



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTRONOMÍA

INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

VARIABILIDAD FOTOPOLARIMÉTRICA DE LARGO-PERÍODO DEL BLÁZAR 3C 454.3

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

PRESENTA:

ROJAS LUIS MIRIAM YURIDIA

TUTORA:

DRA. ERIKA M. BENÍTEZ LIZAOLA
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

MÉXICO D.F., JUNIO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Con todo mi amor

*A mi madre:
Juana Maria Luis Diaz*

*A mi hermano:
Victor Hugo Rojas Luis*

Agradecimientos

Primeramente agradezco a mi directora de tesis la Dra. Erika Benítez por su apoyo, paciencia y confianza en mi para este trabajo.

A mi comité académico Sergio Mendoza y Jesús González por su conocimiento científico y apoyo durante mi formación académica.

A Dra. Deborah Dulzin, Dra. Elena Jiménez, Dr. José de Diego, Dr. Raúl Mújica por los comentarios aportados para la mejora de este trabajo, muchas gracias.

A mi amada madre Juana Maria Luis Diaz por el apoyo incondicional y por el inmenso amor que me das todos los días, te amo. A mi hermano Victor Rojas Luis por estar con nosotras siempre. A Miguel y Ximena Luis por ser esa chispa de alegría que me dan.

A mi novio Arturo Reyes Almanza por compartir tu presencia, nuevas experiencias tomados de la mano, pero sobre todo por el amor que compartimos, te amo.

A Martin Gerardo por tu característico profesionalismo, entrega y entusiasmo con que haces las cosas para beneficio de los demás, por tus enseñanzas y sabiduría que transmites, te admiro y te quiero.

A mis maestros Dr. Alfredo López Ortega y Dra. Isaura Fuentes por sus consejos y apoyo académico, por enseñarme lo que es un científico comprometido y reposable, muchas gracias.

A Carmen Tovar y Eder López por compartir su entusiasmo, solidaridad y sus conocimientos que me han compartido. A Jorge Silva por su sincera y autentica amistad, por su simpático sentido del humor, te quiero.

Mis amigos Laura Verde, Marco Valerio y Erik por las muestras de cariño y apoyo en aquel momento difícil en mi vida, que nuestra amistad perduró muchos años mas, les quiero mucho, infinitas gracias. Mis amigas Selene, Yanet, Andrea, Nancy, Izturi, Fabiola, Dulce, Martha, Lore, Manet, Julia por su amable y maravillosa amistad cada una de manera única y especial, gracias.

Mis compañeros de maestría Donaji, Veronica, Felipe, Oriana, Jeffrey, Ruben por su buena compañía en los años de maestria, por compartir desvelos y nuevas aventuras.

A todas la personas que directamente han tenido que ver en mi desarrollo como persona y como estudiante les doy las gracias.

Al proyecto PAPIIT con clave IN111514 por el apoyo económico para la terminación de este trabajo.

Índice general

Índice de figuras	2
Índice de tablas	6
1. Introducción	7
1.1. Núcleo Activo de Galaxia	7
1.1.1. Esquema Unificado	9
1.2. El fenómeno Blázar	10
1.2.1. El Modelo del Jet relativista	12
1.2.2. Movimiento superlumínico	12
1.2.3. Direccionamiento por Efecto Doppler	13
1.2.4. Amplificación por Efecto Doppler	15
1.3. La SED de los blázares	16
1.4. Secuencia blázar	18
1.5. Variabilidad Polarimétrica	18
1.6. Objetivos	20
2. 3C 454.3	22
2.1. Observaciones en radio	27
2.2. SED	30
3. Proyecto-SPM	34
3.1. Observaciones y reducción de datos	35
3.2. Resultados observacionales	36
3.3. Análisis Polarimétrico	46
4. Análisis de periodicidad	49
4.1. Rob Per	49
4.2. Datos observacionales	52
4.3. Función Ventana	56
5. Conclusiones	58
Bibliografía	60

Índice de figuras

1.1.	Características de los núcleos activos de galaxias (Krolik, 1999)	8
1.2.	Representación esquemática de la comprensión del fenómeno AGN en el modelo unificado (Beckmann and Shrader, 2012)	10
1.3.	Distribución de energía espectral de Mrk 421, todas las observaciones realizadas durante la campaña de multifrecuencia de 19 de Enero y 1 de Junio de 2009. La leyenda izquierda informa los instrumentos y los flujos medidos. Donde se ve la emisión multifrecuencia desde longitudes de onda de radio hasta rayos gama. (Abdo and Ackermann, 2011)	11
1.4.	Movimiento superlumínico del Blázar 3C279. El núcleo estacionario es el punto brillante de color rojo. Los nudos apuntan a 2° con respecto a nuestra línea de visión, y se mueve a una velocidad real de $0,997c$. Estas cinco imágenes son parte de un conjunto mayor de veintiocho imágenes realizadas con el VLBA de 1991-1997. Estos datos se obtuvieron a una frecuencia de 22 GHz (longitud de onda 1.2 cm). Imagen de NRAO/AUI.	13
1.5.	En el lado superior izquierdo tenemos una fuente eyectando material cuya dirección de movimiento forma un ángulo θ respecto a la línea de visión. Ver texto.	14
1.6.	Sistema de referencia K' moviéndose a una velocidad \vec{v} respecto al sistema en reposo K	15
1.7.	Beaming de la radiación emitida isotrópicamente en el marco K'	15
1.8.	La SED de 3C 454.3 del 30 del 31 de Mayo al 1 de Junio de 2008 (MJD 54617-54618). Los triángulos negros representa a radio, cuadrados rojos (azul) a Swift/UVOT, círculo rojo (azul) a Swift/XRT, círculos verdes a RXTE /PCA y las estrellas negras representan a AGILE / GRID. La delgada línea sólida representan el disco de acreción, los puntos la radiación sincrotrón, los guiones el SSC, los guiones y puntos el external Compton en el disco y los triples puntos el external Compton de la BLR. La línea continua gruesa representa la suma de todos los componentes individuales. (Vercellone et al., 2010)	17
1.9.	Distribuciones espectrales de energía para los tipos de blázares LBL y HBL. Los blázares FSRQ y LBL alcanzan su primer pico en las bandas de milimétrico e infrarroja, mientras que los HBL (conocido como objetos BL Lac) alcanzan su primer máximo en bandas de UV y rayos X. El segundo pico en energías GeV para FSRQ y LBL y en energías mucho más altas TeV para HBL . (Urry, 1999)	19

1.10.	Las variaciones del grado de polarización (arriba) y el ángulo de posición (inferior) de la S5 0716 + 71 en octubre de 2011. (Falomo et al., 2014)	19
2.1.	La curva de luz en el óptico (arriba) y la de radio (abajo) mostrada, comineza de finales de 1966 a septiembre de 2005. La franja amarilla indica el período de la campaña WEBT de 2004 a 2005. En el panel inferior, los puntos negros representan la curva de luz a 8 GHz. Las curvas roja, verde y azul, representan las interpolaciones de las curvas de luz a 5, 14.5 y 37 GHz, respectivamente (Villata et al., 2006)	22
2.2.	La SED de 3C 454.3. Los símbolos azul y rojo se refieren a las observaciones realizadas el 2-3 de julio y 18-19 de diciembre de 2006.(Raiteri et al., 2007).	23
2.3.	Curva de luz de 3C 454.3 en la banda de 100 MeV-300 GeV obtenida por LAT. El recuadro muestra un período variable de 7 de julio al 2 de agosto de 2008) (Abdo and et al., 2009).	24
2.4.	Imágenes capturadas tomadas por <i>FERMI</i> mostrando claramente el cambio en el flujo de noviembre a diciembre de 2009. Crédito: NASA	25
2.5.	Curva de luz de 3C454.3 medida con el <i>FERMI</i> -LAT desde su lanzamiento. El recuadro: curva de luz histórica. Los puntos negros son de EGRET (Hartman et al., 1999) y los puntos azules son de AGILE (Striani et al., 2010). Las barras de error son solamente estadística Abdo et al. (2011).	26
2.6.	La intensidad total a 43 GHz (contornos) y la intensidad de polarización lineal (escala de color). Los segmentos de recta muestran el plano de polarización y letras identifican los componentes en el jet Jorstad et al. (2010b)	27
2.7.	Curvas de luz de 3C 454.3 en diferentes frecuencias. Las líneas de puntos indican que los tiempos de las eyecciones de los componentes superlumínicos K1, K2 y K3, las líneas continuas muestran las incertidumbres en los tiempos de eyección; Segundo panel: círculos abiertos datos del telescopio Liverpool en la bandas U, triángulos abiertos datos de Swift UVOT en la bandas de U y llenos triángulos datos de Swift UVOT en la banda UW1; cuarto panel círculos abiertos datos a 345 GHz y quinto panel círculos abiertos datos a 43 GHz se desplazan por 15 Jy para mayor claridad. Las etiquetas muestran los estallidos más destacados en diferentes longitudes de onda Jorstad et al. (2010b).	28
2.8.	Curvas de luz de rayos γ (negro), del núcleo a 7 mm (rojo), K09 (verde) y K10 (violeta); líneas rojas muestran los tiempos de paso de los nudos K09 y K10 a través del núcleo de VLBI Jorstad et al. (2012).	29
2.9.	Imágenes de intensidad total (contornos) y polarizados (escala de color) a 43 GHz d, los segmentos de línea representan la dirección de polarización lineal; círculos rojos indican la posición y el tamaño (FWHM) de los componentes superlumínicas (Jorstad et al., 2013).	30

2.10.	Las SED de 3C 454.3 en diferentes épocas. Panel superior: la SED en el año 2000. El panel medio: la SED durante el gran estallido óptica en 2005. Los diferentes colores corresponden a diferentes conjuntos de datos estrictamente simultáneos. Panel inferior: la SED el 26 de julio de 2007. Las líneas continuas y discontinuas corresponden a nuestro modelo. La línea punteada es la contribución del disco de acreción (que se supone un cuerpo negro simple) (Ghisellini et al., 2007).	31
2.11.	SED de 3C 454.3 MJD 54673-54693. Los triángulos negros representa a radio, cuadrados rojos (azul) a Swift/UVOT, círculo rojo (azul) a Swift/XRT, círculos verdes a RXTE /PCA y las estrellas negras representan a AGILE / GRID. La delgada línea sólida representan el disco de acreción, los puntos la radiación sincrotrón, los guiones el SSC, los guiones y puntos el external Compton en el disco y los triples puntos el external Compton de la BLR. La línea continua gruesa representa la suma de todos los componentes individuales. (Vercellone et al., 2010) .	32
2.12.	Distribuciones espectral de energía desde las bandas del milímetro hasta los rayos gamma en tres épocas, las curvas con puntos representan la SED simuladas por el código TEMZ (negro) y un tiempo después (azul). Los fotones semillas de radiación no térmica son de disco Mach, Wehrle et al. (2012)	33
3.1.	Curva de luz de 3C 454.3 obtenida durante $\sim 6,46$ años. El panel superior muestra las variaciones de banda R, el panel medio del grado de polarización P (%) variaciones, y el panel inferior de las variaciones de ángulo de posición $\theta(^{\circ})$. El resultado más importante en está gráfica es la presencia de una enorme rotación a largo período que comienza el 4 de agosto de 2008 (-135.450°) y termina en el 19 de julio de 2012 d (328.80°) que corresponde a $\Delta\theta = 464,20^{\circ}$ en 1445 días.	37
3.2.	Curva de luz del Ciclo I. Se muestra las dos rotaciones de ángulo de polarización; la primera en sentido contrario a las manecillas del reloj y la segunda en sentido a las manecillas del reloj.	41
3.3.	Correlación entre la magnitud en la banda R y el ángulo de polarización con un coeficiente de correlación de Pearson de $r_{R-\theta} = 0,81 \pm 0,2$. . .	41
3.4.	Ciclo II, se muestra una rotación en sentido de las manecillas del reloj y otra en sentido contrario. Cuando la magnitud se encuentra en su máximo valor el grado de polarización está en su mínimo valor.	42
3.5.	Curva de luz en el Ciclo III, la fuente muestra su más alta actividad en todo nuestro período de observación. Con un valor de flujo máximo de 11.5 mJy (13.57 mag) y el máximo grado de polarización $P = 30.9 \pm 0.47$.	43
3.6.	Anticorrelación entre la magnitud y el grado de polarización con coeficiente de correación de Pearson de $r_{P-R} = -0.7 \pm 0.01$	44
3.7.	Curva de luz en el Ciclo IV, se muestra casi constante la magnitud y el grado de polarización. El máximo ángulo de polarización de 328.8° . . .	45
3.8.	Curva de luz del Ciclo V, el máximo grado de polarización de 14.65 % el 14 de agosto de 2013.	46

3.9. Plano de los parámetros absolutos de Stokes Q-U obtenidos utilizando todos los datos. Los valores medios obtenidos son $\langle Q \rangle = 0,058 \pm 0,06$ mJy y $\langle U \rangle = -0,034 \pm 0,08$ mJy.	47
3.10. Rotación en el Ciclo I	47
3.11. Rotación en el Ciclo V	48
4.1. Periodograma para todos los datos de San Pedro Mártir	52
4.2. Curva histórica en la banda R del blázar 3C 454.3	54
4.3. Periodograma de los datos históricos en la banda R de 3C 454.3	55
4.4. Función Ventana de SPM	56
4.5. Función Ventana de los datos históricos	57

Índice de tablas

3.1. Fotometría y polarización e la banda R de 3C 454.3	38
3.2. (Continuación)	39

Capítulo 1

Introducción

1.1. Núcleo Activo de Galaxia

En el Universo existen miles de millones de galaxias, las cuales sabemos conforman estructuras ligadas por gravedad, constituidas por estrellas, gas, polvo y según el modelo cosmológico de materia oscura fría (Λ CDM, del inglés “lambda cold dark matter”) también materia oscura.

Después de su formación, las galaxias comienzan su evolución cósmica la cual conlleva cambios importantes tanto en su morfología, como en la metalicidad, la masa, el contenido estelar, etc. Uno de los períodos más interesantes en la evolución de las galaxias ocurre cuando su brillo central aumenta tanto, que domina sobre la emisión la galaxia donde se hospeda este núcleo brillante. Este es el período donde se encuentran los llamados cuásares, que deben su nombre a que se observan como “objetos cuasi-estelares” pues la galaxia donde se hospedan queda completamente opacada por la alta luminosidad central.

Cuando las galaxias presentan intensa emisión nuclear, se les conoce como galaxias con núcleo activo, ó AGN (del inglés, “Active Galactic Nuclei”, término que usaremos en esta tesis de aquí en adelante). La familia de los AGN está dividida en dos tipos de fuentes: los AGN radio-fuertes, y los AGN radio-callados. Del total de galaxias en el universo, los AGN constituyen aproximadamente el 10 % y dentro de este porcentaje, aproximadamente 90 % son AGN radio-callados y 10 % son radio-fuertes. Esta dicotomía se descubrió desde los inicios del estudio del fenómeno AGN y aún no se entiende bien el porqué de esta división. Lo que sí es claro es que los objetos radio-fuertes presentan además otro tipo de características propias, las cuales son distintas en los radio-callados (Netzer, 2013). A diferencia de lo que sucede con los procesos de emisión en las estrellas (que son de origen térmico, pues se ajustan con una función de Planck) los AGN emiten luz en multifrecuencias a través de procesos no-térmicos. Observaciones

espectroscópicas en las bandas del óptico mostraron desde hace varias décadas que los AGN presentan en su espectro líneas de emisión muy anchas e intensas. En particular, el astrónomo Karl Seyfert descubre un cierto tipo de AGN, conocidos actualmente como galaxias Seyfert, las cuales se hospedan generalmente en espirales de tipo temprano, aunque también hay núcleos Seyferts hospedados en galaxias elípticas (Adams, 1977). A diferencia de los cuásares, las galaxias Seyfert al estar más cercanas a nosotros nos permiten observar la galaxia donde se hospedan y al mismo tiempo estudiar los procesos de emisión nucleares. Dentro de la familia de los AGN encontramos a los ya mencionados cuásares, los cuales en su momento fueron considerados los objetos más lejanos del universo, pero también a las radio galaxias (hay de dos tipos: de líneas anchas y de líneas angostas); a las galaxias Seyfert, a los LINERS y a los blázares.

Object	Pointlike	Broadband	Broad Lines	Narrow Lines	Radio	Variable	Polarized
Radio-loud quasars	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Some	Some
Radio-quiet quasars	Yes	Yes	Yes	Yes	Weak	Weak	Weak
Broad line radio galaxies	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Weak	Weak
Narrow line radio galaxies	No	No	No	Yes	Yes	No	No
OVV quasars	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
BL Lac Objects	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes
Seyferts type 1	No	Yes	Yes	Yes	Weak	Some	Weak
Seyferts type 2	No	Yes	No	Yes	Weak	No	Some
LINERS	No	No	No	Yes	No	No	No

Figura 1.1: Características de los núcleos activos de galaxias (Krolik, 1999)

El fenómeno AGN ha sido intensamente estudiado con el objetivo fundamental de explicar cuales son los procesos físicos que producen las altas luminosidades observadas, aunque en la actualidad queremos explicar muchas cosas más. Por ejemplo, como se enciende el núcleo, cómo se alimenta, que efecto tienen las fusiones de galaxias, que efecto tienen las galaxias que rodean a los AGN, queremos saber si el agujero negro central evoluciona con el AGN o no, si el AGN tiene que ver con los procesos de formación estelar, que fenómeno es el responsable del apagado de la actividad central, etc etc (Mo et al., 2010; Beckmann and Shrader, 2012). Sin embargo, no debemos olvidar que el modelo básico propuesto para explicar el encendido de la actividad nuclear fue propuesto hace más de 50 años (Zel'dovich and Novikov, 1964). Este modelo, llamado “modelo estándar” para los AGN propone que el encendido de la actividad nuclear se produce por la acreción de material hacia un agujero negro supermasivo ubicado en el centro de la galaxia que alberga al AGN. Este agujero negro es capaz de tragarse grandes cantidades de gas, polvo y estrellas (que son destrozadas por fuerzas de marea antes de ser engullidas por el agujero negro central). Durante el proceso el material cae hacia el núcleo moviéndose en espiral, es decir, es acretado hacia el centro lo cual

produce emisión que se observa principalmente en las bandas de los rayos X (Schneider, 2006; Netzer, 2013; Beckmann and Shrader, 2012)

1.1.1. Esquema Unificado

El conocido como “esquema unificado” propone que todos los AGN constituyen el mismo fenómeno, es decir, se encienden como lo propone el modelo estándar. Pero entonces por qué vemos distintos tipos de AGN? La diversidad de AGN es consecuencia de la orientación de la fuente con respecto a la visual del observador. De acuerdo al modelo estándar tenemos AGN de Tipo 1 y de Tipo 2. Los de Tipo 1 tienen líneas de emisión permitidas (son anchas, y la región donde se emiten se conoce como región de líneas anchas, ó “Broad Line Region”, BLR en adelante) en sus espectros y también líneas producidas por transiciones prohibidas. Las líneas prohibidas se producen en la región conocida como región de líneas angostas ó “Narrow line Region”, NLR en adelante. En el caso de los Tipo 2, éstos sólo muestran líneas producidas por la NLR. En ambos casos las líneas se encuentran sobrepuestas al continuo no-térmico. De esta forma, los AGN Tipo 1 tienen una orientación que nos permiten observar líneas producidas en la BLR y en la NLR. Los AGN Tipo 2 debido a su orientación sólo muestran las líneas producidas en la NLR, pues el toro de polvo que rodea al disco de acreción bloquea la emisión de la BLR (Schneider, 2006; Netzer, 2013; Beckmann and Shrader, 2012). No obstante, es importante considerar que en el caso de algunas galaxias Seyfert (divididas generalmente como Seyfert 1 y Seyfert 2) de tipo 2, haciendo estudios espectropolarimétricos se ha encontrado que carecen totalmente de BLR (Schneider, 2006; Netzer, 2013; Beckmann and Shrader, 2012). El esquema unificado se muestra en la Figura 1.2. De esta forma los AGN se pueden clasificar en:

Fuentes radio-calladas tenemos:

- Seyfert: estos objetos son en general menos luminosos que los quásares. Las Seyfert I son AGN tipo 1 y muestran líneas provenientes de la BLR y de la NLR. Por otra parte, las Seyfert II presentan líneas angostas ya que en estos objetos se observa principalmente la NLR y son AGN tipo 2 (ver Fig. 1.2).
- Quásares radio-callados (en inglés, radio-quiet quasars): se caracterizan por ser fuentes puntuales con índices de color muy azul, presentan líneas de emisión intensas y anchas y en general un alto desplazamiento al rojo.

Fuentes radio-fuertes tenemos:

- Radio galaxias: presentan fuerte emisión en radio proveniente del jet y sus espectros muestran líneas de emisión. Estos objetos se pueden separar según su potencia en longitudes de onda radio en de tipo: Fanaroff-Riley I (FR I) son más brillantes cerca del núcleo, y el brillo superficial disminuye hacia el exterior y Fanaroff-Riley II (FR II), el brillo superficial aumenta hacia el exterior. Estas a su vez se dividen en radio galaxias de línea ancha (BLRG) y línea angosta (NLRG).
- Blázares: el que el ángulo del jet con respecto a la línea de visión forman un ángulo muy pequeño (ver Fig. 1.2).

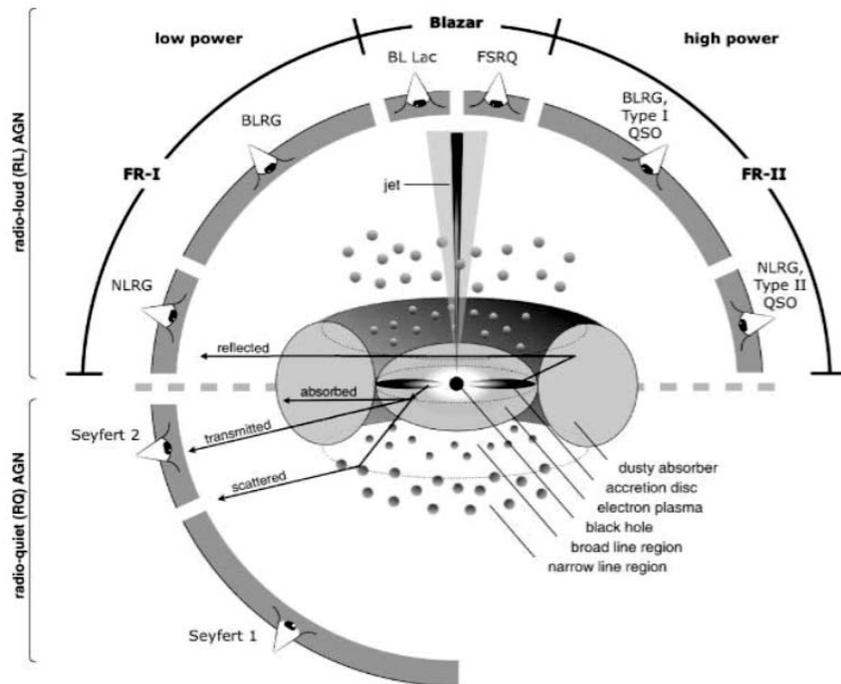


Figura 1.2: Representación esquemática de la comprensión del fenómeno AGN en el modelo unificado (Beckmann and Shrader, 2012)

1.2. El fenómeno Blázar

Como ya mencionamos antes, los blázares forman parte de la familia de los AGN. Son objetos radio-fuertes que presentan una serie de propiedades que los ha convertido en los objetos más extremos de la clase. Consisten de núcleos que presentan emisión colimada de un plasma que se mueve a velocidades relativistas, conocido como jet. En los blázares,

el jet relativista se encuentra casi alineado con la visual del observador (ángulo de visión $\theta < 15$ deg), tal y como puede verse en el esquema unificado (ver Fig. 1.2). El término blázar fue sugerido por E. Spiegel durante la reunión de objetos BL Lac en Pittsburgh en Abril de 1978. Surge de combinar la palabra BL Lac (BL Lac es el prototipo de la clase) con la palabra Cúasar, la cual se refiere a “cuasi-stellar-objects” (Angel and Stockman, 1980)). Los blázares están divididos a su vez en dos clases de objetos: los tipo BL Lac y Cuásares de espectro plano (del inglés, “Flat Spectrum Radio Quasar”, en adelante FSRQ). La diferencia entre estos dos grupbookos es que los FSRQ se encuentran a mayores distancias y muestran líneas anchas de emisión, mientras que los BL Lac son fuentes más cercanas y que por lo general muestran líneas de emisión muy débiles ó no muestran ninguna. Los blázares son emisores multifrecuencias extremos pues en su distribución espectral de energía vemos que algunos llegan a emitir en las bandas de los rayos gama (Fig.1.3).

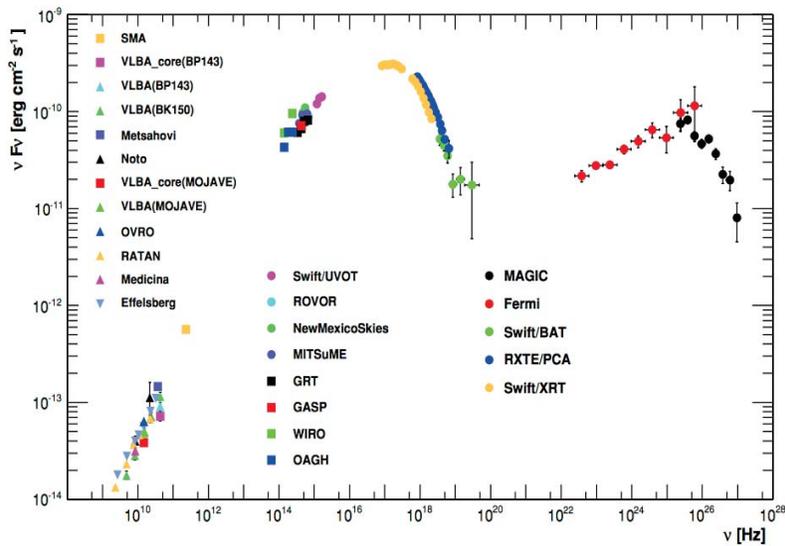


Figura 1.3: Distribución de energía espectral de Mrk 421, todas las observaciones realizadas durante la campaña de multifrecuencia de 19 de Enero y 1 de Junio de 2009. La leyenda izquierda informa los instrumentos y los flujos medidos. Donde se ve la emisión multifrecuencia desde longitudes de onda de radio hasta rayos gama. (Abdo and Ackermann, 2011)

Entre sus características más importantes, tenemos que son fuentes puntuales que presentan variabilidad en todas las escalas de tiempo (desde minutos-días-horas-semanas-meses-años). Son conocidos por presentar microvariabilidad (variabilidad rápida del orden de minutos que se observa en una misma noche) en las bandas del radio-óptico y en años recientes se ha observado también en las bandas de los rayos X y los rayos

gama (Aharonian et al., 2007). Al ser objetos radio-fuertes, presentan jets relativistas los cuales muestran variaciones en su brillo y morfología. Además los blázares emiten luz altamente polarizada, esta propiedad es distintiva en objetos que tienen jets magnetizados (Angel and Stockman, 1980; Impey and Tapia, 1990).

1.2.1. El Modelo del Jet relativista

El modelo de jet relativista fue presentado por primera vez por (Rees, 1967) y ampliado posteriormente por Blandford (1978, 1979). En dicho trabajo se propuso la existencia de un jet cónico con velocidades relativistas apuntando cerca de la línea de visión (usualmente un ángulo $\leq 15^\circ$). Debido a las velocidades cercanas a la velocidad de la luz, los efectos de la Teoría de la Relatividad Especial son importantes, en particular el direccionamiento y amplificación por efecto Doppler y el movimiento superlumínico.

1.2.2. Movimiento superlumínico

En numerosas estudios de blázares en las bandas de radio con el (VLBI), se observa nódulos de plasma eyectados desde la fuente compacta. Estos nódulos se desplazan con respecto al objeto emisor con velocidades aparentes mayor que la velocidad de la luz. Este fenómeno es conocido como movimiento superlumínico. El movimiento superlumínico es producido por un efecto geométrico, pues en realidad el nódulo dentro del jet se mueve con velocidades intrínsecas cercanas a la velocidad de la luz, pero nunca mayores. El descubrimiento observacional del movimiento superlumínico confirmó una de las predicciones del modelo del jet relativista para blázares (Rees, 1967).

Para entender como ocurre el movimiento superlumínico, consideremos un nódulo moviéndose del punto P1 a P2 a una velocidad v muy cercana a la velocidad de la luz, con un ángulo θ con respecto a la línea de visión (ver Fig. 1.5). El nódulo viaja durante un intervalo de tiempo Δt a una distancia $v\Delta t$ de la posición original (P1). La diferencia entre los tiempos de arribo de la luz emitida en los puntos P1 y P2, desde el sistema de referencia del observador está dada por :

$$\Delta t_{obs} = \Delta t - \frac{v\Delta t \cos \phi}{c} = \Delta t(1 - \beta \cos \phi). \quad (1.1)$$

Recordando $\beta = v/c$. Esta diferencia se debe a que la luz emitida en P2 está más cerca del observador que la del punto P1. La distancia desplazada del nódulo en plano del

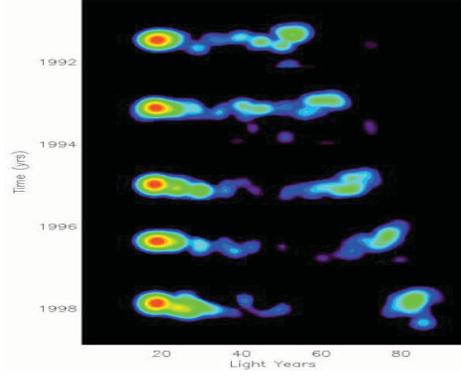


Figura 1.4: Movimiento superlumínico del Blázar 3C279. El núcleo estacionario es el punto brillante de color rojo. Los nudos apuntan a 2° con respecto a nuestra línea de visión, y se mueve a una velocidad real de $0,997c$. Estas cinco imágenes son parte de un conjunto mayor de veintiocho imágenes realizadas con el VLBA de 1991-1997. Estos datos se obtuvieron a una frecuencia de 22 GHz (longitud de onda 1.2 cm). Imagen de NRAO/AUI.

cielo medido por el observador es:

$$\Delta r_{obs} = v \Delta t \sin \theta. \quad (1.2)$$

La velocidad aparente que mide el observador está determinada por

$$v_{app} = \frac{\Delta r_{obs}}{\Delta t_{obs}} = \frac{v \sin \phi}{1 - \beta \cos \phi} \quad (1.3)$$

A partir de esta ecuación es posible ver que si un nódulo posee una velocidad cercana a la velocidad de la luz y ángulo θ pequeños, observaremos movimiento con velocidades aparentes mayores a la de luz, es decir movimiento superlumínico.

1.2.3. Direccionamiento por Efecto Doppler

Otro efecto importante en los jets relativistas es el direccionamiento por Efecto Doppler, que determina como cambia la dirección de propagación de la radiación entre el sistema de referencia de la fuente y del observador. Para entender esto, pensemos en dos sistemas de referencias, uno en reposo K y otro K' moviéndose a una velocidad \vec{v} . En el sistema K' , un nódulo se desplaza a una velocidad \vec{u}' , el cual forma un ángulo θ' con respecto a \vec{v} (ver 1.6).

Las componentes del vector \vec{u}' perpendicular y paralelas a \vec{v} son:

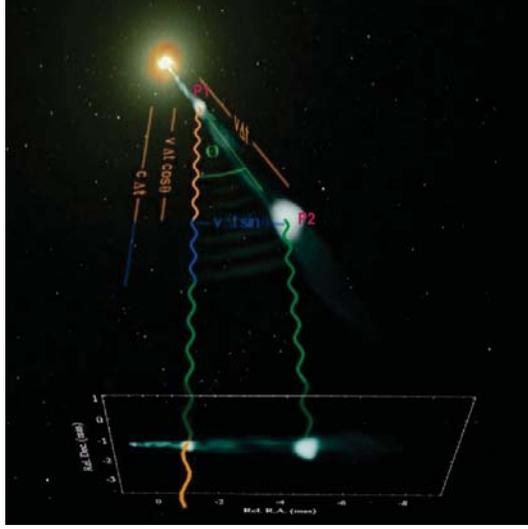


Figura 1.5: En el lado superior izquierdo tenemos una fuente eyectando material cuya dirección de movimiento forma un ángulo θ respecto a la línea de visión. Ver texto.

$$u_{\parallel} = \frac{u'_{\parallel} + v}{1 + \frac{vu'_{\parallel}}{c^2}} \quad (1.4)$$

$$u_{\perp} = \frac{u'_{\perp}}{\gamma \left(1 + \frac{vu'_{\perp}}{c^2}\right)} \quad (1.5)$$

En el sistema del observador tenemos que la tangente de ángulo θ :

$$\tan \theta = \frac{u_{\perp}}{u_{\parallel}} = \frac{u' \sin \theta'}{\gamma (u' \cos \theta' + v)} \quad (1.6)$$

La ecuación 1.6 se conoce como “fórmula de aberración”, donde $u' \equiv |\vec{u}'|$. Una aplicación interesante es el caso de fotones $u' = c$, por lo que

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta'}{\gamma (u' \cos \theta' + v/c)} \quad (1.7)$$

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta'}{1 + (v/c) \cos \theta'} \quad (1.8)$$

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

$$\tan \theta = \frac{c}{\gamma c} \quad (1.9)$$

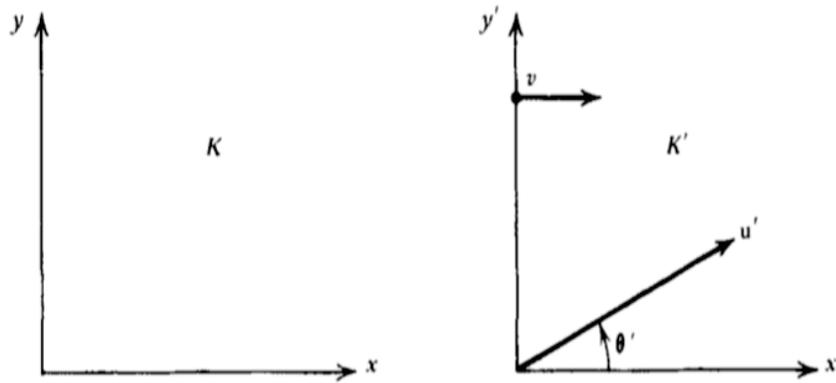


Figura 1.6: Sistema de referencia K' moviéndose a una velocidad \vec{v} respecto al sistema en reposo K .

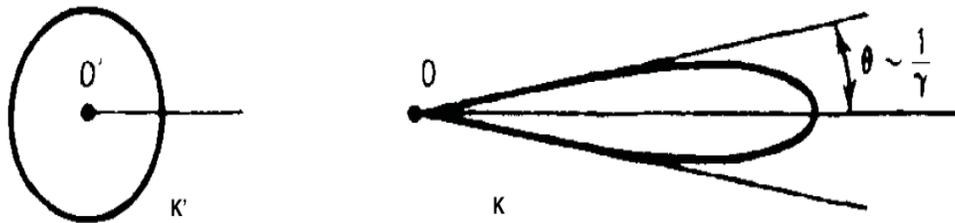


Figura 1.7: Beaming de la radiación emitida isotrópicamente en el marco K'

$$\sin \theta = \frac{1}{\gamma} \quad (1.10)$$

Ahora para velocidades relativistas $\gamma \gg 1$, $\sin \theta \sim \theta$, θ es:

$$\theta \sim \frac{1}{\gamma} \quad (1.11)$$

La ecuación 1.11 muestra sistema en reposo los fotones se encuentran direccionados hacia el observador concentrada en un cono de ángulo medio $\theta \sim \frac{1}{\gamma}$ (ver Fig. 1.7). Esto se conoce también como “beaming” (Rybicki and Lightman, 2004).

1.2.4. Amplificación por Efecto Doppler

La amplificación por efecto Doppler es otro aspecto interesante relacionado con jet del blázar, cuya emisión forma un ángulo pequeño en respecto a la visual del observador y se mueve a velocidades relativistas. Consideremos un material en un jet que se está mo-

viendo hacia nosotros con una velocidad v , en una dirección θ respecto a la línea de visión. La frecuencia observada, ν está relacionada con la frecuencia en el marco en reposo del material, ν' por el desplazamiento Doppler (Rybicki and Lightman, 2004):

$$\nu = \delta \nu' \quad (1.12)$$

donde

$$\delta = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (1.13)$$

El factor Doppler nos determina como se transforma la radiación entre el sistema del jet y el observador. Supongamos que $J(\nu)$ es la intensidad específica observada del material. Debido a la invariancia de $\frac{J(\nu)}{\nu^3}$ (véase Rybicki & Lightman, 1979), la intensidad observada se relaciona con la intensidad en el marco en reposo del material de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$J(\nu) = \delta^3 J'(\nu'). \quad (1.14)$$

Como consecuencia de los efectos previamente mencionados, a medida que la velocidad a la que se mueve el material en el Jet aumenta y el ángulo que forma con la dirección de la visual disminuye, la emisión proveniente del jet se observa con mayor intensidad y concentrada en un cono de emisión más pequeño. Estos efectos relativistas hacen que vemos la radiación más intensificada y concentrada de lo que en realidad es.

1.3. La SED de los blázares

La distribución espectral de energía (SED, de aquí en adelante) de los blázares presenta dos jorobas. Para obtener la SED en los blázares se requieren observaciones simultáneas y en diferentes longitudes de onda. La primer joroba ocurre desde radio hasta óptico, o algunas hasta ultravioleta (UV) o rayos X (Sasada and et al., 2012; Villata and et al., 2009; Marscher and Gear, 1985), en general se acepta que es debido a la radición sincrotrón del jet relativista (Blandford, 1978). La segunda joroba en altas energías, a partir de rayos X hasta rayos gamma, en algunos casos hasta varios TeV, el origen de la segunda joroba sigue siendo objeto de debate hoy en día. Hay dos enfoques diferentes para explicar su origen. El primero proviene de los llamados modelos leptónicos, que se basan en la dispersión inverso Compton (IC) de los fotones producidos por los mismos electrones que emiten la radiación de sincrotrón (Marscher and Gear, 1985). En estos modelos, los fotones semillas son proporcionados por la radiación sincrotrón emitida a energías más bajas por los mismos electrones de la dispersión IC, los modelos

se conocen como sincrotrón auto-Compton (Synchrotron self-Compton o SSC). Si la contribución dominante de los fotones semillas para la IC proviene de regiones fuera del jet, se conocen como modelos Compton externo (EC). Las posibles fuentes fotones semillas externos incluyen: (1) los fotones disco de acreción, (2) los fotones redispersado por las nubes dentro de la región de línea ancha, (3) emisión sincrotrón del jet redispersada por el material circumnuclear situado cerca del disco de acreción y su corona de rayos X , y (4) emisión infrarroja de un toro de polvo que rodean el motor central.

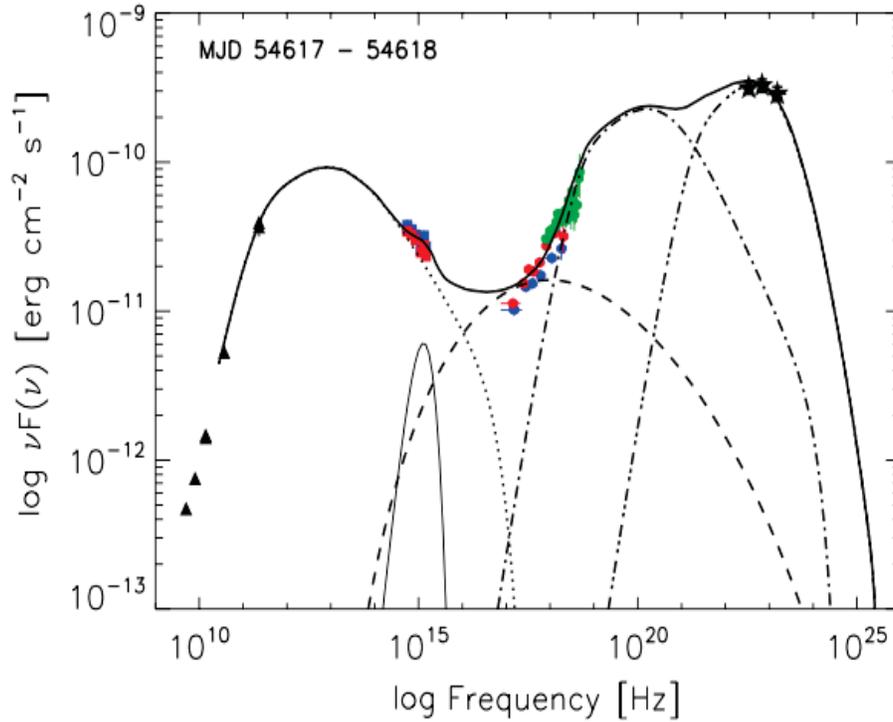


Figura 1.8: La SED de 3C 454.3 del 30 del 31 de Mayo al 1 de Junio de 2008 (MJD 54617-54618). Los triángulos negros representa a radio, cuadrados rojos (azul) a Swift/UVOT, círculo rojo (azul) a Swift/XRT, círculos verdes a RXTE /PCA y las estrellas negras representan a AGILE / GRID. La delgada línea sólida representan el disco de acreción, los puntos la radiación sincrotrón, los guiones el SSC, los guiones y puntos el external Compton en el disco y los triples puntos el external Compton de la BLR. La línea continua gruesa representa la suma de todos los componentes individuales. (Vercellone et al., 2010)

El segundo enfoque utilizado para explicar el pico de emisión de alta energía proviene de los modelos hadrónicos donde se requiere necesariamente que los protones sean acelerados a energías ultrarrelativista, la emisión se produce por la producción de pares y pión, así como por la radiación de sincrotrón de protones altamente magnetizados y

partículas π^\pm y μ^\pm (Aharonian, 2000; Mücke and Protheroe, 2001).

1.4. Secuencia blázar

Padovani and Giommi (1995) clasificaron a los blázares en base a la ubicación del máximo de la componente sincrotrón definidas como “Low-frequency peaked BL Lacs” (LBL) and “High-frequency peaked BL Lacs” (HBL), para objetos en los cuales el máximo sincrotrón ocurre en las bajas frecuencias (mm-IR o $\nu_{sy} < 10^{14}$ Hz) o altas frecuencias (UV-rayos X o $\nu_{sy} > 10^{15}$ Hz), respectivamente. El máximo de la componente Compton para LBL se encuentra en energías GeV y para HBL en más altas energías TeV. Las formas del continuum de los FSRQ son muy similares a los de LBL con picos sincrotrón entre 10^{13-14} Hz y el máximo de la componente Compton en 10^{22-23} Hz (Urry, 1998). Tradicionalmente los BL Lacs se han descubierto en las bandas del radio o rayos X, lo que condujo a la clasificación LBLs y HBLs. Sin embargo en años posteriores se han encontrado objetos intermedios entre LBLs y HBLs (Nieppola et al., 2006). Los “intermediate BL Lacs” (IBL) tienen su máximo sincrotrón en las longitudes de onda óptico ($\nu_{sy} \approx 10^{14-15}$ Hz) (Böttcher et al., 2013).

1.5. Variabilidad Polarimétrica

Los blázares son las fuentes astrofísicas con el mayor porcentaje de polarización lineal óptica en el rango de radio hasta ultravioleta. Esto ha servido como un rasgo distintivo de blázares, hasta el punto que se ha adoptado como criterio de selección blázar (Falomo et al., 2014). Los porcentajes de polarización que van desde unos pocos a decenas de por ciento, es explicada mediante la emisión sincrotrón de electrones no térmicos en un campo magnético parcialmente ordenado, aunque varios autores en trabajos recientes han demostrado que el rango de porcentaje de polarización y el ángulo de posición observada son explicados por la emisión sincrotrón en un jet relativista que contiene un campo magnético con estructura helicoidal (Zhang et al., 2016; Falomo et al., 2014). Tanto el porcentaje polarización y ángulo de posición en general son muy variables en escalas de días hasta años (ver fig 1.10) aunque en algunos trabajos se ha mostrado que el ángulo de posición parece tener una posición preferencial (Angel and Stockman, 1980; Sorcia et al., 2013).

Las variaciones del ángulo de posición pueden ser producido por un campo magnético

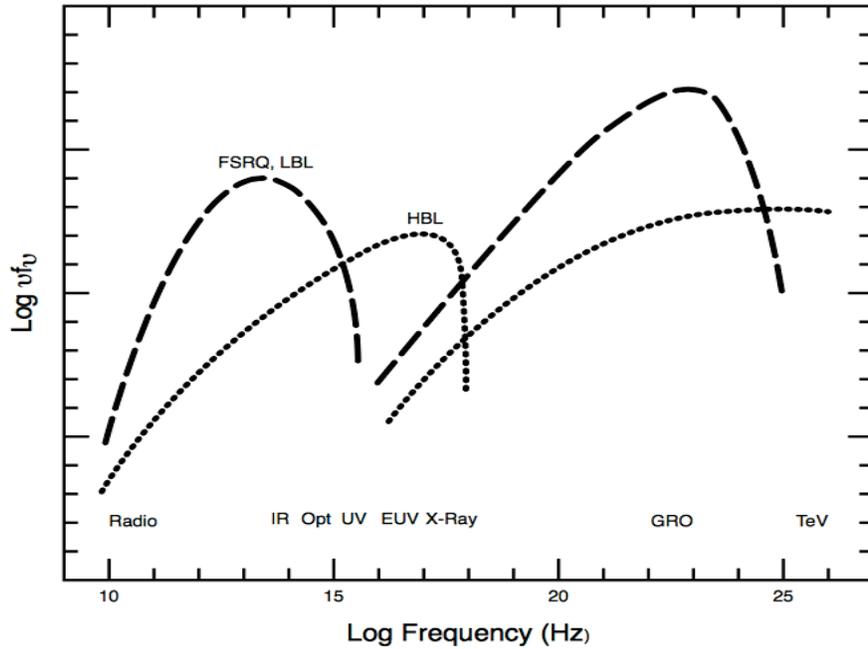


Figura 1.9: Distribuciones espectrales de energía para los tipos de blázares LBL y HBL. Los blázares FSRQ y LBL alcanzan su primer pico en las bandas de milimétrico e infrarroja, mientras que los HBL (conocido como objetos BL Lac) alcanzan su primer máximo en bandas de UV y rayos X. El segundo pico en energías GeV para FSRQ y LBL y en energías mucho más altas TeV para HBL . (Urry, 1999)

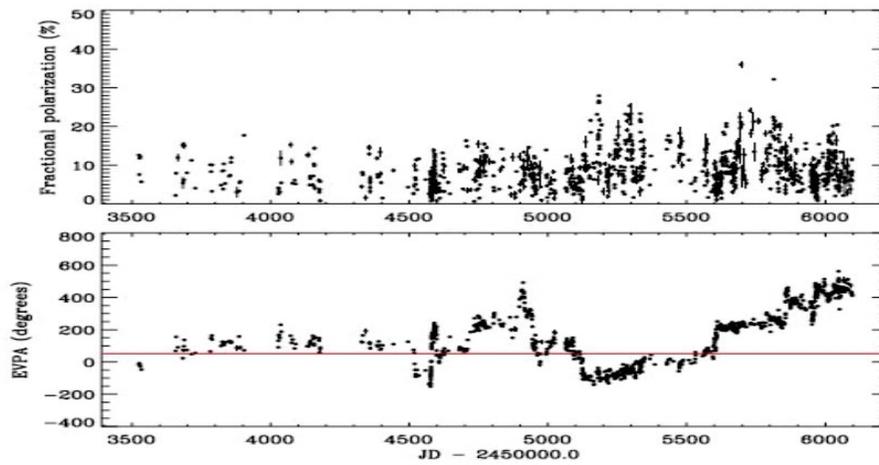


Figura 1.10: Las variaciones del grado de polarización (arriba) y el ángulo de posición (inferior) de la S5 0716 + 71 en octubre de 2011. (Falomo et al., 2014)

con una estructura helicoidal o por una flexión del chorro (Marscher et al., 2010). También se ha sugerido que el comportamiento aleatorio de polarización puede ser producido por varios componentes de la emisión polarizada (Holmes et al. 1984). Un modelo que

ha tenido éxito para explicar la polarización observada en estos objetos ha sido propuesto por Brindle (1996), con la inclusión de dos componentes de polarización. En este modelo, las fuentes de radiación sincrotrón polarizada son ópticamente delgadas y tienen diferentes características polarimétricas. Uno de los componentes polarizados es estable, mientras que la otra muestra un comportamiento caótico.

Otro importante aspecto de la polarización en los blázares es que la luz de la galaxia anfitriona puede afectar el grado de polarización intrínseca y disminuirlo artificialmente, este efecto debe ser corregido (Sorcia et al., 2013). En el estudio de polarización en algunas ocasiones se ha encontrado que el grado de polarización se correlaciona bien con la luz total del blázar (Sorcia et al., 2013), aunque también hay ausencia de correlación o anti-correlación. La existencia de correlación resulta importante para ajustar modelos que describan la física del jet. Además los estudios de fotopolarimetría óptica han resultado relevantes para establecer la estructura del campo magnético asociado al jet relativista de los blázares. Este tipo de estudios ha tenido un auge importante en los últimos años, sobre todo a raíz del lanzamiento del satélite *FERMI*.

1.6. Objetivos

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados del análisis fotopolarimétrico del blázar 3C 454.3 con los de datos obtenidos el Proyecto-SPM. La muestra de datos para el blázar abarca un período de 7 años. El análisis se realizó los siguientes objetivos particulares:

1. Hacer un estudio de las propiedades observacionales fotopolarimétricas, analizando primordialmente la variabilidad en el flujo, el grado de polarización y el ángulo de polarización.
2. Estudiar las propiedades de variabilidad en escalas de tiempo de largo-período, desde días hasta meses.
3. Caracterizar el tamaño de la región de emisión en óptico.
4. El estudio de los parámetros de Stokes mediante el plano de Stokes.
5. Buscar periodicidad mediante los periodogramas obtenidos con la librería Rob Per.

Este trabajo está organizado de la manera siguiente: en el Capítulo 2, se presenta las características en las bandas de óptico y radio, además de los modelos para la distribución espectral de energía del blázar 3C 454.3. En el Capítulo 3, se hace una descripción de la obtención y reducción de datos, así como se presentan los resultados observacionales y el análisis polarimétrico. En el Capítulo 4, se presenta el análisis de periodicidad de los periodogramas obtenidos con la librería Rob Per, y la descripción de la función ventana. Finalmente en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

Capítulo 2

3C 454.3

El blázar 3C 454.3 es tipo FSRQ, tiene un corrimiento al rojo $z= 0,859$ y es uno de los más famosos blázares debido a que ha tenido varios estallidos de brillo muy intensos. Uno de los más excepcionales fue el que ocurrió en primavera de 2005 y duro más de 1año (Villata et al., 2006). Este estallido fue observado inicialmente en las bandas del óptico, esto dio lugar a una campaña de observaciones multifrecuencias dirigida por el Whole Earth Blázar Telescope (WEBT). Se produjo un aumento en la actividad desde las bandas de mm hasta rayos X. El brillo máximo observado en la banda R del óptico fue de 12,0. Esto fue observado el 9 Mayo de 2005, y a la fecha este valor de brillo se considera el más luminoso observado en un blázar (Villata et al., 2006).

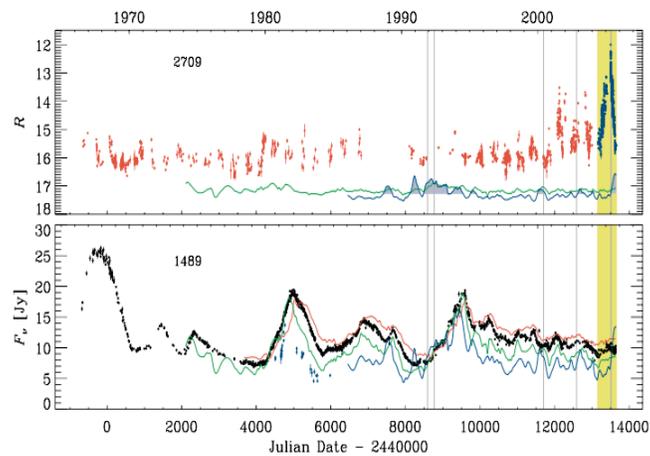


Figura 2.1: La curva de luz en el óptico (arriba) y la de radio (abajo) mostrada, comienza de finales de 1966 a septiembre de 2005. La franja amarilla indica el período de la campaña WEBT de 2004 a 2005. En el panel inferior, los puntos negros representan la curva de luz a 8 GHz. Las curvas roja, verde y azul, representan las interpolaciones de las curvas de luz a 5, 14.5 y 37 GHz, respectivamente (Villata et al., 2006) .

En la figura 2.1 se muestran dos fases de variabilidad diferentes. En la primera tenemos una variabilidad moderada en el óptico, mientras que en radio se muestran estallidos prominentes y de larga duración. En la segunda fase, la actividad óptica aumenta y el flujo en radio es menos variable. Esto sugiere que la emisión en óptico y en radio provienen de dos regiones separadas y desalineadas en el jet (Villata et al., 2006).

Raiteri et al. (2007) estudió la emisión de múltiples longitudes de onda en la fase posterior al estallido de 2005, el cual fue seguido por un período de baja actividad de la fuente, el cual inició en la primavera de 2006 y terminó en la primavera de 2007. En este período de baja actividad fue posible reconocer la contribución térmica debida al disco de acreción, conocida como “big blue bum” o BBB, la cual generalmente queda embebida en el continuo sincrotrónico. Esta emisión presenta un máximo en la región del UV. Además fue posible observar la contribución del llamado “Little Blue Bump”, la cual es producida por la emisión de la BLR ver figura 2.2.

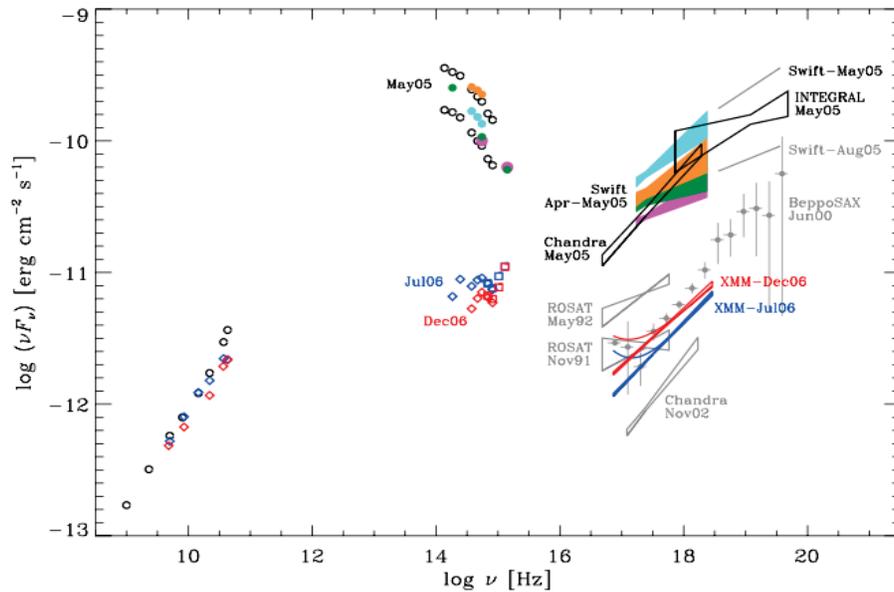


Figura 2.2: La SED de 3C 454.3. Los símbolos azul y rojo se refieren a las observaciones realizadas el 2-3 de julio y 18-19 de diciembre de 2006.(Raiteri et al., 2007).

En nuevo estallido se observó en la banda óptica-mm de julio-agosto y otro evento más el 1 de diciembre de de 2007 (Raiteri et al., 2008). La campaña WEBT siguió realizando observaciones por el Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero (*AGILE*), que detectó a la fuente en su estado más brillante de rayos gamma jamás observada en la fuente hasta ese momento (Vercellone et al., 2008, 2009).

El análisis realizado durante 2007 y 2008 se encuentra correlación entre el flujo de rayos X y óptico con un retraso de 1 día o menos , lo que sugiere que la radiación de rayos X se produce en la región del jet de donde viene la emisión IR-óptico (Raiteri et al., 2008). En las observaciones multifrecuencias llevadas a cabo por Vercellone et al. (2008, 2009) del estallido de 2007, indican fuertemente que el mecanismo de emisión dominante entre 30 MeV y 30 GeV esto dominado por dispersión inverso Compton de electrones relativistas en el jet por los fotones externos de la región de la BLR.

El 4 de septiembre de 2007, la WEBT comenzó un nuevo proyecto, el Programa de Apoyo GLAST-AGILE (GASP). Su objetivo es proporcionar un monitoreo continuo de óptico a radio de largo período de blázares de rayos gamma durante la operación de los satelites *AGILE* y GLAST (Gamma-ray Large Telescopio Espacial Espacio, más tarde llamado Telescopio Espacial *FERMI* de Rayos Gamma en honor al físico italiano Enrico Fermi). Por lo que el monitoreo multifrecuencia de 3C 454.3 queda a cargo de GASP, el estallido óptico se observó con un máximo el 16 de Julio de 2008 (Villata et al., 2009), y en el primer informe de observaciones de *FERMI*, se obtuvo un flujo máximo en flujo alrededor de $1,2 \times 10^{-5} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ el 10 de Julio de 2008, para energías $> 100 \text{ MeV}$ (Tosti et al., 2008; Abdo and et al., 2009). La Fig. 2.3 muestra el flujo de rayos gamma variable, con distintas llamaradas de forma simétrica.

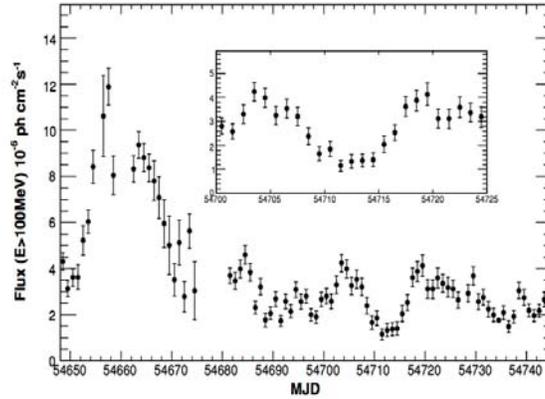


Figura 2.3: Curva de luz de 3C 454.3 en la banda de 100 MeV-300 GeV obtenida por LAT. El recuadro muestra un período variable de 7 de julio al 2 de agosto de 2008) (Abdo and et al., 2009).

En el estudio de correlación entre longitudes de onda en el estallido de rayos γ de julio de 2008, se encontró una excelente correlación entre curvas de luz de IR, óptica, UV y rayos gamma, con un retraso de menos de un día, lo que apoya el modelo que los

electrones relativistas en el jet irradian fotones sincrotrón (IR / ópticos) y por inverso Compton dispersan los fotones térmicos para energías de rayos X y gamma (Bonning et al., 2009; Vercellone et al., 2009).

El 2 de diciembre de 2009 sufrió una estallido extraordinario cuando se convirtió en la fuente más brillante de rayos γ en el cielo durante más de una semana ver figura 2.4. Su flujo diario medido con el LAT de *FERMI* a energías $E > 100$ MeV alcanzó $F_{100} = 22 \pm 1 \times 10^{-6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, lo que representa el flujo diario más alto de cualquier blazar jamás registrado en rayos gamma hasta ese momento. Nuevamente volvió a ser la fuente más brillante en el cielo en abril de 2010 con $F_{100} = 16 \pm 3 \times 10^{-6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Ackermann et al., 2010).

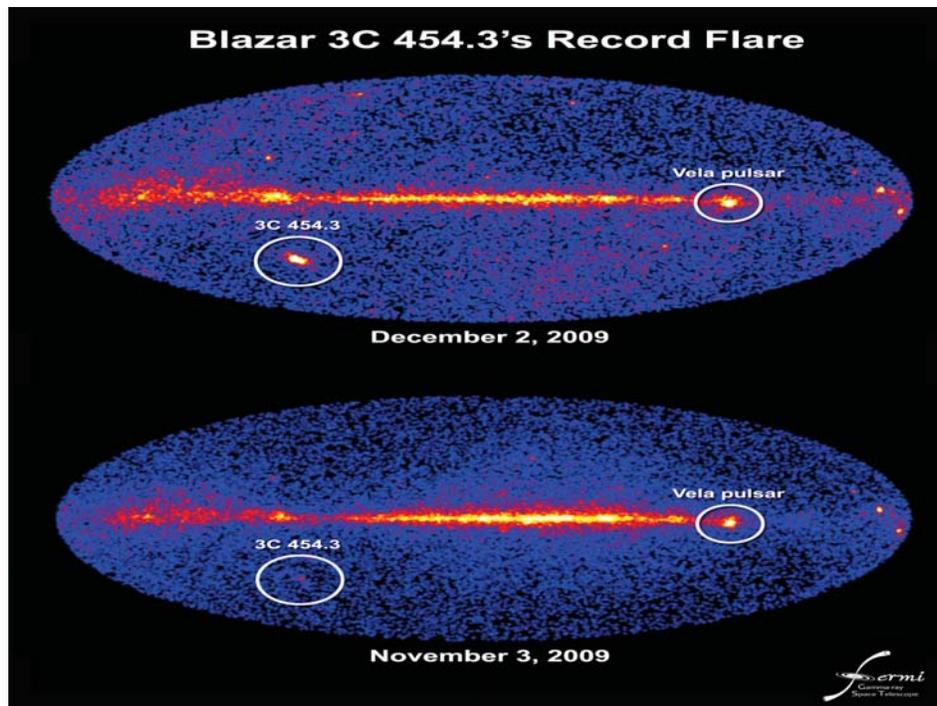


Figura 2.4: Imágenes capturadas tomadas por *FERMI* mostrando claramente el cambio en el flujo de noviembre a diciembre de 2009. Crédito: NASA

En la banda de óptico R la fuente mostró un flujo máximo el 6 de diciembre de 2009 (JD 2455171.6). El nivel de flujo alcanzado es similar al del estallido de 2008. En las observaciones multifrecuencia estudiadas en Raiteri et al. (2011) se interpretó el comportamiento en términos de un modelo de jet inhomogéneo, donde se produce la radiación sincrotrón. El jet se supone que es una estructura curvada (posiblemente en una forma helicoidal) y flexible (tal vez con giro), donde las diferentes zonas que emiten tienen diferentes alineaciones con la línea de visión y el ángulo puede cambiar en el tiempo.

Un extraordinario estallido en rayos gama experimentó 3C 454.3 el 19-20 de noviembre de 2010, cuando el flujo diario medido con el LAT a energías $E > 100\text{MeV}$ de $66 \pm 2 \times 10^{-6} \text{ fotones cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ver Fig 2.5). Este es un factor de tres mayor que su flujo máximo anterior registrado en diciembre de 2009 y 5 veces más brillante que el pulsar de Vela, que normalmente es la fuente más brillante en el cielo de rayos γ (Abdo et al., 2011).

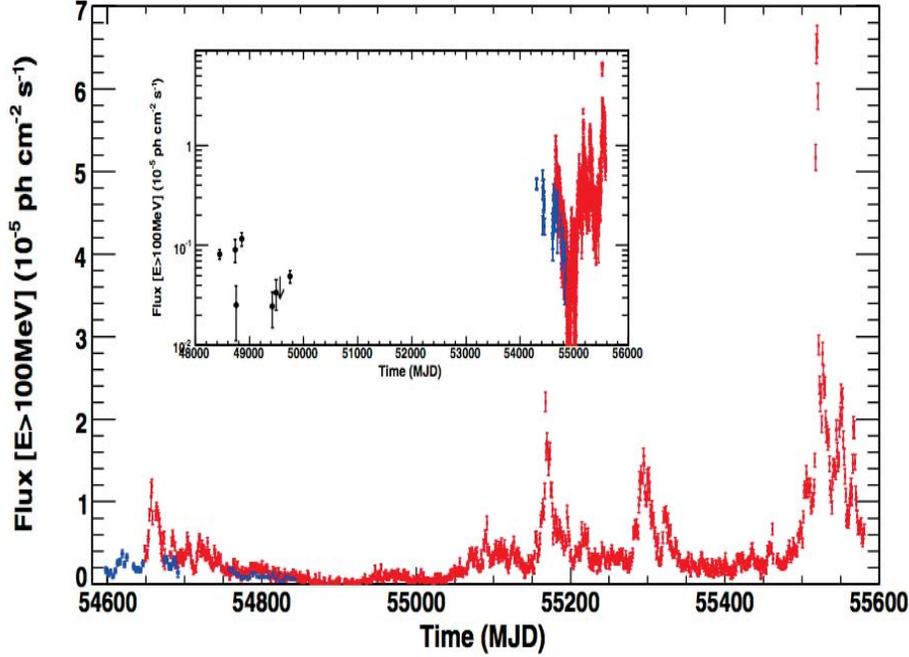


Figura 2.5: Curva de luz de 3C454.3 medida con el *FERMI*-LAT desde su lanzamiento. El recuadro: curva de luz histórica. Los puntos negros son de EGRET (Hartman et al., 1999) y los puntos azules son de AGILE (Striani et al., 2010). Las barras de error son solamente estadística Abdo et al. (2011).

El análisis de correlación entre la curva de luz de rayos γ y 1mm a partir de 2008 a 2011 realizado por Wehrle et al. (2012). En este los autores encontraron una correlación significativa entre las variaciones en las dos longitudes de onda con los retrasos de $-1,5 \pm 3,5$ días, lo que sugiere que las variaciones ondas milimétricas son simultáneas con variaciones en rayos γ . Esto sugiere fuertemente que el mecanismo y la ubicación de los eventos de alta energía son los mismos para los tres estallidos.

Recientemente se reportó por *FERMI* un nuevo estallido, el flujo más alto $F_{E>100\text{MeV}} \simeq 21,6 \pm 2,6 \times 10^{-6} \text{ fotones cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ se registró el 15 de junio de 2014 (MJD 56823.5625), en 3 horas en la curva de luz (Britto et al., 2015).

2.1. Observaciones en radio

Jorstad et al. (2005) monitoreó el blázar 3C 454.3 a 43 GHz con el Very Long Baseline Array (VLBA) cada dos meses a partir de marzo de 1998 a abril de 2001, los parámetros determinados del jet en escala de parsec durante este período basado en la velocidad aparente de nudos superlumínicos (también conocidos como “componentes” del chorro) y la escala temporal de la variabilidad del flujo. Encontraron que el jet de 3C 454.3 durante este lapso de tiempo tuvo los siguientes parámetros: $\Gamma = 15,6 \pm 2,2$, $\Theta_o = 1,3 \pm 1,2$, $\delta = 24,6 \pm 4,5$ y $\theta = 0,8 \pm 0,2$, donde Θ_o es el ángulo de visión y θ es el ángulo de apertura media del jet. El grupo de la Universidad de Boston reanudó las observaciones de VLBA al blázar en junio de 2005 y ha seguido el monitoreo de la fuente dentro de un programa de formación de imágenes más o menos mensual de VLBA a 43 GHz.

Durante 2005-2009, el estudio en múltiples longitudes de onda del comportamiento de 3C 454.3 fue realizado por Jorstad et al. (2010b). Se observaron tres eventos asociados a la propagación de un nudo superlumínico a través del núcleo coincidió con una serie de estallidos ópticos y un aumento en la emisión de rayos X. Estos nudos se muestran en la Figura 2.6, tienen factores Lorentz $\Gamma > 10$.

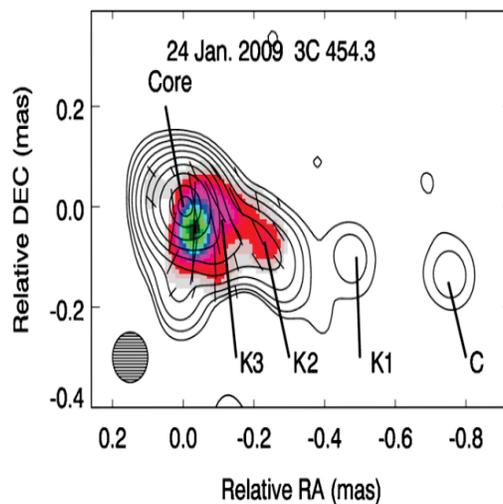


Figura 2.6: La intensidad total a 43 GHz (contornos) y la intensidad de polarización lineal (escala de color). Los segmentos de recta muestran el plano de polarización y letras identifican los componentes en el jet Jorstad et al. (2010b)

Las componentes muestran una clara conexión con estallidos en longitud de onda milimétrica en mayo/junio de 2005, julio y diciembre de 2007. Además se encontró que

los estallidos óptico preceden a los estallidos de ondas milimétricas por 15-50 días ver figura 2.7. Los estallidos ópticos que coinciden con el paso de los nudos superlumínicos a través del núcleo, se acompañan de rotación del ángulo de posición de la polarización lineal óptico. Se cree que dicha rotación parece ser una característica común durante las primeras etapas de bengalas en blazares Jorstad et al. (2010b). En este estudio se propone que la emisión de rayos X y γ se produce a través de la dispersión inverso Compton por SSC y CE.

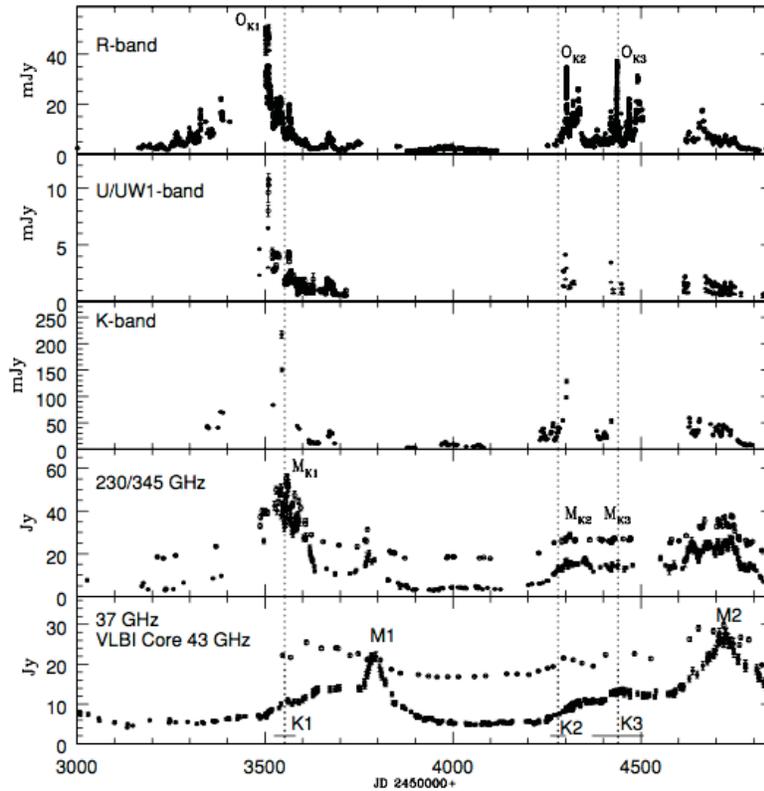


Figura 2.7: Curvas de luz de 3C 454.3 en diferentes frecuencias. Las líneas de puntos indican que los tiempos de las eyecciones de los componentes superlumínicos K1, K2 y K3, las líneas continuas muestran las incertidumbres en los tiempos de eyección; Segundo panel: círculos abiertos datos del telescopio Liverpool en la bandas U, triángulos abiertos datos de Swift UVOT en la bandas de U y llenos triángulos datos de Swift UVOT en la banda UW1; cuarto panel círculos abiertos datos a 345 GHz y quinto panel círculos abiertos datos a 43 GHz se desplazan por 15 Jy para mayor claridad. Las etiquetas muestran los estallidos más destacados en diferentes longitudes de onda Jorstad et al. (2010b).

En las campañas de observación del VLBA realizadas de 2009 a 2010, se encontró un fuerte aumento en la actividad en el jet durante los estallidos en rayos γ en diciembre de

2009, abril de 2010 y noviembre de 2010. Se detectaron nuevos nudos superlumínicos, K09 y K10 (Figura 2.8), asociados con los estallidos en otoño de 2009 y 2010 respectivamente. En este estudio se apoya la idea que la región de emisión de rayos γ y óptico son co-espacial con la longitud de onda milimétrica. En el estudio de polarización se observaron dos rotaciones del ángulo de polarización cuando el componente superlumínico pasa a través del núcleo de VLBI Jorstad et al. (2012).

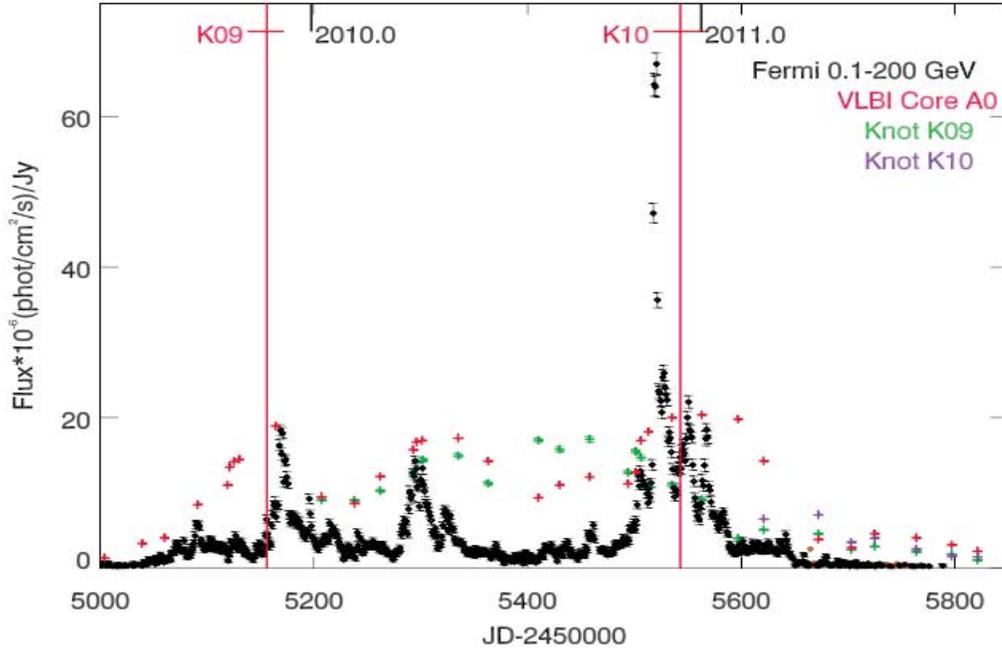


Figura 2.8: Curvas de luz de rayos γ (negro), del núcleo a 7 mm (rojo), K09 (verde) y K10 (violeta); líneas rojas muestran los tiempos de paso de los nudos K09 y K10 a través del núcleo de VLBI Jorstad et al. (2012).

En el análisis multi frecuencias realizado de 2009 a otoño de 2010 por (Jorstad et al., 2013), se presentan en la figura 2.9 los cambios en la densidad de flujo y la polarización del núcleo, así como el aspecto, el movimiento y la evolución de nuevas características en el jet . A cada época se identifica el núcleo A0, como la característica estacionaria situada en el extremo oriente del jet. El tamaño angular medía del núcleo en el modelo se ajusta es $\langle a_{core} \rangle = 0,05 \pm 0,02$ mas (0.4 PC). Se encontró que el jet está orientado en la misma dirección como se observa en 2004-2008 $\langle \Theta \rangle = -95 \pm 8$ deg (Jorstad et al., 2010a), en 2009-2011 $\langle \Theta \rangle = -92 \pm 20$ deg, aunque la desviación estándar de $\langle \Theta \rangle$ indica que el chorro tiene mayores oscilaciones durante 2009-2011 que como se reportó anteriormente. Esto es probablemente el resultado de un ángulo de visión más pequeño del jet durante 2009-2011.

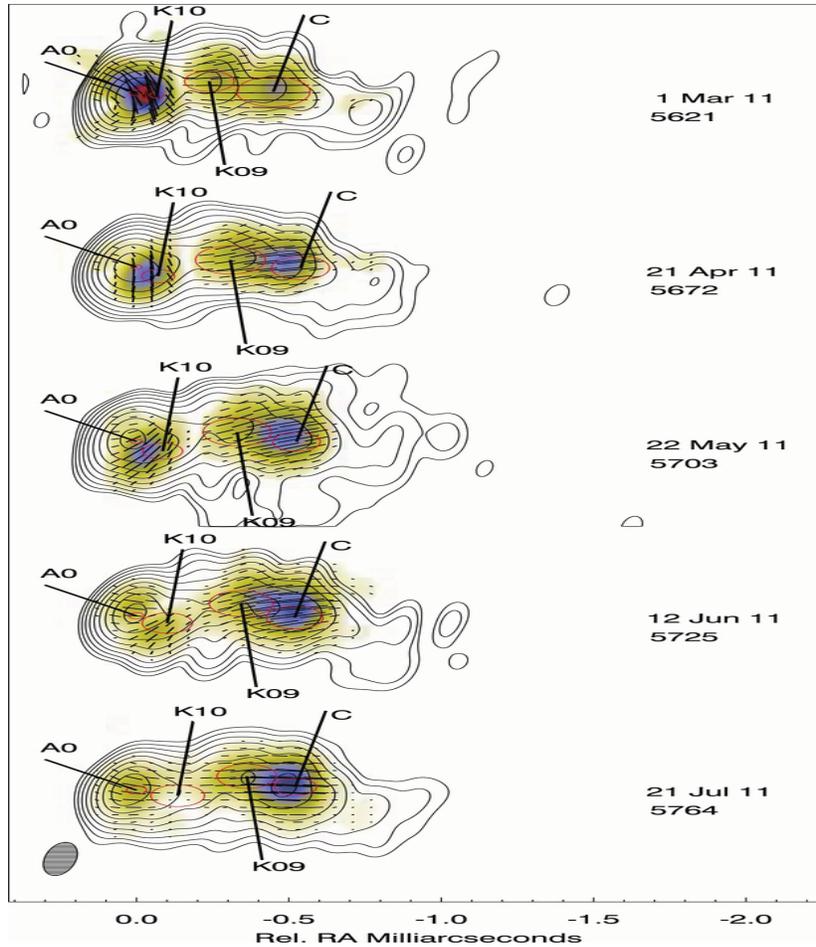


Figura 2.9: Imágenes de intensidad total (contornos) y polarizados (escala de color) a 43 GHz d, los segmentos de línea representan la dirección de polarización lineal; círculos rojos indican la posición y el tamaño (FWHM) de los componentes superlumínicas (Jorstad et al., 2013).

2.2. SED

Los modelos la distribución de energía espectral de 3C 454.3 en todo el espectro electromagnético han sido estudiado por varios autores. (Villata et al., 2007) sugiere que el flujo óptico en primavera de 2005 se conectó con una perturbación (por ejemplo, un choque) propagandose a lo largo de una trayectoria curva en el jet. Ghisellini et al. (2007) ha encontrado que el comportamiento de 3C 454.3 en 2005 a 2007 es consistente con el modelo sugerido por (Katarzyński and Ghisellini, 2007), en la que el sitio de la disipación de un estallido depende del factor de Lorentz y la compacidad de la propagación de la perturbación del jet. Los estallidos que ocurren más cerca del agujero negro deben tener una región de emisión más compacta con un factor Lorentz mayor Γ y un campo magnético más grande B . Así la componente de alta energía es producida

a través del mecanismo SSC, external Compton con fotones de semillas de fuera de la jet (ver Fig. 2.10).

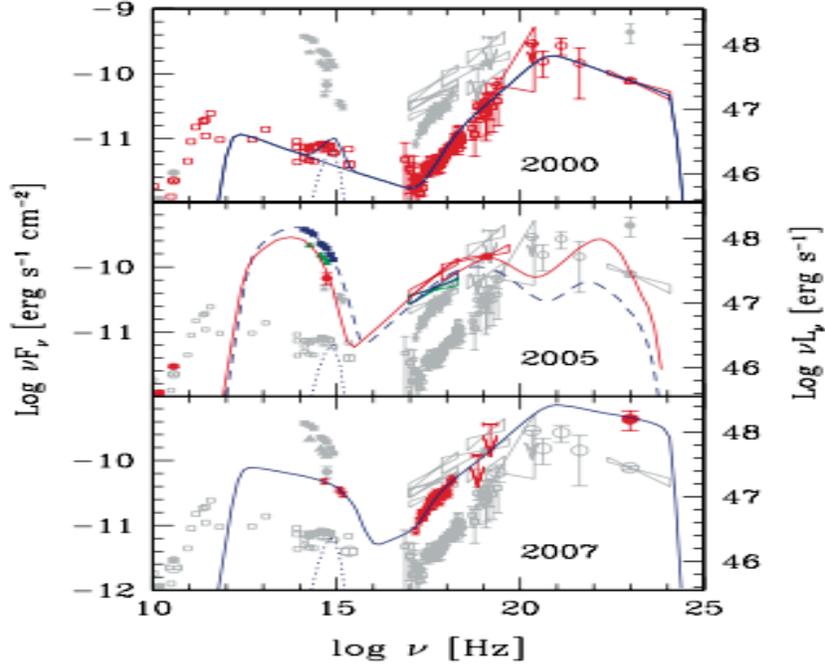


Figura 2.10: Las SED de 3C 454.3 en diferentes épocas. Panel superior: la SED en el año 2000. El panel medio: la SED durante el gran estallido óptica en 2005. Los diferentes colores corresponden a diferentes conjuntos de datos estrictamente simultáneos. Panel inferior: la SED el 26 de julio de 2007. Las líneas continuas y discontinuas corresponden a nuestro modelo. La línea punteada es la contribución del disco de acreción (que se supone un cuerpo negro simple) (Ghisellini et al., 2007).

Sikora et al. (2008) infiere de la emisión de los rayos X y gamma es probablemente producido a través del mecanismo external Compton, con fotones de semillas emitidos por el polvo caliente dispersados por los electrones relativistas en un plasma con factor de Lorentz $\gamma \sim 20$.

Los estallidos de múltiples frecuencias del blázar 3C 454.3 en 2009 y 2010 han sido analizados por Bonnoli et al. (2011) que ha modelado SED en diferentes etapas del estallido de noviembre de 2009. Estos autores utilizan un emisión sincrotrón de una sola zona leptónica e inverso Compton modelo discutido en detalle por Ghisellini y Tavecchio (2009). Se reproducen correctamente las grandes variaciones en el flujo de rayos γ mediante la variación de la potencia inyectada en electrones relativistas (por un factor de 10 de estado de baja al de alta actividad) y el factor de Lorentz (de 15 a 20). Colocan la zona de disipación del estallido dentro de la BLR (~ 1000 radios Schwarzschild). Un modelo leptónica de una zona se ha utilizado también por (Vercellone et al., 2010) para

explicar el comportamiento dinámico de la SED durante 2009 y otoño de 2010. Los autores emplean el sincrotrón, SSC, y los mecanismos de la EC, con fotones semillas para la dispersión IC proporcionada por el disco de acreción y BLR. La dispersión es producida por una burbuja de plasma relativista que se mueve con $\Gamma \sim 20 - 25$ en $\sim 0,05$ pc desde la BH. Estos autores reproducen los SED del blázar bastante bien ver figura 2.11.

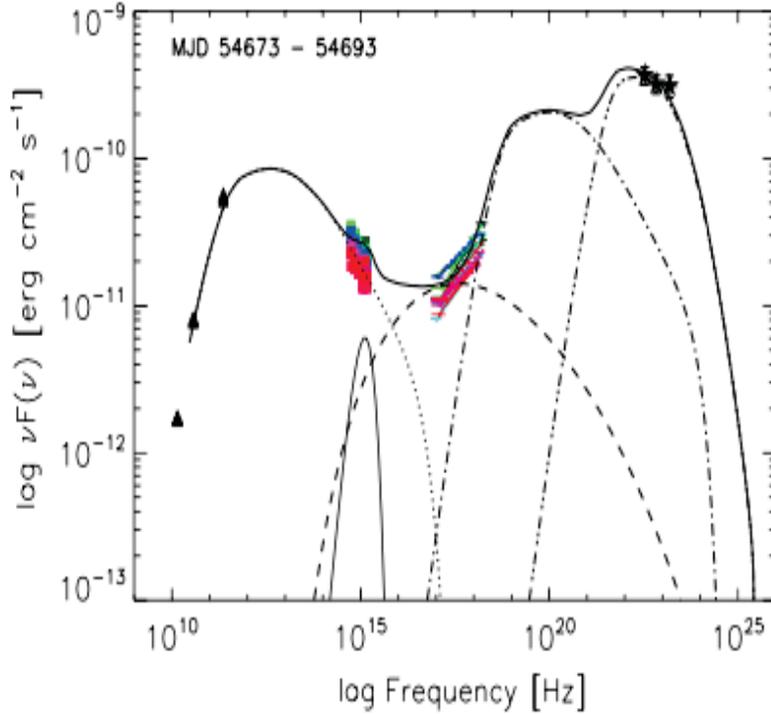


Figura 2.11: SED de 3C 454.3 MJD 54673-54693. Los triángulos negros representa a radio, cuadrados rojos (azul) a Swift/UVOT, círculo rojo (azul) a Swift/XRT, círculos verdes a RXTE /PCA y las estrellas negras representan a AGILE / GRID. La delgada línea sólida representan el disco de acreción, los puntos la radiación sincrotrón, los guiones el SSC, los guiones y puntos el external Compton en el disco y los triples puntos el external Compton de la BLR. La línea continua gruesa representa la suma de todos los componentes individuales. (Vercellone et al., 2010)

En las SEDs obtenidas durante 2010-2011 por (Wehrle et al., 2012), se propone un modelo de plasma turbulento que pasa a través de una onda de choque cónica estable en el chorro que comprime el plasma y acelera electrones a energías relativistas. En este caso, la emisión de alta energía en el modelo es producido por dispersión inverso Compton de fotones semilla suministradas por la de radiación no térmica de un choque estable orientado transversalmente al eje del chorro (Mach disco), la emisión térmica de polvo caliente o (para los rayos X) de la radiación sincrotrón de plasma que atraviesa el

choque estable (Wehrle et al., 2012). El modelo está de acuerdo con las observaciones en todas las bandas excepto en energías de rayos X, en el que el espectro es más plano que el observado (ver figura 2.12).

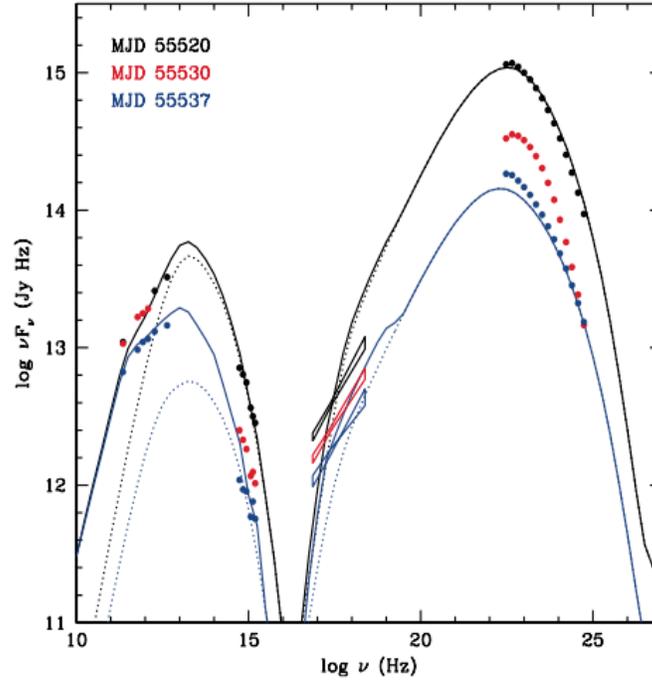


Figura 2.12: Distribuciones espectral de energía desde las bandas del milímetro hasta los rayos gamma en tres épocas, las curvas con puntos representan la SED simuladas por el código TEMZ (negro) y un tiempo después (azul). Los fotones semillas de radiación no térmica son de disco Mach, Wehrle et al. (2012)

Capítulo 3

Proyecto-SPM

En julio de 2008 se inicio el proyecto *Polarimetric monitoring of Blázar at San Pedro Mártir*, en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) en Baja California, México. Este proyecto tiene como finalidad realizar observaciones fotopolarimétricas de una muestra de 37 bázares emisores de rayos- γ , como parte del proyecto GASP (*GLAST-AGILE Support Program*), iniciado por el *Whole Earth Blázar Telescope* (WEBT) en septiembre de 2007. El *GASP* se planteó como un proyecto para obtener un monitoreo continuo a largo período desde las bandas del radio hasta el óptico de bázares emisores en rayos- γ durante la operación de los satélites *AGILE* y *FERMI*.

Las primeras temporadas de observación para la calibración se tuvieron en octubre y noviembre de 2007. El monitoreo de los objetos inició formalmente en marzo de 2008 y continúa hasta el presente año. Las observaciones se llevarón a cabo en el telescopio Ritchey-Chretien de 0.84m y el polarizador de imagen en la banda óptica POLIMA. POLIMA consiste en un prisma giratorio Glan-Taylor y tiene un campo sin viñeteo de $(3 \times 3)'$ en el plano cielo (Hiriart et al. 2005). Nuestras observaciones se llevan a cabo actualmente una vez al mes centradas en la fase de luna nueva. El conjunto de las 37 fuentes, se dividen en grupos de fuentes “ débiles” y “brillante”. Las fuentes “brillantes” se observan cada noche cuando es observable, las fuentes “débiles” sólo 1-2 veces por temporada. Los objetos brillantes ($m_R \leq 16mag$), son observados con un tiempo de exposición entre 60 y 300 segundos. Los objetos de bajo brillo, requieren de un mayor tiempo de exposición entre 500 y 600 segundos. Para la calibración polarimétrica se usan estrellas estándares polarizadas y no polarizadas de la lista de Schmidt et al. (1992).

La reducción de datos, se realiza con un programa de diseñado especialmente para el proyecto-SPM, escrito David Hiriart. El programa está escrito en lenguaje C consta

esencialmente de dos partes: *estándar.c* y *flujo.c*. El programa *estándar* es utilizado para la reducción de las estándares polarimétricas polarizadas y no polarizadas. El programa de *flujo* es utilizado para obtener la fotopolarimetría de los blázares. La calibración de las magnitudes instrumentales se realiza por medio de estándares fotométricas ubicadas en la misma imagen que el objeto de estudio.

3.1. Observaciones y reducción de datos

El monitoreo polarimétrico óptico del blázar 3C 454.3 se llevo a cabo desde el 19 de Octubre del 2007 JD (2,454,393) hasta el 17 de Noviembre del 2014 JD (2,456,979). En este período se realizaron 38 temporadas de observación centradas en luna nueva, el total de puntos colectados fueron 104. Se toman cuatro imágenes en diferentes posiciones de ángulo, utilizando la secuencia 0° , 90° , 45° y 135° para el ángulo de posición del prisma. El tiempo de exposición fue de 240 s por imagen para 3C 454.3. Los Darks no fueron tomadas cuando los detectores estaban operando a temperaturas criogénicas, la imagen Dark es la señal que se genera por el calentamiento del detector. Los Flats fueron tomadas en las cuatro posiciones del polarizador en el filtro R al anochecer o al amanecer, el Flat es una imagen con iluminación uniforme para poder tener una medición de las variaciones espaciales en la respuesta del detector. El Bias, el cual es una imagen con cero tiempo de integración y representa el nivel del detector previo a cualquier detección, fueron tomadas a medía noche. Para cada posición del prisma, los Bias se restaron de los Flat (Flat-Bias). Las imágenes Flats se combinaron para obtener una imagen promedio Flat para cada posición del prisma. La imagen Bias también se resta de todas las imágenes del objeto y las imágenes resultantes se multiplican por el valor promedio del Flat-Bias corregido. Finalmente la imagen del objeto se divide por el campo Flat promedio. Los datos se reducen con un programa escrito por D. Hiriart especialmente para nuestro programa de monitoreo. Para medir la polarización usamos las estándares polarimétricas HD 155197 y HD 155528 y no polarizadas BD+332642 y HD 154892 de Smith&Lupin (1992). Las calibraciones polarimétricas para esta fuente se realizaron utilizando las estrellas estándares polarizadas HD 155197 y HD 155528 y no polarizadas BD+332642 y HD 154892.

Las magnitudes fotométricas en la banda R fueron determinadas mediante dos mediciones ortogonales: $f_1 = f(0^\circ) + f(90^\circ)$ y $f_2 = f(45^\circ) + f(135^\circ)$ donde $f(x)$ es el flujo del objeto o de la estrella estándar. Los datos se analizaron usando un programa de fotometría de apertura, la cual para 3C 454.3 en particular fue de $3''$.

Para calcular los parámetros de Stokes q y u para cada observación

$$q = \frac{f(0^\circ) + f(90^\circ)}{f(0^\circ) - f(90^\circ)} \quad (3.1)$$

y

$$u = \frac{f(45^\circ) - f(135^\circ)}{f(45^\circ) + f(135^\circ)} \quad (3.2)$$

Los parámetros q y u están relacionados con el grado de polarización P y le ángulo de polarización θ por

$$P = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (3.3)$$

y

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right) \quad (3.4)$$

3.2. Resultados observacionales

Las magnitudes en la banda R han sido transformadas a flujos utilizando la siguiente expresión: $F_{obs} = K_0 \times 10^{-0,4m_R}$, con $K_0 = 3,08 \times 10^6$ mJy, para una longitud de onda $\lambda = 640$ nm. Hemos considerado la ambigüedad de 180° en el ángulo de polarización. Para este propósito corregimos suponiendo que la diferencia entre el ángulo de polarización de los datos temporales debe ser menor de 90° . Definimos está diferencia como

$$|\Delta\theta_n| = |\theta_{n+1} - \theta_n| - \sqrt{\sigma(\theta_{n+1})^2 + \sigma(\theta_n)^2} \quad (3.5)$$

donde θ_{n+1} y θ_n son el n-ésimo ángulo de polarización θ_{n+1} y θ_n sus errores. Si $|\Delta\theta_n| \leq 90^\circ$ no necesita corrección. Si $\Delta\theta_n < -90^\circ$ se suma 180° a θ_{n+1} , si $\Delta\theta_n > 90^\circ$ se suma -180° a θ_{n+1} (Sasada et al., 2011).

Hacemos notar que los datos del ángulo de polarización corregidos por la ambigüedad son representados en la Tabla 3.1. En está se muestra en la columna 1 el tiempo universal, la columna 2 día Juliano, la columna 3 y 4 el grado de polarización y sus errores, la columna 5 y 6 el ángulo de polarización y sus errores, la columna 7 y 8 la magnitud en la banda R y sus errores, la columna 9 y 10 el flujo en la banda R y sus errores. La Figura 3.1 se muestra la curva de luz en la banda R, el grado de polarización $P(\%)$ y el ángulo de polarización ($\theta(^\circ)$) obtenidas en las 38 temporadas de observación. Por claridad hemos dividido la curva de luz en ciclos, lo cuales definimos a continuación:

Ciclo I: de 5 de Junio al 3 de Diciembre de 2008 (JD 2,454,623- 2,454,804),

Ciclo II: de 25 de abril al 17 de Noviembre de 2009 (JD 2,454,947-2,455,153),

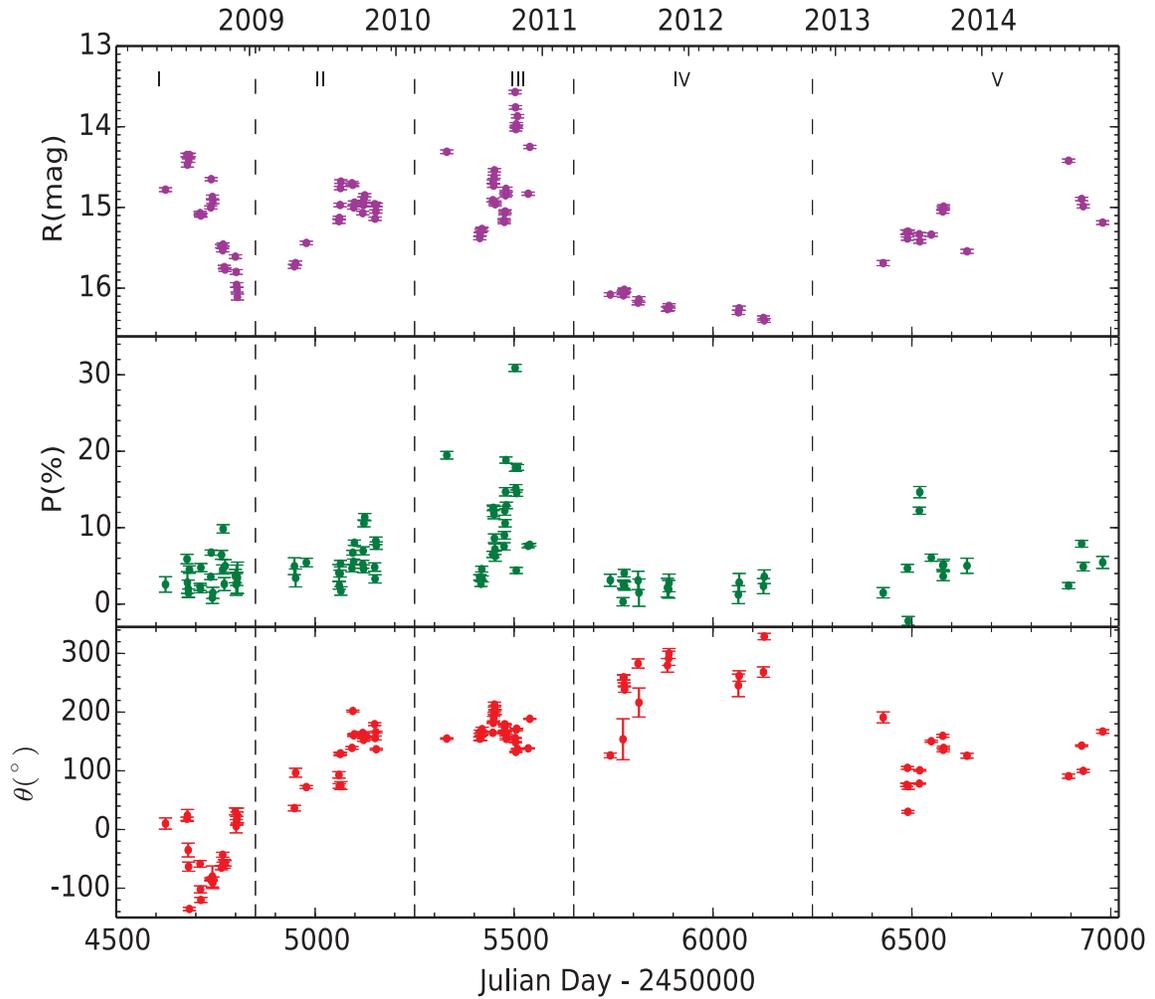


Figura 3.1: Curva de luz de 3C 454.3 obtenida durante $\sim 6,46$ años. El panel superior muestra las variaciones de banda R, el panel medio del grado de polarización P (%) variaciones, y el panel inferior de las variaciones de ángulo de posición $\theta(^{\circ})$. El resultado más importante en esta gráfica es la presencia de una enorme rotación a largo período que comienza el 4 de agosto de 2008 (-135.450°) y termina en el 19 de julio de 2012 d (328.80°) que corresponde a $\Delta\theta = 464,20^{\circ}$ en 1445 días.

Ciclo III: de 13 de Mayo al 8 de Diciembre de 2010 (JD 2,455,330- 2,455,539),
 Ciclo IV: de 28 de Junio de 2011 al 19 de Julio de 2012 (JD 2,455741-2,456,128),
 Ciclo V: de 14 de mayo de 2013 al 17 de Noviembre de 2014 (JD 2,456,427- 2,456,979).
 Los ciclos son marcados con guiones verticales en la Figura 3.1.

Tabla 3.1: Fotometría y polarización e la banda R de 3C 454.3

	date	JD	p (%)	ϵ_p (%)	θ ($^\circ$)	ϵ_θ ($^\circ$)	R (mag)	ϵ_R (mag)	Flux (mJy)	ϵ_{flux} (mJy)
	19/10/07	4393.7947	12.18	0.27	4.75	0.74	14.69	0.02	4.1	0.08
Ciclo I	05/06/08	4623.9789	2.57	1.01	10.17	9.56	14.78	0.02	3.77	0.08
	29/07/08	4677.9744	5.9	0.62	18.34	2.8	14.35	0.02	5.6	0.11
	31/07/08	4679.0082	2.82	1.42	23.82	10.28	14.47	0.03	5.02	0.14
	01/08/08	4680.9518	2	1.14	-35.01	11.7	14.36	0.03	5.55	0.14
	02/08/08	4681.9759	1.44	0.54	-63.3	7.81	14.42	0.02	5.25	0.11
	04/08/08	4683.9661	4.52	0.48	-135.45	2.81	14.35	0.02	5.6	0.11
	31/08/08	4710.8414	2.24	0.47	-58.56	5.63	15.07	0.02	2.89	0.06
	01/09/08	4711.8419	1.96	0.48	-102.09	5.97	15.09	0.02	2.83	0.05
	02/09/08	4712.8368	4.77	0.54	-120.08	4.22	15.1	0.02	2.81	0.05
	27/09/08	4737.6981	3.57	0.37	-84.54	2.18	15	0.02	3.08	0.06
	28/09/08	4738.7668	6.74	0.34	-86.67	1.41	14.65	0.02	4.25	0.08
	01/10/08	4741.7789	0.83	0.75	-80.13	17.95	14.87	0.02	3.47	0.07
	02/10/08	4742.7728	1.47	0.73	-90.71	9.81	14.93	0.02	3.29	0.07
	24/10/08	4764.7436	6.44	0.58	-65.06	3.46	15.48	0.02	1.98	0.04
	26/10/08	4767.771	4.53	0.59	-43.06	4.24	15.53	0.02	1.89	0.04
	28/10/08	4768.7506	9.84	0.55	-58.77	3.16	15.46	0.02	2.02	0.04
	31/10/08	4771.7304	2.62	0.85	-58.38	7.53	15.74	0.02	1.56	0.03
	02/11/08	4773.6892	4.97	0.84	-57.67	4.64	15.77	0.02	1.52	0.03
	28/11/08	4799.6432	3.66	0.87	30.92	5.82	15.61	0.02	1.76	0.04
	30/11/08	4801.6273	2.58	1.43	5.56	11.31	15.8	0.03	1.47	0.04
	01/12/08	4802.6421	3.78	1.33	14.92	7.57	15.96	0.03	1.27	0.03
	02/12/08	4803.7024	2.79	1.39	19.42	10.41	16.02	0.03	1.2	0.03
	03/12/08	4804.7178	3.44	2.06	23.94	12.54	16.11	0.04	1.11	0.04
Ciclo II	25/04/09	4947.9912	4.96	1.1	36.37	4.68	15.73	0.03	1.57	0.04
	28/04/09	4950.9907	3.42	1.17	96.79	7.56	15.69	0.03	1.63	0.04
	26/05/09	4977.9612	5.43	0.56	72.31	2.55	15.44	0.02	2.05	0.04
	15/08/09	5059.9078	4.08	1.09	93.05	5.44	15.17	0.03	2.63	0.07
	16/08/09	5060.8568	2.44	0.48	74.18	4.02	15.13	0.02	2.73	0.05
	18/08/09	5062.8601	3.99	0.44	128.64	2.64	14.97	0.02	3.17	0.06
	19/08/09	5063.8551	5.29	0.42	129.74	2.02	14.76	0.02	3.84	0.07
	20/08/09	5064.8641	1.71	0.55	74.92	6.57	14.68	0.02	4.14	0.09
	17/09/09	5092.778	4.68	0.47	139.06	2.22	14.7	0.02	4.06	0.08
	19/09/09	5094.7973	6.72	0.31	201.91	1.54	14.72	0.02	3.99	0.07
	21/09/09	5096.7887	5.54	0.35	160.44	1.8	15	0.02	3.08	0.06
	23/09/09	5098.8169	8.03	0.35	162.28	1.53	14.94	0.02	3.25	0.06
	14/10/09	5119.7854	5.21	0.53	164.49	2.09	15.07	0.02	2.89	0.06
	15/10/09	5120.7218	6.97	0.53	162.42	1.61	14.96	0.02	3.2	0.06
	16/10/09	5121.7212	4.62	0.52	152.73	2.36	14.97	0.02	3.17	0.06
	17/10/09	5122.7286	10.56	0.45	158.95	1	14.89	0.02	3.41	0.07
	19/10/09	5124.7412	11.39	0.47	156.58	0.97	14.85	0.02	3.54	0.07
	13/11/09	5149.6936	4.84	0.55	179.44	2.43	14.96	0.02	3.2	0.06
	14/11/09	5150.6731	3.3	0.54	155.93	3.37	15.14	0.02	2.71	0.05
	16/11/09	5152.7167	8.28	0.49	166.01	1.4	15.05	0.02	2.94	0.06
	17/11/09	5153.6806	7.65	0.48	136.76	1.43	14.97	0.02	3.17	0.06
Ciclo III	13/05/10	5330.9881	19.47	0.5	155.02	1.21	14.31	0.02	5.82	0.12
	04/08/10	5413.9153	3.46	0.35	154.68	3.11	15.38	0.02	2.17	0.04
	05/08/10	5414.8919	3.51	0.34	166.53	2.8	15.33	0.02	2.27	0.04
	06/08/10	5416.8576	2.65	0.34	155.83	3.82	15.29	0.02	2.36	0.05
	09/08/10	5418.8914	4.58	0.38	163.37	2.47	15.27	0.02	2.4	0.05
	10/08/10	5419.8714	3.29	0.39	171.01	3.33	15.27	0.02	2.4	0.05
	06/09/10	5446.822	6.5	0.41	164.79	1.52	14.91	0.02	3.35	0.06
	07/09/10	5447.7994	12.59	0.36	181.68	0.81	14.68	0.02	4.14	0.08
	08/09/10	5448.768	12.11	0.65	189.01	3.91	14.73	0.02	3.95	0.08
	09/09/10	5449.7723	11.78	0.62	198.19	1.69	14.62	0.02	4.37	0.08
	10/09/10	5450.763	8.61	0.57	212.84	4.22	14.54	0.02	4.7	0.09
	11/09/10	5451.9691	7.17	0.68	206.96	4.27	14.94	0.02	3.25	0.06
	12/09/10	5452.7389	6.27	0.66	200.07	4.5	14.96	0.02	3.2	0.06
	04/10/10	5474.9112	7.55	0.47	166.19	1.33	15.16	0.02	2.66	0.05
	05/10/10	5475.7073	9	0.5	179.11	1.15	15.18	0.02	2.61	0.05
	06/10/10	5476.6852	12.22	0.59	172.17	2.83	15.07	0.02	2.89	0.06
	07/10/10	5477.6921	10.58	0.48	178.88	1.15	15.05	0.02	2.94	0.06
	08/10/10	5478.7106	14.7	0.54	164.13	1.99	14.85	0.02	3.54	0.07
	09/10/10	5479.7019	18.84	0.41	161.15	1.7	14.77	0.02	3.81	0.07
	10/10/10	5480.6856	12.91	0.43	154.36	1.64	14.83	0.02	3.6	0.07
	01/11/10	5502.7751	30.9	0.47	156.02	0.77	13.57	0.02	11.5	0.23
	02/11/10	5503.6788	17.89	0.52	148.69	0.91	13.76	0.02	9.65	0.2
	03/11/10	5504.6392	15.13	0.5	132.21	0.97	14.03	0.02	7.53	0.15
	04/11/10	5505.64	4.4	0.4	170.21	2	13.97	0.02	7.95	0.15
	05/11/10	5506.6896	14.52	0.42	171.75	0.92	14	0.02	7.74	0.15
	07/11/10	5508.6659	17.87	0.38	137.23	0.82	13.87	0.02	8.72	0.17
	04/12/10	5535.673	7.62	0.25	138.26	0.95	14.83	0.02	3.6	0.07
	08/12/10	5539.6848	7.76	0.17	188.57	0.86	14.25	0.02	6.15	0.11
Ciclo IV	28/06/11	5741.9845	3.12	0.79	126.23	4.12	16.08	0.02	1.14	0.02
	30/07/11	5773.9323	0.31	0.54	153.74	34.89	16.06	0.02	1.16	0.02
	31/07/11	5774.888	2.62	0.55	259.02	4.42	16.09	0.02	1.13	0.02
	01/08/11	5775.9159	2.5	0.52	259.1	4.44	16.04	0.02	1.18	0.02
	02/08/11	5776.8957	4.05	0.49	247.2	2.65	16.02	0.02	1.2	0.02
	03/08/11	5777.883	2.35	0.54	238.46	4.63	16.03	0.02	1.19	0.02
	06/09/11	5811.7953	3.1	1.2	282.9	7.82	16.18	0.03	1.04	0.03
	08/09/11	5813.9122	1.5	1.79	216.33	24.72	16.14	0.03	1.08	0.03
	19/11/11	5885.6926	2.15	1.22	279.7	11.63	16.26	0.03	0.97	0.02
	22/11/11	5888.6514	1.95	1.16	291.74	12.08	16.25	0.03	0.97	0.02
	23/11/11	5889.6496	2.77	1.16	299.87	8.51	16.22	0.03	1	0.02
	15/05/12	6063.9776	1.24	1.18	245.59	19.17	16.3	0.03	0.93	0.02
	17/05/12	6065.9794	2.82	1.19	261.56	8.93	16.25	0.03	0.97	0.02
	17/07/12	6126.972	2.36	0.99	268.28	8.84	16.37	0.03	0.87	0.02
	19/07/12	6128.9121	3.58	0.89	328.82	5.45	16.4	0.02	0.85	0.02
Cycle V	14/05/13	6427.97694	1.49	0.67	190.97	9.37	15.69	0.03	1.63	0.05
	14/07/13	6488.88226	4.69	0.51	104.98	2.34	15.39	0.02	2.16	0.04

Tabla 3.2: (Continuación)

date	JD	p (%)	ϵ_p (%)	θ ($^\circ$)	ϵ_θ ($^\circ$)	R (mag)	ϵ_R (mag)	Flux (mJy)	ϵ_{flux} (mJy)
13/08/13	6518.82507	12.22	0.47	78.27	1.08	15.33	0.02	2.27	0.04
14/08/13	6519.88095	14.65	0.74	100.82	1.37	15.42	0.02	2.09	0.04
12/09/13	6548.79226	6.07	0.46	150.39	1.71	15.34	0.02	2.26	0.04
11/10/13	6577.73774	5.07	0.56	159.58	2.35	15.05	0.02	2.94	0.06
12/10/13	6578.72686	3.65	0.59	135.71	3.33	15.01	0.02	3.04	0.06
13/10/13	6579.71429	5.13	0.73	139.07	2.97	14.99	0.02	3.11	0.07
11/12/13	6638.64742	5.01	0.99	125.7	4.15	15.54	0.03	1.87	0.04
23/08/14	6893.89685	2.41	0.41	90.89	3.6	14.42	0.02	5.25	0.1
25/09/14	6926.74527	7.89	0.45	142.9	1.35	14.89	0.02	3.39	0.07
29/10/14	6930.77229	4.91	0.56	99.9	2.47	14.98	0.02	3.12	0.06
17/11/14	6979.67258	5.45	0.79	166.97	3.01	15.19	0.02	2.59	0.05

Hemos estimado el mínimo escala de tiempo de variabilidad en flujo usando el método descrito en Sorcia et al. (2013) donde:

$$\tau = dt / \ln(F_i/F_j) \quad (3.6)$$

donde dt es el intervalo de tiempo entre los flujos F_i y F_j , con $F_i > F_j$. Calculamos todos los posibles escalas de tiempo τ_{ij} para cualquier par de observaciones para las cuales $|F_i - F_j| > \sigma_{F_i} + \sigma_{F_j}$ a la frecuencia ν . El mínimo escala de tiempo se obtiene cuando

$$\tau_\nu = \min \{\tau_{ij,\nu}\} \quad (3.7)$$

donde $i = 1, \dots, N - 1$; $j = j + 1, \dots, N$ y N es el número de observaciones. El error asociado a la escala de tiempo es:

$$\sigma(\tau_\nu) = \frac{\tau_\nu}{\ln(F_i/F_j)} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{F_i}}{F_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_j}}{F_j}\right)^2} \quad (3.8)$$

El mínima escala de tiempo de varibilidad de flujo obtenido en nuestros datos con el método descrito anteriormente en la banda R es $\tau_R = t_{min} = 3,27 \pm 0,24$ días.

Usando el factor Doppler $\delta = 24,6$ dada por (Jorstad et al., 2005), la mínima escala de tiempo calculada anteriormente y $z = 0,859$, el tamaño de la región de emisión dada por $r_b \leq ct_{min}\delta/(1+z)$, sustituyendo los valores, obtenemos $r_b = 1,12 \times 10^{17}$ cm.

Los resultados más importantes en cada ciclo de describen a continuación:

En el Ciclo I

Variabilidad Fotométrica

La fuente muestra un aumento de brillo alcanzando dos veces un flujo máximo de $5,6 \pm 0,11$ mJy ($14,35 \pm 0,02$ mag) el 29 de Julio y 4 de Agosto de 2008 (JD 2454677 y 84) ver Figura 3.2, en este período el flujo tiene pequeñas variaciones. A partir de 4 de Agosto de 2008 (JD 2454684) el flujo comienza a disminuir teniendo fluctuaciones hasta llegar a un mínimo $1,11 \pm 0,04$ mJy ($16,11 \pm 0,04$ mag) el 3 de Diciembre de 2008 (JD 2454804). Este decaimiento en flujo de 4.50 mJy (1.76 mag) fue en 121 días, a una tasa de 0.037 mJy día⁻¹ (0.0145 mag día⁻¹). Este estallido ha sido reportado con un máximo el 16 de Julio (JD 24554663.6) por GASP-WEBT (Villata and et al., 2009).

Variabilidad polarimétrica

El valor promedio del grado de polarización fue es de 3.72 ± 2.08 . El máximo grado de polarización en este ciclo fue de 9.84% el 23 de October de 2008 (JD 2454768).

Variabilidad del ángulo de posición

Una rotación del ángulo de polarización de $23,82^\circ$ (JD 2454679) a $-135,5^\circ$ (JD 2454684) es observada. Esto corresponde a una rotación de $159,27^\circ$ en 5 días, a una tasa de $31,8^\circ$ por día. También se muestra otra rotación del ángulo de polarización de $-135,5^\circ$ (JD 2454683.9) a $30,9^\circ$ (JD 2454799) es decir un $\Delta\theta = 166,3^\circ$ en un período de 115 días (una tasa de $1,45^\circ$ día⁻¹). Es importante notar que esta segunda rotación en dirección de las manecillas del reloj se presenta cuando la fuente disminuye en flujo. Del 4 de agosto al 28 de noviembre de 2008, existe una correlación entre la magnitud en la banda R y el ángulo de polarización con un coeficiente de correlación de Pearson de $r_{R-\theta} = 0,81 \pm 0,2$ ver Figura 3.2.

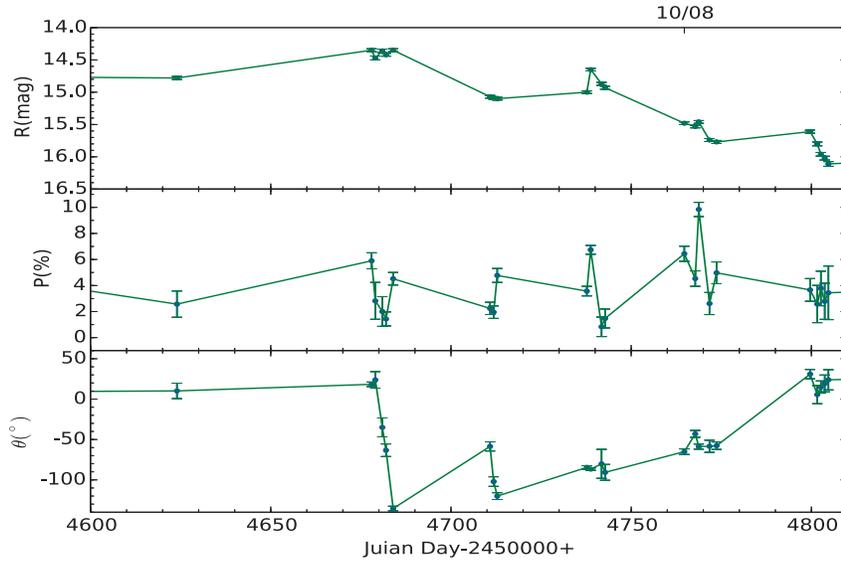


Figura 3.2: Curva de luz del Ciclo I. Se muestra las dos rotaciones de ángulo de polarización; la primera en sentido contrario a las manecillas del reloj y la segunda en sentido a las manecillas del reloj.

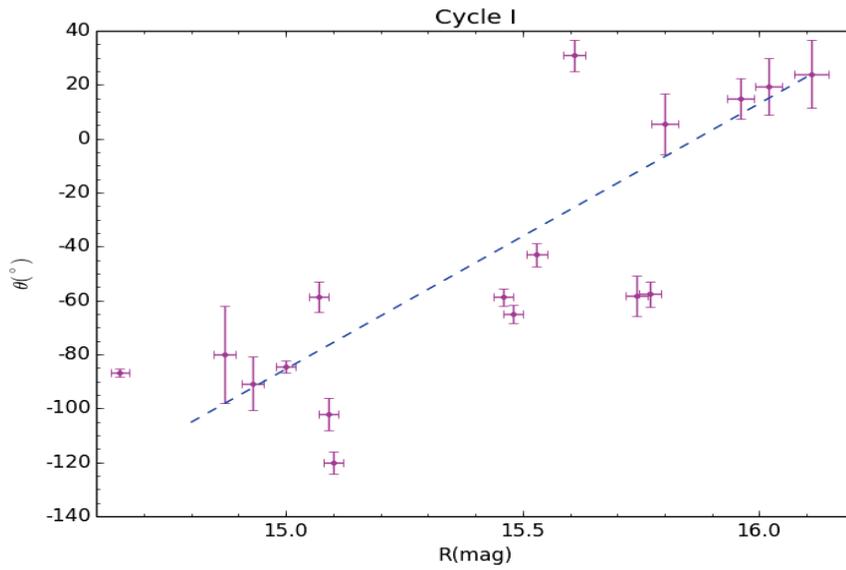


Figura 3.3: Correlación entre la magnitud en la banda R y el ángulo de polarización con un coeficiente de correlación de Pearson de $r_{R-\Theta} = 0,81 \pm 0,2$

En el Ciclo II

Variabilidad Fotométrica

En este ciclo el objeto vuelve a encontrarse en un estado activo mostrando un aumento de flujo de 1.57 ± 0.04 mJy (15.73 ± 0.03 mag) el 25 de Abril de 2009 (JD 2454948) a 4.14 ± 0.09 mJy (14.68 ± 0.02 mag) el 20 de Agosto de 2009 (JD 2455065) en 117 días (con una tasa de 0.022 mJy día⁻¹, 0.008 mag día⁻¹). Después de esto la fuente tiene fluctuaciones en el brillo con una tendencia a bajar discretamente. Este nuevo estallido en diciembre de 2009 fue reportado en múltiples longitudes de onda (Raiteri et al., 2011; Ackermann et al., 2010; Jorstad et al., 2013).

Variabilidad polarimétrica

El grado de polarización se mantiene casi constante hasta el estallido, cuando el flujo se encuentra en el máximo el grado de polarización tiene su mínimo de 1.71 ± 0.55 % el 20 de Agosto de 2009 (JD 2455065). Enseguida el grado de polarización incrementa con ligeras fluctuaciones hasta llegar a 11.39 ± 0.47 % el 19 de Octubre de 2009 (JD 2455125) en 60 días.

Variabilidad del ángulo de posición

En este ciclo el ángulo de polarización muestra una rotación en sentido de las manecillas del reloj de 37.37° el 25 de abril (JD 2454948) al 201° el 19 de septiembre de 2009 (JD 2455095). Esto corresponde a una variación de $\Delta\theta = 165,5^\circ$ en 147 días (una tasa de 1.12° día⁻¹). Muestra una segunda rotación en el ángulo de polarización de 201° el 19 de septiembre (JD 2455095) a 136.8° el 17 de noviembre de 2009, que corresponde a $\Delta\theta=65.1^\circ$ en 59 días (una tasa de 1.10° día⁻¹).

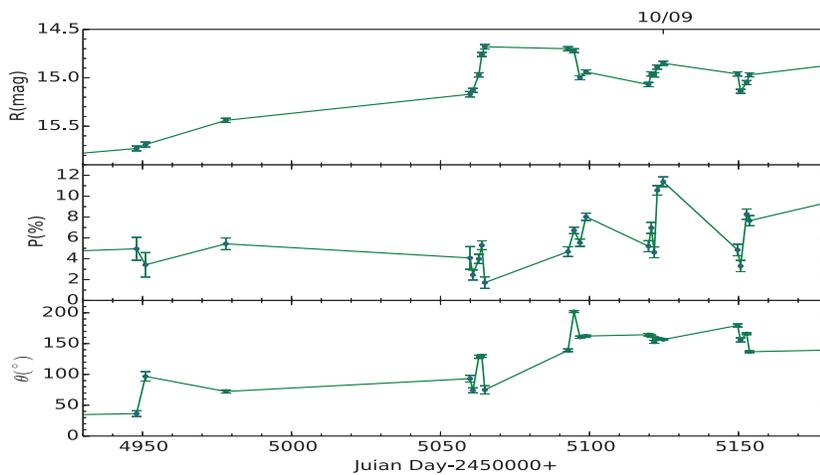


Figura 3.4: Ciclo II, se muestra una rotación en sentido de las manecillas del reloj y otra en sentido contrario. Cuando la magnitud se encuentra en su máximo valor el grado de polarización está en su mínimo valor.

En el Ciclo III

Variabilidad Fotométrica

Nuevamente la fuente está en estado activo mostrando el flujo máximo en todo nuestro período de observación de 11.5 ± 0.23 mJy (13.57 ± 0.02 mag) el 1 de Noviembre de 2010 (JD 2455503). El estallido fue reportado el 19-20 de noviembre cuando la fuente mostró el flujo en rayos γ más alto jamás reportado para un blázar. Después del máximo el flujo decae a una tasa de 0.23 mJy día⁻¹ (0.038 mag día⁻¹).

Variabilidad polarimétrica

El objeto mostró el máximo grado de polarización de (30.9 ± 0.47) % el 1 de Noviembre de 2010 (JD 2455503) el cambio fue de $\Delta P = 28.25$ % en 86 días (a una tasa de 0.32 % día⁻¹). Este máximo coincide con el estado de flujo máximo. Después del máximo grado de polarización está comienza a decaer hasta con un $\Delta P = 26.5$ % en 3 días (a una tasa de 8.83 % día⁻¹). Del 13 de mayo al 8 de noviembre de 2010, existe una anticorrelación entre la magnitud en la banda R y el grado de polarización con un coeficiente de correlación de Pearson de $r_{P-R} = -0.7 \pm 0.01$ ver Figura 3.6.

Variabilidad del ángulo de posición

Se observa una rotación en sentido de las manecillas del reloj, con un $\Delta\theta = 58^\circ$ en 36 días (variando de 154.68° (JD 2455414) a 212.8° (JD2455450)). Después el ángulo tiene otra rotación con un cambio $\Delta\theta = 80.6^\circ$ en 54 días (variando de 212.8° (JD2455450) a 132.21° (JD2455504)), esta rotación es en sentido contrario a la manecillas del reloj.

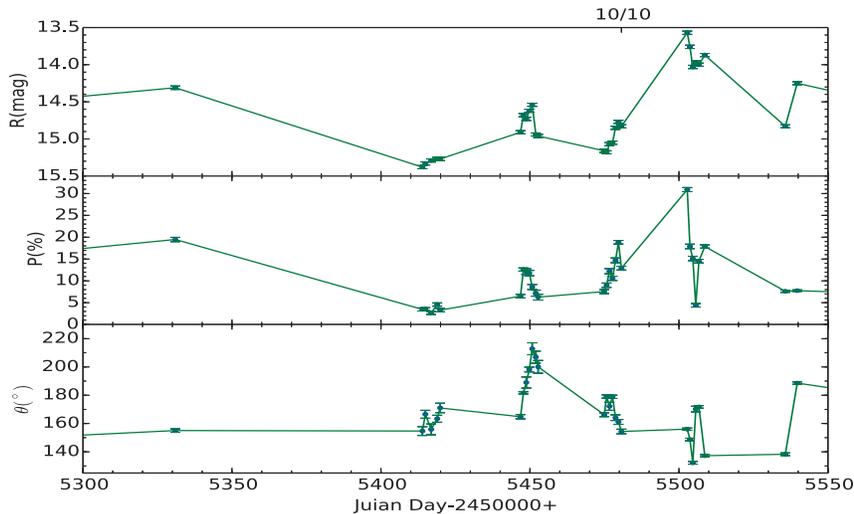


Figura 3.5: Curva de luz en el Ciclo III, la fuente muestra su más alta actividad en todo nuestro período de observación. Con un valor de flujo máximo de 11.5 mJy (13.57 mag) y el máximo grado de polarización $P = 30.9 \pm 0.47$.

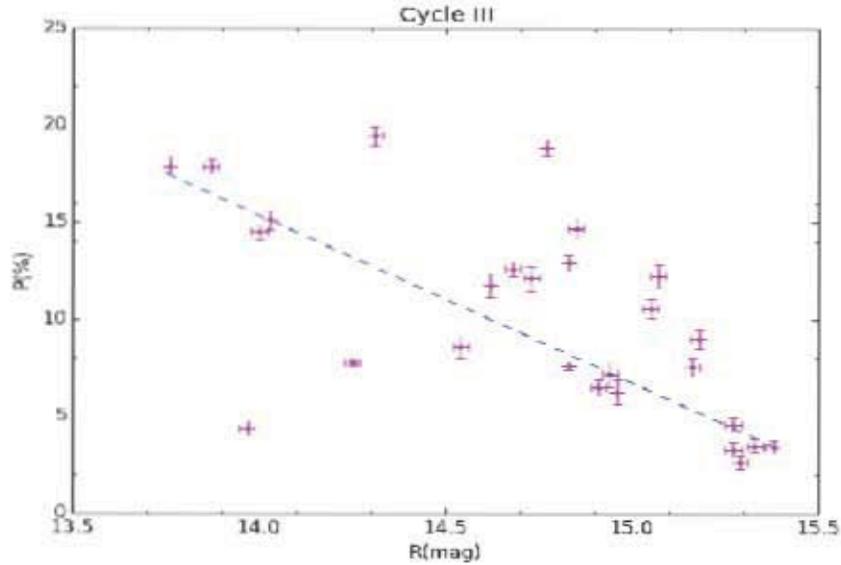


Figura 3.6: Anticorrelación entre la magnitud y el grado de polarización con coeficiente de correlación de Pearson de $r_{P-R}=-0.7\pm 0.01$

En el Ciclo IV

Variabilidad Fotométrica

Mostro el mínimo flujo de 3C 454.3 en todo el período de observación fue de 0.85 ± 0.02 mJy (16.4 ± 0.02 mag) el 19 de julio de 2012 (JD 2455503). El flujo se mantiene entre 0.85 y 1.2 mJy (durante 387 días).

Variabilidad polarimétrica

El grado mínimo de polarización se observa en este ciclo y es de 0.31 % el 30 de Julio de 2011 (JD2455774). El grado de polarización se mantiene entre 4.05 y 0.31 % durante 387 días. Es importante notar que tanto el flujo como el grado de polarización permanecen constantes.

Variabilidad del ángulo de posición

Se observa una rotación $\Delta\theta = 202,6^\circ$ en 387 días (variando de 126.2° (JD 2455742) a 328.8° (JD 2456129), notemos que el máximo ángulo de polarización en toda la temporada de observación es de 328.8° (JD 2456129) que es cuando la fuente está en estado de baja actividad.

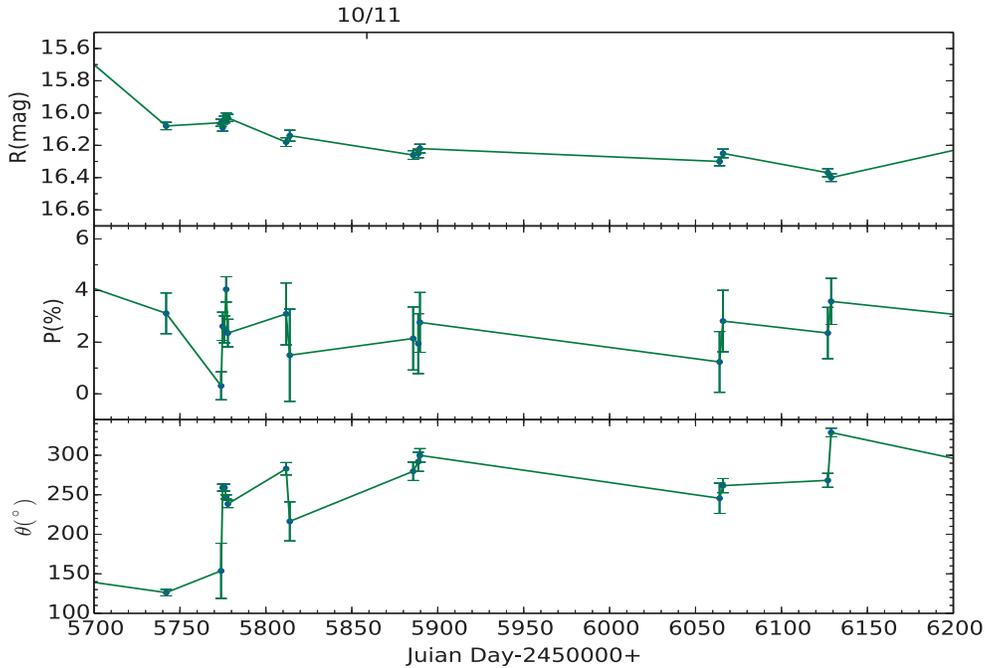


Figura 3.7: Curva de luz en el Ciclo IV, se muestra casi constante la magnitud y el grado de polarización. El máximo ángulo de polarización de 328.8° .

En el Ciclo V

Variabilidad Fotométrica

3C 454.3 muestra un lento aumento de brillo de 1.63 mJy (15.69 mag) el 14 de mayo de 2013 (JD 2456428) a 5.25 mJy (14.42 mg) el 23 de diciembre 2014 (JD 2456894). Es decir una cambio de 3.62 mJy (1.27 mag) en 266 días a una tasa de $0.01 \text{ mJy day}^{-1}$ ($0.004 \text{ mag day}^{-1}$). En este aumento de flujo hay pequeñas fluctuaciones.

Variabilidad polarimétrica

La fuente muestra un aumento en la polarización del 13 de mayo de al 14 de agosto de 2013 de un $\Delta P = 13,16 \%$ en 91 días. Es decir a una tasa de 0.14% day^{-1} . Después de este máximo el flujo comienza a disminuir.

Variabilidad del ángulo de posición

Se observa una rotación $\Delta\theta = 112,7^\circ$ en 90 días (variando de 190.9° (JD 2456428) a 78.2° (JD 2456518), con una tasa de $1.25^\circ \text{ day}^{-1}$ en sentido contrario a las manecillas del reloj. Otra rotación es observada de $\Delta\theta = 81,31^\circ$ en 58 días a un tasa de $1.40^\circ \text{ day}^{-1}$ en sentido de las manecillas del reloj.

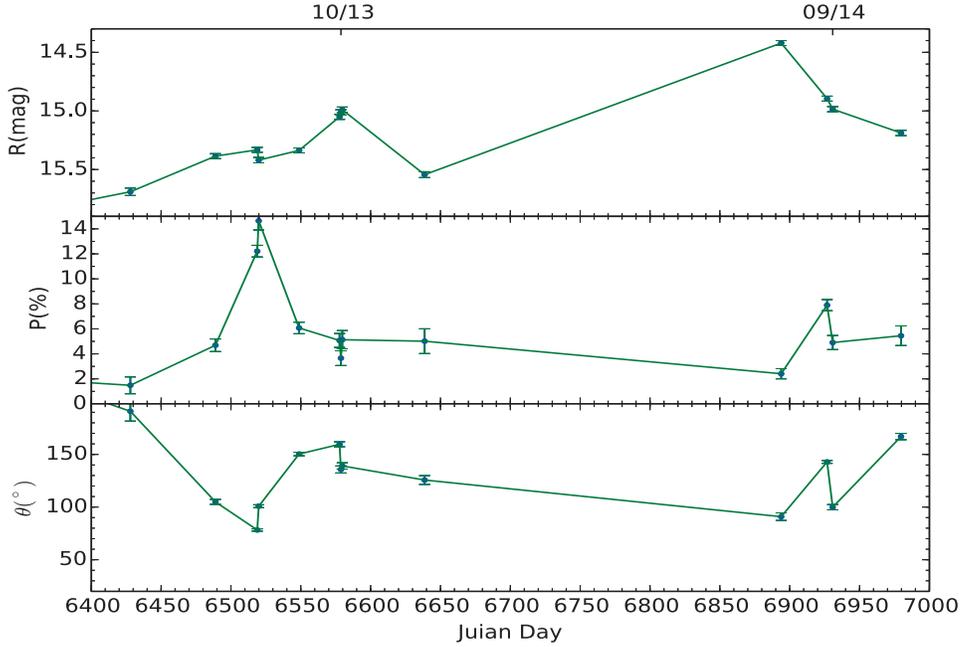


Figura 3.8: Curva de luz del Ciclo V, el máximo grado de polarización de 14.65 % el 14 de agosto de 2013.

3.3. Análisis Polarimétrico

Para identificar la presencia de un componente estable de polarización, se ha utilizado el método sugerido por Jones et al. (1985); Sorcia et al. (2013). En términos de los parámetros de Stokes normalizados, el vector de Stokes absoluto se define como $(Q, U) = (q, u)I$. Se propone que si los valores medios $(\langle Q \rangle, \langle U \rangle)$ observados en el plano de los parámetros de Stokes absolutos Q-U se desvían significativamente del origen, una componente de polarización estable o variable de largo período (\sim meses-años) esta presente.

Para el caso de un modelo de dos componentes, definimos los valores medios de Q y U como la componente de polarización estacionaria. Estos promedios fueron calculados de forma iterativa. En primer lugar, se calculó el promedio de Q (o U) utilizando todos los datos, el valor obtenido se calculó de nuevo después de descartar los valores extremos ($> 3\sigma$). La iteración continúa hasta que no hay valores atípicos. La Figura 3.3 muestra el plano Q -U para el componente estable. Los valores medios obtenidos de los parámetros absolutos de Stokes $\langle Q \rangle = 0,058 \pm 0,06$ mJy y $\langle U \rangle = -0,034 \pm 0,08$ mJy. Estos valores

medios aparecen como un punto de color azul en el plano Q-U y corresponde a un componente estable.

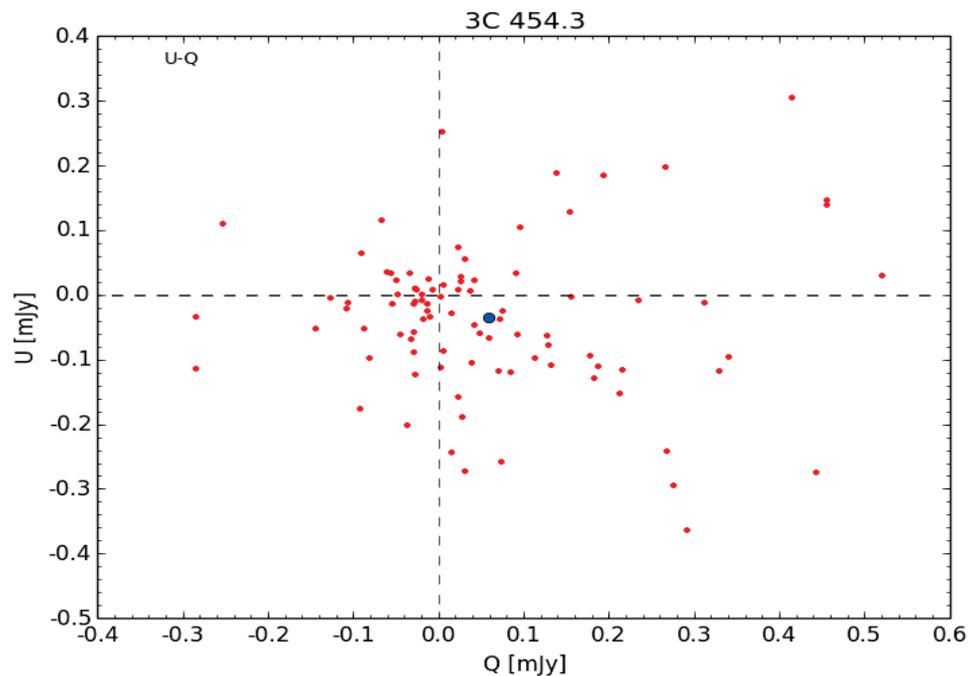


Figura 3.9: Plano de los parámetros absolutos de Stokes Q-U obtenidos utilizando todos los datos. Los valores medios obtenidos son $\langle Q \rangle = 0,058 \pm 0,06$ mJy y $\langle U \rangle = -0,034 \pm 0,08$ mJy.

Las rotaciones del ángulo de polarización también pueden observarse en el plano de Stokes, en la siguiente Figura 3.3 se muestra la primera rotación del ángulo en el Ciclo I.

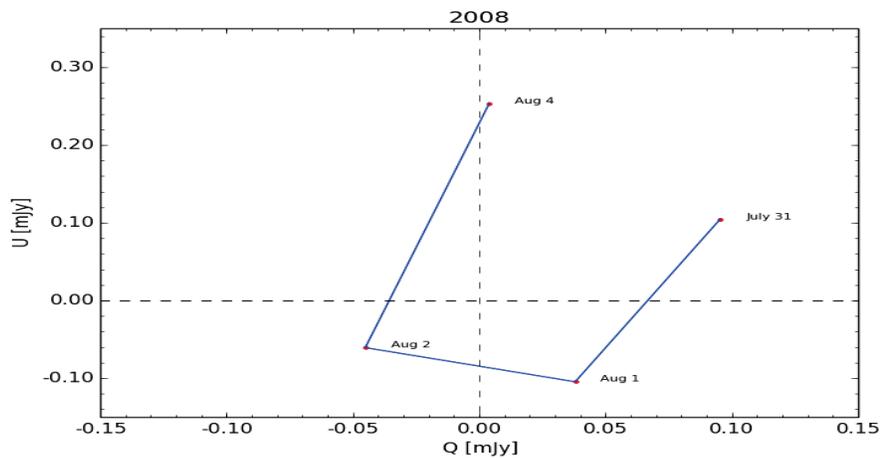


Figura 3.10: Rotación en el Ciclo I

En la Figura 3.3 muestra una rotación del ángulo de polarización en el Ciclo V en el plano de Stokes.

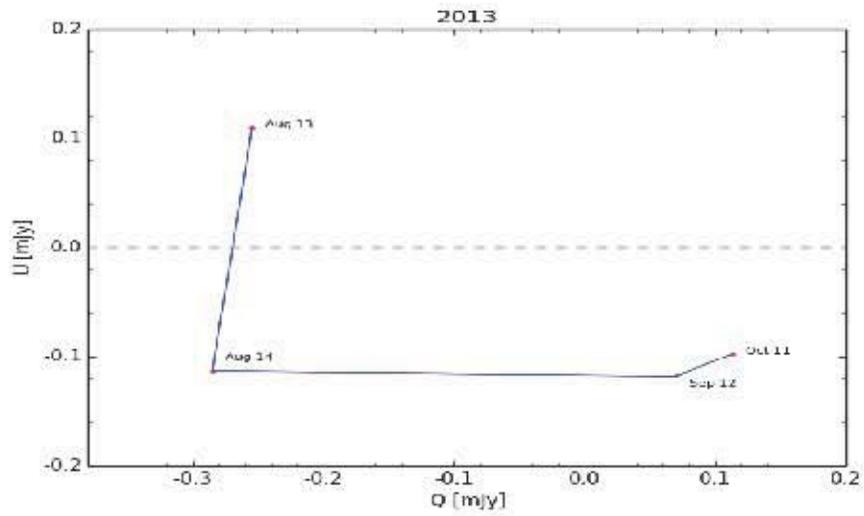


Figura 3.11: Rotación en el Ciclo V

Capítulo 4

Análisis de periodicidad

Como se mencionó anteriormente los blázares presentan una gran variabilidad en todas las frecuencias y el estudio de la variabilidad a través de los diferentes métodos y algoritmos se ha aplicado a curvas de luz en busca de caracterizar tiempos de escalas. El descubrimiento de una periodicidad en la variabilidad podría tener profundas consecuencias en la comprensión global de las fuentes. La periodicidad se ha buscado en las curvas de luz de blázares en todas las longitudes de onda, el ejemplo más conocido es OJ 287 ($z = 0,306$), para el cual se encontró un período en flujo en la banda V de 12 años (Falomo et al., 2014). El período para OJ 287 se le atribuye a la presencia de un sistema binario de agujeros negros supermasivos.

4.1. Rob Per

La manera estándar de buscar periodicidad es mediante los periódogramas que se realizan mediante el análisis de Fourier pero esto sólo se puede aplicar a series de tiempo con tiempos de observación igualmente muestreados. En algunos casos las series requieren el uso de técnicas de interpolación pero esto puede introducir un sesgo adicional. El análisis de periodicidad de las series de tiempo irregular y desigual muestreados no es una tarea fácil por lo que es un campo de investigación activo.

La librería RobPer en R, se puede utilizar para calcular periódogramas y detectar periodicidades en series de tiempo irregularmente muestreado $(t_i, y_i, s_i)_{i=1, \dots, n}$, donde t_i son los tiempos de observación, y_i los valores observados y s_i los errores de la medición. Esto se realiza mediante el ajuste de una función periódica g a los datos $(T_i, y_i)_{i=1, \dots, n}$ o técnicas de regresión como mínimos cuadrados (en inglés least squares), desviación absoluta mínima (en inglés least absolute deviation L_1), mínimos cuadrados recortados

(en inglés least trimmed squares LTS) y regresión robusta M , S y τ . Todas las técnicas de regresión implementadas en RobPer se basan en minimizar el valor

$$SE = \zeta(y - X\beta) \quad (4.1)$$

con respecto al valor del parámetro desconocido $\beta \in \mathbb{R}^m$, donde $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$ es la matriz que contiene los componentes conocidos $g\left(\frac{t}{p_j}\right)$ en los tiempos de medición t_1, \dots, t_n con p el período de prueba y y el vector de observaciones y_1, \dots, y_n . La función $\zeta : \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty[$ se elige de acuerdo con el método de regresión, por ejemplo, es $\zeta(r) = \sum_{i=1}^n r_i^2$ para la de regresión de mínimos cuadrados. Utilizando la misma técnica de regresión, la ubicación μ de los observaciones y_1, \dots, y_n , puede minimizarse

$$SY = \zeta(y - i\mu) \quad (4.2)$$

con $i \in \mathbb{1}_n$ es un vector de n -variable de unos en caso de regresión no ponderada. El períodograma se puede calcular entonces como $R^2 = 1 - \frac{SE}{SY}$, donde R es el coeficiente de determinación. Esta definición del coeficiente de la determinación no sólo se aplica para la regresión de mínimos cuadrados (L2), sino también para la desviación absoluta mínima (L1) y regresión M en general, así como para mínimos cuadrados recortados (LTS) las regresiones S y τ . Para más detalles ver (Thieler et al., 2013, 2014, 013b; Maronna et al., 2006; Salibian and Yohai, 2006). Las funciones periódicas que se ajustan a las curvas de luz (utilizando técnicas de regresión) que ofrece RobPer incluyen funciones step, senos, series de Fourier y funciones spline.

RobPer ofrece dos opciones para adaptarse a las funciones **periódicas “step”**. El número de pasos por ciclo es controlado por los pasos de argumento. Utilizando el **modelo = “step”**, una única función **periódica “step”** con escalones de igual anchura es ajustada para cada período de prueba. Utilizando el **modelo = “2step”**, dos funciones escalonadas con diferentes tiempos de salto opuestas y pasos de igual anchura se ajustan por separado y el períodograma es la media de los dos coeficientes de determinación. Esta es la única opción en la que dos funciones periódicas son ajustadas para un período de prueba.

Las funciones senos son bastante populares para la investigación de periodicidad en el períodograma clásico de Fourier. En RobPer estas funciones se definen mediante **modelo = “sine”**, para obtener el períodograma clásico de Fourier en el caso de tiempos de observación equidistantes es equivalente a **regresión = “L2”** y **modelo = “sine”**.

Recientemente se han propuesto otras funciones periódicas más complejas para el período-grama, las series de Fourier y splines periódicas, esto puede proporcionar una mejor adaptabilidad en comparación con funciones de seno y step. RobPer ofrece la posibilidad de utilizar las series de Fourier de segundo grado **modelo = “Fourier(2)”** o tercer grado **modelo = “Fourier(3)”** o una función spline periódica con cuatro nudos por ciclo **modelo = “splines”** (Thieler et al., 2013).

En esta tesis utilizamos todos los datos obtenidos en San Pedro Mártir en la banda R de 3C 454.3 para calcular períodos en escalas de tiempo de años con la librería RobPer (Thieler et al., 2013, 2014, 013b). Utilicé todas las regresiones proporcionadas en Rob Per y el modelo **“splines”**.. Los resultados fueron los siguientes:

- Regresión **Huber**: muestra el otro pico observado con máxima probabilidad en 884 días.
- Regresión **L2** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 884 días.
- Regresión τ muestra el pico observado con máxima probabilidad en 884 días.
- Regresión **Bisquare** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 884 días.
- Regresión **S** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 884 días.
- Regresión **L1** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 897 días.
- Regresión **LTS** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 1471 días.

En la siguiente Figura 4.1 se muestra el período-grama obtenido utilizando todas regresiones (marcadas en diferentes colores) de los datos de San Pedro Mártir y el pico con máxima probabilidad en 884 días.

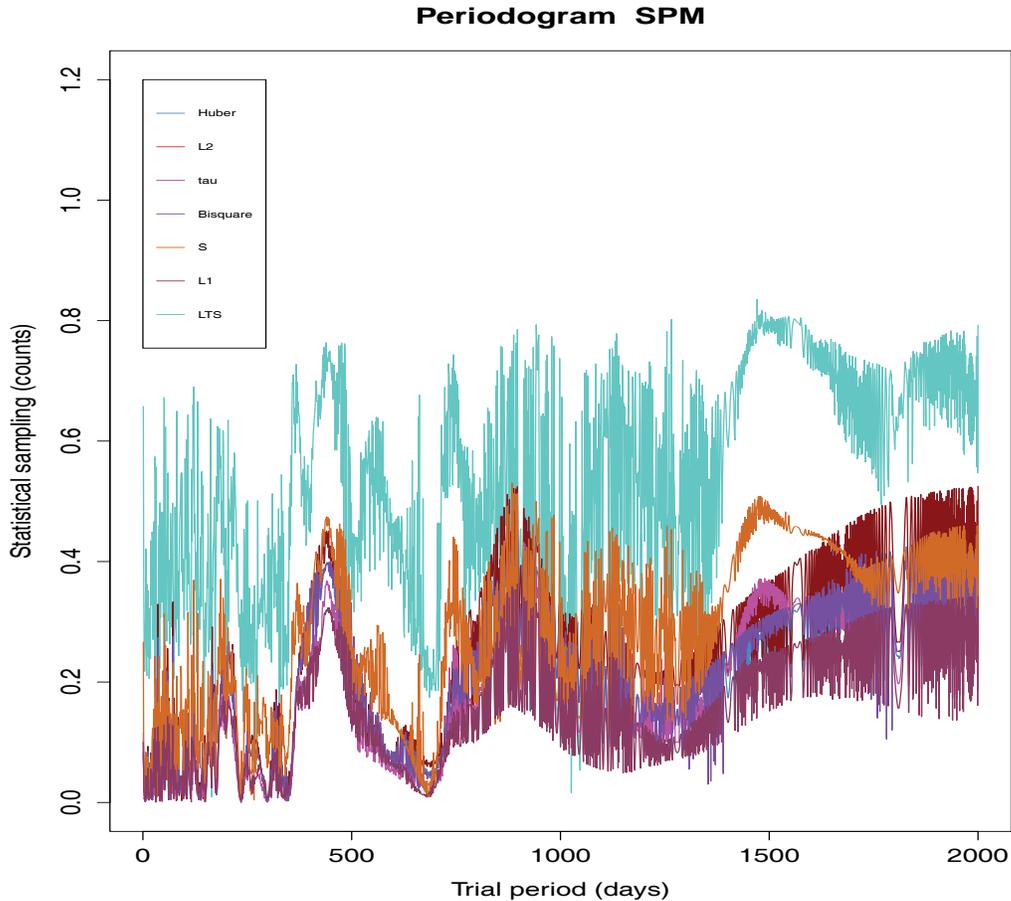


Figura 4.1: Periodograma para todos los datos de San Pedro Mártir

Como las observaciones de San Pedro Mártir son 104 datos, durante 7 años. Recopilamos los datos históricos publicados disponibles en la banda R de 3C 454.3 para calcular periodogramas a escalas de tiempo de varias décadas con paquete RobPer (Thieler et al., 2013, 2014, 013b).

4.2. Datos observacionales

Los datos para la curva de luz histórica en la banda R de 3C 454.3 se recopilaron de diferentes fuentes:

- Datos de AAVSO

Usé los datos de la Asociación Americana de Observadores de Estrellas Variables (AAVSO), a partir de 31 de agosto 2007 al 22 de diciembre 2010 (~ 3.3 años). Se obtuvo las magnitudes con sus correspondientes errores σ .

- Los datos de SMARTS
Utilizando la base de datos de SMARTS se obtuvo las magnitudes del 23 junio de 2008 al 19 de noviembre de 2015 (~ 7.4 años).
- Los datos de San Pedro Mártir
A partir de programa de monitoreo en la banda R se tienen datos de 19 de octubre de 2007 al 17 de noviembre de 2014 (~ 7 años).
- Curva de luz histórica
Se obtuvieron las magnitudes en la banda R mediante el software XYscan de los curvas de luz histórica del artículo (Villata et al., 2006), del 11 de agosto de 1967 al 7 de octubre de 2003 (~ 36 años). Estos datos no cuentan con errores σ .
- Estallido 2005 y 2008
Mediante el software XYscan se obtuvieron los datos de de las curvas de luz en el artículo (Villata et al., 2009), a partir del 14 de junio de 2004 al 14 de agosto de 2008 (~ 4 años). Estos datos no cuentan con sus errores σ .

El total de puntos recolectados son 1395 distribuidos de la siguiente manera:

SPM	104
AVSSO	23
SMARTS	737
Villata 2009	292
Histórico	239

En la Figura 4.2 se muestra la curva de luz histórica de 3C 454.3 obtenida con los datos anteriormente mencionados. En esta curva claramente se observa el estallido impresionante en la banda R de 2005. Además de los estallidos de 2008 a 2014.

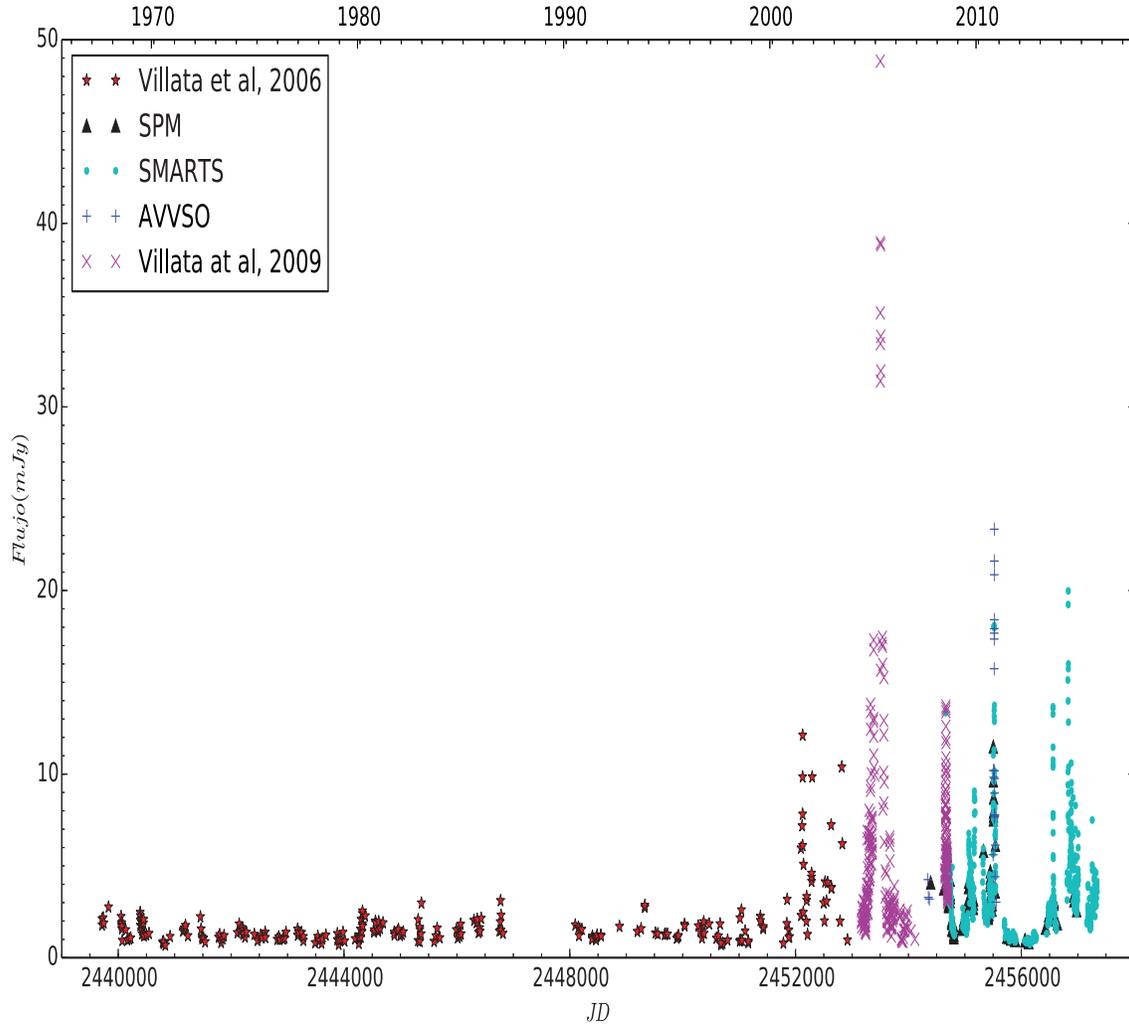


Figura 4.2: Curva histórica en la banda R del blázar 3C 454.3

Utilizando los datos mostrados en la figura 4.2 se obtuvieron diversos periódogramas utilizando las 8 regresiones dadas por RobPer, todas se realizaron utilizando `model="splines"`.

- Regresión **Huber**: muestra el otro pico observado con máxima probabilidad en 438 días.
- Regresión **L2** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 440 días
- Regresión τ muestra el pico observado con máxima probabilidad en 440 días.
- Regresión **Bisquare** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 438 días.

- Regresión **S** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 897 días.
- Regresión **L1** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 897 días.
- Regresión **LTS** muestra el pico observado con máxima probabilidad en 919 días.

En la siguiente Figura 4.2 se muestra el períodograma obtenido utilizando todas regresiones (marcadas en diferentes colores) de los datos históricos recolectados.

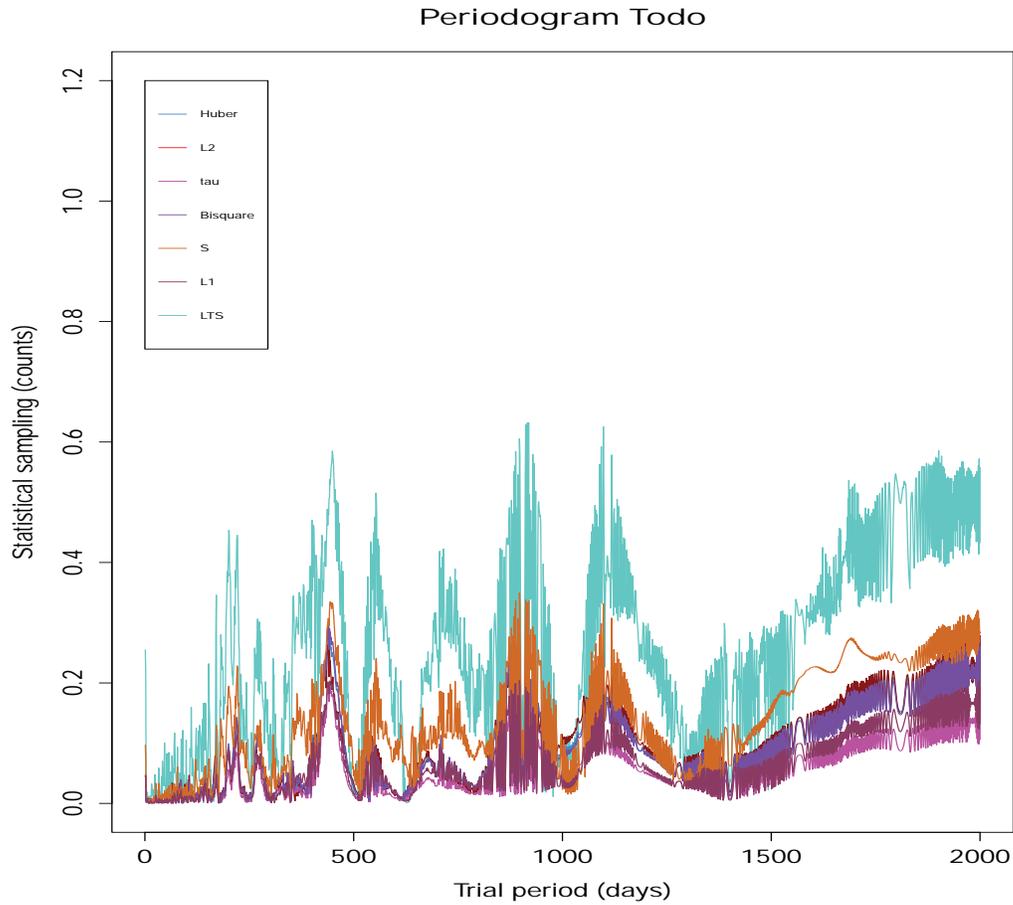


Figura 4.3: Periodograma de los datos históricos en la banda R de 3C 454.3

4.3. Función Ventana

El Teorema de Nyquist o de Muestreo, explica que para poder replicar con exactitud la forma de una señal es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. Si esto no se cumple se produce un efecto llamado “aliasing” que son frecuencias irreales que no tiene nada que ver con la señal original. Dawson et al 2010 han desarrollado un enfoque para identificar los alias mediante el aprovechamiento de las características de la “función de ventana” que es la transformada de Fourier de los tiempos de observación t_i

$$F(\omega) = \sum_{N=0}^N e^{\omega t_{obs}} = \sum_{N=0}^N e^{\frac{2\pi}{N} t_{obs}} \quad (4.3)$$

donde N es el número de puntos y t_{obs} es el fecha de observación.

Calcule la función ventana con ayuda de la ecuación 4.3 para los datos de San Pedro Mártir obteniendo un pico en 360 días, es decir corresponden al de un año (ver Fig 4.3).

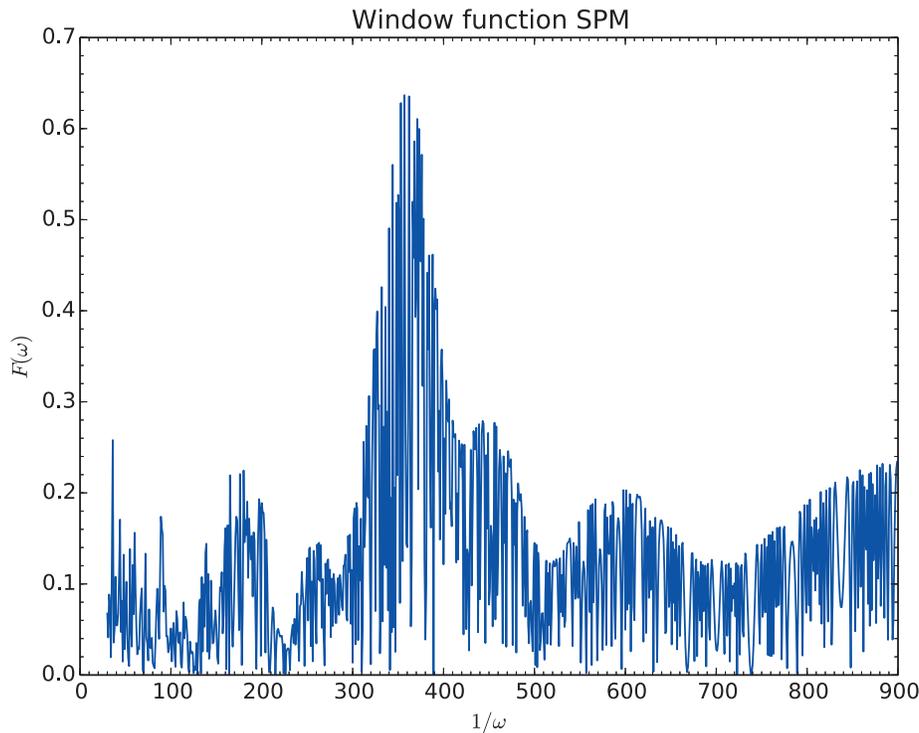


Figura 4.4: Función Ventana de SPM

Calcule la función ventana para los datos históricos en la banda R, obteniendo un pico en 360 días, similar al de la función ventana con datos de SPM (ver Fig 4.3).

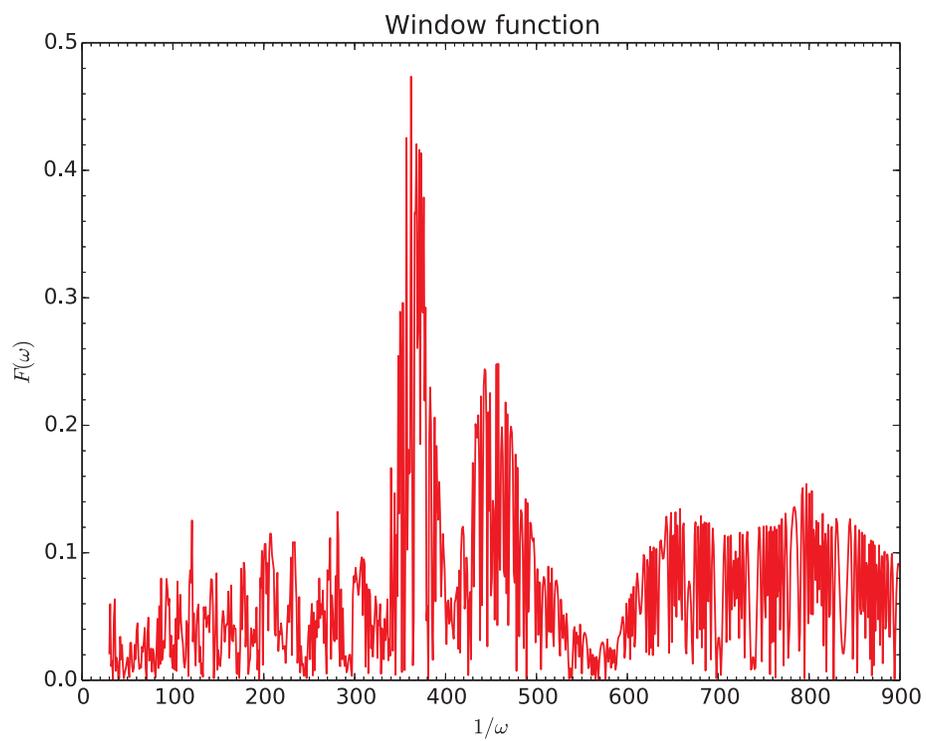


Figura 4.5: Función Ventana de los datos históricos

Capítulo 5

Conclusiones

Se presenta un análisis de la variabilidad polarimétrica en óptico del blázar 3C 454.3 del 19 de Octubre de 2007 al 17 de Noviembre de 2014.

Durante el estallido en el Ciclo I (5 de Junio al 3 de Diciembre de 2008) el valor mínimo del ángulo de posición es $\theta \sim -135^\circ$ seguido de una gran rotación $159,3^\circ$ en 5 días, esto corresponde a una tasa de $31,8^\circ$ por día. En el Ciclo II (25 de abril al 17 de Noviembre de 2009) el blázar mostró actividad con un estallido y dos rotaciones del ángulo de posición: una rotación de $\sim 165,5^\circ$ en 147 días y $\sim 65^\circ$ en 59 días. En el Ciclo III (13 de Mayo al 8 de Diciembre de 2010) la fuente mostró su más grande actividad para nuestro período de observación con un flujo máximo de $\sim 11,5$ mJy (13.57 mag) y su máximo grado de polarización $P \sim 30,9\%$. En el Ciclo IV (28 de Junio de 2011 al 19 de Julio de 2012) fue observado el máximo ángulo de posición $\sim 329^\circ$ y el mínimo valor $P \sim 0,31\%$. En el Ciclo V (14 de mayo de 2013 al 17 de Noviembre de 2014) el ángulo de posición presenta de nuevo dos rotaciones: $\sim 112^\circ$ en 90 días y $\sim 81^\circ$ en 58 días. El resultado más importante obtenido con los datos del monitoreo es la presencia de una enorme rotación de largo-período iniciando el 4 de Agosto de 2008 ($\sim -135,45^\circ$) y terminando el 19 de Julio de 2012 ($\sim 328,8^\circ$) que corresponde a $\sim 464,2^\circ$ en 1445 días. El mínimo grado de polarización de $0,31\%$ se observó durante la fase de baja actividad de nuestro período de observación correspondiente al Ciclo IV. La mínima escala temporal de variabilidad es $\sim 3,27 \pm 0,11$ días. Usando el factor Doppler $\delta \sim 24,6 \pm 4,5$ estimado por Jorstad et al (2005), se calcula el tamaño de la región emisora obtenida $r_b = 1,12 \times 10^{17}$ cm.

Se obtuvo el plano de Stokes Q-U, en el cual se muestra que hay dos componentes de polarización.

En el periodograma realizado con el software de RobPer encontramos una periodicidad

de 884 días, lo que podría explicarse mediante un sistema binario de agujeros negros en el centro de 3C 454.3. La función ventana tiene un pico máximo en ~ 360 días, lo que significa que nuestro período de 884 ± 132 días es real.

Bibliografía

- Abdo, A. A. and Ackermann, M., e. a.: 2011, *ApJ* **736**, 131
- Abdo, A. A., Ackermann, M., and Ajello, M.: 2011, *ApJ* **733**, L26
- Abdo, A. A. and et al.: 2009, *ApJ* **699**, 817
- Ackermann, M., Ajello, M., and Baldini, L.: 2010, *ApJ* **721**, 1383
- Adams, T. F.: 1977, *ApJS* **33**, 19
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., and et al: 2007, *A&A* **470**, 475
- Aharonian, F. A.: 2000, *NA* **5**, 377
- Angel, J. R. P. and Stockman, H. S.: 1980, *ARA&A* **18**, 321
- Beckmann, V. and Shrader, C.: 2012, *Active Galactic Nuclei*, WILEY-VCH
- Blandford, R.D. & Königl, A.: 1979, *ApJ* **232**, 34
- Blandford, R. D. & Rees, M. J.: 1978, in *Pittsburgh Conference on BL Lac Objects*, ed.A. M. Wolfe (Univ. Pittsburgh Press), p. 328
- Bonning, E. W., Bailyn, C., Urry, C. M., Buxton, M., Fossati, G., Maraschi, L., Coppi, P., Scalzo, R., Isler, J., and Kaptur, A.: 2009, *The Astrophysical Journal Letters* **697(2)**, L81
- Bonnoli, G., Ghisellini, G., Foschini, L., Tavecchio, F., and Ghirlanda, G.: 2011, *MNRAS* **410**, 368
- Böttcher, M. & Reimer, A., Sweeney, K., and Prakash, A.: 2013, *ApJ* **768**, 54
- Britto, R. J. G., Buson, S., Lott, B., Razzaque, S., and Bottacini, E.: 2015, *ArXiv e-prints*

- Falomo, R., Pian, E., and Treves, A.: 2014, *A&A Rev.* **22**, 73
- Ghisellini, G., Foschini, L., Tavecchio, F., and Pian, E.: 2007, *MNRAS* **382**, L82
- Impey, C. D. and Tapia, S.: 1990, *ApJ* **354**, 124
- Jones, T. W., Rudnick, L., Aller, H. D., Aller, M. F., Hodge, P. E., and Fiedler, R. L.: 1985, *ApJ* **290**, 627
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., and et al.: 2010a, *ApJ* **715**, 362
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., Joshi, M., MacDonald, N. R., Scott, T. L., Williamson, K. E., Smith, P. S., Larionov, V. M., Agudo, I., and Gurwell, M.: 2012, *ArXiv e-prints*
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., and Larionov: 2010b, *ApJ* **715**, 362
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., Lister, M. L., Stirling, A. M., Cawthorne, T. V., Gear, W. K., Gómez, J. L., Stevens, J. A., Smith, P. S., Forster, J. R., and Robson, E. I.: 2005, *AJ* **130**, 1418
- Jorstad, S. G., Marscher, A. P., and Smith: 2013, *ApJ* **773**, 147
- Katarzyński, K. and Ghisellini, G.: 2007, *A&A* **463**, 529
- Maronna, R., Martin, R., and Yohai, V.: 2006, *Robust Statistics: Theory and Methods.*, John Wiley & Sons, Chichester
- Marscher, A. P. and Gear, W. K.: 1985, *ApJ* **298**, 114
- Mo, H., van den Bosh, F., and White, S.: 2010, *Galaxy Formation and Evolution*, Cambridge
- Mücke, A. and Protheroe, R. J.: 2001, *Astroparticle Physics* **15**, 121
- Netzer, H.: 2013, *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press, United States of America
- Nieppola, E., Tornikoski, M., and Valtaoja, E.: 2006, *A&A* **445**, 441
- Padovani, P. and Giommi, P.: 1995, *ApJ* **444**, 567
- Raiteri, C. M., Villata, M., and Aller, M. F.: 2011, *A&A* **534**, A87
- Raiteri, C. M., Villata, M., and et al.: 2007, *A&A* **473**, 819

- Raiteri, C. M., Villata, M., and et al.: 2008, *A&A* **491**, 755
- Rees, M. J.: 1967, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **135**(4), 345
- Rybicki, G. B. and Lightman, A. P.: 2004, *Radiative Processes in Astrophysics*, WILEY-VCH
- Salibian, M. B. and Yohai, V.: 2006, *A Fast Algorithm for S-Regression Estimates.*, Journal of Computational and Graphical Statistics
- Sasada, M. and et al.: 2012, *PASJ* **64**, 58
- Sasada, M., Uemura, M., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., Ikejiri, Y., Itoh, R., Yamana-ka, M., Sakimoto, K., Ohsugi, T., Yoshida, M., Sato, S., and Kino, M.: 2011, *PASJ* **63**, 489
- Schneider, P.: 2006, *Extragalactic Astronomy and Cosmology An Introduction.*, Springer
- Sikora, M., Moderski, R., and Madejski, G. M.: 2008, *ApJ* **675**, 71
- Sorcía, M., Benítez, E. and Hiriart, D., López, J. M., Cabrera, J. I., Mújica, R., Heidt, J., Agudo, I., Nilsson, K., and Mommert, M.: 2013, *ApJS* **206**, 11
- Thieler, A. M., Fried, R., and Rathjens, J.: 2013, *Technical report, RobPer: An R Package to Calculate Periodograms for Light Curves Based on Robust Regression*
- Thieler, A. M., Fried, R., and Rathjens, J.: 2013b, *Technical report, RobPer: An R Package to Calculate Periodograms for Light Curves Based on Robust Regression Technical Report 2*
- Thieler, A. M., Fried, R., and Rathjens, J.: 2014, *Package RobPer*
- Tosti, G., Chiang, J., Lott, B., Do Couto E Silva, E., Grove, J. E., and Thayer, J. G.: 2008, *The Astronomer's Telegram* 1628
- Urry, C. M.: 1998, *Advances in Space Research* **21**, 89
- Urry, C. M.: 1999, *Multiwavelength properties of blazars*, Vol. 11
- Vercellone, S., Chen, A. W., and et al.: 2008, *ApJ* **676**, L13
- Vercellone, S., Chen, A. W., and et al.: 2009, *ApJ* **690**, 1018
- Vercellone, S., D'Ammando, F., and et al.: 2010, *ApJ* **712**, 405

- Villata, M. and et al.: 2009, *A&A* **504**, L9
- Villata, M., Raiteri, C. M., , and et al.: 2006, *A&A* **453**, 817
- Villata, M., Raiteri, C. M., , and et al.: 2009, *A&A* **504**, L9
- Villata, M., Raiteri, C. M., and Aller, M. F.: 2007, *A&A* **464**, L5
- Wehrle, A. E., Marscher, A. P., Jorstad, S. G., Gurwell, M. A., Joshi, M., MacDonald, N. R., Williamson, K. E., Agudo, I., and Grupe, D.: 2012, *ApJ* **758**, 72
- Zel'dovich, Y. B. and Novikov, I. D.: 1964, *Soviet Physics Doklady* **9**, 246
- Zhang, H., Deng, W., Li, H., and Böttcher, M.: 2016, *ApJ* **817**, 63