfico staralt de los tres objetos BL Lac para el 20 de junio de 2018.

Tabla 4.3: Imágenes de calibración tomadas el 19 de junio de 2018: bias, darks de diferentes tiempos de exposición y flats en filtros V y R .

Tipo	Filtro	Exposición (S)	N
Bias	-	0	11
Dark	-	5	11
Dark	-	10	11
Dark	-	20	11
Dark	-	30	11
Dark	-	45	11
Dark	-	60	11
Dark	-	90	11
Dark	-	120	11
Dark	-	180	10
Dark	-	240	10
Dark	-	300	10
Flat	R	6	1
Flat	R	8	1
Flat	R	10	3
Flat	R	20	3
Flat	V	5	8

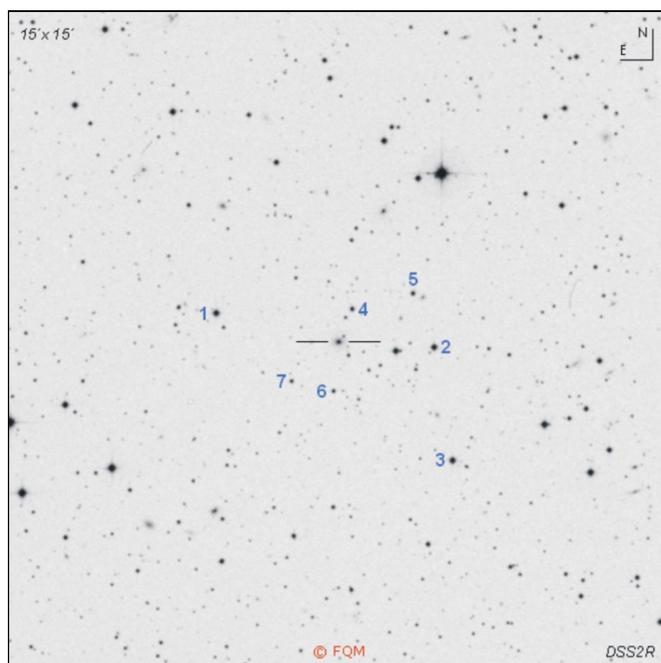


Figura 4.2: Campo de observación de 1ES 1959+650. Cortesía de Frankfurt Quasar Monitoring

4.4. Campos de observación

Utilizaremos como referencia los campos de observación definidos por el *Frankfurt Quasar Monitoring* para los 3 objetos BL Lac seleccionados.

4.4.1. Campo de observación de 1ES 1959+650

El campo de observación en *Frankfurt Quasar Monitoring* para el objeto 1ES 1959+650 incluye 7 estrellas de referencia (ver Tabla 4.4) dentro de una superficie $15' \times 15'$ tal como muestra la Figura 4.2.

4.4.2. Campo de observación de MRK 501

El campo de observación en *Frankfurt Quasar Monitoring* para el objeto MRK 501 incluye 6 estrellas de referencia (ver Tabla) dentro de una superficie

Tabla 4.4: Objeto 1ES 1959+650 y estrellas de referencia en su campo.

Objeto	AR (J2000)	DE (J2000)
1ES 1959+650	19 59 59.9	+65 08 55
Ref1	20 00 26.688	+65 9 27.440
Ref2	19 59 39.284	+65 8 52.670
Ref3	19 59 34.399	+65 6 19.040
Ref4	19 59 57.522	+65 9 41.440
Ref5	19 59 44.331	+65 10 5.310
Ref6	20 00 0.651	+65 7 47.720
Ref7	20 00 9.765	+65 7 58.190

Tabla 4.5: Objeto MRK 501 y estrellas de referencia en su campo.

Objeto	AR (J2000)	DE (J2000)
MRK 501	16 53 52.217	39 45 36.610
Ref1	16 53 45.816	39 44 8.830
Ref2	16 53 28.503	39 46 59.500
Ref3	16 53 31.667	39 47 18.900
Ref4	16 53 46.858	39 43 8
Ref5	16 53 58.486	39 48 2.210
Ref6	16 53 57.190	39 45 36.220

$15' \times 15'$ tal como muestra la Figura 4.3.

4.4.3. Campo de observación de OQ 530

El campo de observación en *Frankfurt Quasar Monitoring* para el objeto OQ 530 incluye 6 estrellas de referencia (ver Tabla 4.6) dentro de una superficie $15' \times 15'$ tal como muestra la Figura 4.4.

Tabla 4.6: Objeto OQ 530 y estrellas de referencia en su campo.

Objeto	AR (J2000)	DE (J2000)
OK 530	14 19 46.597	54 23 14.79
RefA	14 20 18.449	54 30 20.280
RefB	14 20 24.247	54 29 7.810
RefC	14 20 18.232	54 24 14.830
RefD	14 20 22.197	54 21 24.700
RefE	14 20 3.697	54 19 52.090
RefG	14 19 43.841	54 18 49.440

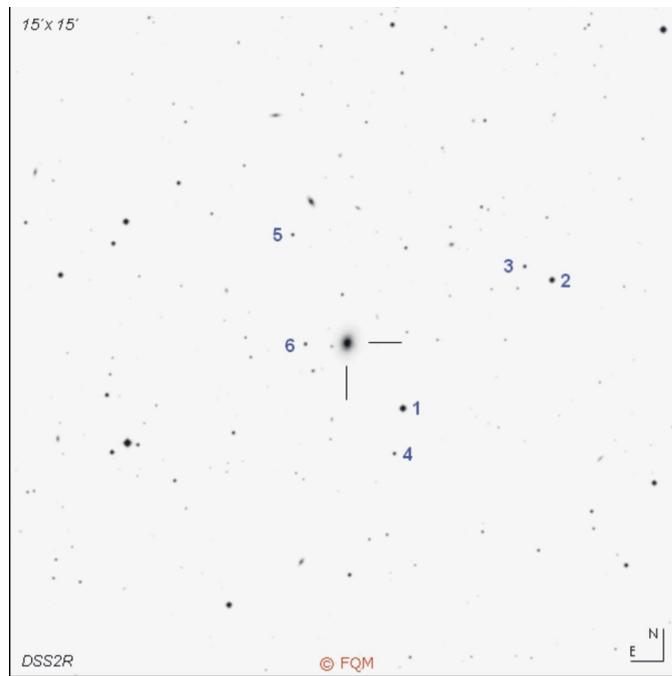


Figura 4.3: Campo de observación de MRK 501

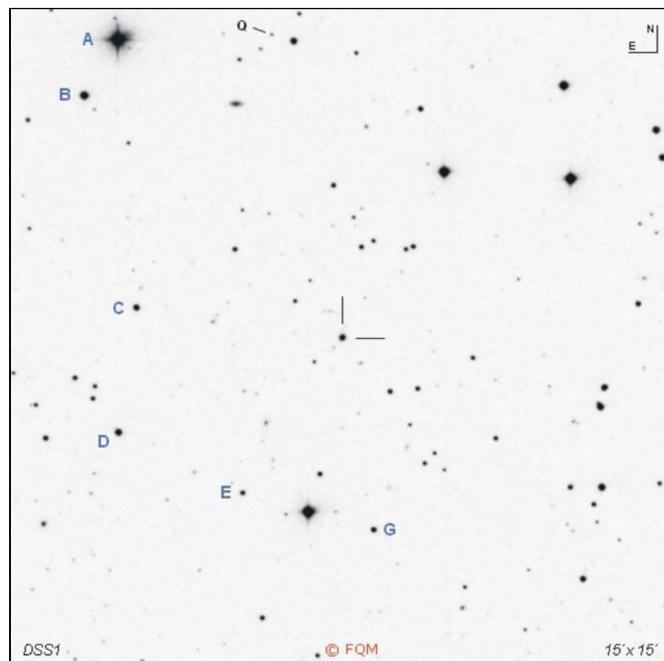


Figura 4.4: Campo de observación de OQ 530

Capítulo 5

Resultados

El capítulo de resultados presenta los detalles de la reducción de imágenes, el análisis de la calidad de las imágenes basado en la PSF, la fotometría de apertura, las curvas de luz de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 y posibles periodos de microvariabilidad.

5.1. Reducción de imágenes

La reducción de las imágenes se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.1 utilizando el script *BatchPreprocessing* implementado en PixInsight Core Version 1.8 por Kai Wiechen y Pleiades Astrophoto en 2012. El proceso se realizó conjuntamente para todas las imágenes de los canales R y V adquiridas durante las cinco noches (ver Tabla 4.2 con características de la adquisición).

La reducción utilizó las imágenes de calibración adquiridas el 19 de junio de 2018 4.3. Las 11 imágenes bias se utilizaron para calcular una imagen media master bias con la que eliminar el nivel cero de todas las imágenes de objetos, flats y darks.

Las imágenes dark de 60s sirvieron para calcular una imagen master dark

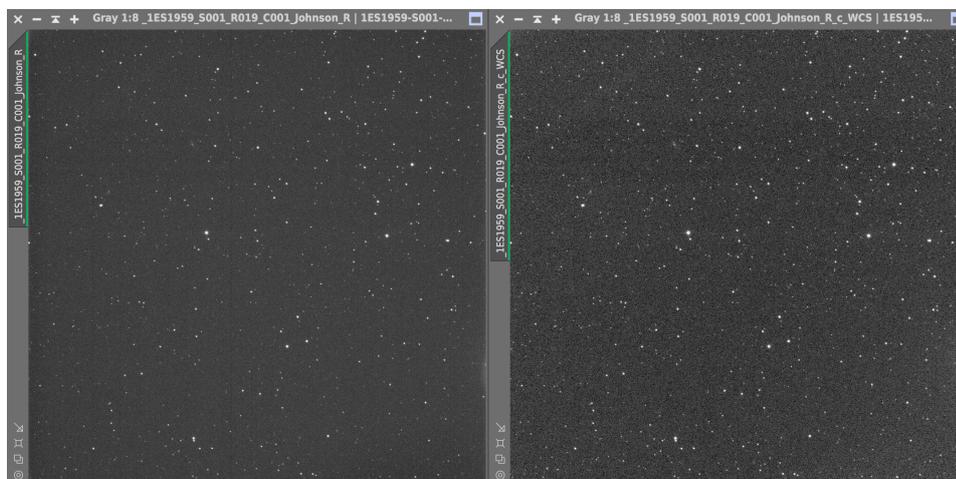


Figura 5.1: Imagen 19 de 1ES 1959+650 en canal R, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).

de 60 para substraer la corriente oscura de las imágenes de objetos. De forma similar, las imágenes dark de 5s se utilizaron para eliminar la corriente oscura de los flats en canal V. Las imágenes dark de 10s y 20s se utilizaron para eliminar la corriente oscura de los flat en canal R con tiempo de exposición de 10s y 20s, respectivamente. Por otra parte, todas las imágenes dark sirvieron para calcula darks sintéticos para los tiempos de exposición 6s y 8s, mediante el método *optimize dark frames*, y sustraer los master dark de 6s y 8s a los flats de canal R correspondientes.

Las imágenes flat de cada canal R y V con diferentes exposiciones corregidas de nivel cero y corriente oscura sirvieron para calcular los master flats medios de los canales R y V con los que corregir en las imágenes de objetos BL Lac el efecto multiplicativo de la distinta respuesta de los píxeles.

La Figura 5.1 muestra como la reducción de la imagen 19 del canal R del campo de 1ES 1959+650 consigue mayor contraste de la señal de los objetos respecto al fondo y reducir el viñeteo. La Figura 5.2 muestra la clara eliminación de motas de polvo y del viñeteo en la imagen 70 del canal V del campo de 1ES 1959+650.

La Figura 5.3 muestra como la reducción de la imagen 38 en el canal R del campo de MRK 501 consigue mayor contraste de la señal de los objetos

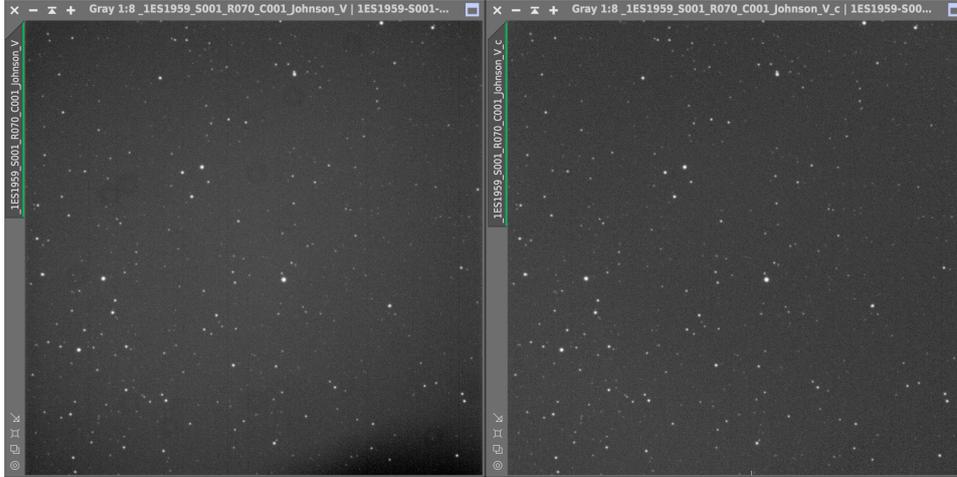


Figura 5.2: Imagen 70 de 1ES 1959+650 en canal V, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).

respecto al fondo. La Figura 5.4 muestra una disminución del efecto de columnas de píxeles oscuros tras la reducción de la imagen 37 en el canal R del campo de MRK 501.

La Figura 5.5 muestra la reducción de la imagen 43 en el canal R del campo de OQ 530, observando el efecto en las columnas de píxeles dañados y una franja horizontal en la parte superior. La Figura 5.6 muestra la reducción del efecto de columnas de píxeles oscuros y aumento de contraste de la imagen 43 en el canal V del campo de OQ 530.

Todas las imágenes presentan en la parte superior una franja horizontal de píxeles más oscurecidos. Este defecto está más marcado en el canal R, pero también aparece en el canal V. La franja no llega a desaparecer tras la reducción, aunque sí se degrada considerablemente.

5.2. Análisis de la PSF

Una vez reducidas las series de imágenes de 1959+650, MRK 501 y OQ 530, se sometió cada imagen al control de calidad basado en el *seeing* medio de su sección cuadrada central de 2048×2048 según lo explicado en la

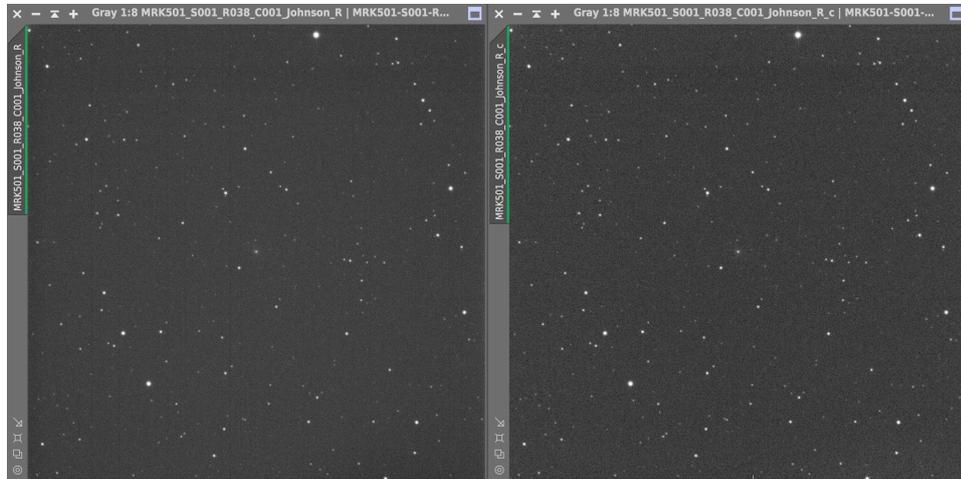


Figura 5.3: *Imagen 38 de MRK 501 en canal R, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).*

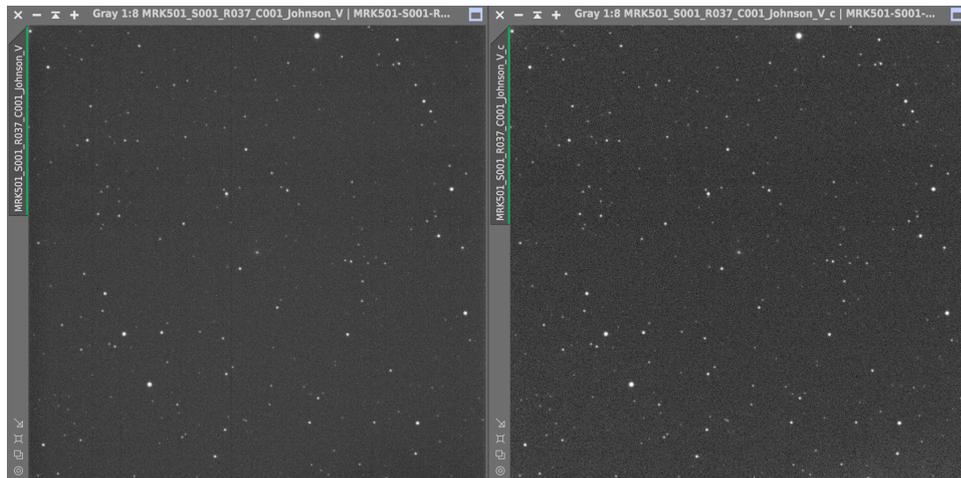


Figura 5.4: *Imagen 37 de MRK 501 en canal V, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).*

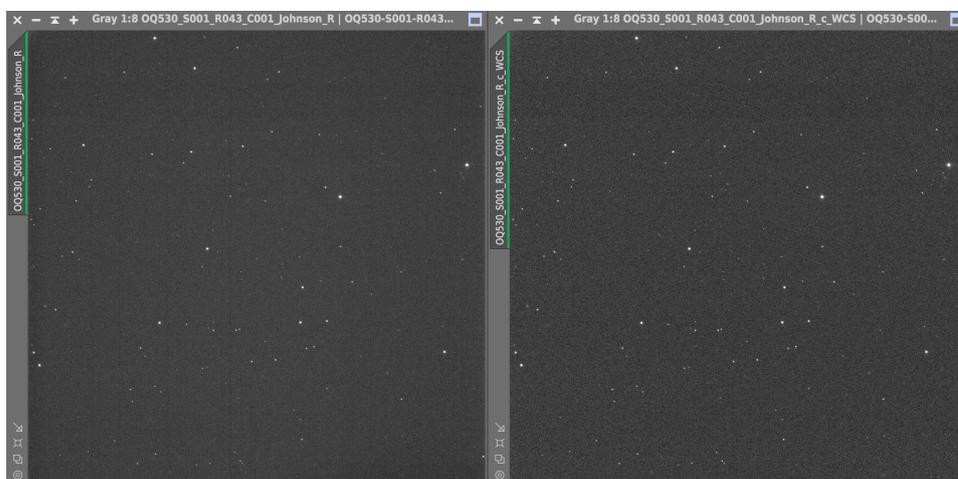


Figura 5.5: Imagen 43 de OQ 530 en canal R, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).

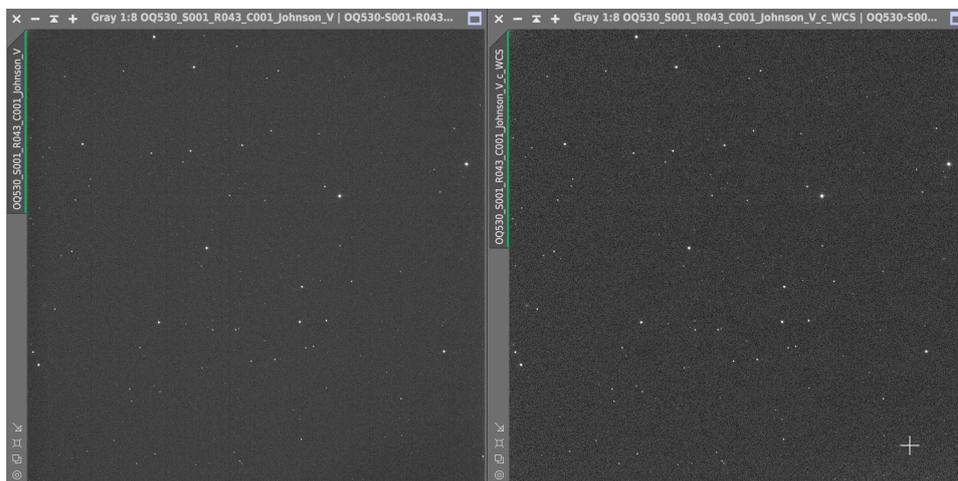


Figura 5.6: Imagen 43 de OKQ530 en canal V, antes (izquierda) y después de reducirla (derecha).

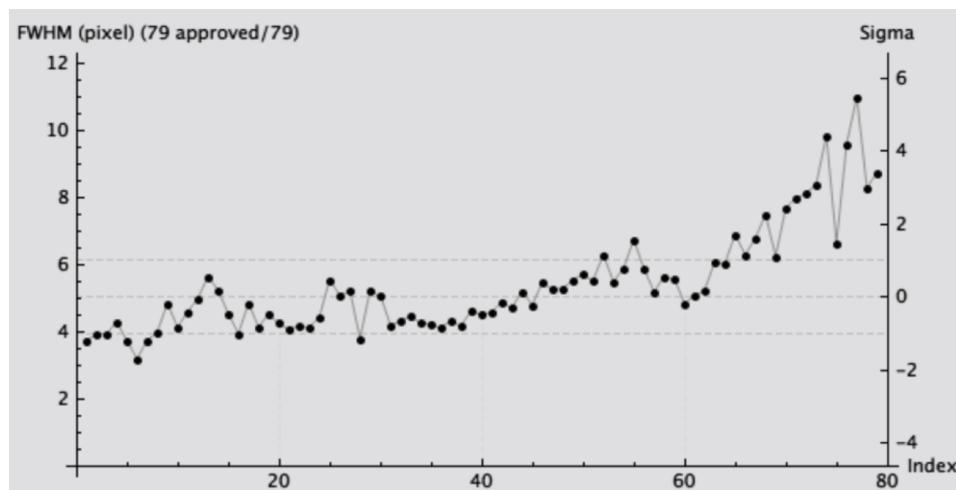


Figura 5.7: FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal V del campo 1ES 1959+650. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.

sección 3.2.

Las Figuras 5.7 y 5.8 muestran la FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en los canales V y R del campo 1ES 1959+650. Como podemos apreciar, la mayoría de imágenes tienen un *seeing* por debajo de $6px$, que equivale a $3.3arcsec$, que se puede considerar de calidad intermedia. Hemos descartado por lo tanto las imágenes R61 a R75 de las series de ambos canales por encontrarse todas las del canal R por encima de un *seeing* de $6px$, indicando un cambio en las condiciones de la noche que hace recomendable no usar este segmento de la serie. Además, se comprobó que la imagen R26 en canal V tenía un 16% más de residuo en el ajuste de la PSF a las estrellas de la imagen. La inspección visual de la imagen indicó una doble exposición desplazada posiblemente debida a una vibración o fallo de *tracking* de la montura. Por ello, también la imagen R26 fue descartada.

Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran la FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en los canales V y R del campo MRK 501. Es fácil comprobar que el *seeing* de la primera noche de observación de MRK 501 es realmente malo. Salvo las imágenes MRK501-S001-R00[2-4], todo el resto de imágenes tienen PSF alrededor de $10px$. La segunda noche de observación tiene un *seeing* muy bueno, por debajo de $4px$ en el canal V y rondando los $4px$ en el canal

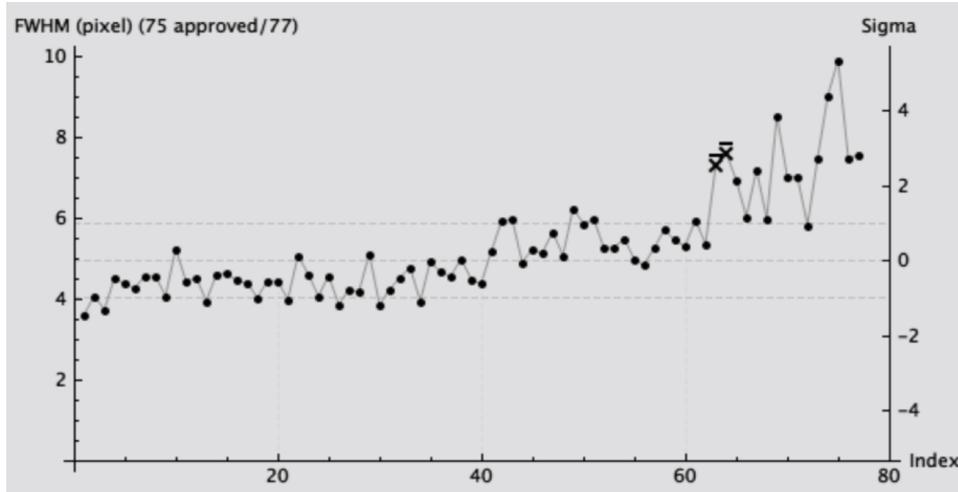


Figura 5.8: FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal R del campo 1ES 1959+650. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.

R. Así pues, tras establecer un corte por *seeing* de 5px, se descartaron las 80 imágenes de la primera noche de observación de MRK 501 y únicamente se utilizaron las imágenes de la segunda noche para el estudio de fotometría.

Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran la FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en los canales V y R del campo OQ 530. Con muy buena primera noche y una segunda noche intermitente, el *seeing* de la serie en V se encuentra dentro del rango [2.6, 7.8]px. Con el objetivo de quedarnos con la mayor cantidad de muestras con una calidad aceptable, establecimos

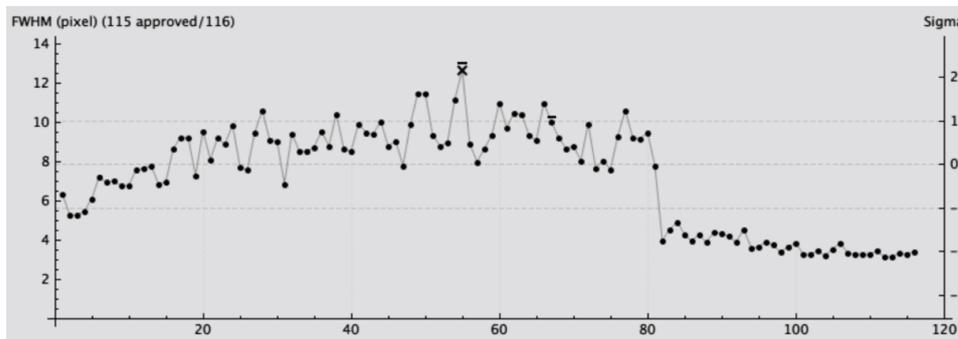


Figura 5.9: FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal V del campo MRK 501. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.

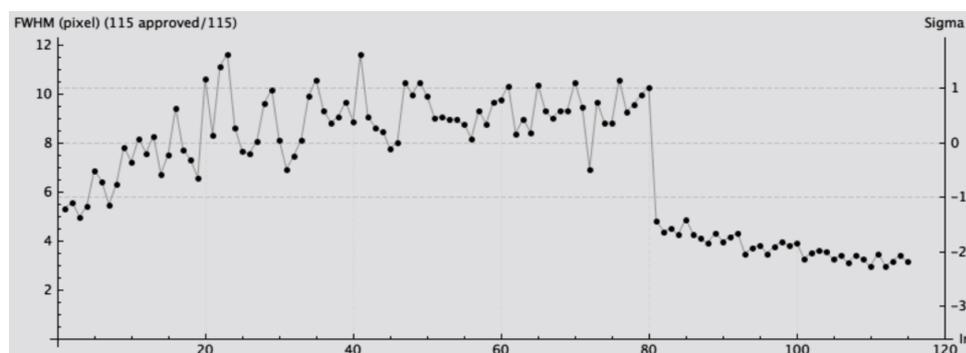


Figura 5.10: *FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal R del campo MRK 501. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.*

el corte por *seeing* en $5.6px$, por lo que se descartamos las imágenes R11, R15, R16, R18, R27, R29 y R30 de la segunda noche.

5.3. Fotometría de Apertura

Se realizó fotometría de apertura de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 y las estrellas de referencia de sus respectivos campos en las imágenes que superaron el control de calidad basado en *seeing*. Las estrellas de referencia utilizadas son las incluidas en las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 y sus coordenadas se establecieron visualmente comparando los campos de las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 con los de Vizier¹.

Se estableció un diámetro de apertura 3 veces la FWHM de la PSF media de las imágenes de cada serie. Así pues, para las series en los canales V y R de 1ES 1959+650 se estableció una apertura de $18px$, para MRK 501 se estableció una apertura de $15px$ y para OQ 530 se estableció una apertura conservadora de $15px$ aunque las condiciones de algunas horas de la primera noche daban para reducir la apertura a $9px$. En todos los casos se utilizó un anillo cuadrado de $30px \times 30px$ para estimar el flujo de fondo de cielo mediante modelo de residuo de Multiscale Median Transform (MTT) con 8 capas.

¹<http://vizier.u-strasbg.fr>

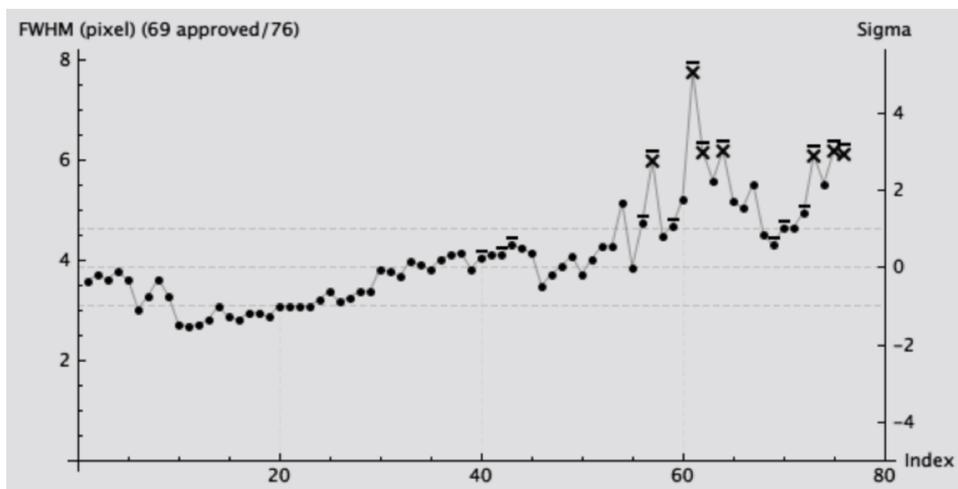


Figura 5.11: FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal V del campo OQ 530. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.

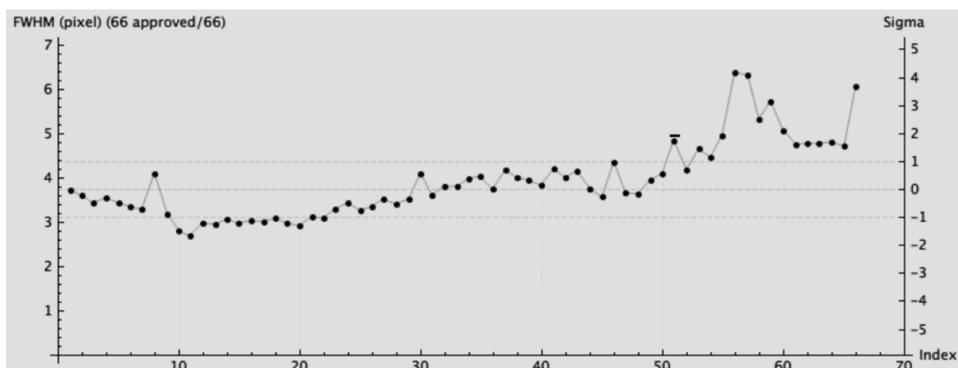


Figura 5.12: FWHM de la PSF de la serie de imágenes adquiridas en el canal R del campo OQ 530. El eje X representa el índice de las imágenes del objeto ordenadas por fecha de adquisición y el eje Y representa la FWHM en píxeles.

Tabla 5.1: *Magnitudes estándar medias \bar{m} , mínimas (Min), máximas (Max), el rango Δm y el ratio SNR de las series obtenidas de los objetos BL Lac para los canales R y V.*

Objeto	Canal	\bar{m}	$[Min, Max], \Delta m$	SNR
1ES 1959+650	V	14.28	[14.19,14.33], 0.13	87.83
	R	13.89	[13.83, 13.93], 0.10	116.13
MRK 501	V	13.95	[13.93,13.97], 0.04	171.16
	R	14.50	[14.48,14.52], 0.04	200.13
OQ 530	V	16.07	[15.76,16.27], 0.51	20.42
	R	15.63	[15.45,15.76], 0.31	25.71

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.4, se calculó la magnitud instrumental de los objetos y estrellas de referencia a partir de la estimación de flujos por fotometría de apertura y se utilizó fotometría diferencial para estimar la magnitud estándar del objeto. En el caso del campo OQ 530 se utilizaron las transformaciones entre sistemas fotométricos para calcular la magnitud del canal R de las estrellas de referencia a partir de las magnitudes U, B y V disponibles en *Frankfurt Quasar Monitoring*. El coeficiente de correlación lineal de los flujos de las estrellas de referencia y las magnitudes estándar en *Frankfurt Quasar Monitoring* fue muy alta. Las correlaciones de los flujos en V y R del campo 1ES 1959+650 fue superior a 0.99. Para el canal V de MRK 501, el coeficiente fue superior a 0.999 y para el canal R superó siempre 0.98. Los coeficientes de correlación lineal de las estrellas de referencia para el campo OQ 530 en los canales V y R superaron el 0.999.

La tabla 5.1 muestra las magnitudes estándar medias \bar{m} , mínimas (Min), máximas (Max), el rango Δm y el ratio SNR de las series obtenidas de los objetos BL Lac para los canales R y V. Cabe destacar el buen ratio señal/ruido obtenido en todas las series, lo que nos permite sacar conclusiones de nuestras microvariaciones.

5.4. Curvas de luz

Una vez obtenidas las magnitudes estándar m_R y m_V de las series de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530, podemos obtener las curvas de luz de nuestras observaciones representando las magnitudes respecto a las

Tabla 5.2: *Componentes principales senoidales de las curvas de luz de 1ES 1959+650 y OQ 530 en los canales V y R que muestran posibles microvariabilidades.*

Objeto	Canal	$f(\text{días}^{-1})$	$P(s)$	$A(\text{u.a.})$	ϕ
1ES 1959+650	V	6.934	12500 ± 300	0.357	0.672
	V	11.456	7500 ± 300	0.014	0.782
	V	15.977	5400 ± 300	0.015	0.990
	R	7.1258	12100 ± 300	0.031	0.523
	R	15.143	5700 ± 300	0.010	0.782
	R	3.563	24300 ± 300	0.027	0.232
MRK 501	V	46.25	1800 ± 300	0.008	0.327
	R	33.41	2600 ± 300	0.005	0.942
OQ 530	V	5.423	15900 ± 300	0.080	0.148
	R	3.451	25000 ± 300	0.064	0.767

fechas julianas de observación.

La Figura 5.13 representa la curva de luz de la observación de 1ES 1959+650 durante la noche del 12 de junio de 2018.

La Figura 5.14 representa la curva de luz de la observación de MRK 501 durante la noche del 18 de junio de 2018.

La Figura 5.15 representa la curva de luz de la observación de OQ 530 durante las noches del 15 y 17 de junio de 2018.

5.5. Periodos de microvariabilidad

La adquisición de imágenes realizada en este estudio únicamente posibilita la detección de microvariabilidades en los objetos BL Lac, es decir, de variabilidades de horas. La Tabla 5.2 muestra las componentes principales senoidales calculadas mediante Period 04 de las curvas de luz de 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 en los canales V y R, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.7.

Los periodos de variabilidad para los canales V y R de 1ES 1959+650 son muy similares, por lo que resulta plausible que se haya observado una microvariabilidad de con dos componentes. La componente frecuencia de mayor

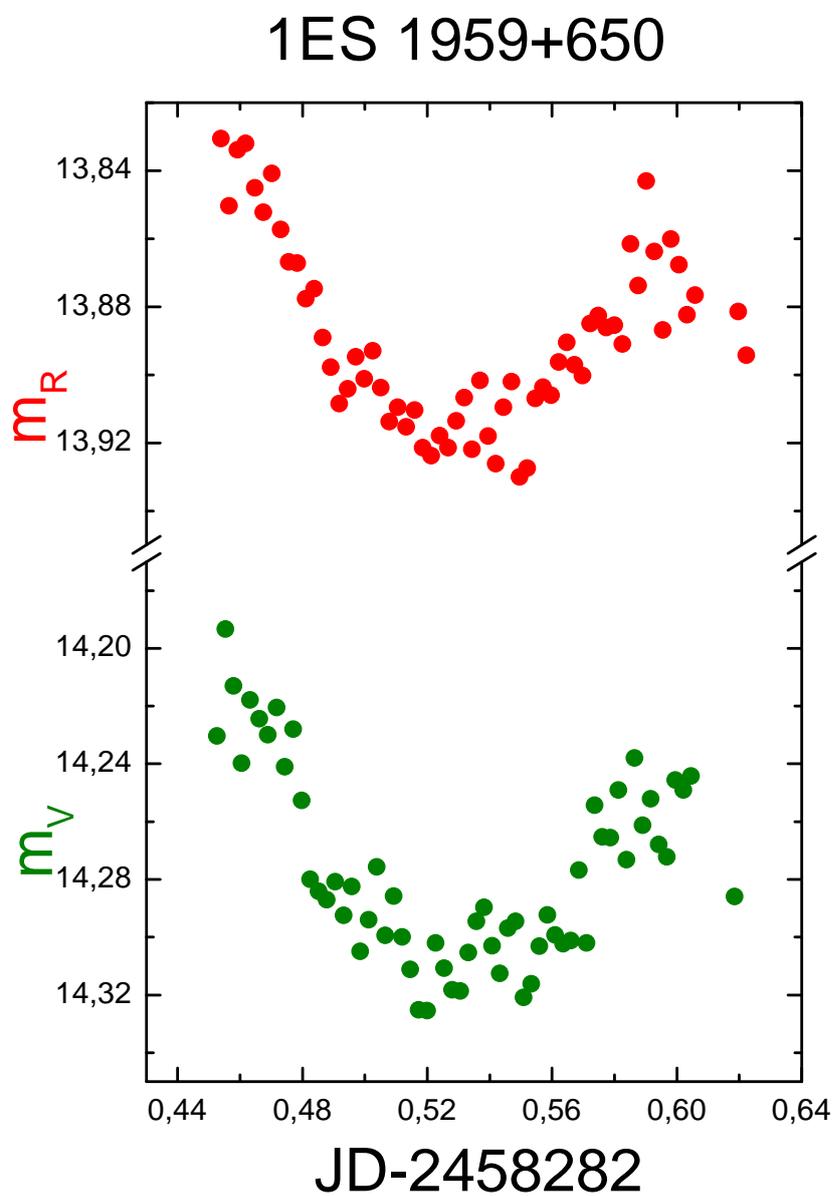


Figura 5.13: Observaciones intradía en bandas V y R de 1ES 1959+650. El error de medida de la magnitud observada es de 0.03 y el error de medida del eje temporal es de 300s.

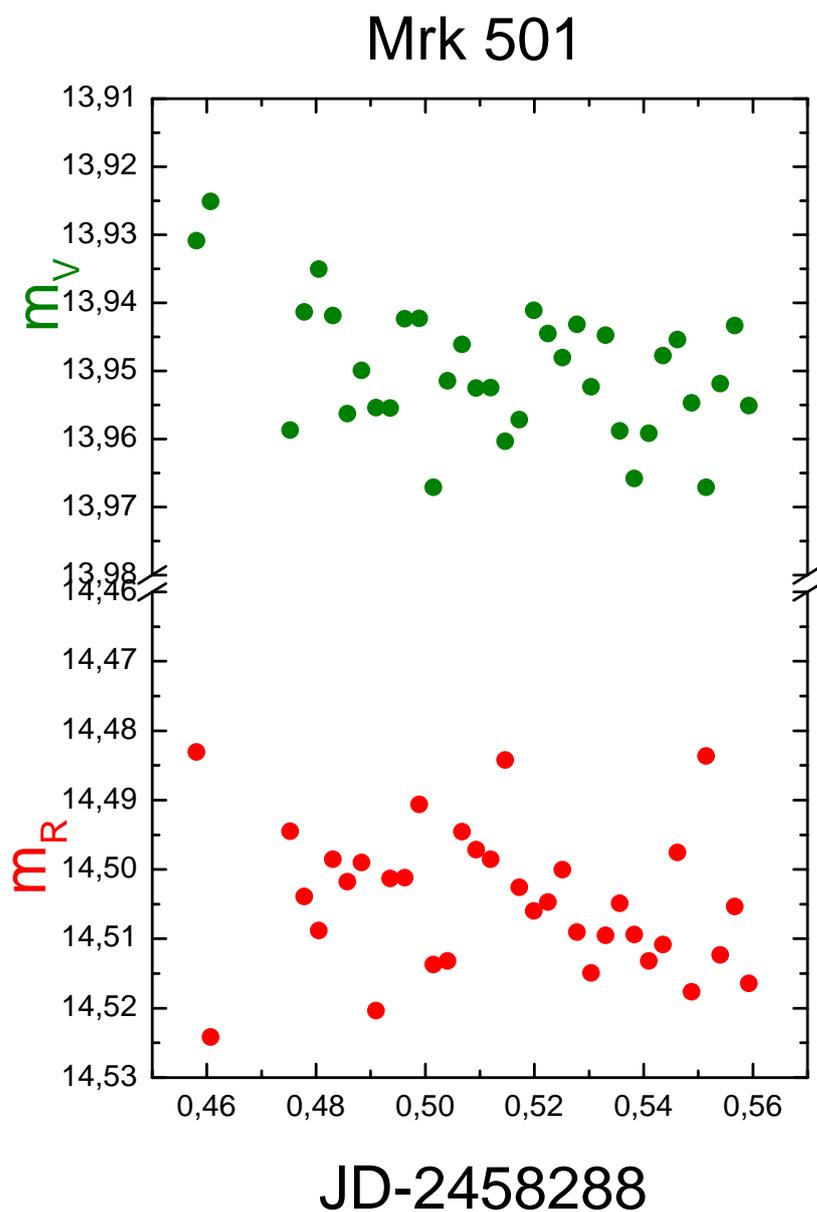


Figura 5.14: Observaciones intradía en bandas V y R de MRK 501. El error de medida de la magnitud observada es de 0.03 y el error de medida del eje temporal es de 300s.

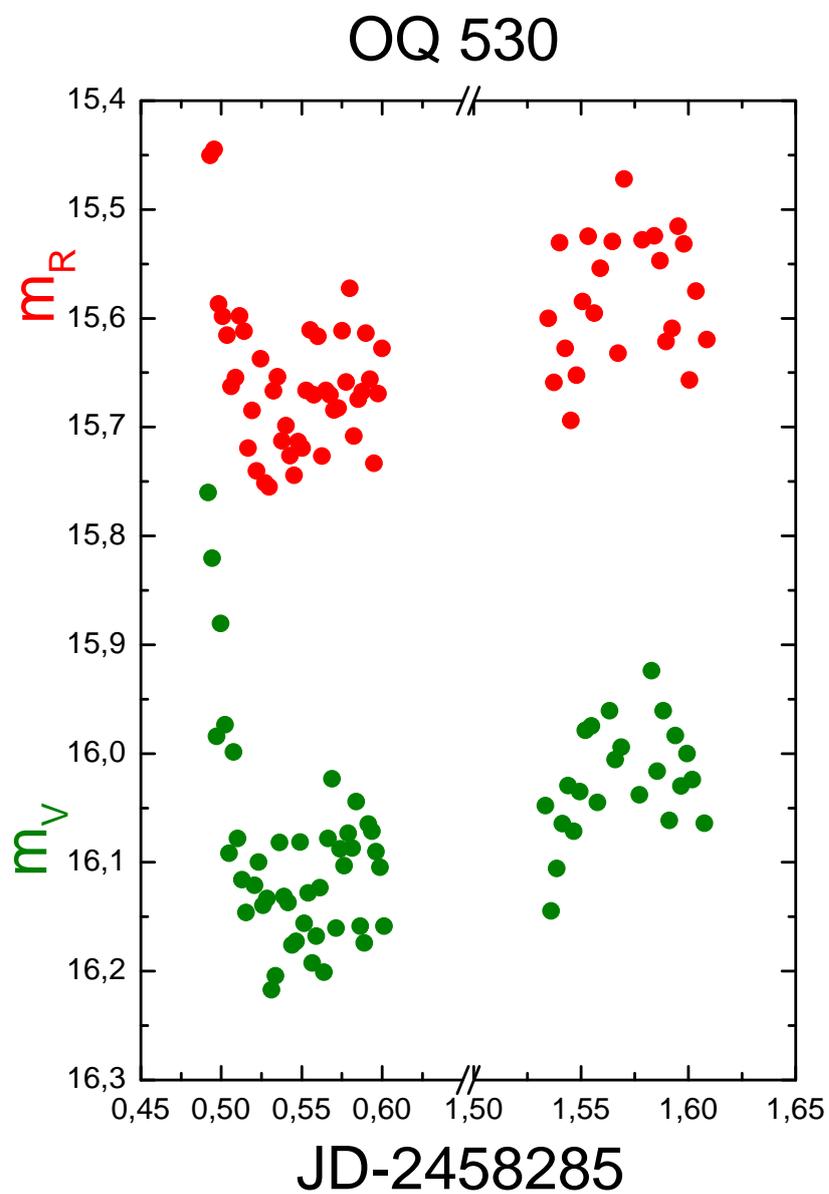


Figura 5.15: Observaciones intradía en bandas V y R de OQ 530. El error de medida de la magnitud observada es de 0.03 y el error de medida del eje temporal es de 300s.

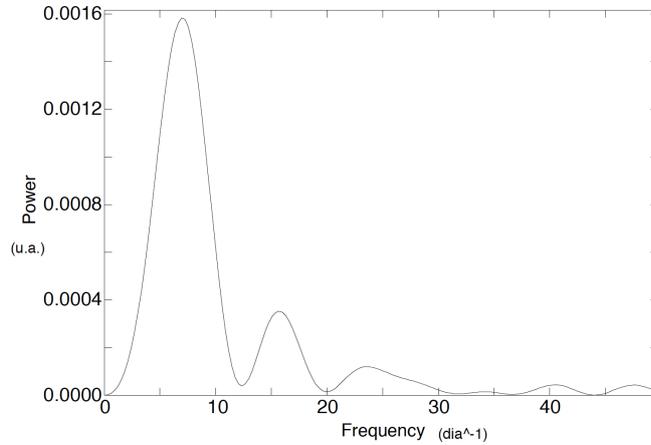


Figura 5.16: *Espectro en frecuencias de la curva de luz en el canal V de 1ES 1959+560.*

amplitudes es la de periodo $12500 \pm 300s$ y $12100 \pm 300s$ en V y R, respectivamente. El ajuste de las series temporales se completan con dos componentes más en cada canal, que no coinciden en sus periodos. Es muy posible que estas componentes sean armónicos obtenidos al aplicar la transformada de Fourier a series temporales con escasos ciclos observados.

La Figura 5.16 muestra el espectro en frecuencias de la curva de luz en el canal V de 1ES 1959+560. La Figura 5.17 el ajuste de la curva de luz del canal V de 1ES 1950+650 a las tres componentes principales senoidales mostradas en la Tabla 5.2.

La Figura 5.18 muestra el espectro en frecuencias de la curva de luz en el canal R de 1ES 1959+560. La Figura 5.19 el ajuste de la curva de luz del canal R de 1ES 1950+650 a las tres componentes principales senoidales mostradas en la Tabla 5.2.

Por otro lado, los periodos de variabilidad para los canales V y R de MRK 501 no son similares ni se ajoinasa la serie temporal, por lo que descartamos la detección de microvariabilidades mediante nuestro método.. Por su parte, los periodos de variabilidad para los canales V y R de OQ 530 no son similares, por lo que no es inmediato afirmar la posibilidad de haber observado un fenómeno común en ambos.

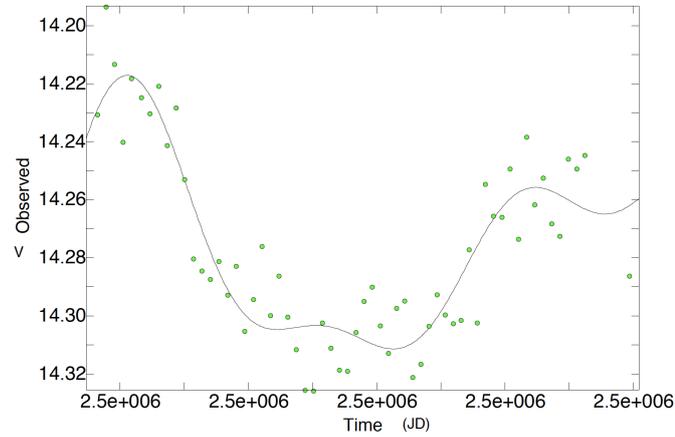


Figura 5.17: Ajuste de la curva de luz del canal V de 1ES 1950+650 a las tres componentes principales senoiales. El error de medida de la magnitud observada es de 0.03 y el error de medida del eje temporal es de 300s.

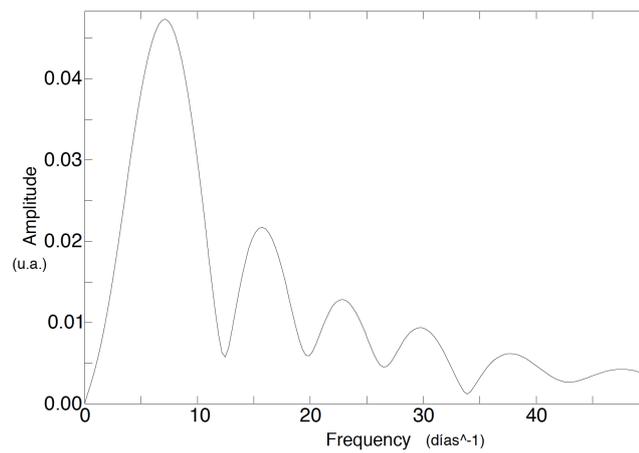


Figura 5.18: Espectro en frecuencias de la curva de luz en el canal R de 1ES 1959+560.

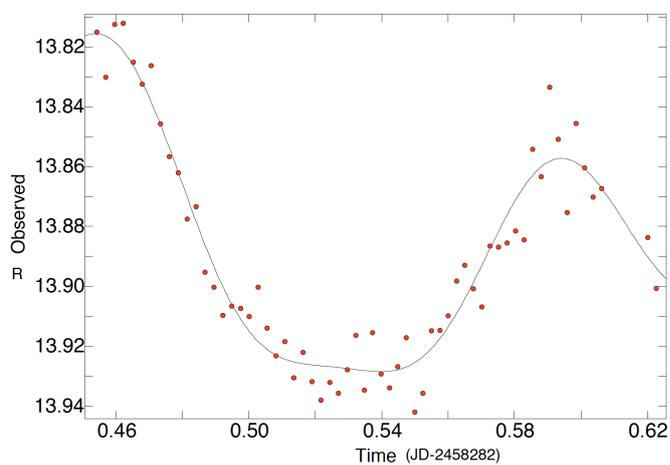


Figura 5.19: Ajuste de la curva de luz del canal R de 1ES 1950+650 a las tres componentes principales senoidales. El error de medida de la magnitud observada es de 0.03 y el error de medida del eje temporal es de 300s.

Capítulo 6

Discusión

En el capítulo de discusión extraemos parámetros físicos del agujero negro del 1ES 1959+650 compatible con la microvariabilidad detectada en las curvas de luz observadas. También se hace una comparación de nuestros resultados con los reportados en el estado del arte. El capítulo concluye con una sección de limitaciones del estudio.

6.1. Hallazgos en 1ES 1959+650

Las curvas de luz de 1ES 1959+650 mostradas en la Figura 5.13 son compatibles con una posible microvariabilidad del brillo en los canales V y R de Johnson-Cousins con un periodo $P = 12100 \pm 300s$.

A partir de este periodo, ajustando el corrimiento al rojo ($z = 0.047$) y utilizando la ecuación 2.9, estimamos el radio de la órbita estable del agujero negro de Kerr como $r_{+E*} = 790 \pm 20R_{\odot}$.

Estimado el radio de la órbita estable r_{+E*} , podemos calcular mediante 2.5 la masa del agujero negro para el rango $0 \leq \chi \leq 1$ en los casos de que el disco de acreción gira en el mismo sentido que el agujero negro (-) y en el caso que gira en sentido contrario (+). La Figura 6.1 muestra

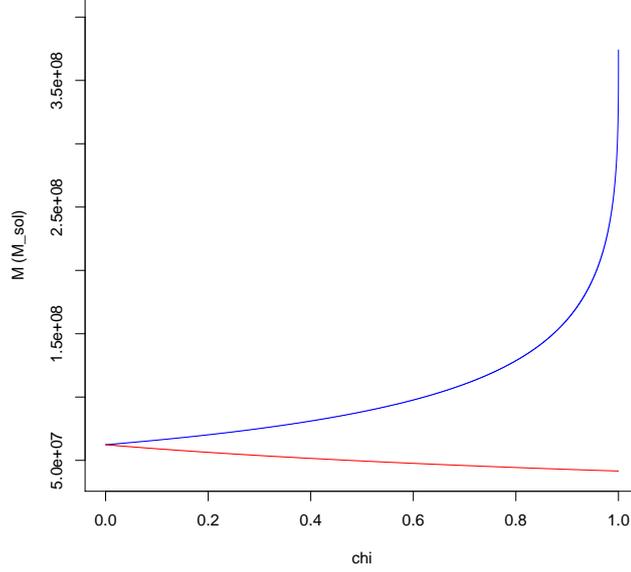


Figura 6.1: Masas del agujero negro (en M_{\odot}) en función de χ para la órbita estable observada r_{+E^*} del disco de acreción del objeto 1ES 1959+650 en el caso que gire en el mismo sentido (azul) y que gire en sentido contrario (rojo).

que masa tendría el agujero negro de 1ES 1959+650 en función del valor de χ para la órbita estable observada r_{+E^*} del disco de acreción en el caso que gire en el mismo sentido (– en azul) y que gire en sentido contrario (+ en rojo). Según nuestro cálculo, la masa del agujero negro estaría en el rango $[6.2 \times 10^7, 37.4 \times 10^7] \pm 1 \times 10^6 M_{\odot}$ en el caso en que el disco de acreción gire en el mismo sentido que el agujero negro y en el rango $[4.2 \times 10^7, 6.2 \times 10^7] \pm 1 \times 10^6 M_{\odot}$ en el caso de giro contrario. De los resultados, podemos comprobar que la masa del agujero negro es mayor conforme aumenta la velocidad de giro en el caso de que su disco de acreción gire en el mismo sentido, y disminuye con χ en el caso de sentidos de giro contrario.

Sustituyendo en 2.10 el radio de estabilidad r_{+E} por la estimación 2.9 y $M = \frac{mc^2}{G}$, siendo $m = \frac{r_{+E}}{[3+B \mp \sqrt{(3-A)(3+A+2B)}]}$ de la ecuación 2.5, obtenemos que

$$\Omega_{LT} = \frac{4\pi(1+Z)}{P[3+B \mp \sqrt{(3-A)(3+A+2B)}]^2}, \quad (6.1)$$

cuyo periodo de precesión de Lense-Tirring $P_{LT} = \frac{2\pi}{\Omega_{LT}}$ se muestra en la

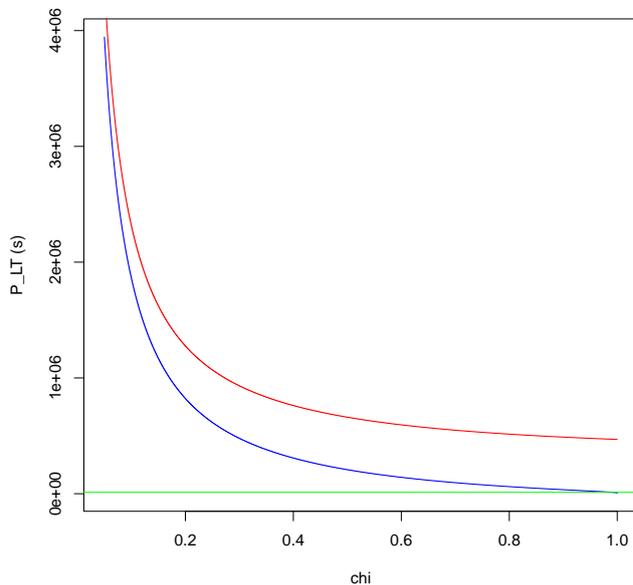


Figura 6.2: *Periodos de precesión de Lense-Tirring del disco de acreción 1ES 1959+650 en el caso de giro en mismo sentido (azul) y sentido contrario (rojo) comparado con el periodo observado en la microvariabilidad (verde).*

Figura 6.2 en función de χ para los casos $(-)$ y $(+)$.

Si suponemos que la microvariabilidad observada en 1ES 1959+650 es debida a la precesión de Lense-Tirring, el periodo de precesión $P_{LT} = \frac{2\pi}{\Omega_{LT}}$ puede igualarse al periodo observado de variabilidad, siendo compatible con un agujero negro con ratio de momento angular respecto a su masa $\chi = 0.99 \pm 0.01$ con un disco de acreción que gira en el mismo sentido que el agujero negro. Establecido χ mediante el periodo de precesión P_{LT} , la masa del agujero negro compatible con nuestras observaciones del objeto 1ES 1959+650 puede establecerse como $M = 2.6 \times 10^8 \pm 1 \times 10^7 M_{\odot}$ y su radio $r_+ = 550 \pm 20 R_{\odot}$.

1ES 1959+650 está siendo monitorizado regularmente mediante el instrumento SPOL CCD Imaging/Spectropolarimeter en el Steward Observatory de la University of Arizona (36) como parte del estudio multicanal de soporte a Fermi¹. Esta monitorización realiza una adquisición diaria en ciclos

¹<http://james.as.arizona.edu/~psmith/Fermi/Objects/targets.html>

de 10 días², que incluye los canales V y R. Durante los días 19 a 24 de junio de 2018, adquirieron en V la serie $[14.23 \pm 0.02, 14.20 \pm 0.02, 14.18 \pm 0.02, 14.19 \pm 0.02, 14.21 \pm 0.02, 14.21 \pm 0.06]$, compatible con nuestra adquisición $m_V = 14.19 \pm 0.02$ durante la noche del 12 de junio de 2018. Sin embargo, los datos disponibles en el registro SPOL no permiten un estudio de microvariabilidad como el nuestro.

Varios son los estudios que han estimado la masa del agujero negro en 1ES 1959+650. El 2 y 3 de Septiembre de 2009 (JD 2455077, JD 2455078), Yuan et al. en (42) obtuvieron variabilidad intradía con escalas de tiempo entre 23' y 3.72h. Basándose en sus resultados, Yuan et al. estiman la masa del agujero negro de Schwarzschild en el rango $M_s = [0.69, 6.7] \times 10^7 M_\odot$ y para el agujero negro de Kerr $M = [0.42, 4.09] \times 10^8 M_\odot$. Falomo et al. en (13) calcularon una masa del agujero negro central de $M = 1.3 \times 10^8 M_\odot$ basándose en la velocidad de las estrellas del halo galáctico. Kurtanidze et al. (24) calcularon una masa del agujero negro central de $M = 3.16 \times 10^8 M_\odot$.

El modelo SSC de dos zonas presentado en (32) se ajustó satisfactoriamente a la distribución espectral de energía observada en su estudio multibanda en las bandas óptica, rayos X y rayos γ . Una primera zona interior del chorro relativista podría ser responsable principalmente de la producción de máximos de sincrotrón y de $R\gamma$ de alta energía mientras que una segunda zona produciría la emisión menos variable en óptico, UV y emisión de $R\gamma$. El muestreo diario de los datos en óptico utilizado en este estudio no permite un análisis de microvariabilidad como el nuestro.

Contrariamente a nuestro resultado, Gaur *et al.* en (17) no encontraron ninguna componente de microvariabilidad en su monitorización de 24 días en los canales B y R. Además del número de días de monitorización, la principal diferencia metodológica de los estudios está en la obtención de las curvas de luz. Mientras que nuestro estudio realizó las curvas de luz tras el ajuste de las observaciones a magnitudes estándar, el estudio de Gaur *et al.* compara la magnitud instrumental del objeto 1ES 1959+650 con dos estrellas de referencia, lo que puede enmascarar la variación de flujo en intervalos de

²http://james.as.arizona.edu/~psmith/Fermi/DATA/Objects/ALLphot_10.html

horas.

6.2. Hallazgos en MRK 501

La curva de luz del objeto MRK 501 no contiene ninguna componente que podamos considerar claramente un observable de microvariabilidad utilizando la metodología utilizada en nuestro estudio.

Saduc *et al.* en (34) detectaron una docena microvariabilidades de entre 6 y 10 minutos en MRK 501 durante una monitorización de cuatro noches en el canal R. Su método incluyó la substracción del flujo de la galaxia huésped. En su estudio, detectaron las microvariabilidades mediante microfulguraciones definidas como un aumento del 10% sobre el flujo aquietescente de la curva de luz. Debido a la corta duración de los fenómenos asumieron que su procedencia era debida a diferente desvío del haz relativista durante las micro-fulguraciones respecto al estado quiescente de entre 1° y 2° .

6.3. Hallazgos en OQ 530

Las componentes extraídas de las curvas de luz del objeto OQ 530 para los canales V y R son de diferente periodo, lo que no es inmediato afirmar la posibilidad de haber observado un fenómeno común en ambos y no se ha profundizado en su estudio.

Carini y Miller (8) observaron microvariabilidades de 0.05 magnitudes en el canal V con periodos de 20 minutos a diferencia de nuestros resultados que superan los 250 minutos de periodo de variación. En su estudio, estimaron la masa del agujero negro de Schwarzschild $6 \times 10^8 M_\odot$.

6.4. Limitaciones del estudio

La principal limitación del estudio es la longitud de las series temporales utilizadas para obtener las curvas de luz. Como consecuencia, los resultados extraídos de las curvas de luz no pueden tomarse como definitivos, en especial los hallazgos de microvariabilidad del objeto 1ES 1959+650. Otra gran limitación de nuestro estudio ha sido realizar la estimación del radio de estabilidad mediante el periodo de variación observado. Esta estimación asume que la materia rota a la velocidad de la luz en el radio de estabilidad y que además es observada mediante variabilidad de su flujo de radiación, lo que no se justifica. No se ha justificado la mayor variación porque se obtiene en el canal R mayor variabilidad que en el canal V del objeto 1ES 1959+650. Por último, no se han realizado ajustes de las observaciones a otros modelos de microvariabilidad disponibles en la literatura.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las conclusiones finales del estudio. Revisaremos además las futuras líneas de trabajo para continuar con la investigación.

7.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio nos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- **Se han adquirido series temporales de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 durante cinco noches del 12 al 18 de junio de 2018 con el telescopio T50 del Observatorio de Aras de los Olmos con una extinción atmosférica mínima de 1.11, 1.00 y 1.20, respectivamente.** Como resultado, se ha adquirido un total de 75, 125 y 73 imágenes en el canal R, y 75, 125 y 74 imágenes en el canal V para los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530, respectivamente. Además, se adquirieron 11 imágenes bias, 118 imágenes dark y 16 imágenes flat el 19 de junio de 2018.
- **Se ha realizado la reducción de todas las imágenes mediante el script BatchPreprocessing del *software* PixInsight Core Ver-**

sion 1.8. El nivel de bias de las las imágenes de objetos, flats y darks fue substraído mediante las imágenes bias. La corriente de oscuridad de todas las imágenes de objetos y flats fueron corregidas mediante las imágenes darks. La respuesta multiplicativa de los pixeles de las imágenes de objetos fueron corregidas mediante las imágenes flats. Al no disponer de imágenes dark de 6s y 8s, se utilizó el método *optimize dark frames* para calcular máster darks sintéticos necesarios para corregir los flats de estas exposiciones.

- **El análisis de control de calidad de cada imagen se basó en el seeing medio de su sección cuadrada central.** En la serie de 1ES 1959+650 se descartaron 15 imágenes de cada canal por tener un seeing superior a $6px, 3.3''$, además de otra imagen por un posible problema de vibración o traking detectado mediante el residuo del ajuste de la PSF a las estrellas. La primera noche de la serie MRK 501 tuvo un seeing de $10px$, por lo que se tuvieron que descartar las 80 imágenes de cada canal. En la serie OQ 560 se descartaron 6 imágenes para cada canal de la segunda noche por un seeing mayor de $5.6px$.
- **Se ha realizado fotometría de los objetos y estrellas de referencia de los campos de 1ES 1959+650 con una apertura de 18px, MRK 501 con una apertura de 15px y OQ 530 con 15px suprimiendo el flujo de fondo de cielo de un anillo cuadrado de $30px \times 30px$ mediante el residuo de MTT de 8 capas.** El ratio señal/ruido en el canal V fueron de 87, 171 y 20 y en canal R fueron 116, 200 y 25, para los tres objetos, respectivamente.
- **Se han obtenido magnitudes estándar de los objetos BL Lac mediante la relación lineal del flujo observado de la estrellas de referencia a las magnitudes estándar del catálogo Frankfurt Quasar Monitoring, obteniendo una correlación superior a 0.99.** Para OQ 530 se utilizó las transformaciones entre sistemas fotométricos para calcular la magnitud del canal R de las estrellas de referencia a partir de las magnitudes U, B y V disponibles en *Frankfurt Quasar Monitoring*. Se han utilizado los errores de medida en el ajuste lineal del flujo observado a las magnitudes estándar. La fotometría diferencial de 1ES 1959+650 obtenida en nuestro estudio es compatible con la monitorización realizada del 19 al 24 de junio de 2018 por

el SPOL CCD Imaging/Spectropolarimeter en el Steward Observatory de la University of Arizona (36).

- Se han obtenido las curvas de luz de las magnitudes estándar en los canales R y V de los objetos 1ES 1959+650 del 12 de junio, MRK 501 del 18 de junio y OQ 530 del 15 y 17 de junio de 2018.
- Las curvas de luz de 1ES 1959+650 presentan una variabilidad con la primera componente senoidal de periodos $12500 \pm 300s$ y $12100 \pm 300s$ en V y R, respectivamente. No se han encontrado variabilidades con componentes claras en las curvas de luz de MRK 501 y OQ 560.
- En las curvas de luz del 12 de junio de 2018 del objeto 1ES 1959+650 se detectó una posible microvariabilidad con un quasi-periodo de $12100 \pm 300s$ en los canales V y R compatible con una precesión de Lense-Tirring de su disco de acreción. Esta posible microvariabilidad es compatible con un agujero negro de Kerr de masa $M = 2.6 \times 10^8 \pm 1 \times 10^7 M_{\odot}$ y radio de horizonte de sucesos $r_+ = 550 \pm 20 R_{\odot}$ con un ratio momento angular-masa $\chi = 0.99 \pm 0.01$ y cuyo disco de acreción con radio de estabilidad $r_{+E*} = 790 \pm 20 R_{\odot}$ gira en el mismo sentido que el agujero negro.

7.2. Líneas futuras

A partir de este trabajo podemos abrir varias líneas futuras de estudio de objetos BL Lac:

- Un estudio inmediato utilizando nuestras propias adquisiciones podría aplicar la metodología de Saduc *et al.* en (34) para detectar microvariabilidades mediante micro-fulguraciones de MRK 501 y OQ 530.
- La metodología puesta a punto en este proyecto para la adquisición, reducción, fotometría, extracción de componentes principales senoidales,

cálculo de errores y cálculo de parámetros físicos de BL Lacs puede utilizarse en el estudio de series de imágenes en banda óptica e infrarroja de BL Lacs y otros AGNs.

- La adquisición de series de un año de los objetos 1ES 1959+650, MRK 501 y OQ 530 nos permitiría consolidar los resultados sobre microvariabilidad de este estudio y estudiar su variabilidad de periodos más largos.
- La adquisición de polarización óptica de objetos BL Lac permitiría estudiar el campo magnético del chorro relativista.
- Hacer públicos los resultados de fotometría obtenidos pueden complementar monitorizaciones internacionales como la llevada a cabo por el SPOL CCD Imaging/Spectropolarimeter como apoyo al proyecto Fermi y al *Frankfurt Quasar Monitoring*.

Bibliografía

- [1] A. A. Abdo, M. Ackermann, W. B. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, B. M. Baughman, K. Bechtol, R. Bellazzini, B. Berenji, R. D. Blandford, E. D. Bloom, G. Bogaert, E. Bonamente, A. W. Borgland, J. Bregeon, A. Brez, M. Brigida, P. Bruel, T. H. Burnett, G. A. Caliandro, R. A. Cameron, P. A. Caraveo, J. M. Casandjian, E. Cavazzuti, C. Cecchi, E. Charles, A. Chekhtman, C. C. Cheung, J. Chiang, S. Ciprini, R. Claus, J. Cohen-Tanugi, S. Colafrancesco, J. Conrad, L. Costamante, S. Cutini, C. D. Dermer, A. d. Angelis, F. d. Palma, S. W. Digel, E. d. C. e. Silva, P. S. Drell, R. Dubois, D. Dumora, Y. Edmonds, C. Farnier, C. Favuzzi, E. C. Ferrara, P. Fleury, W. B. Focke, L. Foschini, M. Frailis, L. Fuhrmann, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, N. Gehrels, S. Germani, B. Giebels, N. Giglietto, F. Giordano, M. Giroletti, T. Glanzman, G. Godfrey, I. A. Grenier, M.-H. Grondin, J. E. Grove, L. Guillemot, S. Guiriec, A. K. Harding, R. C. Hartman, M. Hayashida, E. Hays, S. E. Healey, R. E. Hughes, G. Johannesson, A. S. Johnson, R. P. Johnson, W. N. Johnson, M. Kadler, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, N. Kawai, M. Kerr, J. Knodlseder, M. L. Kocian, F. Kuehn, M. Kuss, L. Latronico, S.-H. Lee, M. Lemoine-Goumard, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, A. Makeev, M. Marelli, M. N. Mazziotta, J. E. McEnery, S. McGlynn, C. Meurer, P. F. Michelson, W. Mitthumsiri, T. Mizuno, A. A. Moiseev, C. Monte, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, S. Murgia, P. L. Nolan, E. Nuss, M. Ohno, T. Ohsugi, R. Ojha, N. Omodei, E. Orlando, J. F. Ormes, D. Paneque, J. H. Panetta, D. Parent, M. Pepe, M. Pesce-Rollins,

- F. Piron, T. A. Porter, S. Raino, R. Rando, M. Razzano, A. Reimer, O. Reimer, T. Reposeur, L. C. Reyes, S. Ritz, L. S. Rochester, A. Y. Rodriguez, R. W. Romani, M. Roth, F. Ryde, H. F.-W. Sadrozinski, R. Sambruna, D. Sanchez, A. Sander, P. M. S. Parkinson, C. Sgro, M. S. Shaw, E. J. Siskind, D. A. Smith, P. D. Smith, G. Spandre, P. Spinelli, J.-L. Starck, M. S. Strickman, D. J. Suson, H. Tajima, H. Takahashi, T. Tanaka, J. B. Thayer, J. G. Thayer, D. J. Thompson, L. Tibaldo, O. Tibolla, D. F. Torres, G. Tosti, A. Tramacere, T. L. Usher, N. Vilchez, V. Vitale, A. P. Waite, P. Wang, B. L. Winer, K. S. Wood, T. Ylinen, M. Ziegler, T. F. L. Collaboration, P. G. Edwards, M. M. Chester, D. N. Burrows, M. Hauser, and S. Wagner. Fermi/large area telescope discovery of gamma-ray emission from the flat-spectrum radio quasar PKS 1454?354. *The Astrophysical Journal*, 697(1):934.
- [2] J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, P. Antoranz, A. Armada, C. Baixeras, J. A. Barrio, H. Bartko, D. Bastieri, J. K. Becker, W. Bednarek, K. Berger, C. Bigongiari, A. Biland, R. K. Bock, P. Bordas, V. Bosch-Ramon, T. Bretz, I. Britvitch, M. Camara, E. Carmona, A. Chilingarian, J. A. Coarasa, S. Commichau, J. L. Contreras, J. Cortina, M. T. Costado, V. Curtef, V. Danielyan, F. Dazzi, A. D. Angelis, C. Delgado, R. d. l. Reyes, B. D. Lotto, E. Domingo-Santamaria, D. Dorner, M. Doro, M. Errando, M. Fagiolini, D. Ferenc, E. Fernandez, R. Firpo, J. Flix, M. V. Fonseca, L. Font, M. Fuchs, N. Galante, R. J. Garcia-Lopez, M. Garczarczyk, M. Gaug, M. Giller, F. Goebel, D. Hakobyan, M. Hayashida, T. Hengstebeck, A. Herrero, D. Hohne, J. Hose, D. Hrupec, C. C. Hsu, P. Jacon, T. Jogler, R. Kosyra, D. Kranich, R. Kritzer, A. Laille, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, J. Lopez, M. Lopez, E. Lorenz, P. Majumdar, G. Maneva, K. Mannheim, O. Mansutti, M. Mariotti, M. Martinez, D. Mazin, C. Merck, M. Meucci, M. Meyer, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, S. Mizobuchi, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, J. Ninkovic, E. Ona-Wilhelmi, N. Otte, I. Oya, D. Paneque, M. Panniello, R. Paoletti, J. M. Paredes, M. Pasanen, D. Pascoli, F. Pauss, R. Pegna, M. Persic, L. Peruzzo, A. Piccioli, E. Prandini, N. Puchades, A. Raymers, W. Rhode, M. Ribo, J. Rico, M. Rissi, A. Robert, S. Rugamer, A. Saggion, T. Saito, A. Sanchez, P. Sartori, V. Scalzotto, V. Scapin, R. Schmitt, T. Schweizer, M. Shayduk, K. Shinozaki, S. N. Shore, N. Sidro, A. Sillanpaa, D. Sobczynska, A. Stamerra, L. S.

- Stark, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, D. Tescaro, M. Teshima, D. F. Torres, N. Turini, H. Vankov, V. Vitale, R. M. Wagner, T. Wibig, W. Wittek, F. Zandanel, R. Zanin, and J. Zapatero. Variable very high energy γ -ray emission from markarian 501. *The Astrophysical Journal*, 669(2):862.
- [3] J. M. Bai, G. Z. Xie, K. H. Li, X. Zhang, and W. W. Liu. Photometric monitoring of three BL lacertae objects in 1993-1998. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 136:455–460.
- [4] J. M. Bardeen. Timelike and null geodesics in the kerr metric. pages 215–239.
- [5] G. Bhatta. Radio and γ -ray variability in the BL lac PKS 0219 -164: Detection of quasi-periodic oscillations in the radio light curve. *The Astrophysical Journal*, 847(1):7.
- [6] G. Bhatta and J. R. Webb. Microvariability in BL lac: Zooming into the innermost blazar regions. *arXiv:1711.08698 [astro-ph]*.
- [7] J. Bosch-Bailach, O. Brevia, J. M. Garcia-Gomez, S. Moros, V. Peris, and A. Vera. Fotometria de objetos bl lac.
- [8] M. T. Carini, H. R. Miller, and B. D. Goodrich. The timescales of the optical variability of blazars. i - OQ 530. *The Astronomical Journal*, 100:347–355.
- [9] L. Carrasco, D. Dultzin-Hacyan, and I. Cruz-Gonzalez. Periodicity in the BL lac object OJ287. *Nature*, 314(6007):146–148.
- [10] S. K. Chakrabarti and P. J. Wiita. Spiral shocks in accretion disks as a contributor to variability in active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, 411:602–609.
- [11] O. I. Chashchina, L. Iorio, and Z. K. Silagadze. Elementary derivation of the lense-thirring precession. *arXiv:0808.0397 [gr-qc]*.
- [12] D. Darling. Schwarzschild black hole.
- [13] R. Falomo, J. K. Kotilainen, and A. Treves. The black hole mass of BL lacertae objects from the stellar velocity dispersion of the host galaxy. *The Astrophysical Journal Letters*, 569:L35–L38.

- [14] J. H. Fan, O. Kurtanidze, Y. Liu, G. M. Richter, R. Chanishvili, and Y. H. Yuan. Optical monitoring of two brightest nearby quasars, PHL 1811 and 3c 273. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 213(2):26.
- [15] J. H. Fan, Q. S. Peng, J. Tao, B. C. Qian, and Z. Q. Shen. Optical observations of 3c 273 from 2000 to 2008. *The Astronomical Journal*, 138(5):1428.
- [16] E. D. Feigelson, H. Bradt, J. McClintock, R. Remillard, C. M. Urry, S. Tapia, B. Geldzahler, K. Johnston, W. Romanishin, P. A. Wehinger, S. Wyckoff, G. Madejski, D. A. Schwartz, J. Thorstensen, and B. E. Schaefer. H 0323 + 022 - a new BL lacertae object with extremely rapid variability. *The Astrophysical Journal*, 302:337–351.
- [17] H. Gaur, A. C. Gupta, A. Strigachev, R. Bachev, E. Semkov, P. J. Wiita, S. Peneva, S. Boeva, N. Kacharov, B. Mihov, and E. Ovcharov. Quasi-simultaneous two-band optical variability of the blazars 1es 1959+650 and 1es 2344+514. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420(4):3147–3162.
- [18] D. Giannios, D. A. Uzdensky, and M. C. Begelman. Fast TeV variability in blazars: jets in a jet. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 395(1):L29–L33.
- [19] B. Giebels, E. D. Bloom, W. Focke, G. Godfrey, G. Madejski, K. T. Reilly, P. M. S. Parkinson, G. Shabad, R. M. Bandyopadhyay, G. G. Fritz, P. Hertz, M. P. Kowalski, M. N. Lovellette, P. S. Ray, M. T. Wolff, K. S. Wood, D. J. Yentis, and J. D. Scargle. Observation of x-ray variability in the BL lacertae object 1es 1959+65. 571:763–770.
- [20] P. A. Hughes, H. D. Aller, and M. F. Aller. The university of michigan radio astronomy data base. i - structure function analysis and the relation between BL lacertae objects and quasi-stellar objects. *The Astrophysical Journal*, 396:469–486.
- [21] S. Jester, D. P. Schneider, G. T. Richards, R. F. Green, M. Schmidt, P. B. Hall, M. A. Strauss, D. E. V. Berk, C. Stoughton, J. E. Gunn, J. Brinkmann, S. M. Kent, J. A. Smith, D. L. Tucker, and B. Yanny. The

- SDSS view of the palomar-green bright quasar survey. *The Astronomical Journal*, 130(3):873–895.
- [22] S. Karaali, S. Bilir, and S. Tuncel. New colour transformations for the sloan photometry, and revised metallicity calibration and equations for photometric parallax estimation. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 22:24–28.
- [23] A. K. Kembhavi and J. V. Narlikar. *Quasars and Active Galactic Nuclei: An Introduction*. Cambridge University Press, 1 edition edition.
- [24] O. M. Kurtanidze, S. D. Tetradze, G. M. Richter, M. G. Nikolashvili, G. N. Kimeridze, and L. A. Sigua. Ten years optical photometry of TeV BL lacertae objects. volume 408, page 266.
- [25] W. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-To Approach*. Springer.
- [26] A. Marscher. Variability of blazars and blazar models over 38 years. *Galaxies*, 4(4):37.
- [27] D. Nakamoto. The enigma that is BL lacertae. *Sky & Telescope*, September 2018:30–35.
- [28] K. Nalewajko, D. Giannios, M. C. Begelman, D. A. Uzdensky, and M. Sikora. Radiative properties of reconnection-powered minijets in blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(1):333–346.
- [29] H. Netzer. Revisiting the unified model of active galactic nuclei. 53(1):365–408.
- [30] J. B. Oke and J. E. Gunn. The distance of BL lacertae. 189:L5.
- [31] P. Padovani and P. Giommi. A sample-oriented catalogue of bl-lacertae objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 277:1477.
- [32] S. R. Patel, A. Shukla, V. R. Chitnis, D. Dorner, K. Mannheim, B. S. Acharya, and B. J. Nagare. Broadband study of blazar 1es 1959+650 during flaring state in 2016. *Astronomy & Astrophysics*, 611:A44.
- [33] J. Quinn, I. H. Bond, P. J. Boyle, S. M. Bradbury, A. C. Breslin, J. H. Buckley, A. M. Burdett, J. B. Gordo, D. A. Carter-Lewis, M. Catanese,

- M. F. Cawley, D. J. Fegan, J. P. Finley, J. A. Gaidos, T. Hall, A. M. Hillas, F. Krennrich, R. C. Lamb, R. W. Lessard, C. Masterson, J. E. McEnery, P. Moriarty, A. J. Rodgers, H. J. Rose, F. W. Samuelson, G. H. Sembroski, R. Srinivasan, V. V. Vassiliev, and T. C. Weekes. The flux variability of markarian 501 in very high energy gamma rays. *The Astrophysical Journal*, 518(2):693.
- [34] A. Sadun, M. Asadi-Zeydabadi, B. Mills, and J. Moody. Statistical analysis of the microvariable AGN source mrk 501. *Galaxies*, 6:20.
- [35] R. Scarpa, C. M. Urry, R. Falomo, J. E. Pesce, R. Webster, M. O'Dowd, and A. Treves. The hubble space telescope survey of BL lacertae objects: Gravitational lens candidates and other unusual sources. *The Astrophysical Journal*, 521(1):134.
- [36] P. S. Smith, E. Montiel, S. Rightley, J. Turner, G. D. Schmidt, and B. T. Jannuzi. Coordinated fermi/optical monitoring of blazars and the great 2009 september gamma-ray flare of 3c 454.3. *arXiv:0912.3621 [astro-ph]*.
- [37] M.-H. Ulrich, L. Maraschi, and C. M. Urry. Variability of active galactic nuclei. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35:445–502.
- [38] C. M. Urry. BL lac objects and blazars: Past, present, and future.
- [39] P. Veron and M. P. Veron. UBV sequences in the fields of mark 421 and mark 501. 25:287–290.
- [40] M.-P. Veron-Cetty and P. Veron. A catalogue of quasars and active nuclei: 10th edition. 374:92–94.
- [41] R. V. Wagoner. Relativistic and newtonian diskoseismology. 51:828–834.
- [42] Y. H. Yuan, J. H. Fan, and H. J. Pan. Optical photometry of the BL lac object 1es 1959+650. *The Astronomical Journal*, 150:67.