

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis de la variabilidad del blazar ON 231

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física Aplicada

por

María Magdalena Martínez Frias

Asesorada por

Dr. Raúl Mújica García
Dra. María del Rosario Pastrana Sánchez

Puebla Pue.
29 de abril de 2026



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis de la variabilidad del blazar ON 231

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

Licenciado en Física Aplicada

por

María Magdalena Martínez Frias

Asesorada por

Dr. Raúl Mújica García
Dra. María del Rosario Pastrana Sánchez

Puebla Pue.
29 de abril de 2026

Título: Análisis de la variabilidad del blazar ON 231
Estudiante: María Magdalena Martínez Frias

COMITÉ

Dra. Ana Aurelia Avilez López
Presidente

Dr. José Silvano Guichard Romero
Secretario

Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez
Vocal

Dra. Yari Juárez López
Vocal

Dr. Raúl Mújica García
Dra. María del Rosario Pastrana Sánchez
Asesor

Dedicatoria

A mi papá Joaquín, un padre excepcional, quien me enseñó el valor del esfuerzo y la importancia de luchar por mis sueños. Aunque ya no esté físicamente conmigo, su constante aliento, su corazón bondadoso y su inmensa fortaleza continúan guiando mi camino.

A mi mamá Magda, una mujer maravillosa, quien ha estado presente en los momentos más importantes de mi vida y cuyo amor y compromiso han sido fuente constante de motivación para seguir adelante. Su apoyo incondicional, su fortaleza y su entrega continúan inspirándome cada día.

A mi hermano Joaco, con quien siempre he compartido una relación llena de cariño y complicidad. Su corazón bondadoso, su sentido del humor y su personalidad única continúan llenando mi vida de alegría y momentos felices.

A mi novio Lalo. Su apoyo constante y la manera en que siempre me impulsa a dar lo mejor de mí han sido fundamentales en este camino. Su compañía en cada paso, así como su presencia en los momentos buenos y difíciles, lo han convertido en mi inspiración diaria y el mejor compañero.

Este logro también les pertenece, pues gran parte de quien soy y de lo que he logrado se lo debo a ellos.

Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. Raúl Mujica, gracias por su paciencia y apoyo en todo momento. Gracias por compartir conmigo su valioso conocimiento, pues más allá de brindarme el material necesario para la realización de esta tesis, me transmitió su experiencia y pasión por la ciencia. Gracias también por haberme hecho parte de tantos proyectos de divulgación e investigación, los cuales me permitieron conocer distintas áreas de la ciencia e inspirarme a seguir por este camino.

A mi asesora, la Dra. Rosario Pastrana, por su paciencia y apoyo durante este proceso, por compartir conmigo su valioso conocimiento y por brindarme orientación a lo largo de esta etapa.

A todos los profesores de la facultad, quienes han sido grandes docentes y guías a lo largo de mi trayectoria académica, iluminando este camino con su sabiduría, entrega y dedicación.

A todos aquellos profesores de quienes tuve el privilegio de aprender durante mi formación académica. De manera especial, a Miss Gaby y a Miss Amalia, quienes siempre se interesaron en mi crecimiento personal y académico, me brindaron las herramientas necesarias para elegir esta carrera y estudiar en la universidad que deseaba, y que hasta hoy continúan al tanto de mi camino.

A mis abuelos, Lorenzo, Guille, Rosa y Enrique. Gracias porque, aunque ya no estén conmigo, siempre sentí el apoyo de cada uno de ustedes en las distintas etapas que tuve la fortuna de compartir a su lado. Su recuerdo permanece siempre en mi mente y en mi corazón.

A mis tíos, por estar presentes en cada etapa de mi vida. De manera especial, a mis padrinos, Fernando y Doris, por mostrar un genuino interés en todo lo que hago, tanto en lo profesional como en lo personal. Gracias por ser un apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mis amigos de la universidad, en especial a Mytzi, Tania, Hugo, Mayo y Max. Este proceso no habría sido lo mismo sin ustedes y sin los momentos compartidos a lo largo de esta etapa.

A mis amigas, Bianca, Sofi, Fer y Dulce, quienes siempre han sabido escucharme y estar presentes en los momentos más importantes de mi vida. Gracias porque, aunque hemos tomado caminos diferentes, siempre se han mantenido cerca.

A Ale y a Meche, por ser familia. Todo lo que hicieron por mi papá lo llevo en el corazón y lo agradezco como propio. Este logro también lleva consigo mi agradecimiento hacia ustedes.

Por último, expreso mi más sincero agradecimiento tanto al proyecto *Photopolarimetric Variability Monitoring of TeV Blazars at SPM*, encabezado por la Dra. Érika Benítez del IA-UNAM, por proporcionarme los datos de ON 231 obtenidos en el OAN-SPM, como al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, por otorgarme una beca durante el desarrollo de este trabajo. El apoyo de ambas instituciones hizo posible la realización de esta investigación.

Índice general

Resumen **xv**

1. Introducción **1**
1.1. Núcleos Activos de Galaxias (AGN) . . . 1
1.2. El Modelo Unificado de AGNs . . . 1
1.2.1. Estructura de los AGN . . . 2
1.2.2. Orientación y efectos de proyección . . . 3
1.2.3. Efecto Doppler y beaming relativista . . . 4
1.3. Clasificación de los Núcleos Activos de Galaxias . . . 5
1.3.1. Diferencias entre QSOs y cuásares . . . 5
1.3.2. Clasificación de los Núcleos Activos de Galaxias . . . 5
1.3.3. Blazares: BL Lacs y FSRQs . . . 7
1.4. Variabilidad en AGNs . . . 8
1.4.1. Escalas de variabilidad temporal: corta, mediana y larga duración . . . 8
1.4.2. Mecanismos físicos responsables de la variabilidad . . . 8
1.4.3. Variabilidad polarimétrica . . . 10
1.4.4. Objetivos de la tesis . . . 10
1.4.5. Estructura de la tesis . . . 10

2. Características espectrales y polarimétricas de ON 231 **13**
2.1. Propiedades generales . . . 13
2.1.1. Generalidades y contexto astronómico . . . 13
2.1.2. Variabilidad y polarización . . . 14
2.2. Estudios previos . . . 14
2.2.1. Eventos de alta actividad registrados . . . 14
2.3. Propiedades polarimétricas de ON 231 . . . 15
2.3.1. Estudios previos de polarización . . . 15
2.3.2. Evolución de la polarización a lo largo del tiempo . . . 15
2.3.3. Variabilidad polarimétrica de ON 231 . . . 16

3. Observaciones polarimétricas y recopilación de datos multifrecuencia **17**
3.1. Programa de Monitoreo Polarimétrico en San Pedro Mártir . . . 17
3.2. Telescopio de 0.84 m . . . 17
3.3. POLIMA . . . 18
3.4. Estrategia de observación . . . 20
3.4.1. Criterios de selección de ON 231 . . . 20
3.4.2. Campañas observacionales . . . 21
3.5. Comparación con otras bases de datos en distintas bandas . . . 21
3.5.1. Características de los telescopios utilizados . . . 21
3.5.2. Síntesis del análisis multifrecuencia . . . 23

4. Análisis y resultados de los datos polarimétricos **25**
4.1. Análisis de variabilidad de ON 231 con datos del OAN-SPM 25
4.1.1. Intervalo temporal de los ciclos 27
4.1.2. Resultados principales 28
4.1.3. Correlaciones entre el flujo y los parámetros de polarización 28
4.1.4. Comparación con estudios previos en el intervalo 2008–2012 29
4.2. Descripción general de la variabilidad temporal 29
4.3. SED 30
4.3.1. División de las SEDs en máximos y mínimos 30
4.3.2. SED de ON 231 durante eventos de máxima emisión 31
4.3.3. SED de ON 231 durante eventos de mínima emisión 31
4.3.4. Comparación entre los SED de máximos y mínimos reales 32
4.3.5. Comportamiento polarimétrico asociado a los estados de máxima y mínima emisión 33
4.4. Definición de los parámetros de polarización 34
4.4.1. Parámetros de Stokes 34
4.4.2. Ángulo de polarización y su variabilidad 35
4.4.3. El plano de Stokes y su relevancia en el estudio de blazares 36
4.4.4. Comparación del plano de Stokes 37
4.5. Parámetros de Stokes para cada flare 39
4.5.1. Plano de Stokes del Flare 1 40
4.5.2. Plano de stokes flare 2 41
4.5.3. Plano de stokes flare 3 42
4.5.4. Plano de Stokes flare 4 43
4.6. Métodos de análisis de curvas de luz polarimétrica 43
4.6.1. Función de Correlación Cruzada Discreta Transformada en Z (ZDCF) . . . 44
4.7. Análisis de las correlaciones ZDCF entre observatorios 45
4.7.1. Correlación ZDCF entre SPM y Steward 45
4.7.2. Correlaciones ZDCF entre SPM y otros observatorios 46

Conclusión **48**

5. Perspectivas a futuro **51**

A. Curvas de luz multi-longitud de onda y parámetros de polarización del blazar ON 231 obtenidas con distintos observatorios **53**

Bibliografía **61**

Índice de figuras

1.1. Esquema del Modelo Unificado de AGN, donde se muestra que la clasificación observacional de estos objetos depende principalmente del ángulo con el que se observa el eje del jet relativista. Crédito de la imagen: NASA 2

3.1. Telescopio de 0.84 m del OAN-SPM. Imagen tomada de [108] 18
3.2. Diagrama óptico del telescopio de 0.84 m en configuración Ritchey–Chrétien. Se muestra el recorrido de la luz desde su incidencia en el espejo primario (M1), su reflexión hacia el espejo secundario (M2) y su posterior enfoque en el plano focal. . 18
3.3. Esquema general del polarímetro de imagen POLIMA. Imagen tomada de [109] . . 19
3.4. Esquema del prisma de Glan-Taylor utilizado como analizador de polarización en el sistema POLIMA. La imagen fue tomada de [110] 20
3.5. Curvas de luz multifrecuencia del blazar ON 231, abarcando observaciones en bandas de radio, infrarrojo, visible y rayos X. De arriba a abajo, se presentan: (1) Flujo radio en SAO-RAS con distintas frecuencias, (2) Flujo en la banda I de REM-ESO, (3) Flujo en la banda J de REM-ESO, (4) Flujo en la banda H de REM-ESO, (5) Flujo en la banda K de REM-ESO, (6) Flujo en la banda V del visible de REM-ESO, (7) Flujo en la banda R del visible de REM-ESO, (8) Flujo en banda R del visible de OAN-SPM, (9) Flujo óptico en el Observatorio Steward, (10) Flujo en rayos X de Swift-XRT, (11) Flujo en rayos gamma por FermiLat, (12) Porcentaje de polarización en la banda R de OAN-SPM, y (13) Ángulo de polarización en la banda R de OAN-SPM. Los datos cubren un amplio intervalo de tiempo en MJD = JD − 2450000.0, permitiendo un análisis comparativo de la variabilidad en distintas longitudes de onda. Para una mejor visualización de cada conjunto de datos, las curvas de luz individuales se presentan por separado en el Apéndice A. . 24

4.1. Curvas de luz fotopolarimétricas del blazar ON 231 obtenidas en el OAN-SPM en la banda R. De arriba a abajo, se presentan: (1) F(mJy), (2) R(mag), (3) $P(\%)$, y (4) $\Theta(^\circ)$. Los datos cubren un amplio intervalo de tiempo en días julianos (JD − 2450000.00). Las líneas punteadas verticales marcan la separación en ciclos, cada ciclo corresponde a un año. 27
4.2. Distribuición de Energía Espectral (SED) del blazar ON 231 construido a partir de los estados de máxima emisión observados en cada banda. Los puntos verdes representan los datos reales obtenidos a partir de observaciones multibanda; el punto negro corresponde a un punto virtual introducido para conectar la región de sincrotrón con la región de Compton inverso. Se ajustaron dos componentes mediante curvas log-parabólicas: la primera (línea azul punteada) modela la emisión de sincrotrón en el infrarrojo y óptico, y la segunda (línea roja punteada) representa la emisión Inverse Compton en rayos X y rayos γ. En la esquina inferior derecha se muestran los valores promedio de polarización óptica en el OAN-SPM, asociados al estado de máximo y mínimo flujo. 32

4.3. Distribución de Energía Espectral (SED) del blazar ON 231 construido a partir de los estados de mínima emisión observados en cada banda. Los puntos cafés representan los datos reales obtenidos a partir de observaciones multibanda; el punto gris indica un punto virtual utilizado para conectar la región de emisión sincrotrón con la región dominada por el proceso de Inverse Compton. Se ajustaron dos componentes log-parabólicos: la curva azul punteada representa el ajuste de la emisión sincrotrón en el infrarrojo y óptico, mientras que la curva roja punteada describe la emisión Inverse Compton en rayos X y rayos γ. En la esquina inferior derecha se muestran los valores promedio de polarización óptica en el OAN-SPM, asociados a los estados de máximo y mínimo flujo. 33
4.4. Comparación entre las distribuciones de energía espectral (SED) de ON 231 durante los estados de máxima y mínima actividad. Los ajustes mediante log-parábolas modelan dos componentes principales: la emisión sincrotrón (curvas punteadas azul y celeste) y la emisión Inverse Compton (curvas punteadas roja y amarilla) para máximos y mínimos respectivamente. Los puntos representan los datos reales de cada estado, mientras que los puntos virtuales permiten conectar las regiones de emisión en ausencia de observaciones intermedias. Se aprecia un desplazamiento en la potencia radiada tanto en la región sincrotrón como en la región Compton entre ambos estados, en concordancia con los cambios observados en la polarización óptica registrada en el OAN-SPM. 34
4.5. (a) Plano de Stokes Q vs. U construido a partir de los datos polarimétricos de esta tesis para ON 231 durante el evento de 2008. Las fechas están etiquetadas en formato calendario. 38
4.6. (b) Plano de Stokes Q vs. U publicado por [91] para el mismo intervalo temporal. Las fechas están etiquetadas en calendario. 39
4.7. Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 1 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal. 40
4.8. Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 2 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal. 41
4.9. Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 3 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal. 42
4.10. Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 4 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales antes, durante y después del máximo del evento, mientras que la línea indica la evolución temporal de los parámetros de Stokes. 43
4.11. Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz ópticas obtenidas en el OAN-SPM y el observatorio Steward para el blazar ON 231. 46
4.12. Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el telescopio REM para el blazar ON 231. 47
4.13. Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el telescopio Fermi LAT para el blazar ON 231. 47
4.14. Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el radiotelescopio RATAN-600 para el blazar ON 231. 47
4.15. Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y Swift-XRT para el blazar ON 231. 48

A.1. Curva de luz en radio del blazar ON 231 obtenida a partir de observaciones del observatorio SAO-RAS en múltiples frecuencias (2.64–43 GHz). Los diferentes símbolos representan cada frecuencia observada. El flujo se presenta en mJy en función MJD. Se observa la variabilidad de la emisión sincrotrónica en radio. 53

A.2. Curva de luz en la banda I del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano. 54
A.3. Curva de luz en la banda J del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano. 54
A.4. Curva de luz en la banda H del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano. 55
A.5. Curva de luz en la banda K del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano. 55
A.6. Curva de luz en la banda V del blazar ON 231. Se muestra la variabilidad en el rango óptico. 56
A.7. Curva de luz en la banda R del blazar ON 231 obtenida con REM-ESO. Se muestra la variabilidad en el rango óptico. 56
A.8. Curva de luz en la banda R del blazar ON 231 obtenida en el OAN-SPM. 56
A.9. Curva de luz óptica del blazar ON 231 obtenida por el programa del Steward Observatory. Los datos corresponden a observaciones fotométricas en banda V. 57
A.10. Curva de luz en rayos X del blazar ON 231 obtenida con el instrumento XRT a bordo del satélite Swift. La tasa de conteo fue escalada para facilitar la comparación con otras bandas. 57
A.11. Curva de luz en rayos gamma del blazar ON 231 obtenida con el telescopio Fermi LAT. Se muestra el flujo integrado en función del tiempo (MJD), correspondiente a la componente de alta energía del espectro. 58
A.12. Variación temporal del grado de polarización lineal ($P\,\%$) del blazar ON 231 obtenida en el OAN-SPM. Este parámetro proporciona información sobre el grado de orden del campo magnético en la región emisora. 58
A.13. Evolución temporal del ángulo de polarización (EVPA, θ) del blazar ON 231. Las variaciones en este parámetro reflejan cambios en la geometría del campo magnético o en la estructura del jet. 59

Índice de tablas

3.1. Características del telescopio del Observatorio de San Pedro Mártir (SPM) [47] . . 21
3.2. Características del telescopio del Observatorio de Arizona [69] 22
3.3. Características del telescopio Swift-XRT [70] 22
3.4. Características del telescopio REM del Observatorio de La Silla [71] 22
3.5. Características del radiotelescopio RATAN-600 del SAO-RAS [72] 23
3.6. Características del telescopio espacial Fermi LAT [82] 23

4.1. Parámetros polarimétricos promedio y en el pico de los flares detectados en el blazar ON 231. Los valores promedio fueron calculados mediante el promedio vectorial en el plano Q–U. 40

Resumen

En esta tesis se presenta un análisis polarimétrico del blazar ON 231 (W Comae), basado principalmente en observaciones ópticas obtenidas en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) durante el periodo 2008–2024. La amplia cobertura temporal permitió estudiar la variabilidad de la fuente en escalas de tiempo largas y analizar de manera conjunta el flujo óptico, el grado de polarización y el ángulo de polarización en distintos estados de actividad.

El análisis de las curvas de luz mostró una variabilidad óptica significativa, caracterizada por fases de ascenso y descenso del flujo y por la presencia de flares de distinta amplitud y duración. Desde el punto de vista polarimétrico, se observó una amplia dispersión en el porcentaje y en el ángulo de polarización, así como una anticorrelación débil entre el flujo y el grado de polarización ($r \approx -0.20$), mientras que no se encontró una correlación significativa entre el flujo y el ángulo de polarización.

Se realizó un estudio detallado de flares individuales mediante el análisis de los parámetros de Stokes y su representación en el plano Q–U, mostrando que eventos fotométricamente similares pueden presentar comportamientos polarimétricos distintos, desde estados dominados por campos magnéticos relativamente ordenados hasta escenarios compatibles con superposición de múltiples regiones emisoras. La comparación con estudios previos para eventos específicos mostró una buena concordancia, validando la metodología empleada.

Asimismo, se investigó la relación temporal entre distintos observatorios mediante la función de correlación cruzada transformada en Z (ZDCF), encontrándose una correlación óptico–óptico fuerte entre OAN-SPM y Steward Observatory con un máximo localizado cerca de $\tau \approx 0$, lo que indica variabilidad prácticamente simultánea y consistente con un origen común dominado por emisión sincrotrón en el jet relativista.

Adicionalmente, se construyeron Distribuciones de Energía Espectral (SEDs) correspondientes a estados de máxima y mínima emisión utilizando datos multifrecuencia desde radio hasta rayos gamma. Los resultados muestran una estructura de doble joroba característica y consistente con la clasificación de ON 231 como un blazar de tipo IBL, evidenciando cambios en la eficiencia energética del jet entre distintos estados de actividad.

En conjunto, los resultados obtenidos en este trabajo permiten caracterizar el comportamiento polarimétrico del blazar ON 231 a lo largo de un intervalo temporal extenso. El análisis realizado muestra que su emisión óptica es consistente con un origen sincrotrónico dominante en el jet relativista, y que la variabilidad observada puede interpretarse en términos de cambios en la estructura del campo magnético y en la contribución relativa de distintas regiones emisoras dentro del chorro.

Palabras clave: blazares; ON 231 (W Comae); polarización óptica; parámetros de Stokes; variabilidad; SED.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Núcleos Activos de Galaxias (AGN)

Los Núcleos Activos de Galaxias (AGN, Active Galactic Nuclei) son regiones extremadamente luminosas en el centro de ciertas galaxias, cuya emisión no puede explicarse únicamente por la contribución estelar. Su radiación intensa, que incluye una significativa componente no térmica, proviene principalmente del proceso de acreción de material hacia un agujero negro supermasivo (SMBH, Supermassive Black Hole), cuya masa puede variar entre millones y miles de millones de veces la del Sol [1].

Los primeros indicios de los AGN surgieron a inicios del siglo XX, cuando los avances en espectroscopía revelaron líneas de emisión inusuales en algunas galaxias. En 1908, E. A. Fath detectó líneas de emisión intensas en el espectro óptico de la galaxia NGC 1068 , lo que sugería la presencia de gas ionizado en su núcleo [2]. Posteriormente, V. M. Slipher observó que estas líneas presentaban un ensanchamiento considerable, lo que indicaba la existencia de movimiento de gas a alta velocidad en la región central de la galaxia [3].

En 1943, Carl Seyfert identificó un grupo de galaxias con núcleos brillantes y cuyos espectros estaban dominados por líneas de alta excitación, estableciendo las bases para su clasificación [4]. Sin embargo, la distinción de los AGN como una categoría específica, dentro de la astronomía extragaláctica, ocurrió en la década de 1960 con el desarrollo de la radioastronomía. Durante este periodo, se comenzaron a detectar fuentes de radio extremadamente intensas, algunas identificadas con galaxias activas. Un caso clave fue el de 3C 273, un objeto detectado en estudios de radiofrecuencia que, en 1963, Maarten Schmidt identificó como extragaláctico con un alto corrimiento al rojo (redshift), demostrando que se encontraba a grandes distancias [5]. Esto llevó al descubrimiento de los cuásares (Quasi-Stellar Radio Sources, quasars), los cuales poseen luminosidades que pueden superar las de sus galaxias anfitrionas.

1.2. El Modelo Unificado de AGNs

El Modelo Unificado de AGNs es una de las propuestas más conocidas y aceptadas para explicar la diversidad observacional de estos objetos. Este modelo postula que las diferencias entre las distintas clases de AGN no reflejan necesariamente variaciones en su estructura física, sino que son principalmente el resultado de efectos geométricos, en particular del ángulo de observación con respecto al eje del sistema.

Según este modelo, todos los AGN comparten una estructura común. Dependiendo de la orientación del observador, ciertos componentes pueden estar ocultos o ser dominantes en la emisión observada.

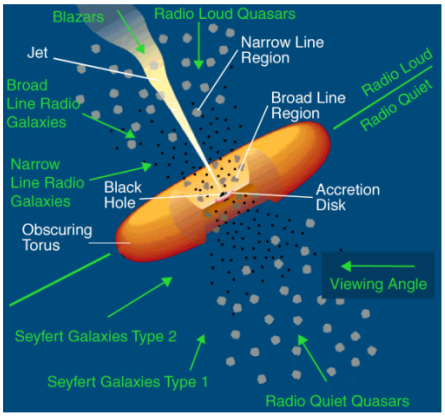


Figura 1.1: Esquema del Modelo Unificado de AGN, donde se muestra que la clasificación observacional de estos objetos depende principalmente del ángulo con el que se observa el eje del jet relativista. Crédito de la imagen: NASA

Este modelo ha sido respaldado por una amplia variedad de evidencias, incluyendo estudios espectroscópicos en distintas longitudes de onda, análisis polarimétricos y simulaciones teóricas que han resultado consistentes con los datos observacionales. [12].

1.2.1. Estructura de los AGN

Para facilitar la comprensión del Modelo Unificado de los AGNs, se puede describir sus componentes por separado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos no funcionan de manera aislada. La estructura de un AGN es un sistema compacto en el que todas las regiones están conectadas e interactúan constantemente a través de procesos físicos como la gravedad, la radiación y los campos magnéticos, los cuales se explicarán más adelante. Por eso, cada componente debe entenderse como una parte integrada dentro de un mismo conjunto.

A continuación, se presentan los principales elementos que conforman la estructura de un AGN.

El agujero negro supermasivo (SMBH)

En el centro de cada AGN se encuentra un agujero negro supermasivo, cuya masa varía típicamente entre 10^6 y 10^9 $M_\odot$, dependiendo de la luminosidad del AGN y del tipo de galaxia huésped. A pesar de que el SMBH no emite radiación directamente, su intensa gravedad genera una enorme cantidad de energía al atraer y acelerar el material circundante. Este proceso, conocido como acreción, convierte energía potencial gravitacional en energía térmica y luego en radiación electromagnética [17].

El disco de acreción

El material que rodea al SMBH no cae directamente hacia él, sino que primero forma un disco de acreción como resultado de la conservación del momento angular. Este disco es una estructura plana y giratoria formada por gas caliente que se va acercando lentamente al agujero negro.

Para que el material pueda avanzar hacia el centro, debe perder parte de su momento angular. Este proceso ocurre gracias a la presencia de fricción interna y turbulencia en el disco. Esta pérdida permite que el gas se desplace en espiral (acreción), hacia el agujero negro.

El gas que alimenta al disco puede tener distintos orígenes: puede venir del medio interestelar de la galaxia, de estrellas que han sido perturbadas por la gravedad del SMBH, pero principalmente del *toro de polvo*, que actúa como una reserva de material alrededor del núcleo. Las partes más

internas del disco pueden alcanzar temperaturas entre 10^4 y 10^5 kelvin, lo que genera una intensa emisión térmica, sobre todo en el ultravioleta y el óptico. Esta emisión es una de las características más observables en muchos AGN [18].

Región de Líneas Anchas (BLR)

La BLR es una zona situada muy cerca del agujero negro supermasivo, justo por fuera del disco de acreción. Está formada por nubes de gas denso y caliente que se mueven a velocidades muy altas, del orden de varios miles de kilómetros por segundo, debido a la fuerte gravedad del agujero negro.

Estas altas velocidades hacen que las líneas de emisión producidas por el gas aparezcan muy ensanchadas en los espectros, lo que le da su nombre a esta región.

Región de Líneas Estrechas (NLR)

Más alejada del núcleo se encuentra la NLR. Esta zona está compuesta por gas menos denso que el de la BLR, y sus nubes se mueven a velocidades mucho menores, de unos cientos de kilómetros por segundo. Debido a esto, las líneas de emisión que produce este gas aparecen más angostas en los espectros.

La NLR puede extenderse hasta cientos o incluso miles de parsecs desde el centro galáctico, ocupando un volumen mucho mayor que el de la BLR.

El toro de polvo

El toro de polvo es una estructura con forma de anillo grueso, formada por gas molecular frío y granos de polvo, que rodea al disco de acreción y al agujero negro supermasivo. Esta región tiene dos efectos importantes: por un lado, puede bloquear la vista directa hacia el centro del AGN, dependiendo del ángulo desde el que se observe, lo que explica porqué algunos AGN muestran líneas espectrales diferentes; y por otro, funciona como una reserva de gas que puede alimentar al disco de acreción [19].

Los jets relativistas

En ciertos tipos de AGN, particularmente en radiogalaxias y blázares, se observan jets relativistas, que son chorros estrechos de plasma que son expulsados a velocidades cercanas a la de la luz desde el agujero negro supermasivo. Estos jets emergen de forma aproximadamente perpendicular al plano del disco de acreción y pueden extenderse desde unas pocas unidades de parsec hasta alcanzar cientos de kiloparsecs. Su emisión y dinámica están fuertemente influenciadas por efectos relativistas, lo que explica gran parte de sus propiedades observacionales [20].

1.2.2. Orientación y efectos de proyección

AGN tipo 1 vs AGN tipo 2

Una de las ideas centrales del Modelo Unificado es que las diferencias entre los AGN tipo 1 y tipo 2 se deben principalmente al ángulo desde el que los observamos. Específicamente, lo que determina si vemos o no las líneas anchas en el espectro óptico es si el toro de polvo bloquea nuestra vista hacia la Región de Líneas Anchas.

En los AGN tipo 1, la vista hacia la BLR está despejada, por lo que se observa claramente tanto la BLR, como la NLR.

En los AGN tipo 2, en cambio, el toro bloquea directamente la BLR, por lo que el espectro sólo muestra la NLR [12].

1.2.3. Efecto Doppler y beaming relativista

El efecto Doppler relativista surge cuando la fuente emisora se encuentra en movimiento a velocidades relativistas respecto al observador. En el caso de los núcleos activos de galaxias (AGN), las partículas relativistas que se desplazan dentro de los jets producen radiación que experimenta un corrimiento Doppler: si el flujo se dirige hacia el observador la radiación se desplaza hacia frecuencias más altas (corrimiento al azul), mientras que si se aleja se desplaza hacia frecuencias más bajas (corrimiento al rojo) [1].

El grado de amplificación o atenuación de la radiación está determinado por el factor Doppler relativista D, definido como

$$D = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \Theta)} \tag{1.1}$$

donde $\beta = v/c$ representa la velocidad del flujo en unidades de la velocidad de la luz, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ es el factor de Lorentz asociado al movimiento relativista, y Θ es el ángulo entre la dirección del jet y la línea de visión del observador [12].

Cuando el jet relativista está orientado cerca de la línea de visión del observador ($\Theta \approx 0°$), el factor Doppler puede ser significativamente mayor que la unidad, produciendo una amplificación sustancial del flujo observado. Si el espectro de emisión sigue una ley de potencias característica de la radiación sincrotrón, $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, el flujo observado se incrementa aproximadamente como

$$F_{\nu,\text{obs}} \propto D^{2+\alpha} F_{\nu,\text{int}} \tag{1.2}$$

donde el término D^2 está relacionado con la concentración de la radiación en la dirección del movimiento del jet y con la reducción del tiempo entre los fotones que llegan al observador. Por otro lado, el término D^α aparece debido al corrimiento Doppler de la frecuencia, ya que la intensidad del espectro depende de la frecuencia mediante una ley de potencias con índice espectral α. En conjunto, estos efectos producen una amplificación significativa de la radiación observada, fenómeno conocido como *Doppler boosting* o *relativistic beaming*. Este efecto explica la gran luminosidad aparente de los blázares a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde radio hasta rayos gamma [12, 1].

Por el contrario, cuando el jet está orientado a ángulos mayores respecto a la línea de visión (Θ grande), el factor Doppler disminuye y la radiación observada se debilita considerablemente, haciendo que el AGN parezca mucho menos luminoso [12].

Beaming relativista: amplificación direccional de la radiación

El *beaming* relativista es otro efecto fundamental asociado a los jets de los AGN. Debido a que los electrones responsables de la radiación sincrotrón se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz, la emisión no se distribuye de manera isotrópica, sino que se concentra en la dirección del movimiento del jet [20]. Como resultado, la radiación queda confinada dentro de un cono estrecho cuya apertura disminuye a medida que aumenta la velocidad del flujo relativista, intensificando la emisión en la dirección del jet [12].

Cuando el jet está orientado cerca de la línea de visión del observador, la radiación puede amplificarse por varios órdenes de magnitud. Este efecto explica por qué los blázares, cuyos jets apuntan aproximadamente hacia el observador, pueden parecer mucho más luminosos que las radiogalaxias cuyos jets están orientados a ángulos mayores respecto a la línea de visión.

El grado de amplificación depende del índice espectral (α) de la radiación sincrotrón y del factor Doppler D. En el caso de componentes emisoras discretas dentro del jet, la densidad de flujo observada puede expresarse como [21]

$$S_{\nu,obs} = S_{\nu,intr} D^{3+\alpha} \tag{1.3}$$

donde

- $S_{\nu,obs}$ es la densidad de flujo observada a la frecuencia ν,
- $S_{\nu,intr}$ es la densidad de flujo intrínseca de la fuente,
- D es el factor Doppler relativista,
- α es el índice espectral de la emisión sincrotrón.

Cuando $D > 1$, el efecto de *beaming* relativista amplifica significativamente la radiación observada, lo que puede producir variabilidad extrema en escalas de tiempo de días o incluso horas [22].

1.3. Clasificación de los Núcleos Activos de Galaxias

1.3.1. Diferencias entre QSOs y cuásares

El término cuásar (quasar) se introdujo en los años 60 para describir objetos puntuales y extremadamente luminosos detectados inicialmente como fuentes de radio, pero cuyos espectros en el óptico mostraban líneas en emisión desplazadas al rojo, características de objetos a gran distancia cosmológica [5]. Estas fuentes, como 3C 273, fueron interpretadas rápidamente como núcleos de galaxias con mucha actividad energética, hoy conocidas como AGNs.

Con el tiempo, se detectaron numerosos objetos similares en el óptico, pero sin emisión significativa en radio. Para distinguirlos, se introdujo el término *Quasi-Stellar Object* (QSO), que designa a aquellas fuentes puntuales, con espectros de AGN, pero sin la necesidad de ser radio-intensas [1]. De esta forma, todos los cuásares son QSOs, pero no todos los QSOs son cuásares en el sentido histórico original.

En la actualidad, esta distinción ha perdido rigidez en muchos contextos. Por ejemplo, [92] aclara que en clasificaciones modernas, el término cuásar se refiere principalmente a AGNs con alta luminosidad bolométrica, típicamente con magnitudes absolutas $M_B < -23$, independientemente de su emisión en radio. Así, QSO es utilizado frecuentemente como un término observacional general para catalogar estos objetos [93].

Además, los QSOs representan una etapa clave en la evolución galáctica, ya que su elevada emisión es atribuida a acreción de materia por agujeros negros supermasivos en el centro de galaxias activas. Su estudio ha sido esencial para entender la formación de estructuras a gran escala en el universo y la evolución de galaxias y agujeros negros.

En el contexto de esta tesis, se utilizarán ambos términos conforme al uso dado en las fuentes citadas, aunque de forma general se considerarán equivalentes funcionales dentro del marco de AGNs brillantes.

1.3.2. Clasificación de los Núcleos Activos de Galaxias

Los AGN se clasifican en distintas categorías según su luminosidad, estructura y características espectrales. Uno de los métodos más comunes para diferenciarlos es el análisis de sus líneas de emisión, que corresponden a rasgos espectrales generados por la radiación emitida en regiones de gas ionizado, alrededor del agujero negro supermasivo [6].

A partir de estas diferencias espectrales, se han definido las siguientes categorías principales de AGN:

Galaxias Seyfert Las galaxias Seyfert se encuentran entre los AGN más comunes y están asociados principalmente a galaxias espirales. Su espectro óptico muestra líneas de emisión de alta excitación, y su luminosidad suele ser moderada, en comparación con otros tipos de AGN [4] Se dividen en dos tipos: [7].

- Seyfert 1: presentan líneas de emisión tanto anchas como estrechas, lo que sugiere la existencia de una BLR bien definida. Además, presentan alta variabilidad en escalas de tiempo cortas, desde días hasta meses.
- Seyfert 2: sólo muestran líneas de emisión estrechas, lo que sugiere que la BLR está oculta por polvo y gas.

Cuásares Los cuásares son AGN extremadamente luminosos, cuya emisión puede superar la de su galaxia anfitriona. Debido a su gran brillo, en muchos casos, la galaxia que los alberga es difícil de detectar en el espectro óptico. Se dividen en dos subcategorías según su emisión en radio [8]:

- Radio-ruidosos: Cuásares con una emisión intensa en la banda de radio, caracterizados por la presencia de chorros relativistas que interactúan con el medio circundante.
- Radio-silenciosos: Cuásares cuya emisión en radio es relativamente débil o inexistente en comparación con su emisión en otras longitudes de onda.

Radiogalaxias Estas galaxias, comúnmente vinculadas a galaxias elípticas gigantes, se dividen en dos tipos principales: [9]

- Radiogalaxias de Líneas Anchas (BLRGs, Broad-Line Radio Galaxies): exhiben tanto líneas de emisión anchas como estrechas en su espectro óptico, lo que indica la presencia de una BLR activa.
- Radiogalaxias de Líneas Estrechas (NLRGs, Narrow-Line Radio Galaxies): presentan únicamente líneas de emisión estrechas, sugiriendo que la BLR podría estar oscurecida o ausente.

Además de esta clasificación espectral, las radiogalaxias pueden dividirse según la morfología y distribución de su emisión en radio en dos tipos fundamentales: [10]

- Radiogalaxias Tipo FR I (Fanaroff-Riley I): caracterizadas por una emisión más intensa en el núcleo y debilitamiento hacia los extremos de los lóbulos de radio. Estas galaxias se encuentran principalmente en entornos ricos en cúmulos y suelen estar asociadas con los BL Lacs.
- Radiogalaxias de Tipo FR II (Fanaroff-Riley II): exhiben lóbulos de radio con regiones de emisión brillante en sus extremos, lo que indica la presencia de choques de terminación en los jets relativistas (regiones donde el flujo del jet se desacelera abruptamente al interactuar con el medio circundante, convirtiendo su energía cinética en radiación no térmica). Estas galaxias suelen estar asociadas con los cuásares de espectro plano con líneas fuertes (FSRQs, por sus siglas en inglés) .

LINERs (Low Ionization Nuclear Emission-line Regions) Los LINERs son AGN de baja luminosidad cuya característica distintiva es la presencia de líneas de emisión de baja ionización en su espectro. Se detectan en un porcentaje significativo de galaxias normales y su origen puede estar relacionado con procesos distintos a los observados en los AGN más brillantes [1].

Se han propuesto dos mecanismos principales para explicar la actividad de los LINERs: [11].

- Versión de baja luminosidad de un AGN convencional. En este caso, el agujero negro supermasivo seguiría acumulando material, pero con una eficiencia mucho menor en comparación con cuásares o Seyferts.
- Asociación con procesos de formación estelar. Algunos estudios sugieren que los LINERs pueden estar vinculados con la presencia de brotes de formación estelar, donde la ionización del gas proviene de regiones con alta actividad.

1.3.3. Blazares: BL Lacs y FSRQs

Los blazares representan una de las manifestaciones más extremas de los AGN. Se caracterizan por la emisión de potentes jets relativistas orientados casi directamente hacia la línea de visión del observador. Esta alineación produce un fuerte efecto Doppler que amplifica su brillo aparente y acorta los tiempos característicos de variabilidad. Como resultado, los blazares son fuentes altamente luminosas en todo el espectro electromagnético, desde ondas de radio hasta rayos gamma [12].

El término *blazar* agrupa dos clases principales de AGN: los objetos BL Lacertae (BL Lacs) y los quásares de espectro plano (Flat Spectrum Radio Quasars, FSRQs). Ambos comparten propiedades comunes como emisión no térmica dominada por el jet, fuerte variabilidad y polarización, pero se diferencian principalmente por la intensidad de sus líneas espectrales y características del entorno circundante.

Objetos BL Lacertae (BL Lacs)

Los objetos BL Lacertae (BL Lacs) se caracterizan por la ausencia o debilidad extrema de líneas de emisión en sus espectros ópticos, con anchos equivalentes inferiores a 5 Å, lo que dificulta su clasificación espectroscópica y la determinación precisa de su corrimiento al rojo. Estos objetos muestran una alta polarización óptica, generalmente superior al 3 %, la cual varía en intensidad y orientación, así como una marcada variabilidad en el flujo óptico en escalas de tiempo que van desde horas hasta días. Dichas características se interpretan como evidencia de emisión sincrotrón proveniente de un chorro relativista, cuya estructura interna presenta turbulencias y reordenamientos del campo magnético [13].

Los BL Lacs suelen estar alojados en galaxias elípticas gigantes de tipo Fanaroff-Riley I, lo que indica un régimen de acreción de baja eficiencia. Su distribución espectral de energía (SED) presenta típicamente dos componentes: uno asociado a emisión sincrotrón y otro a procesos de dispersión Compton inversa, ya sea del tipo *Synchrotron Self Compton* o *External Compton*.

Con base en la frecuencia del pico de la componente sincrotrón ($\nu_{\rm syn}^{\rm peak}$), los BL Lacs se clasifican en tres categorías [94]:

- **LBL (Low-energy peaked BL Lacs)**: el pico sincrotrón se ubica en el infrarrojo o el óptico, con $\nu_{\rm syn}^{\rm peak} < 10^{14}\,\text{Hz}$.
- **IBL (Intermediate-energy peaked BL Lacs)**: presentan un pico sincrotrón intermedio, entre 10^{14} y $10^{15}\,\text{Hz}$, mostrando características transicionales entre los extremos.
- **HBL (High-energy peaked BL Lacs)**: el pico sincrotrón se encuentra en el ultravioleta o en los rayos X suaves, con $\nu_{\rm syn}^{\rm peak} > 10^{15}\,\text{Hz}$.

Esta clasificación ha sido fundamental para comprender las diferencias físicas y observacionales entre los diversos subtipos de BL Lacs, así como para interpretar su comportamiento multi-longitud de onda en el contexto de los modelos de emisión de núcleos activos de galaxias.

Radio Cuásares de Espectro Plano (FSRQs)

Los FSRQs presentan características distintivas que los diferencian claramente de los BL Lacs [12]:

- Presencia de líneas de emisión anchas, típicamente con $W_\lambda > 5$ Å, lo que indica una región de líneas anchas activa.
- SED dominada por la dispersión Compton inversa, lo que los hace más brillantes en rayos X y gamma, en comparación con los BL Lacs.

- Mayor densidad de gas ionizado, explicada por la intensa emisión de líneas de su disco de acreción.
- Asociación con galaxias elípticas tipo FR II, lo que indica la presencia de jets más potentes y colimados que los BL Lacs.

Estudios recientes han demostrado que los FSRQs suelen ser más brillantes y presentan una mayor contribución de la radiación Compton inversa, lo que los hace predominantes en el espectro de rayos gamma [14].

1.4. Variabilidad en AGNs

Una de las características más distintivas de los Núcleos Activos de Galaxias (AGN) es su variabilidad, es decir, los cambios en su luminosidad y emisión espectral a lo largo del tiempo en distintas longitudes de onda. La variabilidad observada en los AGN es un reflejo de los procesos físicos que ocurren en el entorno del agujero negro supermasivo (SMBH), incluyendo la acreción de materia, la inestabilidad del disco de acreción y la emisión en los jets relativistas [16].

La variabilidad de los AGN se puede clasificar en diferentes escalas temporales, dependiendo del proceso físico que la origina. En general, se identifican tres tipos principales:

- Variabilidad de corta duración ($\leq$ días-semanas)
- Variabilidad de mediana duración (meses-años)
- Variabilidad de larga duración (décadas)

1.4.1. Escalas de variabilidad temporal: corta, mediana y larga duración

Variabilidad de corta duración (horas-días-semanas)

La variabilidad más rápida en los AGN ocurre en escalas de horas a días y se observa principalmente en rayos X y en el óptico-ultravioleta. Esta variabilidad se origina en la región más interna del disco de acreción, donde el material caliente emite en el ultravioleta y los rayos X debido a la intensa radiación térmica y la dispersión Compton en la corona de electrones [23].

Variabilidad de mediana duración (meses-años)

La variabilidad en escalas de meses a años es observada principalmente en el óptico, ultravioleta e infrarrojo y se asocia con cambios en la estructura del disco de acreción y la región de líneas anchas (BLR) [24].

Variabilidad de larga duración (décadas y más)

Los AGN también presentan variabilidad en escalas de décadas o incluso siglos, lo que sugiere la existencia de cambios en la estructura global del disco de acreción y en la tasa de alimentación del SMBH. Esta variabilidad se ha observado en estudios de cuásares y galaxias Seyfert, donde algunos objetos han mostrado transiciones dramáticas entre estados brillantes y débiles en periodos de varias décadas. [25].

1.4.2. Mecanismos físicos responsables de la variabilidad

Los principales procesos que explican la variabilidad observada en los AGN incluyen una combinación de fenómenos relacionados con la acreción de material, la estructura del disco, la interacción con el entorno y los efectos relativistas en los jets.

Variaciones en la tasa de acreción sobre el SMBH

La acreción de gas sobre el agujero negro supermasivo (SMBH) es el principal motor energético de los AGN. Cambios en la cantidad de material que fluye hacia el SMBH generan fluctuaciones en la luminosidad en diversas longitudes de onda [16]. Estas variaciones pueden originarse en:

- Cambios en la estructura del disco de acreción, que afectan la eficiencia de conversión de energía gravitacional en radiación [26].
- Eventos de acreción episódica, como la disrupción de estrellas, que provocan estallidos de luminosidad [27].
- Alimentación irregular desde el medio interestelar, dando lugar a episodios de acreción caótica [28].

Estas variaciones pueden generar cambios detectables en el óptico y el ultravioleta, en escalas de días a meses.

Inestabilidades en el disco de acreción

El disco de acreción es dinámico y propenso a inestabilidades térmicas, de viscosidad y gravitacionales. Estas generan fluctuaciones observadas principalmente en el óptico y rayos X [29]:

1. Inestabilidades térmicas: alteran la temperatura y la opacidad del gas [30].
2. Inestabilidades de viscosidad: están relacionadas con turbulencia magnética (MRI), afectando el transporte de momento angular [31].
3. Ondas de densidad o perturbaciones gravitacionales: inducen cambios estructurales en el disco [32].

Estos procesos explican la variabilidad observada en el continuo de muchos AGN [33].

Reprocesamiento de radiación en el toro de polvo

Los cambios en la radiación del disco central pueden modificar el estado térmico del toro de polvo, originando variabilidad en el infrarrojo. Esta puede ser causada por:

- Retrasos en la respuesta del polvo al cambio de luminosidad, debido a su localización y composición [34].
- Geometría clumpy del toro, donde las nubes de polvo generan absorciones variables en la línea de visión [35].

La variabilidad infrarroja ha permitido estimar el tamaño y estructura del toro en diferentes AGN [36].

Variaciones en la BLR y la NLR

La región de líneas anchas (BLR) responde de forma rápida (días a meses) a cambios en la luminosidad, mientras que la NLR presenta respuestas en escalas mucho más largas. La detección de líneas anchas polarizadas ha sido usada como evidencia indirecta de la BLR en AGN tipo 2 [37].

Variabilidad en los jets relativistas y efectos Doppler

En AGN con jets, especialmente blazares, la emisión es modulada por fenómenos como:

- Choques internos en el flujo de plasma, que amplifican la emisión sincrotrón [39].
- Efecto Doppler, que intensifica o disminuye el flujo observado según la orientación del jet [40].
- Precesión del jet, que altera su orientación en escalas de décadas [41].

1.4.3. Variabilidad polarimétrica

La polarización de la radiación en los AGN constituye una herramienta crucial para inferir la geometría y los mecanismos físicos en su emisión. La variabilidad polarimétrica hace referencia a las fluctuaciones temporales tanto en el grado como en el ángulo de polarización observados en distintas bandas espectrales, lo cual proporciona información sobre las condiciones locales del medio emisor y dispersor.

En el Modelo Unificado de AGN, las observaciones polarimétricas han desempeñado un papel fundamental, particularmente en objetos de tipo 2, donde la región de líneas anchas (BLR) y el disco de acreción se encuentran ocultos por el toro de polvo. En estos casos, la detección de emisión polarizada dispersada ha permitido acceder de forma indirecta a la estructura central del núcleo activo [42].

En blázares, la emisión polarizada está dominada por radiación sincrotrón proveniente de jets relativistas orientados cercanamente a la línea de visión. La variabilidad del grado de polarización y de la orientación del vector de polarización en escalas de tiempo desde horas hasta días ha sido interpretada como evidencia de fenómenos dinámicos en el jet, como choques internos, turbulencia o rotación de estructuras de campo magnético [43].

1.4.4. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es llevar a cabo un análisis polarimétrico y multifrecuencia del blazar ON 231 (W Comae), con énfasis en las observaciones realizadas en la banda R desde el OAN-SPM entre los años 2008 y 2024. Estas observaciones, obtenidas con el polarímetro POLIMA, constituyen la base principal del estudio y permiten caracterizar la evolución temporal del grado de polarización y del ángulo de posición de la polarización.

Además del análisis detallado de las propiedades polarimétricas, se incorporan otras observaciones fotométricas en múltiples bandas a lo largo del espectro electromagnético, desde radio hasta rayos gamma, con el fin de estudiar la variabilidad del flujo en diferentes escalas temporales y evaluar la posible correlación entre las distintas bandas. En particular, se realiza una comparación directa entre los datos polarimétricos de SPM y aquellos obtenidos desde el observatorio de Arizona, con el propósito de analizar coherencias o discrepancias en la evolución del ángulo de polarización entre ambos sitios de observación.

1.4.5. Estructura de la tesis

La presente tesis está organizada de la siguiente manera. El **Capítulo 1** introduce el marco teórico necesario para el desarrollo del trabajo, donde se describen los Núcleos Activos de Galaxias, el Modelo Unificado de AGN y su clasificación observacional, con énfasis en los blazares y en los mecanismos físicos responsables de la variabilidad y la polarización. El **Capítulo 2** presenta las características espectrales y polarimétricas del blazar ON 231 (W Comae), incluyendo su distribución de energía espectral (SED), su contexto astronómico, su comportamiento variable y una síntesis de estudios previos relevantes. Posteriormente, el **Capítulo 3** describe las observaciones

polarimétricas y la recopilación de datos multifrecuencia empleadas en esta investigación, detallando el Programa de Monitoreo Polarimétrico en el OAN-SPM, las características del telescopio de 0.84 m y del polarímetro POLIMA, la estrategia observacional, y la integración de datos en distintas bandas del espectro electromagnético. En el **Capítulo 4** se presenta el análisis y los resultados de los datos polarimétricos de ON 231 obtenidos entre 2008 y 2024: se construyen las curvas de luz de flujo, magnitud, grado de polarización y ángulo de polarización, se agrupan las observaciones en quince ciclos para caracterizar la variabilidad temporal, y se discuten rotaciones del EVPA y su interpretación en el contexto del chorro relativista. Asimismo, se construyen SEDs representativas de estados de máxima y mínima emisión mediante ajustes log-parabólicos. Finalmente, se evalúa la consistencia del comportamiento polarimétrico mediante el plano de Stokes Q–U y se aplica la ZDCF para investigar la simultaneidad de la variabilidad entre observatorios y bandas, cerrando con una síntesis general de los hallazgos principales en las conclusiones.

Capítulo 2

Características espectrales y polarimétricas de ON 231

2.1. Propiedades generales

Distribución de Energía Espectral (SED)

ON 231 presenta una distribución de energía espectral que abarca un amplio intervalo del espectro electromagnético, extendiéndose desde las longitudes de onda de radio hasta los rayos gamma de muy alta energía (VHE). En el intervalo óptico, su espectro se caracteriza por ser prácticamente continuo y carecer de líneas prominentes, tanto en emisión como en absorción, una propiedad distintiva de los objetos tipo BL Lacertae. Esta ausencia de rasgos espectrales definidos ha dificultado históricamente la determinación precisa de su distancia. No obstante, a partir de estudios previos se ha estimado un corrimiento al rojo de $z = 0.102$ [95].

Con el fin de asociar este valor de corrimiento al rojo con una distancia cosmológica, se adopta el modelo cosmológico ΛCDM *Lambda-Cold Dark Matter*, ampliamente empleado en la literatura actual. Este modelo considera una constante de Hubble $H_0 = 70\ \mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, una densidad de materia $\Omega_m = 0.3$ y una densidad de energía oscura $\Omega_\Lambda = 0.7$, parámetros compatibles con los resultados obtenidos por el satélite *Planck* [96]. Bajo este modelo, el corrimiento al rojo $z = 0.102$ corresponde a una distancia de luminosidad del orden de 475 Mpc, lo que equivale aproximadamente a 1.55 mil millones de años luz.

2.1.1. Generalidades y contexto astronómico

El blazar ON 231, también conocido como W Comae, es una fuente extragaláctica perteneciente a la subclase de objetos BL Lacertae (BL Lac), los cuales forman parte del grupo de núcleos activos de galaxias (AGN). Este objeto se distingue por presentar una marcada variabilidad en múltiples bandas del espectro electromagnético, una emisión espectral débil o prácticamente ausente de líneas y un alto grado de polarización, características típicas de los blazares de tipo BL Lac.

ON 231 fue identificado por primera vez por Max Wolf en 1916, quien lo catalogó como una estrella variable localizada en la constelación de Coma Berenices [62]. Sin embargo, su verdadera naturaleza extragaláctica no fue reconocida sino hasta varias décadas después, cuando estudios radioastronómicos permitieron asociarlo con una fuente de radio detectada en el Ohio Radio Survey [63]. Posteriormente, su comportamiento fotométrico inusual en el dominio óptico y la evidencia de emisión no térmica en radiofrecuencia llevaron a su identificación como un AGN [54].

Observaciones de alta resolución realizadas con el Very Large Array (VLA), MERLIN y la European VLBI Network revelaron una estructura de emisión en radio de doble lóbulo a frecuencias

de 1.6 y 5 GHz, una morfología que no había sido detectada en imágenes VLBI previas [53]. Esta configuración ha sido interpretada como el resultado de una posible reorientación del chorro relativista, sugiriendo actividad en ambos sentidos del jet. Dicho comportamiento resulta inusual en la mayoría de los blazares, donde el efecto Doppler relativista suele favorecer la detección de un solo lado del chorro.

Durante el estallido óptico registrado en 1998, ON 231 presentó un espectro de rayos X con una forma cóncava, lo que ha sido interpretado como evidencia de una naturaleza intermedia entre los blazares de baja energía (LBL) y los de alta energía (HBL). En este contexto, el objeto ha sido clasificado como un blazar de tipo intermedio (IBL) [56]. Esta interpretación se ve reforzada por la variabilidad observada en su distribución de energía espectral (SED), la cual parece depender del estado de actividad del núcleo.

Estudios fotométricos en las bandas ópticas BVRI han mostrado que ON 231 exhibe variabilidad significativa en escalas temporales cortas, que van desde días hasta escalas intra–día (intraday), acompañada de cambios apreciables tanto en el flujo como en el grado de polarización [65]. Estas propiedades reflejan una dinámica altamente activa en el chorro relativista y proporcionan una base observacional sólida para el estudio de los procesos físicos que dominan su emisión.

2.1.2. Variabilidad y polarización

ON 231 exhibe una variabilidad extrema a lo largo de prácticamente todo el espectro electromagnético. Cambios significativos en el flujo han sido documentados en escalas temporales que abarcan desde horas hasta varios años, destacando episodios de alta actividad como el ocurrido en 1998, cuando el objeto alcanzó una magnitud aparente de $R \approx 12.2$ [67]. Este tipo de incrementos abruptos en luminosidad se interpretan principalmente como consecuencia de procesos dinámicos en el chorro relativista, tales como choques internos, regiones de emisión transitorias y variaciones en el factor Doppler, en un jet orientado cerca de la línea de visión del observador.

La polarización óptica de ON 231 también presenta una evolución notable en el tiempo. Se han registrado porcentajes de polarización superiores al 10 % durante determinados periodos, acompañados de variaciones significativas en la orientación del ángulo de polarización [68]. Estas propiedades sugieren la presencia de campos magnéticos parcialmente ordenados dentro del jet, así como procesos de reconfiguración en su estructura interna. En conjunto, la combinación de una marcada variabilidad fotométrica y polarimétrica posiciona a ON 231 como un laboratorio astrofísico privilegiado para el estudio de los procesos no térmicos que dominan la emisión en AGN.

2.2. Estudios previos

2.2.1. Eventos de alta actividad registrados

Entre los eventos más relevantes en la evolución de ON 231 se encuentra el estallido óptico registrado en la primavera de 1998, cuando el objeto alcanzó una luminosidad excepcional. Esta fase de alta actividad fue acompañada por un endurecimiento espectral y aumentos en la emisión de rayos X, consistentes con un episodio de aceleración de partículas en el jet [49].

Posteriormente, en 2008, ON 231 fue detectado por el telescopio VERITAS como fuente emisora de rayos gamma de muy alta energía (VHE), lo que confirmó su capacidad para acelerar partículas hasta escalas relativistas extremas [50]. Este episodio coincidió con un incremento simultáneo en el flujo óptico e infrarrojo, indicando un acoplamiento eficiente entre los mecanismos sincrotrón y Compton inverso.

Durante esta misma fase de alta actividad, también se documentó una rotación significativa del ángulo de polarización óptica, que ocurrió en paralelo con el incremento en la emisión de alta energía [51]. Este fenómeno ha sido interpretado como evidencia de una reorganización en la topología del campo magnético del jet, posiblemente causada por reconexiones magnéticas o eventos de choque internos.

En conjunto, estos eventos han ofrecido oportunidades clave para validar modelos de emisión en blazares, y en particular, para explorar la relación entre los cambios en la polarización, el flujo multibanda y la dinámica del chorro relativista.

2.3. Propiedades polarimétricas de ON 231

La polarización de la radiación emitida por blazares como ON 231 constituye una herramienta diagnóstica clave para el estudio de los procesos físicos que tienen lugar en los chorros relativistas. En particular, el análisis conjunto del grado de polarización y del ángulo de posición permite inferir la estructura y el grado de orden del campo magnético, así como la geometría y evolución de la región emisora. Variaciones temporales en estos parámetros reflejan cambios dinámicos en el jet y proporcionan información directa sobre los mecanismos responsables de la emisión no térmica [83].

En blazares, la polarización óptica está directamente relacionada con la emisión sincrotrón que se produce en el jet relativista. La presencia de una componente del espectro de energía (SED) que sigue una ley de potencias indica que la emisión es de origen no térmico, lo cual es característico de una población de electrones relativistas. Este tipo de radiación sólo puede generarse si existe un campo magnético, ya que la emisión sincrotrón se produce cuando partículas cargadas se mueven en forma helicoidal dentro de dicho campo.

Si bien la polarización se describe en términos de la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética, su origen físico en blazares está controlado por la estructura y el grado de orden del campo magnético en la región emisora. Por ello, el análisis del grado de polarización y del ángulo de posición permite obtener información directa sobre la configuración del campo magnético en el jet y cómo éste evoluciona con el tiempo.

2.3.1. Estudios previos de polarización

El blazar W Comae ha sido objeto de estudios polarimétricos detallados a lo largo de las últimas décadas. En particular, en el trabajo de [91] se realizó un análisis exhaustivo de la variabilidad polarimétrica en la banda R durante el periodo comprendido entre febrero de 2008 y mayo de 2013, empleando el telescopio de 84 cm del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir y el polarímetro POLIMA. En dicho estudio se observaron variaciones significativas en el grado de polarización, alcanzándose un valor máximo de $P = 33.8\,\% \pm 1.6\,\%$, con una variación total de $\Delta P = 33.2\,\%$.

Uno de los resultados más relevantes fue la detección de una rotación de gran amplitud del ángulo de polarización (EVPA), que evolucionó desde 78° hasta 315°, lo que corresponde a una rotación total de aproximadamente 237°. Este evento coincidió temporalmente con un brote de emisión en rayos gamma registrado en junio de 2008, lo que sugiere una posible co-espacialidad entre las regiones responsables de la emisión óptica y de alta energía.

A partir del análisis de los parámetros de Stokes, los autores propusieron un modelo compuesto por dos componentes de emisión sincrotrón ópticamente delgadas que contribuyen al flujo polarizado. La primera corresponde a una componente variable asociada a choques en el chorro relativista, mientras que la segunda se interpreta como una componente más estable, caracterizada por un grado de polarización aproximadamente constante de $\sim 11\,\%$ y un ángulo de polarización cercano a 65°.

2.3.2. Evolución de la polarización a lo largo del tiempo

La evolución temporal de los parámetros polarimétricos de ON 231 muestra patrones que no pueden considerarse aleatorios. Análisis realizados a lo largo de varios años indican que las variaciones del ángulo de polarización suelen coincidir con incrementos en el flujo óptico y, en determinados periodos, con episodios de actividad detectados en otras bandas del espectro, como rayos X o rayos gamma. Esta correlación sugiere que la emisión polarizada se origina en regiones coespaciales del

chorro relativista, cuya evolución está modulada por procesos dinámicos como choques internos, turbulencia en el campo magnético o eventos de reconexión magnética [84].

El estudio de la polarización en el plano de Stokes Q–U ha resultado particularmente útil para caracterizar este comportamiento. En dicho plano, la evolución temporal de la polarización se manifiesta en forma de trayectorias que, durante ciertos intervalos, describen arcos o bucles bien definidos. Estas estructuras son interpretadas como evidencia de rotaciones sistemáticas del vector de polarización, asociadas a cambios ordenados en la geometría o en la orientación del campo magnético dentro del chorro [85].

2.3.3. Variabilidad polarimétrica de ON 231

ON 231 presenta una variabilidad polarimétrica significativa, tanto en el grado de polarización como en el ángulo de posición, lo que muestra la naturaleza altamente dinámica de su chorro relativista [86]. Este comportamiento ha sido caracterizado mediante programas de monitoreo sistemático, entre los cuales destacan las ya mencionadas observaciones realizadas en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM).

El análisis conjunto del flujo, el grado de polarización y el ángulo de posición muestra que las variaciones polarimétricas están relacionadas con los distintos estados de actividad del blazar. La combinación de estos parámetros permite obtener una visión más completa de la evolución temporal de ON 231 y proporciona información clave sobre la estructura interna del chorro y los mecanismos físicos responsables de la emisión no térmica [84].

En este contexto, ON 231 representa un objeto particularmente adecuado para el estudio de la polarización óptica y su relación con la variabilidad multifrecuencia. La disponibilidad de observaciones polarimétricas de largo plazo, complementadas con datos en radio, infrarrojo, rayos X y rayos gamma, ofrece un marco observacional ideal para investigar la evolución del campo magnético y la geometría del jet.

Capítulo 3

Observaciones polarimétricas y recopilación de datos multifrecuencia

Este capítulo describe la adquisición y análisis de observaciones polarimétricas del blazar ON 231 realizadas en el OAN-SPM con el telescopio de 84 cm y el polarímetro POLIMA. Se detallan las características instrumentales, los métodos de adquisición y el objetivo del Programa de Monitoreo Polarimétrico, resaltando su importancia para el estudio de la variabilidad de blazares.

Se presentan los criterios de selección de ON 231, las estrategias observacionales adoptadas, y se comparan los datos del OAN-SPM con observaciones en otras bandas (radio, infrarrojo, óptico, rayos X y gamma) para un análisis multifrecuencia integral.

Finalmente, se revisa el contexto astronómico de ON 231, su clasificación, eventos de alta actividad y estudios previos de su polarización, destacándolo como un objeto ideal para investigaciones en polarización óptica debido a su intensa variabilidad.

3.1. Programa de Monitoreo Polarimétrico en San Pedro Mártir

El *Polarimetric Monitoring of Blazars at San Pedro Mártir* es un programa de observación continua dedicado al estudio de la variabilidad polarimétrica de blazares. Este proyecto tiene como objetivo analizar la evolución temporal de la polarización óptica en diferentes objetos, con el fin de caracterizar los mecanismos físicos responsables de la emisión y la variabilidad en estos núcleos activos de galaxias.

El programa se lleva a cabo en el OAN-SPM y utiliza el telescopio de 0.84 m junto con el polarímetro POLIMA para la adquisición de datos. A través de campañas observacionales regulares, el programa ha generado una base de datos robusta sobre la polarización de blazares.

Además, este monitoreo se realiza en coordinación con otros programas internacionales de observación en múltiples longitudes de onda, lo que permite correlacionar los datos polarimétricos con observaciones en multifrecuencia. De esta manera, el programa facilita el estudio integral del comportamiento de los blazares y su evolución en diferentes escalas de tiempo. [46].

3.2. Telescopio de 0.84 m

El telescopio de 0.84 metros ubicado en el OAN-SPM es uno de los instrumentos más utilizados en este observatorio, principalmente por su versatilidad y confiabilidad para realizar distintos tipos de observaciones ópticas. Desde que comenzó a operar en 1979, ha sido empleado en numerosos proyectos de investigación tanto en objetos estelares como extragalácticos.

Para dar una referencia visual del instrumento con el que se llevaron a cabo las observaciones, en la Figura 3.1 se muestra el telescopio de 0.84 m instalado en el OAN-SPM. En esta imagen se aprecia la configuración general del telescopio dentro de la cúpula, así como el tubo óptico y parte de la montura que permite su movimiento y seguimiento.

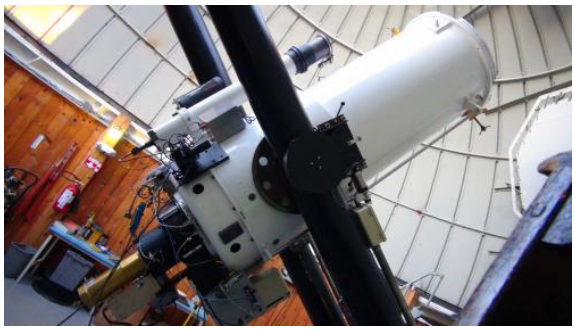


Figura 3.1: Telescopio de 0.84 m del OAN-SPM. Imagen tomada de [108]

El diseño óptico del telescopio es del tipo Ritchey-Chrétien, lo que permite reducir aberraciones como la coma y mejorar la calidad de imagen en todo el campo. Opera con una razón focal efectiva de f/15, lo cual resulta adecuado para la observación tanto de fuentes puntuales como de objetos extendidos.

Para ilustrar el trayecto de la luz dentro del sistema óptico, en la Figura 3.2 se muestra un esquema del recorrido de los rayos a lo largo del eje óptico del telescopio.

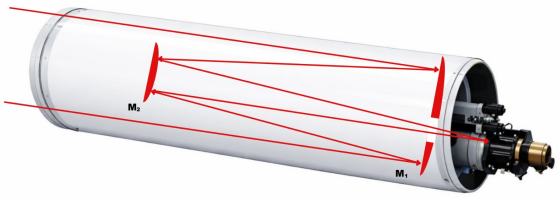


Figura 3.2: Diagrama óptico del telescopio de 0.84 m en configuración Ritchey–Chrétien. Se muestra el recorrido de la luz desde su incidencia en el espejo primario (M1), su reflexión hacia el espejo secundario (M2) y su posterior enfoque en el plano focal.

Su operación se realiza mediante un sistema computarizado que permite ingresar coordenadas ecuatoriales (AR y DEC), posicionar el telescopio de forma automática y mantener el seguimiento con correcciones en tiempo real.

En cuanto a sus límites operativos, el telescopio puede trabajar dentro de un ángulo horario de $\pm$5h29m y un intervalo en declinación que va desde $+75°$ hasta $-39°$, lo que define la región del cielo accesible durante las observaciones. [106]

3.3. POLIMA

El estudio de la polarización lineal en fuentes astrofísicas, como los blazares, proporciona información crítica sobre los procesos de emisión no térmica, la geometría y la orientación de los campos magnéticos, así como sobre la composición y dinámica del material circunestelar. Para

abordar estas cuestiones, el OAN-SPM desarrolló el Polarímetro Óptico de Imagen, conocido como POLIMA, un instrumento creado específicamente para la adquisición de imágenes polarimétricas en la banda óptica, garantizando alta estabilidad y un control preciso de la orientación del polarizador.

Para tener una visión general del funcionamiento del instrumento, en la Figura 3.3 se muestra el esquema del polarímetro de imagen POLIMA, donde se presentan sus principales componentes y la forma en que están conectados. En este diagrama se puede identificar la computadora de adquisición, los controladores de motores a pasos que permiten la rotación del polarizador y el movimiento de la rueda de filtros, así como el detector CCD acoplado al cabezal del instrumento. Este esquema es útil para entender cómo interactúan los distintos elementos electrónicos y mecánicos durante la operación del polarímetro en las observaciones.

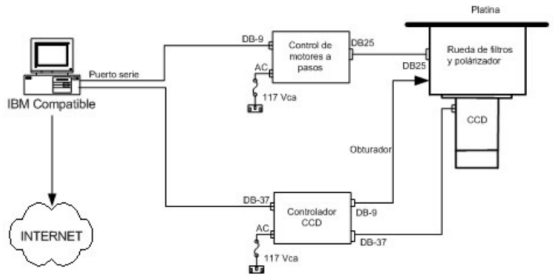


Figura 3.3: Esquema general del polarímetro de imagen POLIMA. Imagen tomada de [109]

La pieza óptica esencial de POLIMA es un prisma de Glan-Taylor fabricado en calcita óptica de alta calidad. Este prisma consiste en un cubo dividido longitudinalmente y reensamblado con un espacio de aire entre sus secciones, lo que permite suprimir uno de los dos haces generados por la birrefringencia natural del cristal, de modo que se transmite un único haz de luz linealmente polarizada con un elevado nivel de pureza. El prisma se encuentra montado en una celda metálica con acabado negro anodizado (el aluminio se somete a un baño electrolítico que crea una capa controlada de óxido de aluminio, mucho más densa y estable que la que se formaría naturalmente) que ayuda a minimizar los reflejos internos que podrían afectar la calidad de las mediciones polarimétricas. En la Figura 3.4 se muestra una fotografía de este prisma.

El cabezal del instrumento integra, además del prisma, una rueda de filtros ópticos puestos en un tambor con capacidad para cuatro posiciones, cuyo propósito es seleccionar la banda espectral de interés durante la adquisición. La rueda es accionada por un motor de pasos (200 pasos por revolución) independiente. Esta precisión mecánica permite posicionar el prisma en cualquier ángulo entre 0° y 360° en incrementos de un grado, lo que resulta esencial para un muestreo adecuado de los parámetros de Stokes.

La adquisición polarimétrica con POLIMA consiste en tomar una serie de exposiciones mientras el prisma se coloca en diferentes ángulos que ya están definidos.

Los ángulos de orientación del polarizador en el instrumento POLIMA corresponden a posiciones específicas respecto al plano de referencia del sistema óptico, y su elección tiene un fundamento directo en cómo se descompone la luz polarizada en sus componentes principales. Cuando se coloca el polarizador en 0°, se mide la intensidad de la componente de la luz cuya vibración está alineada con el eje horizontal del sistema, mientras que la orientación en 90° permite registrar la componente perpendicular, que corresponde al eje vertical. Estas dos posiciones proporcionan información sobre cuánta luz está orientada a lo largo de cada eje ortogonal (x e y). Por otro lado, los ángulos de 45° y 135° se utilizan para medir la luz proyectada sobre direcciones que están rotadas 45° respecto a los ejes principales, es decir, sobre los ejes diagonales del plano de la imagen. Esto es necesario porque una onda polarizada puede estar orientada en cualquier ángulo intermedio, y

no sería suficiente observar solo las componentes horizontales y verticales para caracterizarla por completo. Al medir en estas cuatro posiciones, se pueden calcular los parámetros de Stokes Q y U, que describen, respectivamente, la diferencia de intensidad entre la luz polarizada a 0° y 90°, y la diferencia entre la luz polarizada a 45° y 135°.

Esta forma de trabajar se considera una modulación algo lenta, ya que las cámaras CCD necesitan tiempos de integración relativamente largos para registrar suficiente señal. Sin embargo, es una técnica muy adecuada cuando se estudian objetos que son grandes en el campo de visión o que tienen un alto grado de polarización, como ocurre con los chorros relativistas que emiten los blazares. Durante las observaciones, se mide la intensidad de la luz que llega con cada orientación del polarizador, y con esos valores se calculan los parámetros de Stokes normalizados utilizando las siguientes relaciones:

$$Q/I = \frac{I(0°) - I(90°)}{I(0°) + I(90°)}$$

y

$$U/I = \frac{I(45°) - I(135°)}{I(45°) + I(135°)},$$

y se determina el grado de polarización lineal y el ángulo de polarización que caracterizan el estado de la radiación.

La calibración instrumental del sistema polarimétrico se lleva a cabo mediante observaciones de estrellas estándar polarizadas y no polarizadas, seleccionadas de catálogos de referencia de estándares polarimétricos, tales como el compilado por Schmidt, Elston y Lupie [107]. Estas observaciones permiten estimar y corregir la polarización instrumental residual, así como determinar con precisión el cero del ángulo de polarización del sistema, estableciendo la referencia absoluta para la orientación del analizador. Adicionalmente, se consideran efectos atmosféricos, principalmente la extinción y la posible extinción diferencial entre exposiciones obtenidas en distintas orientaciones o en tiempos separados, ya que tales efectos pueden introducir sesgos sistemáticos en los parámetros de Stokes derivados. La aplicación conjunta de estas correcciones garantiza la consistencia fotométrica y polarimétrica de las mediciones [109], [110].

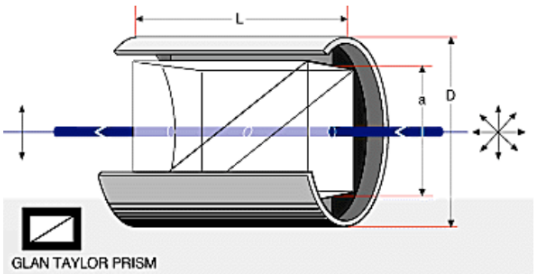


Figura 3.4: Esquema del prisma de Glan-Taylor utilizado como analizador de polarización en el sistema POLIMA. La imagen fue tomada de [110]

3.4. Estrategia de observación

3.4.1. Criterios de selección de ON 231

El blazar ON 231 fue seleccionado como uno de los objetivos de alta prioridad en el programa *Polarimetric Monitoring of Blazars at San Pedro Mártir* debido a su notable variabilidad óptica y polarimétrica. Este objeto es un blazar tipo BL Lac, caracterizado por su alto grado de polarización

y cambios rápidos en el brillo, lo que lo convierte en un excelente candidato para estudios detallados de polarización en el óptico.

Además, ON 231 presenta un flujo lo suficientemente brillante en el intervalo óptico como para obtener mediciones confiables con el telescopio de 0.84 m del OAN-SPM y el polarímetro POLIMA. Su ubicación en el cielo permite una cobertura observacional continua durante varios meses del año desde el OAN-SPM, maximizando la posibilidad de detectar variaciones en su polarización. [46]

3.4.2. Campañas observacionales

POLIMA opera con una lámina polarizadora rotatoria, lo que requiere condiciones de cielo despejado para mediciones óptimas. Debido a esto, las campañas observacionales se planifican alrededor de la fase de luna nueva para minimizar la contaminación lumínica y optimizar la calidad de los datos.

Cada campaña tiene una duración de siete noches consecutivas, durante las cuales se observa un conjunto de aproximadamente 35 fuentes, divididas en grupos de alta y baja prioridad. ON 231, al ser una de las fuentes más brillantes, pertenece al grupo de alta prioridad y por lo tanto es observada todas las noches en que las condiciones lo permiten, mientras que las fuentes más débiles se monitorean con menor frecuencia, pero al menos una vez por temporada [46].

3.5. Comparación con otras bases de datos en distintas bandas

Para llevar a cabo un estudio multifrecuencia del blazar ON 231, fue esencial complementar las mediciones obtenidas a partir del monitoreo polarimétrico en el OAN-SPM con observaciones en distintas longitudes de onda.

A continuación, se detallan los programas de observación, los telescopios utilizados y las bandas espectrales en las que se recopilaron datos, organizados en subsecciones según la región del espectro electromagnético.

3.5.1. Características de los telescopios utilizados

Tabla 3.1: Características del telescopio del Observatorio de San Pedro Mártir (SPM) [47]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	SPM 0.84m
Tipo de telescopio	Reflector Ritchey-Chrétien
Ubicación	Observatorio Astronómico Nacional, México
Altitud	2,800 m
Diámetro del espejo	0.84 m
Relación focal	f/15
Longitud focal	12.6 m
Cobertura espectral	Óptico y polarimetría en banda R
Resolución angular	Dependiente del receptor utilizado

Tabla 3.2: Características del telescopio del Observatorio de Arizona [69]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	Arizona 1.55 m
Tipo de telescopio	Reflector Ritchey-Chrétien
Ubicación	Observatorio Steward, Arizona, EE.UU.
Altitud	2,510 m
Diámetro del espejo	1.55 m
Relación focal	f/13.5
Longitud focal	20.9 m
Cobertura espectral	Óptico y polarimetría
Resolución angular	Dependiente del instrumento utilizado

Tabla 3.3: Características del telescopio Swift-XRT [70]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	Swift-XRT
Tipo de telescopio	Wolter I de incidencia rasante
Ubicación	Órbita terrestre baja
Altitud	600 km (aprox.)
Diámetro del espejo	0.30 m
Relación focal	No aplicable
Longitud focal	3.5 m
Cobertura espectral	Rayos X (0.2 - 10 keV)
Resolución angular	18 arcsec (HPD)

Tabla 3.4: Características del telescopio REM del Observatorio de La Silla [71]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	REM (Rapid Eye Mount)
Tipo de telescopio	Reflector Ritchey-Chrétien
Ubicación	Observatorio de La Silla, Chile
Altitud	2,400 m
Diámetro del espejo	0.60 m
Relación focal	f/8
Longitud focal	4.8 m
Cobertura espectral	Óptico e infrarrojo cercano (0.45–2.3 µm)
Resolución angular	1.16 arcsec

Tabla 3.5: Características del radiotelescopio RATAN-600 del SAO-RAS [72]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	RATAN-600 (Radio Astronomical Telescope of the Academy of Sciences)
Tipo de telescopio	Radiotelescopio de reflector anular fijo
Ubicación	Observatorio Astrofísico Especial, Zelenchukskaya, Rusia
Altitud	970 m
Diámetro del anillo reflector	576 m
Apertura efectiva	Variable, hasta 300 m lineales según configuración
Rango de frecuencias	610 MHz – 30 GHz
Resolución angular	Hasta 2 arcmin (a 4.8 GHz)
Modo de observación	Rastreo en transit mode (drift scan)

Tabla 3.6: Características del telescopio espacial Fermi LAT [82]

Parámetro	**Especificación**
Telescopio	Fermi Gamma-ray Space Telescope
Instrumento principal	Large Area Telescope (LAT)
Tipo de telescopio	Telescopio de rayos gamma en órbita
Ubicación	Órbita terrestre baja (∼565 km)
Diámetro efectivo	Variable (no tiene espejo tradicional)
Cobertura espectral	Rayos gamma (20 MeV – 300 GeV)
Resolución angular	∼0.1°–1° (dependiente de la energía)
Resolución temporal	∼10 μs

3.5.2. Síntesis del análisis multifrecuencia

El estudio del flujo de un blazar en distintas frecuencias es esencial para entender los procesos físicos que intervienen en su emisión. La variabilidad observada en longitudes de onda como el óptico, infrarrojo, rayos X o radio puede deberse a mecanismos como la emisión sincrotrón o Compton inverso, por lo que el análisis simultáneo de estas bandas permite evaluar cómo se propagan los cambios a través del chorro relativista y en qué medida interactúan los diferentes componentes del sistema.

En este trabajo, la fuente principal de datos corresponde al OAN-SPM, cuyas observaciones fueron obtenidas mediante un polarímetro. Esto permite no solo analizar la evolución temporal del flujo, sino también estudiar el comportamiento de la polarización y del ángulo de polarización, los cuales proporcionan información clave sobre la geometría y orientación del campo magnético en el chorro. Por ello, además de las curvas de flujo en distintas bandas, se incluyen gráficas de polarización y ángulo de polarización.

En la Figura 3.5 se presenta las curvas de luz multifrecuencia del blazar ON 231, que abarcan observaciones en bandas de radio, infrarrojo, visible y rayos X, así como las curvas polarimétricas obtenidas con el OAN-SPM. Esta visualización permite comparar la evolución del flujo y la polarización en un mismo intervalo temporal, facilitando la identificación de posibles correlaciones entre bandas. Por otro lado, en la Figura 4.1 se muestran las curvas individuales de flujo, magnitud, porcentaje de polarización y ángulo de polarización obtenidas exclusivamente en SPM, lo cual permite un análisis más detallado del comportamiento local de la fuente en esta estación.

Este enfoque multifrecuencia y polarimétrico constituye una herramienta poderosa para identificar retrasos, correlaciones y patrones comunes entre bandas, lo que contribuye significativamente a la comprensión de la variabilidad del blazar y los procesos de aceleración de partículas en su entorno.

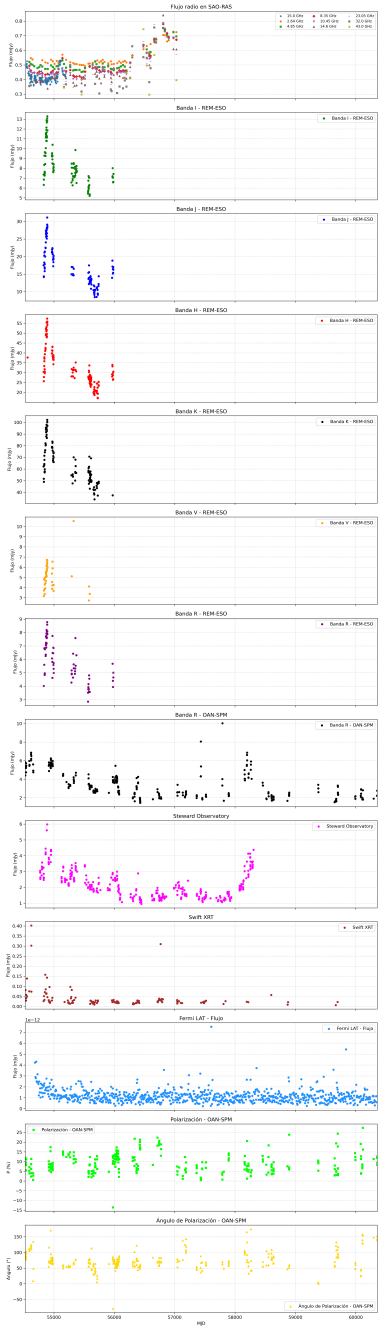


Figura 3.5: Curvas de luz multifrecuencia del blazar ON 231, abarcando observaciones en bandas de radio, infrarrojo, visible y rayos X. De arriba a abajo, se presentan: (1) Flujo radio en SAO-RAS con distintas frecuencias, (2) Flujo en la banda I de REM-ESO, (3) Flujo en la banda J de REM-ESO, (4) Flujo en la banda H de REM-ESO, (5) Flujo en la banda K de REM-ESO, (6) Flujo en la banda V del visible de REM-ESO, (7) Flujo en la banda R del visible de REM-ESO, (8) Flujo en banda R del visible de OAN-SPM, (9) Flujo óptico en el Observatorio Steward, (10) Flujo en rayos X de Swift-XRT, (11) Flujo en rayos gamma por FermiLat, (12) Porcentaje de polarización en la banda R de OAN-SPM, y (13) Ángulo de polarización en la banda R de OAN-SPM. Los datos cubren un amplio intervalo de tiempo en MJD = JD − 2450000.0, permitiendo un análisis comparativo de la variabilidad en distintas longitudes de onda. Para una mejor visualización de cada conjunto de datos, las curvas de luz individuales se presentan por separado en el Apéndice A.

Capítulo 4

Análisis y resultados de los datos polarimétricos

En este capítulo se presenta el análisis polarimétrico del blazar ON 231 a partir de observaciones realizadas en el OAN-SPM durante el periodo comprendido entre 2008 y 2024. Se describen los conceptos fundamentales relacionados con la polarización de la radiación, así como la metodología empleada para la construcción de curvas de luz de flujo, magnitud, grado de polarización y ángulo de polarización.

Con base en el análisis temporal de los datos, las observaciones fueron agrupadas en quince ciclos, lo que permitió identificar una variabilidad significativa tanto en el flujo como en los parámetros polarimétricos. En particular, se observaron rotaciones notables del ángulo de polarización, las cuales se analizaron en el contexto de procesos dinámicos asociados al chorro relativista.

Asimismo, se investigó la relación entre el flujo y el grado de polarización, encontrándose una débil anticorrelación entre ambos parámetros. Este comportamiento es consistente con escenarios en los que la emisión observada resulta de la superposición de múltiples componentes emisoras con diferentes propiedades polarimétricas.

Con el fin de caracterizar el comportamiento espectral del objeto, se construyeron distribuiciones de energía espectral (SED) correspondientes a estados de máxima y mínima emisión. Las componentes sincrotrón y Compton inverso fueron modeladas mediante ajustes log–parabólicos, permitiendo comparar ambos estados y analizar las diferencias en la energía radiada y en la distribución espectral.

Finalmente, se evaluó la consistencia de los resultados obtenidos mediante la comparación del plano de Stokes Q–U con estudios reportados en la literatura. Esta comparación mostró un comportamiento coherente en la evolución del vector de polarización, proporcionando un marco sólido para la interpretación de los procesos físicos responsables de la emisión polarizada en ON 231.

4.1. Análisis de variabilidad de ON 231 con datos del OAN-SPM

En este estudio se han obtenido observaciones en visible con la finalidad de determinar los siguientes parámetros:

- Flujo (F, en mJy).
- Magnitud aparente de la fuente en el intervalo óptico, específicamente en la banda R (rojo) (R, en magnitudes).

- Porcentaje de polarización lineal (P, en %).

- Ángulo de polarización (Θ, en grados).

El flujo observado se ha calculado a partir de la magnitud en la banda R mediante la siguiente expresión:

$$F_{\text{obs}} = K_0 \times 10^{-0.4R} \tag{4.1}$$

donde $K_0 = 3.08 \times 10^6$ mJy, para una longitud de onda efectiva de $\lambda = 640$ nm. [80].

Debido a la ambigüedad de 180° en el ángulo de polarización, se ha aplicado una corrección para garantizar que las diferencias observadas entre datos temporalmente adyacentes sean menores a 90°. Esta corrección se define como:

$$|\Delta\Theta_n| = |\Theta_{n+1} - \Theta_n| - p\sqrt{\sigma(\Theta_{n+1})^2 + \sigma(\Theta_n)^2} \tag{4.2}$$

donde $\sigma(\Theta)$ representa la incertidumbre en la medición del ángulo de polarización. [81].

Las curvas de luz obtenidas se presentan en la Figura 4.1, donde se muestra la evolución temporal de estos parámetros a lo largo del monitoreo en el OAN-SPM.

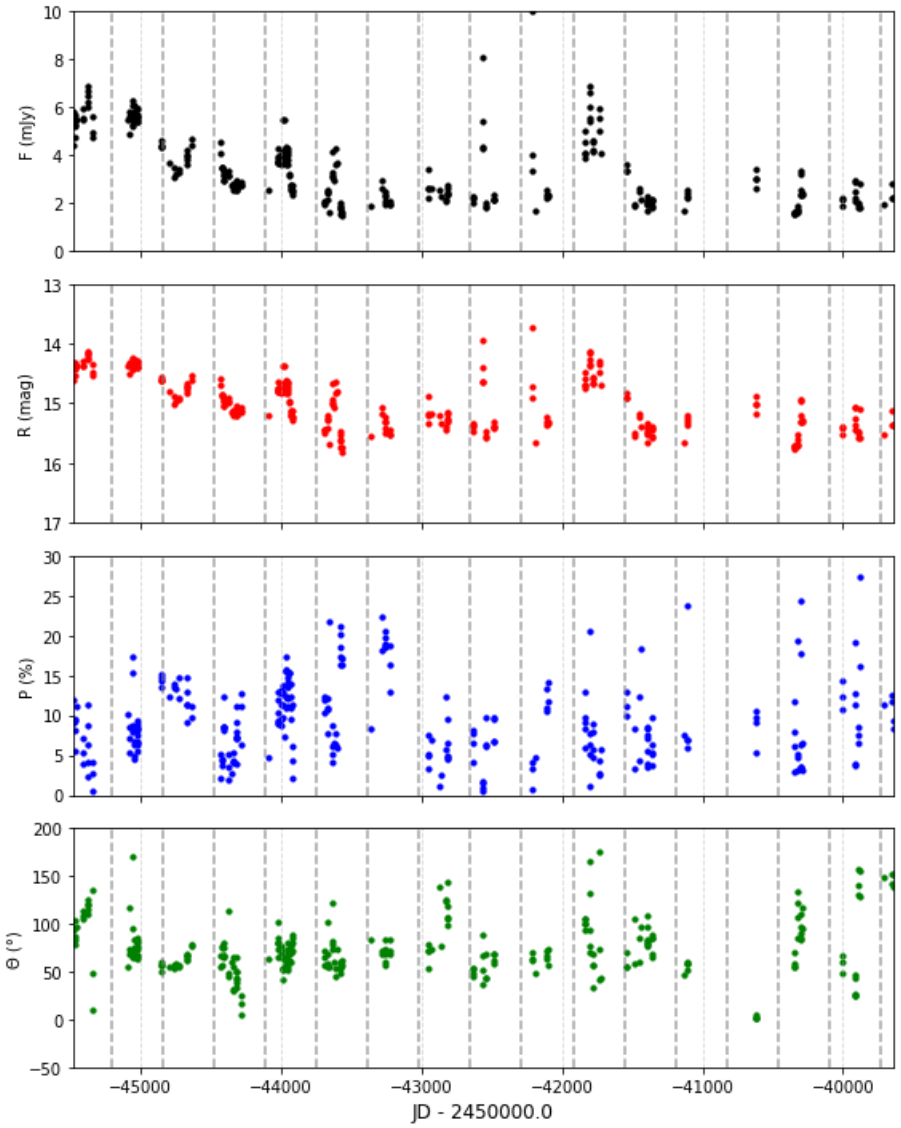


Figura 4.1: Curvas de luz fotopolarimétricas del blazar ON 231 obtenidas en el OAN-SPM en la banda R. De arriba a abajo, se presentan: (1) F(mJy), (2) R(mag), (3) $P(\,\%)$, y (4) $\Theta(^\circ)$. Los datos cubren un amplio intervalo de tiempo en días julianos (JD − 2450000.00). Las líneas punteadas verticales marcan la separación en ciclos, cada ciclo corresponde a un año.

4.1.1. Intervalo temporal de los ciclos

Con el objetivo de describir la evolución temporal del blazar ON 231, el conjunto de datos polarimétricos obtenido entre 2008 y 2024 fue segmentado en 17 intervalos temporales, denominados ciclos. Cada ciclo representa un año de observación dentro del periodo total de monitoreo, iniciando

[0]El Día Juliano (JD) es un sistema de conteo continuo de días utilizado en astronomía, definido como el número de días transcurridos desde el 1 de enero de 4713 a.C. a las 12:00 UT. En este trabajo, el tiempo se expresa como MJD = JD − 2450000.0, es decir, se ha aplicado un desplazamiento constante al Día Juliano con el fin de reducir la magnitud de los valores y facilitar su representación y análisis.

en 2008 y finalizando en 2024. Esta división anual permite organizar de manera sistemática la información observacional y comparar la evolución de la fuente en distintas etapas de actividad.

La segmentación se realizó con base en la distribución temporal de los datos y en la necesidad de estudiar de forma consistente el comportamiento del flujo óptico, el porcentaje de polarización y el ángulo de polarización a lo largo del tiempo. Mediante este esquema fue posible identificar periodos de mayor actividad fotométrica, fases relativamente más estables y cambios significativos en las propiedades polarimétricas del objeto.

De esta manera, cada ciclo constituye una unidad temporal de análisis que facilita el estudio comparativo de la variabilidad de ON 231 durante los 17 años cubiertos por el programa observacional. Esta segmentación se representa visualmente en las curvas de luz mediante líneas verticales divisorias, lo que permite reconocer con claridad la evolución anual del blazar a lo largo del intervalo observado.

4.1.2. Resultados principales

El análisis de los datos polarimétricos confirma que ON 231 presenta una variabilidad significativa tanto en el flujo óptico como en los parámetros de polarización a lo largo de todo el intervalo observado. Este comportamiento es consistente con una emisión dominada por radiación sincrotrónica originada en el chorro relativista, donde los cambios en la población de electrones relativistas, en la estructura del campo magnético y en la geometría de la región emisora producen variaciones simultáneas en brillo y polarización.

Entre los 17 ciclos identificados, los ciclos 9, 10 y 11 destacan como los intervalos de mayor interés. Los ciclos 9 y 10 presentan una amplitud de variación importante, con mediciones ampliamente dispersas en flujo, lo que sugiere fases altamente activas del jet relativista. En particular, durante estos ciclos se registran algunos de los valores de flujo más altos de toda la serie temporal. Por su parte, el ciclo 11 muestra una distribución más concentrada de los datos y una menor dispersión relativa; sin embargo, el flujo todavía alcanza valores cercanos a 6 mJy, indicando que la fuente se mantiene en un estado activo, aunque comparativamente más estable.

Las variaciones observadas en magnitud aparente en banda R son completamente consistentes con las registradas en el flujo óptico. Esto es esperable, ya que la magnitud constituye una transformación logarítmica del flujo, por lo que ambos parámetros describen la misma variabilidad fotométrica de la fuente, expresada en escalas diferentes.

Desde el punto de vista polarimétrico, el porcentaje de polarización exhibe una variabilidad notable durante todo el periodo analizado, con valores que oscilan desde niveles inferiores al 5 % hasta máximos cercanos al 28 %. Este comportamiento sugiere cambios temporales en el grado de ordenamiento del campo magnético, así como variaciones en la contribución relativa de distintas regiones emisoras dentro del jet relativista.

De manera complementaria, el ángulo de polarización muestra una evolución temporal compleja, con una concentración preferente entre aproximadamente 50° y 100°, aunque también se observan variaciones hacia valores cercanos a 0° y superiores a 150°. Estas variaciones son consistentes con modificaciones en la geometría de la región emisora y en la orientación proyectada del campo magnético.

El ciclo 11 resulta particularmente relevante desde el punto de vista polarimétrico, ya que presenta valores elevados tanto en el porcentaje como en el ángulo de polarización. Este comportamiento sugiere un episodio de actividad en el que la estructura magnética y/o la geometría de la región emisora experimentaron cambios significativos, reforzando la idea de que la variabilidad de ON 231 no sólo involucra cambios en intensidad, sino también en la configuración interna del jet.

4.1.3. Correlaciones entre el flujo y los parámetros de polarización

Con el fin de explorar si existe alguna relación sistemática entre el brillo óptico de ON 231 y su comportamiento polarimétrico, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson utilizando todo

el conjunto de datos. En particular, se analizaron las relaciones entre el flujo óptico y el porcentaje de polarización ($P\,\%$), así como entre el flujo y el ángulo de polarización (Θ).

El análisis muestra una correlación débilmente negativa entre el flujo y el porcentaje de polarización, con un valor de $r = -0.20$. Esto indica que, en promedio, los estados de mayor brillo tienden a presentar un menor grado de polarización. Este resultado puede interpretarse como un efecto de depolarización, en el que el aumento del flujo está asociado a la contribución simultánea de varias regiones emisoras dentro del chorro, cada una con una orientación distinta del campo magnético. La superposición de estas componentes provoca una cancelación parcial de los vectores de polarización, reduciendo el valor neto observado [90].

En contraste, la correlación entre el flujo y el ángulo de polarización es prácticamente nula, con un coeficiente de $r = +0.09$. Esto sugiere que la evolución del ángulo de polarización no depende directamente del brillo óptico de la fuente. Este comportamiento es consistente con un escenario en el que el EVPA está dominado principalmente por la geometría local del campo magnético en el chorro, más que por la intensidad total de la emisión, y puede estar relacionado con configuraciones helicoidales del campo, rotaciones internas o procesos turbulentos dentro del jet relativista [45].

4.1.4. Comparación con estudios previos en el intervalo 2008–2012

Los resultados obtenidos en este trabajo para el intervalo comprendido entre 2008 y 2012 muestran una concordancia general con los valores reportados por [91], aunque también permiten identificar algunos matices relevantes en la evolución del flujo.

En el Ciclo 1 (febrero a agosto de 2008), el presente análisis detecta un valor máximo de flujo de 6.86 mJy y un mínimo de 4.41 mJy, lo que corresponde a una amplitud de variación de $\Delta F = 2.45$ mJy. Estos valores son consistentes con los máximos y mínimos reportados por [91] para el mismo intervalo temporal. En este contexto, un *flare* puede entenderse como una ráfaga o incremento repentino en el flujo observado, es decir, un brinco en la energía emitida por el sistema durante un intervalo relativamente corto de tiempo. De acuerdo con ambos estudios, el evento observado durante este ciclo corresponde a un *flare* sostenido con una duración aproximada de dos meses.

En el Ciclo 5 (diciembre de 2011 a junio de 2012), este estudio encuentra una amplitud de variación de flujo de 3.09 mJy, en excelente acuerdo con la amplitud de 3.10 mJy reportada en el trabajo de referencia. Adicionalmente, se detecta un incremento de flujo superior a 1.5 mJy en un intervalo de pocos días, lo cual es coherente con el flare rápido de aproximadamente 1.65 mJy en tres días, descrito en la literatura.

Aunque el artículo original incluye también observaciones correspondientes al Ciclo 6 (enero a julio de 2013), este periodo se encuentra fuera del intervalo temporal principal cubierto por[91], el cual se centra en los años 2008–2012. No obstante, los valores obtenidos en el presente análisis para dicho ciclo, incluyendo una amplitud de variación de 2.80 mJy y la presencia de subflares con incrementos superiores a 3.4 mJy, son coherentes con los resultados reportados en estudios posteriores.

En conjunto, la comparación entre los datos obtenidos en este trabajo y los valores reportados en la literatura muestra una consistencia sólida para los eventos más relevantes del periodo 2008–2012. Este acuerdo valida la metodología de reducción y análisis empleada, y confirma la continuidad en el comportamiento polarimétrico del blazar W Comae durante dicho intervalo temporal.

4.2. Descripción general de la variabilidad temporal

La curva de luz óptica de ON 231 muestra una variabilidad claramente no estacionaria a lo largo del periodo analizado, con una alternancia constante entre estados de mayor y menor actividad. A lo largo de los distintos ciclos temporales, el flujo presenta cambios apreciables, sin seguir una tendencia monótona simple, lo que indica que la emisión óptica del objeto está dominada por procesos dinámicos intrínsecos.

Sobre este comportamiento global se identifican incrementos abruptos del flujo que alcanzan máximos locales bien definidos, los cuales pueden asociarse a eventos tipo *flare*. En algunos ciclos, estos flares se manifiestan como fases de actividad relativamente sostenida, mientras que en otros aparecen como picos más aislados de corta duración. Este patrón sugiere que ON 231 experimenta distintos regímenes de actividad a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, se observan episodios puntuales con valores de flujo significativamente superiores al nivel promedio de la curva de luz. Si bien el muestreo temporal no es completamente uniforme, se revisaron los datos de cada observación y se verificó que estos puntos no corresponden a condiciones observacionales extremas ni a problemas instrumentales. Por lo tanto, es razonable interpretarlos como variaciones reales de corta duración asociadas a la emisión del chorro relativista.

Después de alcanzar los máximos de emisión, el flujo tiende a disminuir de forma más gradual, acompañado de una dispersión apreciable dentro de cada ciclo, lo que evidencia la presencia de variabilidad de corto plazo incluso durante las fases de decaimiento. En los ciclos más recientes, la fuente se mantiene mayormente en estados de actividad moderada a baja, con amplitudes menores en comparación con los periodos de mayor actividad observados en la parte central de la serie temporal.

En conjunto, la curva de luz refleja una sucesión de episodios de actividad caracterizados por ascensos relativamente rápidos, máximos bien definidos y descensos más suaves.

4.3. SED

La Distribución de Energía Espectral (Spectral Energy Distribution, SED) describe la manera en que la energía de un objeto astronómico se distribuye a lo largo de la frecuencia, desde el radio hasta los rayos gamma. En blazares, esta representación toma una forma de doble joroba que refleja la presencia de dos mecanismos principales: uno de baja frecuencia, correspondiente a la emisión sincrotrón generada por electrones relativistas en campos magnéticos, y otro de alta frecuencia asociado al Compton inverso, donde esos mismos electrones dispersan fotones hacia energías más altas [12].

Para representar la cantidad de energía emitida por unidad de frecuencia de forma intuitiva, la SED se suele expresar en función del parámetro νF_ν, donde F_ν es el flujo espectral y ν es la frecuencia correspondiente; de esta manera, el producto νF_ν es la potencia radiada por intervalo logarítmico de frecuencia. Además, en ajustes de curvas log-parabólicas para describir los componentes del SED, el parámetro ν_0 representa la frecuencia de referencia en torno a la cual se define la curvatura de la distribución espectral.

4.3.1. División de las SEDs en máximos y mínimos

En el estudio de la energía emitida por blazares como ON 231, resulta fundamental analizar cómo cambia la distribución espectral de energía (SED) a lo largo del tiempo y en distintos estados de actividad. Con el fin de capturar estas variaciones, se optó por construir dos SEDs independientes: uno correspondiente a los momentos de máxima emisión y otro a los de mínima emisión registrados en las distintas bandas.

La motivación principal para esta división es obtener una comparación directa entre el comportamiento del objeto cuando se encuentra en su fase de mayor actividad frente a su fase de reposo relativo.

Al contar con estas dos representaciones espectrales contrastantes, se puede evaluar si la forma del SED se conserva, se desplaza o cambia de manera significativa entre los dos estados.

4.3.2. SED de ON 231 durante eventos de máxima emisión

Para caracterizar el estado de mayor actividad del blazar ON 231, se construyó un SED utilizando los valores máximos de flujo observados en cada una de las bandas disponibles: radio, infrarrojo, óptico, rayos X y rayos gamma. Esta selección busca representar un momento de alta eficiencia en la emisión del chorro relativista, lo cual permite identificar y analizar con mayor claridad las dos componentes principales del SED: la sincrotrón y la inverse Compton.

Para modelar la componente sincrotrón, se empleó un ajuste log-parabólico definido en el espacio logarítmico de frecuencia y energía, el cual permite describir la curvatura observada en la primera joroba espectral. Este ajuste fue aplicado a los datos con frecuencias menores a 10^{16} Hz, abarcando desde radio hasta el óptico. Los parámetros iniciales del ajuste se definieron a partir de la mediana logarítmica de las frecuencias seleccionadas, el valor máximo de νF_ν, y un coeficiente de curvatura basado en valores típicos para blazares de tipo IBL.

La segunda componente, correspondiente a inverse Compton, fue ajustada también mediante una función log-parabólica pero con el pico fijo en ν_0, utilizando las observaciones de Swift y Fermi LAT. Dado que estas dos bandas por sí solas no permitían un ajuste robusto, se introdujo un punto intermedio virtual entre ambas frecuencias. Este punto fue calculado como una media logarítmica ponderada en frecuencia y flujo, permitiendo una transición suave y físicamente plausible entre la decaída de la componente sincrotrón y el ascenso de la componente Compton. Esta técnica ha sido aplicada en la literatura para reconstruir SEDs de blazares cuando hay pocos datos en energías intermedias, como se muestra en [98].

Ambas curvas ajustadas permiten no solo visualizar la doble estructura esperada del SED, sino también cuantificar la posición del pico de cada componente, su extensión espectral y la eficiencia relativa de emisión en cada región. Estos resultados son consistentes con un blazar de tipo IBL, cuya primera joroba se extiende hasta el óptico-infrarrojo y cuya componente Compton presenta un pico en el intervalo de rayos X bajos o gamma suaves.

4.3.3. SED de ON 231 durante eventos de mínima emisión

Para explorar el comportamiento del blazar ON 231 en su estado de menor actividad, se construyó un SED utilizando los valores mínimos de flujo registrados en cada una de las bandas observacionales. Esta representación permite estudiar cómo se atenúa la emisión del chorro relativista y cuáles son los efectos espectrales asociados a un posible estado de reposo o baja eficiencia en los procesos de aceleración de partículas.

Al igual que en el caso de los máximos, se aplicó un ajuste log-parabólico a la componente sincrotrón del SED, empleando los datos con frecuencias por debajo de 10^{16} Hz. El ajuste fue realizado en coordenadas logarítmicas para capturar la curvatura propia de la primera joroba espectral. Los parámetros iniciales del modelo fueron adaptados a los valores característicos de flujo mínimo, considerando la mediana de las frecuencias y una pendiente inicial suavizada, en línea con estudios previos de blazares de tipo IBL.

La componente Compton inversa fue ajustada también mediante una función log-parabólica con pico fijo en ν_0, usando los puntos correspondientes a Swift y Fermi LAT. Para completar el ajuste, se generó un punto intermedio virtual que actuó como conector entre las dos bandas de alta energía. Este punto fue estimado siguiendo el mismo criterio utilizado en el caso de los máximos, mediante una media logarítmica ponderada que preserva la coherencia espectral.

Una diferencia importante observada en el ajuste de los mínimos fue la menor amplitud de ambas componentes, en comparación con los máximos, lo cual es consistente con una reducción global en la energía emitida. Además, se detectó un posible desplazamiento leve en el pico de la componente sincrotrón hacia frecuencias menores, lo cual podría reflejar procesos de enfriamiento en la población de electrones relativistas o una disminución en el campo magnético efectivo.

El análisis de esta curva en comparación con la obtenida para los máximos permite evaluar la estabilidad de la forma espectral del blazar y proporciona información clave sobre la evolución de

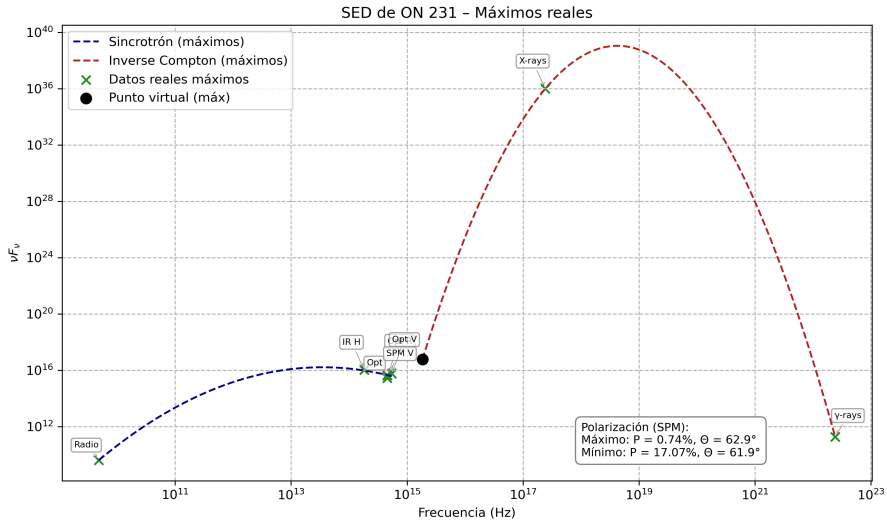


Figura 4.2: Distribuición de Energía Espectral (SED) del blazar ON 231 construido a partir de los estados de máxima emisión observados en cada banda. Los puntos verdes representan los datos reales obtenidos a partir de observaciones multibanda; el punto negro corresponde a un punto virtual introducido para conectar la región de sincrotrón con la región de Compton inverso. Se ajustaron dos componentes mediante curvas log-parabólicas: la primera (línea azul punteada) modela la emisión de sincrotrón en el infrarrojo y óptico, y la segunda (línea roja punteada) representa la emisión Inverse Compton en rayos X y rayos γ. En la esquina inferior derecha se muestran los valores promedio de polarización óptica en el OAN-SPM, asociados al estado de máximo y mínimo flujo.

sus procesos de emisión bajo diferentes condiciones físicas.

4.3.4. Comparación entre los SED de máximos y mínimos reales

El análisis conjunto de los SED construidos a partir de los máximos y mínimos reales de flujo multibanda para ON 231 permite evidenciar diferencias sustanciales en la emisión del objeto en función de su estado de actividad. Esta comparación resulta crucial para interpretar las transiciones energéticas en el entorno del chorro relativista, así como la evolución de las condiciones físicas responsables de la producción del espectro observado.

Uno de los hallazgos más notables es la diferencia en la amplitud absoluta de ambas componentes espectrales: tanto la sincrotrón como la Compton inversa presentan una reducción significativa en sus valores de νF_ν durante los mínimos, reflejando una menor eficiencia de emisión energética del jet. Esto sugiere que el blazar experimenta una variabilidad real en la energía total emitida, y no solo en la geometría de observación o en la absorción externa.

En el caso de la componente sincrotrón, además de su atenuación, se observa un ligero desplazamiento hacia frecuencias menores durante los mínimos, lo cual podría estar asociado a procesos de enfriamiento de los electrones relativistas, o a una disminución del campo magnético que regula la emisión en esta región del espectro.

Por otro lado, la forma general de la componente inverse Compton se conserva entre ambos estados, pero el pico en νF_ν durante los máximos (centrado en Swift) se encuentra notablemente más alto que en los mínimos, sugiriendo una variabilidad significativa en la población de fotones o en la energía de los electrones responsables de la dispersión. Este comportamiento refuerza la clasificación de ON 231 como un objeto IBL, cuya emisión Compton alcanza su máximo en la

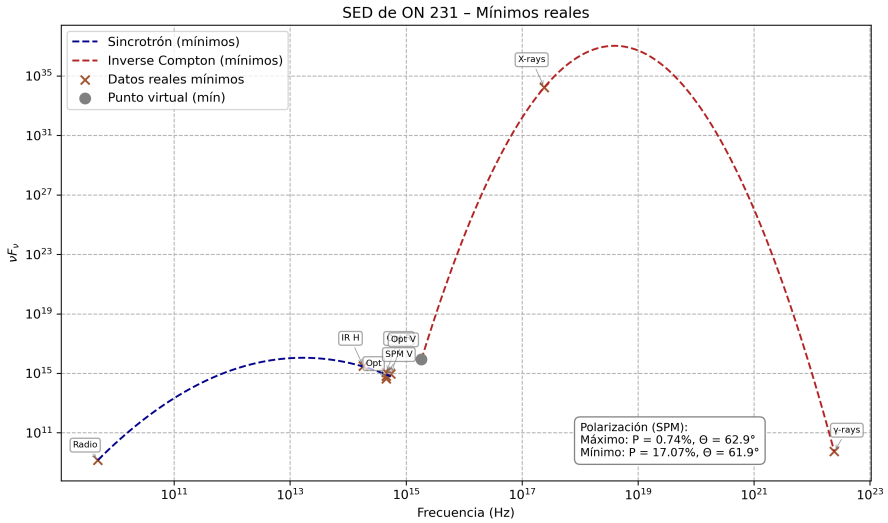


Figura 4.3: Distribución de Energía Espectral (SED) del blazar ON 231 construido a partir de los estados de mínima emisión observados en cada banda. Los puntos cafés representan los datos reales obtenidos a partir de observaciones multibanda; el punto gris indica un punto virtual utilizado para conectar la región de emisión sincrotrón con la región dominada por el proceso de Inverse Compton. Se ajustaron dos componentes log-parabólicos: la curva azul punteada representa el ajuste de la emisión sincrotrón en el infrarrojo y óptico, mientras que la curva roja punteada describe la emisión Inverse Compton en rayos X y rayos γ. En la esquina inferior derecha se muestran los valores promedio de polarización óptica en el OAN-SPM, asociados a los estados de máximo y mínimo flujo.

región de rayos X.

Finalmente, la necesidad de utilizar puntos virtuales intermedios en ambos ajustes Compton destaca la ausencia observacional de datos en el dominio de energías intermedias (UV extremo y rayos X blandos), lo cual limita la reconstrucción directa pero permite, mediante aproximaciones físicamente justificadas, mantener la continuidad entre las dos jorobas del espectro.

4.3.5. Comportamiento polarimétrico asociado a los estados de máxima y mínima emisión

Los datos polarimétricos obtenidos en el OAN-SPM revelan una variación notable en la polarización de ON 231 cuando se compara su estado de mayor emisión con el de menor emisión. En el máximo de flujo, se detecta un porcentaje de polarización de tan solo $P = 0.741\,\%$ y un ángulo de polarización $\Theta = 62.93°$. En contraste, durante el mínimo de flujo, la polarización alcanza un valor elevado de $P = 17.071\,\%$, con un ángulo muy similar de $\Theta = 61.93°$.

Este comportamiento posee implicaciones directas sobre los procesos físicos que dominan la emisión en blazares y la estructura del jet relativista. En el contexto de modelos tipo *shock-in-jet*, se espera que la emisión sincrotrón provenga de regiones donde los electrones relativistas se propagan dentro de un campo magnético parcialmente ordenado [99]. La polarización lineal detectada es una manifestación directa de la orientación y grado de orden de dicho campo magnético.

Durante episodios de alta luminosidad, el flujo total puede estar dominado por la superposición de múltiples regiones de emisión, o bien por una intensificación del aporte de componentes no polarizadas, como la emisión del disco de acreción o regiones turbulentas del jet. Esta mezcla puede causar una cancelación parcial del vector de polarización, resultando en un valor neto reducido,

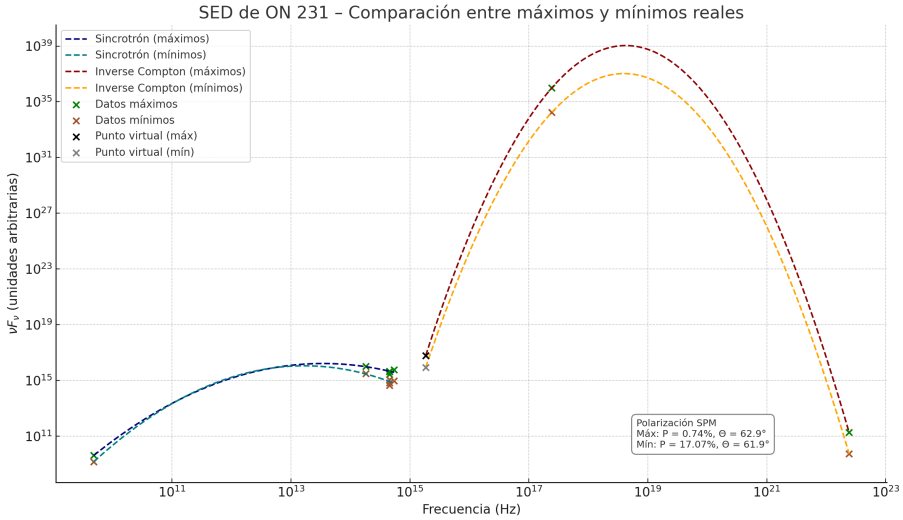


Figura 4.4: Comparación entre las distribuciones de energía espectral (SED) de ON 231 durante los estados de máxima y mínima actividad. Los ajustes mediante log-parábolas modelan dos componentes principales: la emisión sincrotrón (curvas punteadas azul y celeste) y la emisión Inverse Compton (curvas punteadas roja y amarilla) para máximos y mínimos respectivamente. Los puntos representan los datos reales de cada estado, mientras que los puntos virtuales permiten conectar las regiones de emisión en ausencia de observaciones intermedias. Se aprecia un desplazamiento en la potencia radiada tanto en la región sincrotrón como en la región Compton entre ambos estados, en concordancia con los cambios observados en la polarización óptica registrada en el OAN-SPM.

como se observa en el caso de ON 231 con $P = 0.741\,\%$.

Por el contrario, durante estados de baja actividad, las componentes no polarizadas disminuyen su contribución relativa, permitiendo que la emisión sincrotrón del jet domine. Aquí, la señal polarizada se vuelve más clara y representativa del campo magnético local. El valor observado de $P = 17.071\,\%$ es consistente con un campo parcialmente ordenado, probablemente generado por ondas de choque internas que alinean las líneas de campo magnético [100, 101].

El hecho de que el ángulo de polarización permanezca estable sugiere que la orientación proyectada del campo magnético en el plano del cielo no cambia significativamente entre ambos estados. Esto es compatible con una geometría estable del jet o con un campo magnético helicoidal ordenado a lo largo del eje del jet [102].

4.4. Definición de los parámetros de polarización

La polarización óptica constituye una herramienta fundamental para el estudio de la estructura del campo magnético y de los procesos físicos que dominan la emisión sincrotrónica en los chorros relativistas de los blazares [88]. En este trabajo, la caracterización de la polarización se realiza mediante los parámetros de Stokes, los cuales permiten describir de forma cuantitativa el estado de polarización de la radiación observada [89].

4.4.1. Parámetros de Stokes

El estado de polarización de la luz se describe completamente a través de los cuatro parámetros de Stokes I, Q, U y V, ampliamente utilizados en estudios polarimétricos de blazares [83]. En el contexto de la emisión sincrotrónica, dominante en estas fuentes, la polarización lineal proporciona

información directa sobre la geometría y el grado de orden del campo magnético en la región emisora [86].

Los parámetros de Stokes se definen de la siguiente manera [89]:

- I: Intensidad total de la radiación.
- Q: Diferencia de intensidades entre dos componentes linealmente polarizadas en direcciones ortogonales.
- U: Diferencia de intensidades entre dos componentes linealmente polarizadas rotadas 45° respecto a las definidas por Q.
- V: Componente de polarización circular.

El grado de polarización P se define como la fracción de la intensidad total que se encuentra polarizada y se expresa como [87]:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}. \tag{4.3}$$

En la emisión sincrotrón característica de los blazares, la componente de polarización circular suele ser despreciable en el intervalo óptico. Esto se debe a que este tipo de radiación produce principalmente polarización lineal, mientras que la componente circular es mucho más débil. Además, en un jet relativista, la emisión proviene de distintas regiones con diferentes orientaciones del campo magnético, lo que tiende a cancelar la polarización circular cuando se integra la señal total. Por otro lado, en el régimen óptico los electrones responsables de la emisión tienen energías muy altas, lo que hace que la contribución de la polarización circular sea aún menor. Por estas razones, en estudios polarimétricos ópticos de blazares es común considerar despreciable el parámetro de Stokes V ($V \approx 0$) [83, 86].

Bajo esta aproximación, la expresión para el grado de polarización se reduce a:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \tag{4.4}$$

Estas definiciones constituyen la base formal para el análisis polarimétrico presentado en las secciones siguientes, en particular para la interpretación de la evolución temporal del grado de polarización y del ángulo de posición de la polarización, así como del comportamiento en el plano de Stokes Q–U.

4.4.2. Ángulo de polarización y su variabilidad

A partir de Q y U, podemos calcular el ángulo de polarización, que nos dice en qué dirección está alineado el campo magnético en el chorro. Este ángulo es clave porque puede cambiar con el tiempo, y estos cambios pueden revelar cómo evoluciona la estructura magnética del blazar [87].

$$Q = IP\cos(2\Theta) \tag{4.5}$$

$$U = IP\sin(2\Theta) \tag{4.6}$$

Dividiendo ambas ecuaciones y despejando Θ, se obtiene la expresión del ángulo de polarización de la siguiente forma:

$$\frac{U}{Q} = \frac{IP\sin(2\Theta)}{IP\cos(2\Theta)} \tag{4.7}$$

$$\frac{U}{Q} = \tan(2\Theta) \tag{4.8}$$

$$2\Theta = \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{4.9}$$

$$\Theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{4.10}$$

El estudio de la polarización en los blazares es crucial porque nos da pistas sobre los procesos internos de los chorros relativistas. Se ha observado que el ángulo de polarización puede rotar de manera gradual o brusca, lo que puede estar relacionado con eventos energéticos en el chorro. Estos eventos pueden modificar el campo magnético y cambiar la orientación de la luz polarizada que observamos desde la Tierra [44].

4.4.3. El plano de Stokes y su relevancia en el estudio de blazares

El plano de Stokes, definido por los parámetros Q y U, constituye una herramienta fundamental para el análisis de la polarización lineal en blazares. A diferencia del estudio separado del grado y del ángulo de polarización, la representación conjunta en el plano Q–U permite examinar la evolución temporal del estado polarimétrico de la fuente de manera continua y libre de ambigüedades angulares [89].

Definición y representación del plano de Stokes

El plano de Stokes se construye utilizando los parámetros Q y U, los cuales describen completamente la polarización lineal de la radiación. Cada observación se representa como un punto en el plano cartesiano definido por estos parámetros, donde la distancia al origen está relacionada con el grado de polarización y la orientación del vector (Q, U) determina el ángulo de polarización [103].

Más allá de esta interpretación geométrica, el análisis de trayectorias en el plano Q–U permite identificar patrones físicos relevantes, como rotaciones coherentes del vector de polarización, agrupamientos de puntos asociados a estados estables y la presencia de múltiples componentes emisoras. Estas características no siempre son evidentes al analizar únicamente $P\,\%$ y Θ, y resultan especialmente útiles para distinguir entre variabilidad estocástica, cambios geométricos del campo magnético y eventos dinámicos como choques internos o reconexiones magnéticas en el chorro relativista.

Aplicación en el estudio de blazares

En el presente trabajo, el plano de Stokes Q–U se utiliza como una herramienta diagnóstica para el análisis detallado de la variabilidad polarimétrica de ON 231. En particular, su aplicación permite:

1. **Identificar componentes polarimétricas**: La distribución de los puntos en el plano Q–U permite distinguir entre componentes estables, asociadas a agrupamientos persistentes alrededor de una posición fija, y componentes variables, caracterizadas por dispersiones o trayectorias coherentes a lo largo del tiempo.

2. **Caracterizar rotaciones reales del ángulo de polarización**: Las rotaciones sistemáticas del EVPA se manifiestan como trayectorias continuas y organizadas en el plano Q–U, lo que permite diferenciar entre cambios geométricos del campo magnético y variaciones estocásticas dominadas por ruido o turbulencia.

3. **Relacionar la polarización óptica con eventos de alta energía**: La evolución temporal de las trayectorias en el plano de Stokes puede compararse con episodios de actividad en otras bandas del espectro electromagnético, como flares en rayos X o gamma, proporcionando información sobre la posible coespacialidad de las regiones emisoras y los mecanismos físicos involucrados.

4.4.4. Comparación del plano de Stokes

Con el fin de evaluar la consistencia física y observacional de los resultados polarimétricos obtenidos en esta tesis, se realizó una comparación directa entre el plano de Stokes Q–U construido a partir de los datos analizados en este trabajo y el plano presentado por [91]. La comparación se llevó a cabo para el intervalo comprendido entre el 10 de marzo y el 11 de julio de 2008, correspondiente a un evento de *flare* ampliamente documentado.

Aunque ambos estudios se basan en observaciones obtenidas dentro del mismo programa polarimétrico en el OAN-SPM, al revisar detalladamente las series temporales se identificaron ligeras diferencias en el número de observaciones disponibles. En particular, algunos puntos que aparecen en el plano de Stokes publicado por [91] no están presentes en la base de datos empleada en esta tesis. De manera similar, el presente trabajo incluye ciertos puntos observacionales que no aparecen representados en el artículo de referencia. Si bien ambos análisis se apoyan en el mismo programa observacional, no se conoce con precisión la causa de estas diferencias, ya que en principio deberían derivarse de la misma base de datos. Es probable que obedezcan a criterios particulares de selección o depuración aplicados en el estudio de referencia. En todo caso, estas variaciones no tienen un origen físico, sino metodológico.

Para la construcción del plano de Stokes en esta tesis, los parámetros Q y U se calcularon a partir del flujo total en banda R (I), el porcentaje de polarización P y el ángulo de polarización Θ, utilizando las expresiones estándar:

$$Q = I \times \frac{P}{100} \times \cos(2\Theta), \qquad U = I \times \frac{P}{100} \times \sin(2\Theta),$$

donde P se expresa en porcentaje y Θ en grados. Cada observación queda representada como un punto en el plano cartesiano Q–U, lo que permite seguir de manera directa la evolución temporal del estado de polarización de la fuente.

Con el propósito de facilitar una comparación visual directa, se mantuvo el mismo intervalo temporal y se etiquetaron las observaciones en formato calendario, siguiendo el esquema empleado por [91].

A pesar de las diferencias puntuales en el número de observaciones, el plano de Stokes obtenido en esta tesis reproduce de manera notable la trayectoria general reportada en el trabajo de referencia. En ambos casos se observa una evolución continua y curvada del vector de polarización, describiendo un desplazamiento progresivo en el plano Q–U durante el evento de 2008. La forma general de la trayectoria, así como los rangos de valores de Q y U, aproximadamente entre -0.6 y $+0.2$ mJy, resultan comparables entre ambos análisis.

Las pequeñas diferencias en la dispersión o en la posición exacta de algunos puntos no modifican el comportamiento de la trayectoria ni la interpretación física del fenómeno. Por el contrario, el hecho de reproducir de manera independiente la morfología y evolución temporal del plano de Stokes respalda la consistencia de los cálculos realizados y la calidad del tratamiento de los datos polarimétricos en esta tesis.

En conjunto, esta comparación nos permite reproducir el evento polarimétrico de 2008 en ON 231, y valida la metodología empleada en el análisis polarimétrico desarrollado en este trabajo.

Las siguientes figuras muestran: (a) el plano de Stokes Q vs. U generado en esta tesis, y (b) el gráfico publicado por [91]. Ambas evidencian una trayectoria continua y curvada del vector de polarización durante el evento polarimétrico de 2008.

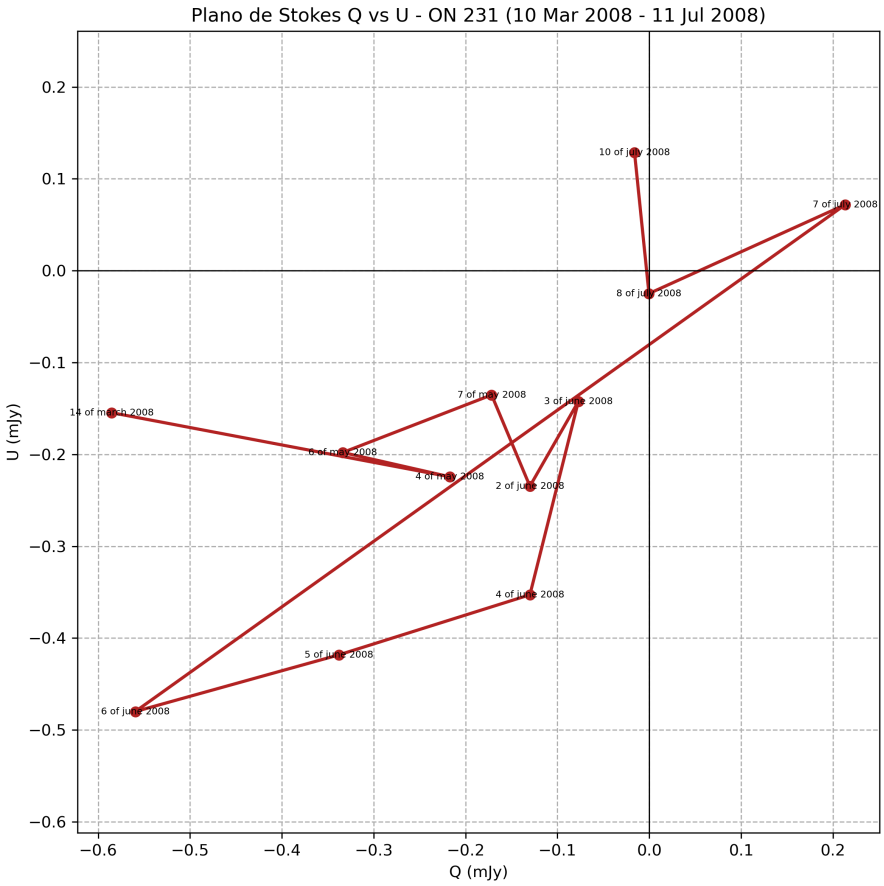


Figura 4.5: (a) Plano de Stokes Q vs. U construido a partir de los datos polarimétricos de esta tesis para ON 231 durante el evento de 2008. Las fechas están etiquetadas en formato calendario.

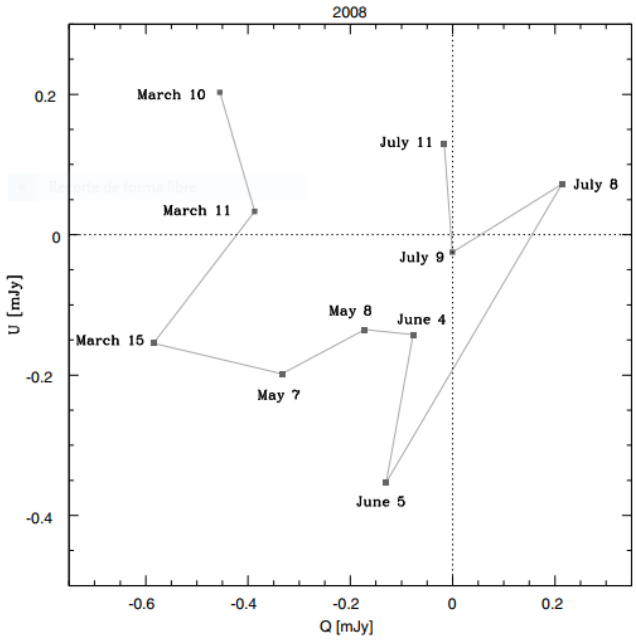


Figura 4.6: (b) Plano de Stokes Q vs. U publicado por [91] para el mismo intervalo temporal. Las fechas están etiquetadas en calendario.

4.5. Parámetros de Stokes para cada flare

Para obtener los parámetros de Stokes asociados a cada flare observado en el blazar ON 231, se identificaron primero los eventos eruptivos presentes en la curva de luz. Con este fin, se determinó un nivel típico de emisión (baseline) mediante una mediana móvil calculada en ventanas temporales, lo que permite describir la variación de largo plazo sin verse afectado por incrementos abruptos de flujo. Posteriormente, la dispersión local de los datos se estimó utilizando el estimador robusto MAD (*Median Absolute Deviation*), el cual proporciona una medida confiable de la variabilidad característica del sistema.

Un punto fue considerado parte de un flare cuando su exceso de flujo superó un umbral definido como un múltiplo fijo de la dispersión local, y los puntos significativos fueron agrupados en eventos individuales empleando un criterio de continuidad temporal. Este procedimiento permitió identificar flares bien definidos y físicamente relevantes a lo largo del periodo de observación.

Una vez detectados los flares, se realizó el análisis polarimétrico de cada evento mediante el cálculo de los parámetros de Stokes lineales. Para ello, se utilizó el método estándar de conversión de polarización a parámetros de Stokes, en el cual la intensidad total del flujo en banda R, el grado de polarización y el ángulo del vector de polarización se combinan para obtener los parámetros Q y U.

Este procedimiento se aplicó punto a punto a todas las observaciones que conforman cada flare, permitiendo caracterizar la evolución temporal de la polarización durante los episodios eruptivos.

Finalmente, los parámetros de Stokes obtenidos se resumieron para cada *flare* mediante dos enfoques complementarios. En primer lugar, se consideraron los valores correspondientes al punto de máximo brillo de cada evento, ya que éste representa el estado de mayor emisión y, por tanto, el momento en el que las propiedades polarimétricas del chorro pueden manifestarse con mayor claridad. En segundo lugar, se calcularon valores promedio representativos de todo el *flare* utilizando el promedio vectorial en el plano Q–U, obtenido a partir de los valores medios de Q y U dentro del intervalo del evento y reconstruyendo posteriormente el grado y el ángulo de polari-

zación. Este procedimiento evita las ambigüedades asociadas al promedio directo del ángulo de polarización —particularmente la periodicidad de 180°— y permite obtener una caracterización físicamente consistente del comportamiento polarimétrico global del evento. La combinación de ambos enfoques permite describir tanto el estado extremo como la evolución promedio del campo magnético proyectado, facilitando el análisis de su relación con la variabilidad fotométrica durante los *flares* observados en ON 231.

Tabla 4.1: Parámetros polarimétricos promedio y en el pico de los flares detectados en el blazar ON 231. Los valores promedio fueron calculados mediante el promedio vectorial en el plano Q–U.

Flare	I_{peak} (mJy)	P_{peak} (%)	θ_{peak} (deg)	P_{vec} (%)	θ_{vec} (deg)	$(Q_{\text{vec}}, U_{\text{vec}})$ (mJy)
1	5.45	12.93	53.59	9.98	57.00	$(-0.22, 0.50)$
2	8.06	0.41	36.54	0.80	63.26	$(-0.03, 0.04)$
3	10.03	0.74	62.93	1.95	65.57	$(-0.07, 0.08)$

4.5.1. Plano de Stokes del Flare 1

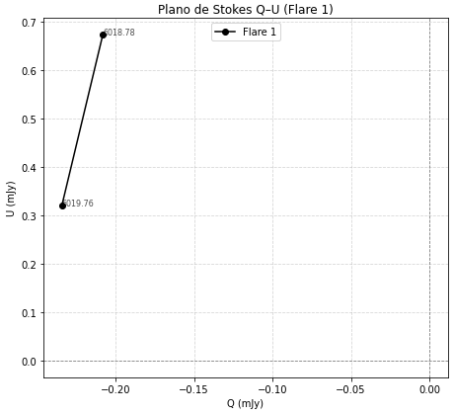


Figura 4.7: Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 1 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal.

El plano de Stokes del Flare 1 muestra una trayectoria corta y aproximadamente lineal, compuesta por dos puntos correspondientes a observaciones consecutivas en el tiempo. Ambos puntos se localizan en el mismo cuadrante del plano, con valores negativos de Q y positivos de U, lo que indica que la orientación del vector de polarización se mantuvo consistente a lo largo del evento. La ausencia de desplazamientos significativos en el plano Q–U sugiere que no ocurrieron rotaciones complejas del ángulo de polarización (EVPA) durante el desarrollo del flare.

Este comportamiento es coherente con el alto grado de polarización observado en este evento, tanto en el punto de máximo brillo como en el promedio vectorial calculado. La concentración de los puntos en una región bien definida del plano Q–U es indicativa de la dominancia de una única región emisora con un campo magnético proyectado relativamente ordenado. En este contexto, el incremento del flujo óptico puede interpretarse como un aumento en la eficiencia de emisión de dicha región, sin una reconfiguración significativa de la geometría del campo magnético.

Cabe señalar que, debido al número limitado de observaciones disponibles para este flare, no es posible identificar patrones más complejos, como trayectorias curvas, bucles cerrados o rotaciones continuas del EVPA. No obstante, el análisis del plano de Stokes es consistente con un estado polarimétrico estable durante el evento, lo que sugiere que el Flare 1 está asociado a un episodio de emisión coherente desde el punto de vista magnético.

4.5.2. Plano de stokes flare 2

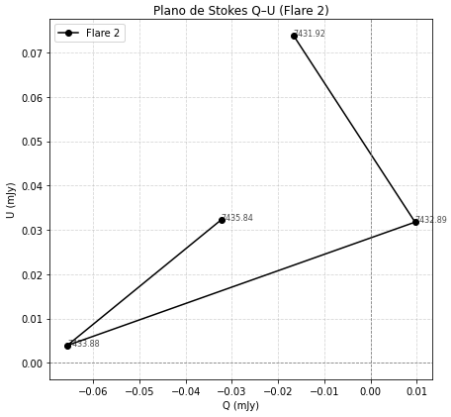


Figura 4.8: Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 2 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal.

El Flare 2 corresponde a un evento de mayor duración y mayor amplitud fotométrica en comparación con el Flare 1; sin embargo, presenta un grado de polarización notablemente menor. Con el objetivo de comprender este comportamiento, se analizó la evolución polarimétrica del evento mediante el plano de Stokes Q–U, construido a partir de las observaciones incluidas dentro del intervalo temporal del flare.

El plano de Stokes del Flare 2 muestra una trayectoria extendida y con cambios claros de dirección, lo que indica una evolución significativa del estado polarimétrico a lo largo del evento. A diferencia del Flare 1, los puntos no se concentran en una región compacta del plano, sino que describen una trayectoria irregular, lo cual sugiere variaciones apreciables en la orientación del vector de polarización. Este comportamiento es consistente con un EVPA variable y con la ausencia de una orientación preferencial estable durante el desarrollo del flare.

La baja polarización promedio observada en este evento puede interpretarse como el resultado de una cancelación vectorial en el plano Q–U, donde contribuciones provenientes de distintas regiones emisoras, cada una con una orientación diferente del campo magnético, se combinan reduciendo el grado de polarización neto. En este contexto, el incremento del flujo óptico no necesariamente implica un mayor orden del campo magnético, sino que puede estar asociado a un escenario más complejo, posiblemente dominado por procesos turbulentos o por la superposición de múltiples zonas emisoras dentro del chorro relativista.

4.5.3. Plano de stokes flare 3

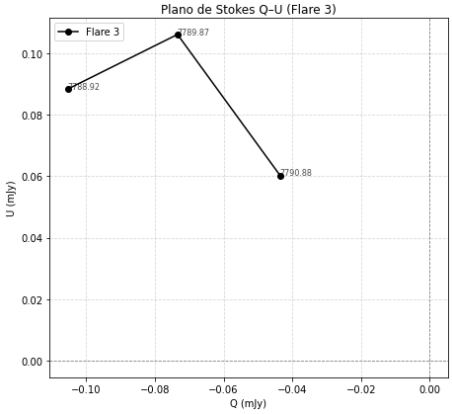


Figura 4.9: Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 3 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales durante el evento y la línea indica su evolución temporal.

El Flare 3 corresponde al evento de mayor amplitud fotométrica identificado en este trabajo y presenta un grado de polarización intermedio en comparación con los otros flares analizados. Para caracterizar su comportamiento polarimétrico, se construyó el plano de Stokes Q–U utilizando las observaciones correspondientes al intervalo temporal del evento.

El plano de Stokes del Flare 3 muestra una trayectoria compuesta por tres puntos que describen cambios moderados en la orientación del vector de polarización. Aunque los puntos se mantienen dentro del mismo cuadrante del plano, se observa una variación apreciable tanto en la magnitud como en la dirección del vector polarimétrico a lo largo del flare. Este comportamiento indica que el ángulo de polarización no permaneció completamente estable durante el evento, pero tampoco exhibió rotaciones abruptas ni trayectorias altamente complejas en el plano Q–U.

La polarización promedio relativamente baja observada en este flare puede interpretarse como el resultado de una combinación entre una región emisora parcialmente ordenada y variaciones temporales en la geometría del campo magnético. A diferencia del Flare 1, dominado por un campo magnético bien organizado, y del Flare 2, donde la cancelación vectorial parece ser el proceso dominante, el Flare 3 presenta un comportamiento intermedio. Este resultado es consistente con un escenario en el que el incremento significativo del flujo óptico estuvo acompañado de una reconfiguración moderada del campo magnético proyectado, sin alcanzar un estado altamente ordenado.

4.5.4. Plano de Stokes flare 4

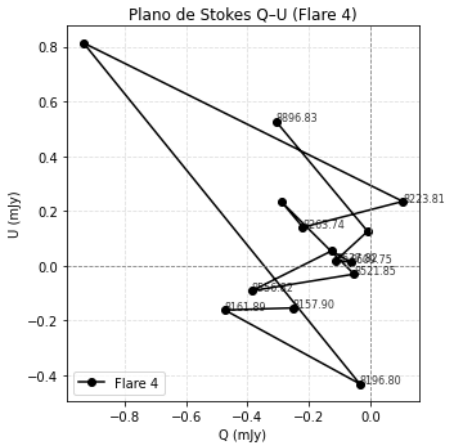


Figura 4.10: Plano de Stokes Q–U correspondiente al Flare 4 del blazar ON 231. Los puntos representan observaciones individuales antes, durante y después del máximo del evento, mientras que la línea indica la evolución temporal de los parámetros de Stokes.

El plano de Stokes del Flare 4 muestra una trayectoria significativamente más extensa y compleja en comparación con los flares previamente analizados. Los puntos se distribuyen en distintas regiones del plano Q–U y describen una evolución no lineal, lo que indica cambios apreciables tanto en la magnitud como en la orientación del vector de polarización a lo largo del evento. Este comportamiento sugiere una variabilidad polarimétrica más compleja durante el desarrollo del flare.

A diferencia del Flare 1, caracterizado por una polarización estable, el Flare 4 presenta variaciones notables en la dirección del vector polarimétrico, lo que es consistente con la presencia de rotaciones parciales del ángulo de polarización (EVPA) o con la superposición de múltiples componentes polarizadas. Estas variaciones pueden interpretarse como el resultado de una estructura del campo magnético más compleja o de una evolución dinámica de la región emisora, posiblemente asociada al paso de un choque a través de un chorro con componentes turbulentas.

La dispersión de los puntos y la ausencia de una trayectoria cerrada bien definida indican que el evento no estuvo dominado por una única configuración magnética estable. En su lugar, el comportamiento observado es consistente con un escenario en el que diferentes regiones o subestructuras contribuyeron de manera variable a la emisión polarizada. En este contexto, el Flare 4 se distingue como un evento polarimétricamente complejo, en contraste con los flares de comportamiento más simple observados en ON 231.

4.6. Métodos de análisis de curvas de luz polarimétrica

El análisis de curvas de luz polarimétrica constituye una herramienta fundamental para investigar la estructura y evolución del chorro relativista en blazares. A través de técnicas estadísticas, es posible identificar patrones de variabilidad en la polarización y explorar su relación con cambios en la emisión en otras bandas del espectro electromagnético, particularmente en rayos gamma y óptico.

4.6.1. Función de Correlación Cruzada Discreta Transformada en Z (ZDCF)

Para estimar retardos temporales entre las curvas de luz obtenidas en distintos observatorios se empleó la Función de Correlación Discreta Transformada - Z (Z-transformed Discrete Correlation Function, ZDCF), un método desarrollado por [79] que corrige las limitaciones del Correlación Cruzada Discreta (DCF) tradicional al tratar datos con muestreo irregular. La ZDCF implementa dos mejoras principales:

1. Uso de *binning equipoblacional*, en el que cada bin contiene el mismo número de pares de datos (al menos 11), lo que reduce sesgos en la estimación de la correlación.

2. Aplicación de la transformación Z de Fisher para aproximar la distribución de la correlación a una gaussiana, permitiendo así obtener incertidumbres más confiables.

El método consiste en formar todos los pares posibles entre dos curvas de luz a_i y b_j, calculando los retardos temporales:

$$\Delta t_{ij} = t_j - t_i. \tag{4.11}$$

Estos pares se ordenan por Δt_{ij} y se agrupan en bins con igual número de pares. En cada bin se calcula el coeficiente de correlación:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{(n-1)\sigma_a \sigma_b}, \tag{4.12}$$

donde $\bar{a}$ y $\bar{b}$ son los promedios y σ_a, σ_b las desviaciones estándar. Para corregir la no-normalidad de r, se aplica la transformación Z de Fisher:

$$z = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right), \qquad \rho = \tanh z, \tag{4.13}$$

y posteriormente se estiman medias y varianzas de z para transformar las incertidumbres de nuevo a r.

Implementación en Python

Para este trabajo se implementó el cálculo de la ZDCF en Python utilizando las curvas de luz de flujo óptico y datos multi-longitud de onda provenientes de distintos observatorios (SPM, REM, SAO-RAS, Steward, Swift y Fermi). Los pasos principales del procedimiento fueron:

- Conversión de las fechas a una escala temporal relativa en días, tomando como referencia la primera observación disponible en cada conjunto.

- Normalización de los flujos mediante `z-score` con el fin de homogenizar las escalas entre distintos observatorios.

- Generación de todos los pares posibles entre las dos series temporales y cálculo de los retardos temporales correspondientes.

- Aplicación de binning equipoblacional, asegurando un número mínimo de pares por bin (al menos 11) para mantener estabilidad estadística.

- Uso de submuestreo aleatorio de pares y la imposición de independencia entre observaciones dentro de cada bin, con el objetivo de reducir sesgos derivados del muestreo irregular y de la reutilización de datos.

- Estimación del coeficiente de correlación y de sus incertidumbres a partir de la dispersión intra-bin y la transformación Z de Fisher.

Este procedimiento permitió obtener las funciones ZDCF mostradas en la sección de resultados, las cuales describen la correlación temporal entre distintas bandas y permiten explorar la presencia de retardos asociados a los episodios de variabilidad del blazar ON 231.

Identificación de alias

Con el fin de evitar la interpretación de correlaciones artificiales al patrón de muestreo irregular, se evaluó la distribución temporal de las observaciones y la cobertura efectiva de cada conjunto de datos. En particular, se prestó atención a estructuras de correlación localizadas en retardos grandes o en regiones con baja densidad de pares, las cuales pueden originarse en huecos observacionales prolongados, duración finita de las curvas de luz o superposición de episodios de actividad independientes.

En consecuencia, los picos de correlación localizados lejos de $\tau \approx 0$ o asociados a bins con gran dispersión fueron considerados con cuidado y no interpretados como evidencia directa de un retardo físico del sistema.

4.7. Análisis de las correlaciones ZDCF entre observatorios

En esta sección se presentan los resultados del análisis de correlación cruzada entre las curvas de luz obtenidas por distintos observatorios, tomando como referencia la curva óptica del OAN-SPM. Para este propósito se empleó la ZDCF, cuya formulación y procedimiento de cálculo fueron descritos en la sección anterior.

El uso de la ZDCF permite evaluar la coherencia temporal entre distintas curvas de luz aun cuando presentan muestreo irregular, diferente cobertura temporal y distinto número de observaciones. A partir de este análisis se investigó la posible presencia de retardos temporales (*lags*) asociados a la variabilidad observada en el blazar ON 231.

En primer lugar, se analiza la correlación óptico–óptico entre los datos del OAN-SPM y Steward Observatory, la cual constituye la comparación con mayor intervalo temporal común y sirve como referencia para interpretar posteriormente las correlaciones con otros observatorios y rangos espectrales.

4.7.1. Correlación ZDCF entre SPM y Steward

La Figura 4.11 muestra la ZDCF calculada entre la curva de luz óptica obtenida en el OAN-SPM en la banda R y la curva óptica del programa Steward Observatory en la banda V. La ZDCF se presenta como el coeficiente de correlación r en función del retardo temporal τ (en días), donde $r > 0$ indica correlación positiva, $r < 0$ anticorrelación y $r = 0$ ausencia de correlación. La línea horizontal punteada marca el nivel nulo, y cada punto corresponde a un bin equipoblacional con incertidumbres estimadas mediante la transformación Z de Fisher.

Dado que ambas curvas corresponden a bandas ópticas cercanas, es razonable esperar que estén correlacionadas. Sin embargo, recuperar un máximo de correlación claro y centrado en $\tau \approx 0$ no es un resultado trivial, ayuda a confirmar que los datos de ambos observatorios son consistentes entre sí y que el método ZDCF permite recuperar adecuadamente la variabilidad común presente en las dos series temporales.

El cálculo se realizó empleando el esquema de *subsampling* propuesto por [79], junto con la imposición de independencia estadística entre los pares de datos (`indep=True`). Estas condiciones reducen el sesgo asociado al muestreo irregular y evitan la reutilización excesiva de observaciones individuales, permitiendo estimaciones más confiables del coeficiente de correlación.

El rasgo principal de esta correlación es un máximo bien definido en retardos cercanos a cero días, con valores típicos en el intervalo $r \sim 0.6$–0.9. Esto indica que las variaciones en ambas bandas ópticas ocurren prácticamente de manera simultánea, sin evidencia de un retardo temporal significativo dentro de la resolución impuesta por el muestreo y el binning. Las líneas verticales en la figura señalan el retardo asociado al máximo de correlación y el centro del intervalo donde se concentra el pico, ambos muy próximos a $\tau = 0$.

A retardos mayores, la ZDCF muestra fluctuaciones con correlaciones moderadas o cercanas a cero, lo cual es común en series temporales astronómicas con cobertura limitada y variabilidad no estacionaria. Estas estructuras no se interpretan como retardos físicos definidos, sino como efectos asociados al muestreo.

En conjunto, la correlación óptico–óptico entre SPM(R) y Steward(V) confirma que ambas curvas describen la misma variabilidad del objeto. Aunque este comportamiento era esperable desde el punto de vista físico, su recuperación cuantitativa valida la calidad de nuestros datos y sirve como referencia para interpretar las correlaciones con otros observatorios e intervalos espectrales, donde la relación no necesariamente es tan directa.

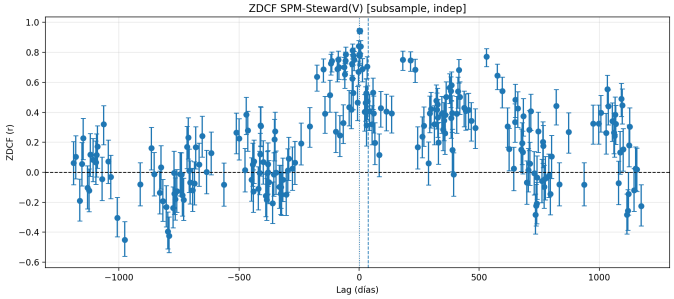


Figura 4.11: Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz ópticas obtenidas en el OAN-SPM y el observatorio Steward para el blazar ON 231.

4.7.2. Correlaciones ZDCF entre SPM y otros observatorios

Las Figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 muestran las funciones ZDCF obtenidas al comparar la curva de luz óptica del OAN-SPM con los datos correspondientes a las observaciones de *REM*, *Fermi*, *SAO-RAS* y *Swift*. Estas funciones permiten examinar la posible relación temporal entre la variabilidad óptica registrada en SPM y la emisión observada en distintos rangos espectrales o campañas independientes.

En términos generales, las correlaciones presentan comportamientos distintos según el conjunto comparado. La correlación SPM–REM muestra un pico positivo bien definido en la región cercana a $\tau \approx 0$, lo cual sugiere una co-variabilidad significativa cuando existe traslape temporal suficiente entre ambas curvas. En contraste, la correlación SPM–Fermi presenta una distribución más dispersa de coeficientes alrededor de valores cercanos a cero, sin un máximo dominante claramente definido, lo que indica que la relación temporal entre la emisión óptica y la emisión gamma no es simple o no se detecta de forma robusta con el muestreo disponible.

Para el caso SPM–SAO-RAS, la ZDCF muestra una tendencia predominantemente negativa en amplios intervalos de retardo, junto con algunas concentraciones positivas localizadas, reflejando una relación temporal compleja posiblemente afectada por diferencias en cobertura observacional y estados de actividad distintos del objeto. Finalmente, la correlación SPM–Swift exhibe valores positivos moderados en la región cercana a $\tau \approx 0$, aunque con mayor dispersión y menor definición del pico en comparación con las correlaciones óptico–óptico, lo que sugiere una posible conexión temporal entre la emisión óptica y la emisión en rayos X, pero con menor significancia estadística.

Las estructuras que aparecen a retardos grandes, de cientos de días, deben analizarse con cuidado. Estas pueden estar relacionadas con diferencias entre las campañas observacionales o

con la superposición de episodios de variabilidad no necesariamente conectados entre sí. Por esta razón, la interpretación física se concentra principalmente en la región cercana a $\tau \approx 0$, donde la correlación es más confiable.

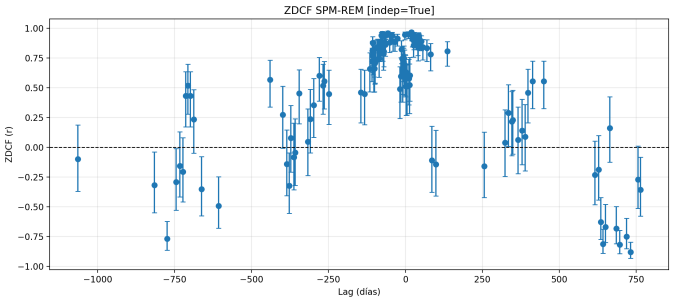


Figura 4.12: Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el telescopio REM para el blazar ON 231.

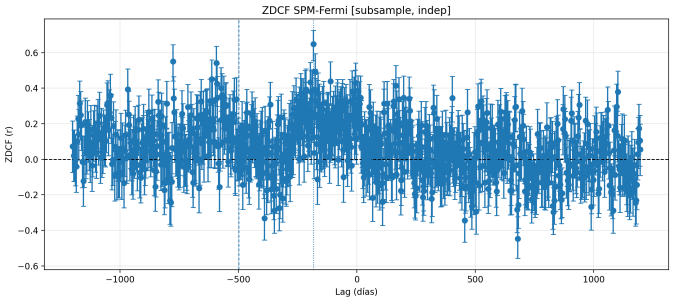


Figura 4.13: Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el telescopio Fermi LAT para el blazar ON 231.

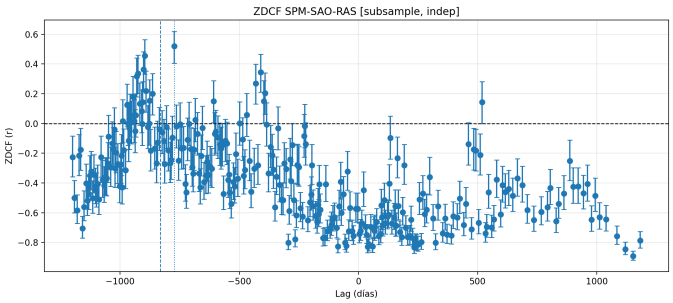


Figura 4.14: Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y el radiotelescopio RATAN-600 para el blazar ON 231.

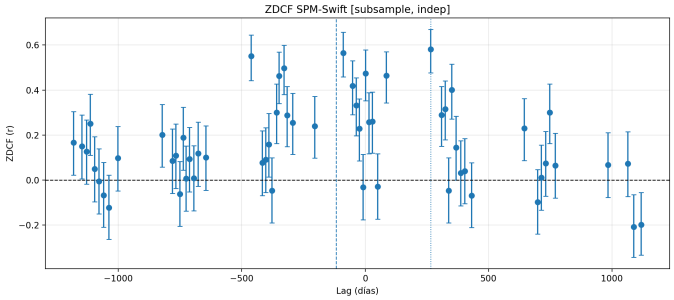


Figura 4.15: Función de correlación cruzada ZDCF entre las curvas de luz obtenidas en el OAN-SPM y Swift-XRT para el blazar ON 231.

Conclusiones derivadas del análisis de correlaciones

A partir del análisis de las funciones ZDCF puede concluirse que la correlación óptico–óptico entre SPM(R) y Steward(V) muestra un máximo bien definido en retardos cercanos a $\tau \approx 0$. Este comportamiento confirma que ambas curvas describen la misma variabilidad del objeto y valida tanto la consistencia temporal de los datos como la correcta implementación del método de correlación.

La correlación entre SPM y REM también presenta un pico positivo cercano a cero, reforzando la coherencia interna de la variabilidad óptica registrada por distintos instrumentos. En el caso de SPM–Swift, se observan indicios de correlación positiva moderada en la región central, lo que sugiere una posible conexión entre la emisión óptica y la emisión en rayos X, aunque con mayor dispersión y menor definición estadística.

Por el contrario, la correlación con Fermi no muestra un máximo dominante claramente definido, lo que indica que, con el muestreo disponible, no puede establecerse una relación temporal simple entre la emisión óptica y la emisión gamma. De manera similar, la función SPM–SAO-RAS exhibe un comportamiento más complejo, con intervalos de correlación negativa y concentraciones positivas localizadas, probablemente influido por diferencias en cobertura observacional y estados de actividad distintos.

En conjunto, estos resultados indican que la variabilidad óptica de ON 231 es coherente entre observatorios ópticos, mientras que su relación con emisiones de mayor energía es menos directa y depende en mayor medida del muestreo y la cobertura temporal. Este comportamiento es consistente con un escenario en el cual la emisión óptica está dominada por procesos sincrotrónicos en una región común del jet relativista, mientras que la emisión de alta energía puede involucrar mecanismos adicionales o escalas temporales distintas.

Conclusión

En esta tesis se presentó un análisis polarimétrico de largo plazo del blazar ON 231 basado principalmente en observaciones ópticas en banda R obtenidas en el OAN-SPM entre 2008 y 2024, complementadas con información multibanda desde radio hasta rayos γ. La cobertura temporal permitió caracterizar la variabilidad del flujo y de la polarización en distintos estados de actividad y discutir sus implicaciones para la física del jet relativista.

La curva de luz óptica muestra una variabilidad marcada y no estacionaria, con episodios de actividad separados por fases de menor emisión. La división del conjunto en 17 ciclos facilitó la comparación entre estados, destacando periodos claramente eruptivos (en particular durante 2016–2018) y otros de variabilidad más moderada. Este comportamiento es consistente con un jet dinámico cuya eficiencia de emisión cambia con el tiempo.

Desde el punto de vista polarimétrico, ON 231 presenta una variabilidad significativa tanto en el grado como en el ángulo de polarización a lo largo de todo el periodo analizado. El porcentaje de polarización muestra valores típicos entre aproximadamente 6 % y 18 %, con episodios extremos que alcanzan máximos cercanos al 28 %. De manera global, se identificó una correlación débilmente negativa entre el flujo óptico y el grado de polarización ($r = -0.20$), lo que sugiere que los estados de mayor brillo tienden a presentar niveles ligeramente menores de polarización. Este comportamiento podría ser consistente con procesos de depolarización asociados a la superposición de múltiples componentes emisoras o al incremento relativo de contribuciones menos polarizadas.

En contraste, no se encontró una correlación lineal significativa entre el flujo y el ángulo de polarización ($r = 0.09$), lo que indica que la orientación del EVPA no depende directamente del nivel de brillo de la fuente. En cambio, su evolución parece estar controlada principalmente por la geometría de la región emisora y por cambios locales en la estructura del campo magnético dentro del jet relativista.

El estudio de episodios eruptivos mediante parámetros de Stokes y su evolución en el plano Q–U evidenció que flares fotométricamente intensos pueden mostrar respuestas polarimétricas muy distintas: desde trayectorias compactas y estables (compatibles con una región dominante y un campo más ordenado) hasta trayectorias extensas e irregulares (indicativas de variabilidad geométrica, cancelación vectorial o contribuciones múltiples). La comparación del plano Q–U para el evento de 2008 con el reportado por [91] mostró una concordancia notable en escala y evolución, lo que respalda la consistencia del análisis y refuerza que las rotaciones observadas corresponden a fenómenos físicos reales en el jet.

La construcción de SEDs para estados de máxima y mínima emisión confirmó la estructura de doble joroba característica de los blazares y es consistente con la clasificación de ON 231 como un objeto IBL. Entre ambos estados se observa una reducción global de la potencia radiada y un posible desplazamiento del componente sincrotrón hacia frecuencias menores durante el mínimo, lo que sugiere cambios en la población de electrones relativistas y/o en el campo magnético efectivo. De forma coherente con los resultados polarimétricos, el estado de máximo flujo presenta una polarización muy baja ($P \simeq 0.7\,\%$), mientras que en el mínimo la polarización es alta ($P \simeq 17\,\%$) con un ángulo similar, lo que apoya escenarios de despolarización por mezcla de componentes durante fases brillantes sin requerir cambios drásticos en la orientación global del campo.

Finalmente, el análisis de correlaciones temporales mediante la ZDCF mostró una co-

variabilidad clara en el caso óptico–óptico entre SPM y Steward, con un pico positivo bien definido centrado en $\tau \approx 0$. Aunque este comportamiento es coherente con la cercanía espectral de ambas bandas, su recuperación cuantitativa confirma la consistencia temporal y fotométrica de los datos empleados.

En el análisis multifrecuencia, la correlación con *Swift* sugiere una posible conexión entre la emisión óptica y la emisión en rayos X cerca de retardo nulo, aunque con mayor dispersión y menor definición del máximo. Por el contrario, las correlaciones con *Fermi* y *SAO-RAS* no presentan una señal central dominante con el muestreo disponible, lo que impide establecer una relación temporal robusta. En el caso de *REM*, la interpretación está fuertemente condicionada por el solapamiento temporal entre las curvas.

En conjunto, estos resultados indican que, mientras la variabilidad óptica muestra una coherencia clara entre observatorios ópticos, las correlaciones con emisiones de mayor energía dependen de manera crítica de la cobertura temporal y de la simultaneidad de las observaciones.

En resumen, ON 231 muestra una variabilidad óptica y polarimétrica compleja que refleja cambios en la eficiencia de emisión y en la estructura del campo magnético del jet, junto con la contribución variable de múltiples regiones emisoras. La combinación de curvas de luz, polarimetría, plano de Stokes, SEDs y correlaciones temporales proporciona una caracterización completa del comportamiento de la fuente y establece una base observacional sólida para estudios futuros con campañas más densas y coordinadas.

Capítulo 5

Perspectivas a futuro

Como trabajo futuro, se propone ampliar el análisis mediante el acceso a bases de datos observacionales no públicas de distintos observatorios y programas de monitoreo, lo cual requeriría el establecimiento de colaboraciones científicas con los equipos responsables de dichas observaciones. En esta tesis se utilizaron exclusivamente datos disponibles en archivos públicos, lo cual limita la cobertura temporal, la densidad de muestreo y el número de observaciones simultáneas entre distintas bandas.

La incorporación de datos adicionales permitiría extender las curvas de luz, mejorar la coincidencia temporal entre observaciones y aumentar la significancia estadística de los análisis de correlación. Esto facilitaría una caracterización más precisa de la variabilidad del blazar ON 231 y un estudio más detallado de los posibles retardos entre diferentes rangos espectrales, contribuyendo a una mejor comprensión de los procesos físicos que ocurren en el jet relativista.

Apéndice A

Curvas de luz multi-longitud de onda y parámetros de polarización del blazar ON 231 obtenidas con distintos observatorios

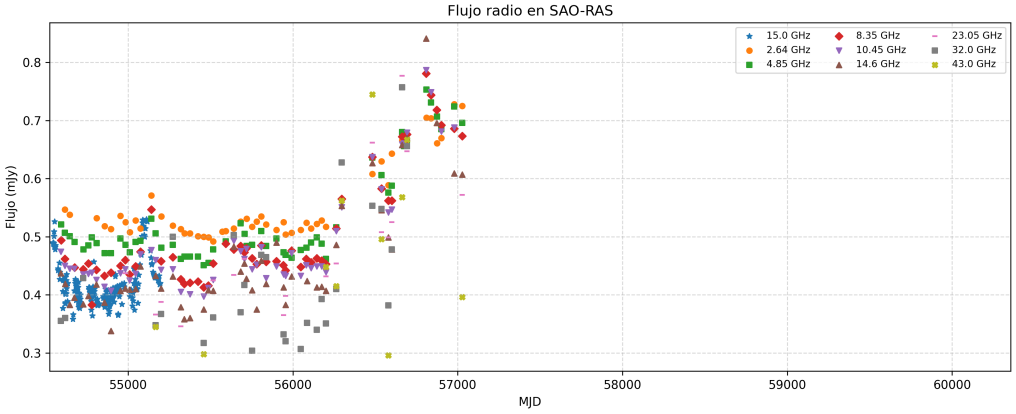


Figura A.1: Curva de luz en radio del blazar ON 231 obtenida a partir de observaciones del observatorio SAO-RAS en múltiples frecuencias (2.64–43 GHz). Los diferentes símbolos representan cada frecuencia observada. El flujo se presenta en mJy en función MJD. Se observa la variabilidad de la emisión sincrotrónica en radio.

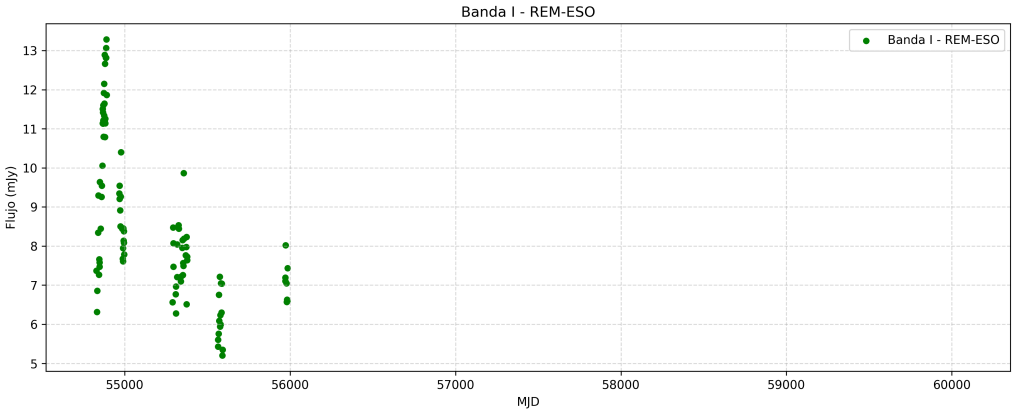


Figura A.2: Curva de luz en la banda I del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano.

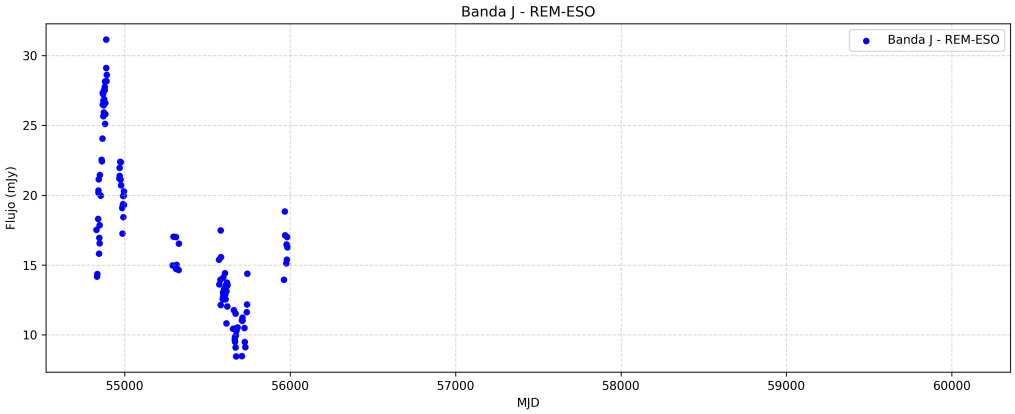


Figura A.3: Curva de luz en la banda J del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano.

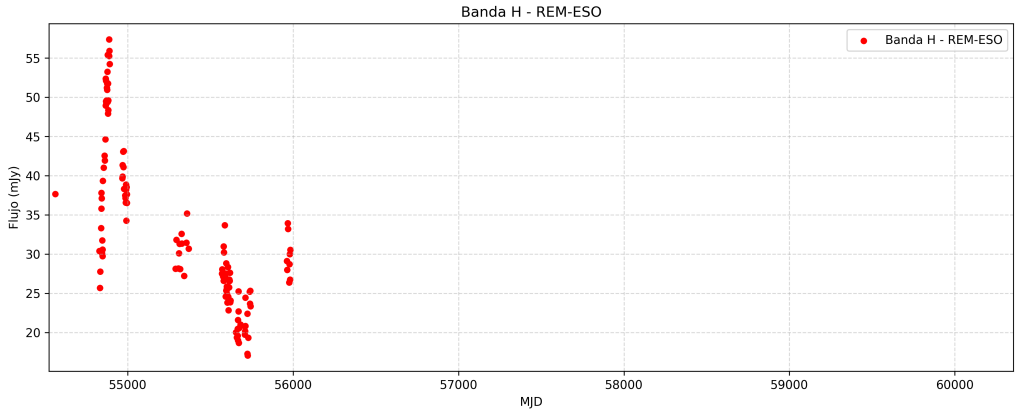


Figura A.4: Curva de luz en la banda H del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano.

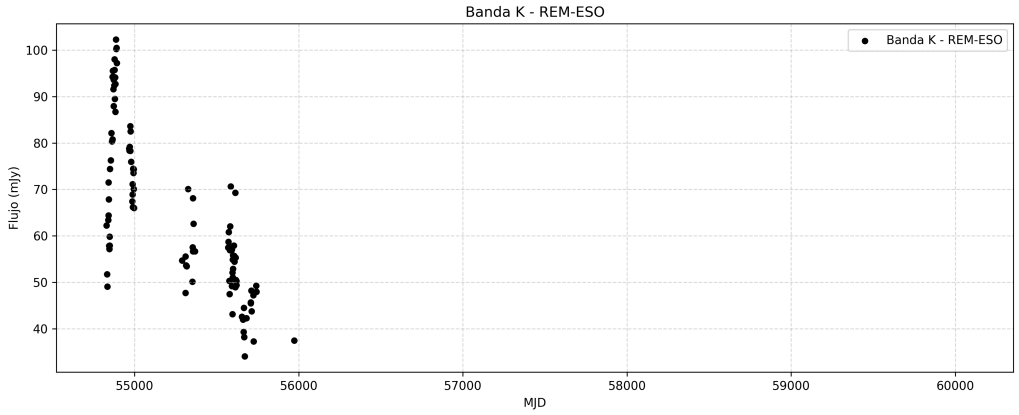


Figura A.5: Curva de luz en la banda K del blazar ON 231 obtenida con el telescopio REM-ESO. El flujo fotométrico se muestra en función del MJD, evidenciando la variabilidad en el infrarrojo cercano.

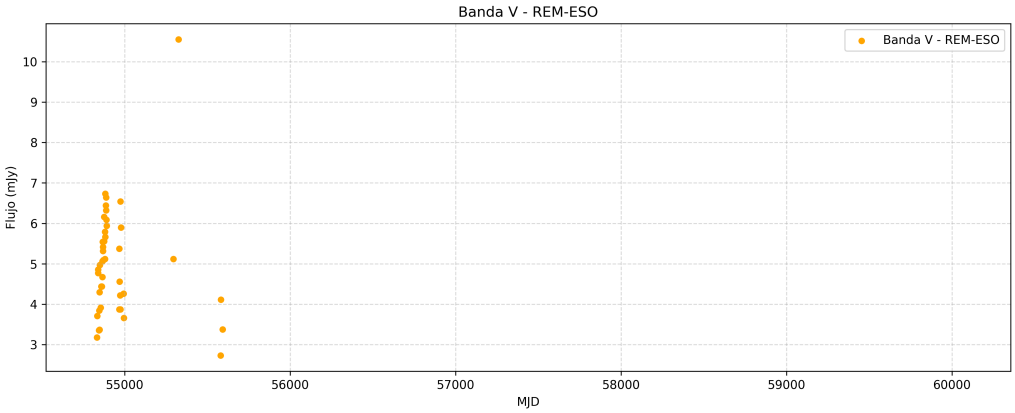


Figura A.6: Curva de luz en la banda V del blazar ON 231. Se muestra la variabilidad en el rango óptico.

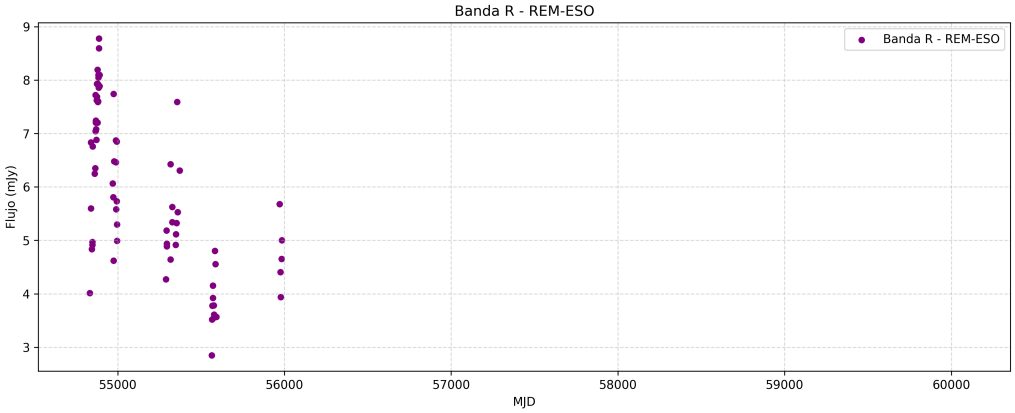


Figura A.7: Curva de luz en la banda R del blazar ON 231 obtenida con REM-ESO. Se muestra la variabilidad en el rango óptico.

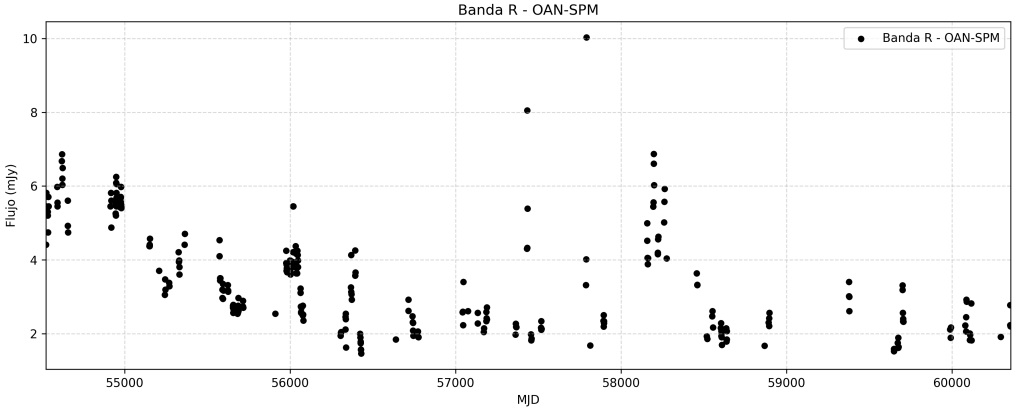


Figura A.8: Curva de luz en la banda R del blazar ON 231 obtenida en el OAN-SPM.

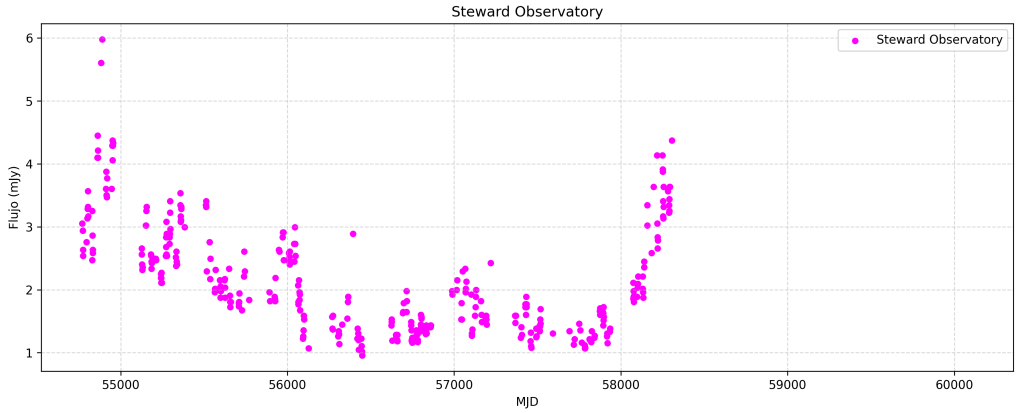


Figura A.9: Curva de luz óptica del blazar ON 231 obtenida por el programa del Steward Observatory. Los datos corresponden a observaciones fotométricas en banda V.

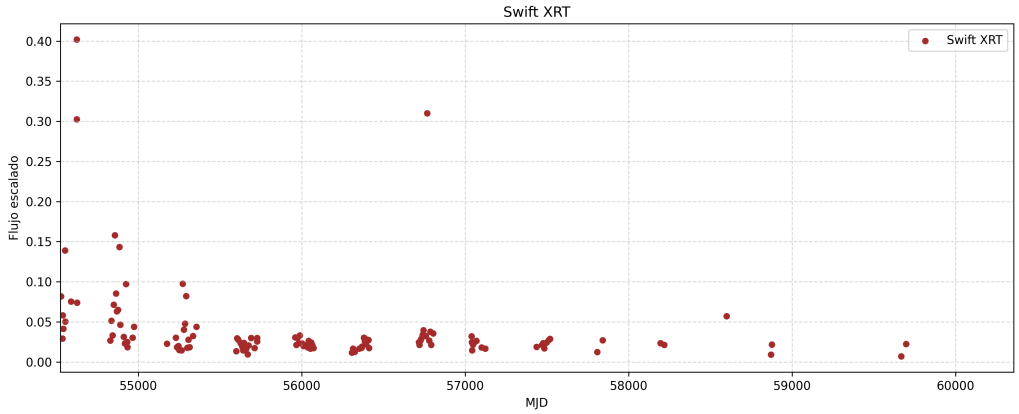


Figura A.10: Curva de luz en rayos X del blazar ON 231 obtenida con el instrumento XRT a bordo del satélite Swift. La tasa de conteo fue escalada para facilitar la comparación con otras bandas.

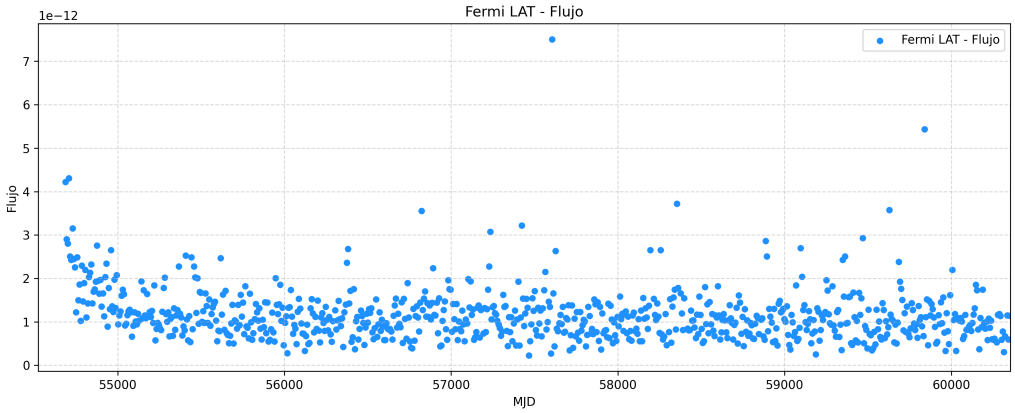


Figura A.11: Curva de luz en rayos gamma del blazar ON 231 obtenida con el telescopio Fermi LAT. Se muestra el flujo integrado en función del tiempo (MJD), correspondiente a la componente de alta energía del espectro.

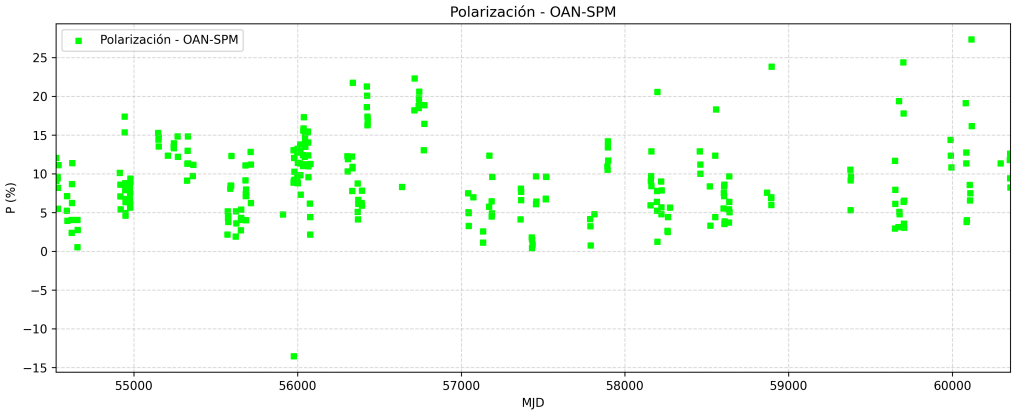


Figura A.12: Variación temporal del grado de polarización lineal ($P\,\%$) del blazar ON 231 obtenida en el OAN-SPM. Este parámetro proporciona información sobre el grado de orden del campo magnético en la región emisora.

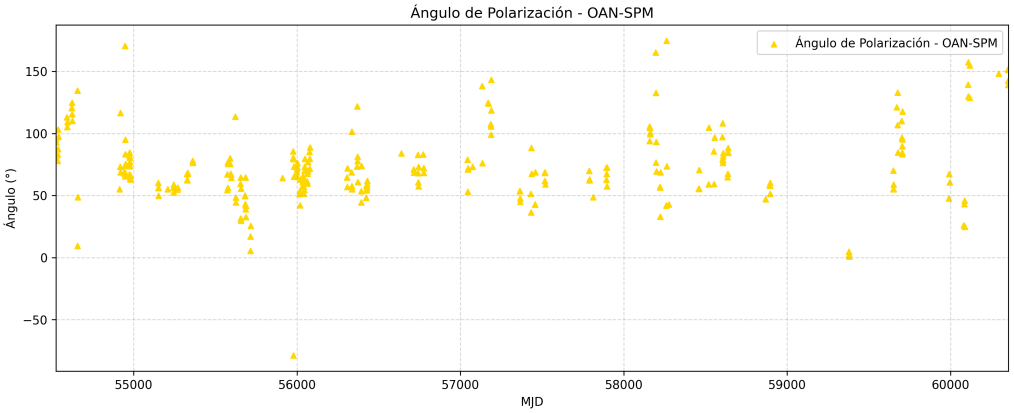


Figura A.13: Evolución temporal del ángulo de polarización (EVPA, θ) del blazar ON 231. Las variaciones en este parámetro reflejan cambios en la geometría del campo magnético o en la estructura del jet.

Bibliografía

[1] Peterson, B. M. (1997). *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press.

[2] Fath, E. A. (1909). *The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters*. Lowell Observatory Bulletin, 5, 71. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1909LicOB...5...71F/abstract`.

[3] Slipher, V. M. (1917). [Título del artículo]. *Proceedings of the Physical Society*, 56, 403. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1917PAPhS..56..403S/abstract`.

[4] Seyfert, C. K. (1943). *Nuclear Spectra of Galaxies*. Astrophysical Journal, 97, 28. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1943ApJ....97...28S/abstract`.

[5] Schmidt, M. (1963). *3C 273: A Star-Like Object with a Large Redshift*. Nature, 197, 1040. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963Natur.197.1040S/abstract`.

[6] Baldwin, J. A. (1981). *Physics of Emission-Line Regions in Active Galaxies*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 78, 732–736.

[7] Khachikian, E. Y., & Weedman, D. W. (1974). *An observational investigation of Seyfert galaxies*. Astrophysical Journal, 192, 581–589.

[8] Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., Shaffer, D. B., & Green, R. (1989). *VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey*. Astronomical Journal, 98, 1195–1207.

[9] Osterbrock, D. E. (1981). *Seyfert galaxies with weak broad H alpha emission lines*. The Astrophysical Journal, 249, 462–470.

[10] Fanaroff, B. L., & Riley, J. M. (1974). *The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 167(1), 31P–36P.

[11] Filippenko, A. V., & Terlevich, R. (1992). *Seyfert 2 galaxies and their relation to LINERs*. Astrophysical Journal, 397, L79–L82.

[12] Urry, C. M., & Padovani, P. (1995). *Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107(715), 803–845..

[13] Stickel, M., Padovani, P., Urry, C. M., Fried, J. W., & Kühr, H. (1991). *The Complete Sample of 1 Jy BL Lacertae Objects. I. Summary Properties*. The Astrophysical Journal, 374, 431–439. https://doi.org/10.1086/170128

[14] Ghisellini, G., Celotti, A., Fossati, G., Maraschi, L., & Comastri, A. (1998). *A theoretical unifying scheme for gamma-ray bright blazars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 301, 451–468.

[15] Moore, R. L., & Stockman, H. S. (1982). *Optical polarization characteristics of BL Lacertae objects*. Astrophysical Journal, 257, 23–35.

[16] Ulrich, M.-H., Maraschi, L., & Urry, C. M. (1997). *Variability of Active Galactic Nuclei*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 35, 445.

[17] Kormendy, J., & Richstone, D. (1995). *Inward Bound—The Search for Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 33, 581–624. https://doi.org/10.1146/annurev.aa.33.090195.003053

[18] Shields, G. A. (1978). *Thermal continuum from accretion disks in quasars*. Nature, 272, 706–708. https://doi.org/10.1038/272706a0

[19] Nenkova, M., Sirocky, M. M., Nikutta, R., Ivezić, Ž., & Elitzur, M. (2008). *AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness*. The Astrophysical Journal, 685(1), 160–180.

[20] Blandford, R. D., & Königl, A. (1979). *Relativistic jets as compact radio sources*. The Astrophysical Journal, 232, 34–48.

[21] Dermer, C. D., & Schlickeiser, R. (1995). *Modeling the Nonthermal Emission of Blazars*. Astrophysical Journal, 446, L63.

[22] Tavecchio, F., Maraschi, L., & Ghisellini, G. (1998). *Constraints on the Physical Parameters of TeV Blazars*. The Astrophysical Journal, 509(2), 608–619.

[23] Uttley, P., Cackett, E. M., Fabian, A. C., Kara, E., & Wilkins, D. R. (2014). *X-ray reverberation around accreting black holes*. Astronomy and Astrophysics Review, 22, 72. https://doi.org/10.1007/s00159-014-0072-0

[24] Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., et al. (2000). *Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei*. Astrophysical Journal, 533, 631–649.

[25] Schmidt, K. B., Marshall, P. J., Rix, H.-W., Jester, S., Hennawi, J. F., & Dobler, G. (2012). *The Variability of Quasars in the Sloan Digital Sky Survey Stripe 82*. Astrophysical Journal, 744(2), 147. https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/2/147

[26] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973). *Black holes in binary systems. Observational appearance*. Astronomy and Astrophysics, 24, 337–355.

[27] Rees, M. J. (1988). *Tidal disruption of stars by black holes of* 10^6–10^8 *solar masses in nearby galaxies*. Nature, 333, 523–528. https://doi.org/10.1038/333523a0

[28] King, A. R., & Pringle, J. E. (2007). *Precession of black hole discs*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 377, L25–L28.

[29] Krolik, J. H. (1999). *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press.

[30] Lightman, A. P., & Eardley, D. M. (1974). *Black holes in binary systems: Instability of disk accretion*. Astrophysical Journal, 187, L1–L3.

[31] Balbus, S. A., & Hawley, J. F. (1991). *A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I—Linear analysis*. Astrophysical Journal, 376, 214–233.

[32] Kato, S. (2001). *Relativistic disk oscillations and QPOs*. Publications of the Astronomical Society of Japan, 53, 1–14.

[33] Arévalo, P., & Uttley, P. (2006). *Investigating X-ray time lags in accreting black holes*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 367(2), 801–814.

[34] Lira, P., Arévalo, P., Uttley, P., McHardy, I. M., & Videla, L. (2011). *Correlated X-ray/optical variability in the quasar MR 2251-178*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415(2), 1290–1300. https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18770.x

[35] Ramos Almeida, C., & Ricci, C. (2017). *Obscured AGN*. Nature Astronomy, 1, 679–689. https://doi.org/10.1038/s41550-017-0232-z

[36] Koshida, S., Minezaki, T., Yoshii, Y., Kobayashi, Y., Sakata, Y., Sugawara, S., Enya, K., Suganuma, M., Tomita, H., Aoki, T., & Peterson, B. A. (2014). *Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in 17 Seyfert Galaxies*. Astrophysical Journal, 788(2), 159. https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/2/159

[37] Denney, K. D., Peterson, B. M., Pogge, R. W., et al. (2009). *Reverberation Mapping Measurements of Black Hole Masses in Six Local Seyfert Galaxies*. Astrophysical Journal, 704, L80–L84.

[38] LaMassa, S. M., Cales, S., Moran, E. C., Myers, A. D., Richards, G. T., Eracleous, M., Heckman, T. M., Gallo, L., & Urry, C. M. (2015). *The Discovery of the First "Changing Look" Quasar: New Insights Into the Physics and Phenomenology of Active Galactic Nucleus*. The Astrophysical Journal, 800(2), 144. https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/2/144

[39] Marscher, A. P., & Gear, W. K. (1985). *Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273*. The Astrophysical Journal, 298, 114–127.

[40] Ghisellini, G., Padovani, P., Celotti, A., & Maraschi, L. (1993). *Beaming and the BL Lac / quasar connection*. Astrophysical Journal, 407, 65–82.

[41] Lister, M. L., Aller, H. D., Aller, M. F., Cohen, M. H., Homan, D. C., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Ros, E., Savolainen, T., Zensus, J. A., & Vermeulen, R. C. (2009). *MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. V. Multi-Epoch VLBA Images*. The Astronomical Journal, 137(3), 3718–3729. https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/3/3718

[42] Antonucci, R. (1993). *Unified models for active galactic nuclei and quasars*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 31, 473–521.

[43] Marscher, A. P., Jorstad, S. G., D'Arcangelo, F. D., Smith, P. S., Williams, G. G., Larionov, V. M., Oh, H., Olmstead, A. R., Aller, H. D., Aller, M. F., McHardy, I. M., Lähteenmäki, A., Tornikoski, M., Valtaoja, E., Hagen-Thorn, V. A., Kopatskaya, E. N., Gear, W. K., Tosti, G., Kurtanidze, O., Nikolashvili, M., Sigua, L., Miller, H. R., & Ryle, W. T. (2008). *The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to-γ-ray outburst*. Nature, 452, 966–969. https://doi.org/10.1038/nature06895

[44] Blinov, D., Pavlidou, V., Papadakis, I. E., et al. (2015). *RoboPol: First season rotations of the optical polarization plane in blazars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 453(2), 1669–1683.

[45] Marscher, A. P., Jorstad, S. G., Larionov, V. M., Aller, M. F., Aller, H. D., Lähteenmäki, A., Agudo, I., Smith, P. S., Gurwell, M. A., Hagen-Thorn, V. A., Konstantinova, T. S., Larionova, E. G., Larionova, L. V., Blinov, D. A., Kopatskaya, E. N., Mirgaliev, E. A., Nicholls, B., Roca-Sogorb, M., Schmidt, G. D., & Tornikoski, M. (2010). *Probing the Inner Jet of the Quasar PKS 1510-089 with Multi-Waveband Monitoring During Strong Gamma-Ray Activity*. Astrophysical Journal Letters, 710(2), L126–L131. https://doi.org/10.1088/2041-8205/710/2/L126

[46] Landessternwarte Heidelberg. (s.f.). *Target & polarization standard list*. Recuperado de `https://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/spm/target/target.html`

[47] Observatorio Astronómico Nacional, UNAM. (2025). *Telescopio de 0.84 m de San Pedro Mártir*. Recuperado de https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/telescopios/tel84. Consultado el 26 de febrero de 2025.

[48] J. Heidt, et al. (2025). *POLIMA User Manual*. Landessternwarte Heidelberg, Universität Heidelberg. Recuperado de https://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/spm/obshints/POLIMA-usuario.pdf

[49] Swift-XRT Monitoring of Fermi-LAT Sources of Interest. Retrieved from https://www.swift.psu.edu/monitoring/source.php?source=WCom.

[50] VizieR Catalog: REM telescope data. Retrieved from https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR-6?-out.form=%2bH&-source=J/A%2bA/562/A79&-corr=FK=Name&-out.max=9999&Name===WComae.

[51] Fermi LAT-monitored Blazars, University of Arizona. Retrieved from https://james.as.arizona.edu/~psmith/Fermi/Objects/targets.html.

[52] Special Astrophysical Observatory (SAO) Radio Catalogs. Retrieved from https://www.sao.ru/cats/.

[53] Massaro, E., Mantovani, F., Fanti, R., Nesci, R., Tosti, G., & Venturi, T. (2001). *Two-sided radio emission in ON 231 (W Comae)*. Astronomy Astrophysics, 374(2), 435-441. Retrieved from https://arxiv.org/abs/astro-ph/0105521.

[54] Romano, G. (1972). *Optical variations of the radio sources ON 231 = W Comae and B2 1215+30*. Memorie della Società Astronomica Italiana, 43, 309. Retrieved from https://adsabs.harvard.edu/full/1972MmSAI..43..309R.

[55] Tosti, G., Massaro, E., Nesci, R., Ciprini, S., Nucciarelli, G., Maesano, M., Montagni, F., Raiteri, C. M., Villata, M., Lanteri, L., & Ostorero, L. (2002). *The optical behaviour of ON 231 (W Comae) during and after the great outburst of spring 1998*. Astronomy Astrophysics, 395, 11-15. Retrieved from https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2002/43/aa2343/aa2343.html.

[56] Tagliaferri, G., Ghisellini, G., Giommi, P., et al. (2000). *The 1998 outburst of the BL Lac object ON 231 (W Comae): multiwavelength observations*. Astronomy Astrophysics, 354, 431-438. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000A&A...354..431T/abstract.

[57] Cheng, X., Zhang, X., & Liu, Y. (2013). *Optical observations of BL Lac object ON 231 (W Comae) during 2010 March–April*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 429(4), 2773-2781. Retrieved from https://academic.oup.com/mnras/article/429/4/2773/1007765.

[58] Acciari, V. A., Aliu, E., Beilicke, M., et al. (2008). *VERITAS discovery of >200 GeV gamma-ray emission from the intermediate-frequency-peaked BL Lac object W Comae*. The Astrophysical Journal Letters, 684(1), L73. Retrieved from https://arxiv.org/abs/0808.0889.

[59] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1976). *The Structure of Accretion Disks in Close Binaries*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 175, 613–632.

[60] Vishniac, E. T., & Diamond, P. H. (1992). *Turbulence in accretion disks: Low Prandtl number effects*. Astrophysical Journal, 398, 561–571.

[61] McHardy, I. M., Koerding, E., Knigge, C., Uttley, P., & Fender, R. P. (2006). *Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes*. Nature, 444, 730–732.

[62] Wolf, M. (1916). *Über eine neue Klasse veränderlicher Sterne*. Astronomische Nachrichten, 203, 109–112.

[63] Browne, I. W. A. (1971). *The Identification of 5C 4.81 with ON 231*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 152(4), 325–329.

[64] Biraud, F. (1971). *Radio survey of quasars and other radio stars at 408 MHz*. Astronomy and Astrophysics, 14, 65.

[65] Nesci, R., Massaro, E., Montagni, F. (2002). *Multifrequency Optical Monitoring of the BL Lac Object ON 231*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 114, 62–66.

[66] Bade, N., Fink, H. H., Engels, D., Voges, W., Hagen, H. J., Wisotzki, L., Reimers, D. (1994). *New bright X-ray AGN from the ROSAT All-Sky Survey*. Astronomy and Astrophysics, 285, 885–896.

[67] Massaro, E., Nesci, R., Maesano, M., Montagni, F., D'Alessio, F. (1999). *The April 1998 giant outburst of ON 231*. Astronomy and Astrophysics, 342, L49–L52.

[68] Tommasi, L., Palazzi, E., Pian, E., et al. (2001). *The Optical Polarization of BL Lacertae Objects*. The Astrophysical Journal Supplement Series, 132, 73–84.

[69] Observatorio Steward. (2024). *Información del telescopio de 1.55 m del Observatorio Steward, Arizona*. Recuperado de `https://www.as.arizona.edu/steward-observatory`

[70] Swift-XRT Instrument Overview. (2024). *Swift X-ray Telescope (XRT) - Instrument Description*. Recuperado de `https://swift.gsfc.nasa.gov/about_swift/xrt_desc.html`

[71] ESO - Rapid Eye Mount telescope. (2024). *Información sobre el telescopio REM del Observatorio de La Silla*. Recuperado de `https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/rem/`

[72] Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO-RAS). (2024). *BTA-6 Telescope Specifications*. Retrieved from `https://www.sao.ru/`

[73] Gaskell, C. M., & Sparke, L. S. (1986). Line Variations in Quasars and Seyfert Galaxies: What are the Reverberation Timescales Telling Us? *The Astrophysical Journal*, 305, 175. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1986ApJ...305..175G/abstract`.

[74] White, R. J., & Peterson, B. M. (1994). Comments on Cross-Correlation Methodology in Variability Studies of Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106, 879. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994PASP..106..879W/abstract`.

[75] Fuller, W. A. (1976). *Introduction to Statistical Time Series*. New York: Wiley. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1976sts..book.....F`.

[76] Patiño-Álvarez, V. M. (2012). *Estudios de Variabilidad de Núcleos Activos de Galaxias: Correlaciones Temporales y Polarización* (Doctoral dissertation). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

[77] Edelson, R. A., & Krolik, J. H. (1988). *The Discrete Correlation Function: A New Method for Analyzing Unevenly Sampled Variability Data*. Astrophysical Journal, 333, 646–659. `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988ApJ...333..646E/abstract`

[78] White, R. J., & Peterson, B. M. (1994). *Comments on cross-correlation methodology in variability studies of active galactic nuclei*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 106(700), 879–889. `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994PASP..106..879W/abstract`

[79] Alexander, T. (1997). *Improved AGN light curve analysis with the z-transformed discrete correlation function*. In Maoz, D., Sternberg, A., & Leibowitz, E. M. (Eds.), Astronomical Time Series, 218, 163–166. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997astro.ph.11040A/abstract

[80] Nilsson, K., Pasanen, M., Takalo, L. O., Lindfors, E., Berdyugin, A., Ciprini, S., & Pforr, J. (2007). *Host galaxy subtraction of TeV candidate BL Lacertae objects*. Astronomy & Astrophysics, 475(1), 199–207. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007A%26A...475..199N/abstract

[81] Sasada, M., Uemura, M., Fukazawa, Y., Kawabata, K. S., Ohsugi, T., & Isobe, N. (2011). *Multi-band optical monitoring of 30 blazars with the KANATA telescope*. Publications of the Astronomical Society of Japan, 63(3), 489–. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011PASJ...63..489S/abstract

[82] Atwood, W. B., et al. (2009). The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-ray Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2), 1071. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...697.1071A

[83] Lyutikov, M., Pariev, V. I., & Gabuzda, D. C. (2005). Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 360(3), 869–891. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005MNRAS.360..869L/abstract

[84] Patiño-Álvarez, V. M. (2018). *Variabilidad polarimétrica y fotométrica de núcleos activos de galaxias BL Lacertae*. Tesis Doctoral, INAOE. https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1536

[85] Kiehlmann, S., Savolainen, T., Jorstad, S. G., et al. (2016). Polarization angle swings in blazars: The case of 3C 279. *Astronomy & Astrophysics*, 590, A10. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016A&A...590A..10K/abstract

[86] Ghisellini, G., Tavecchio, F., & Chiaberge, M. (2005). Structured jets in TeV BL Lac objects and radiogalaxies: Implications for the observed properties. *Astronomy & Astrophysics*, 432(2), 401–410. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005A&A...432..401G/abstract

[87] Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative Transfer*. Dover Publications. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1960ratr.book.....C/abstract

[88] Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. (1979). *Radiative Processes in Astrophysics*. Wiley-VCH. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979rpa..book.....R/abstract

[89] Stokes, G. G. (1852). *On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from Different Sources*. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 9, 399–416. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1852TCaPS...9..399S/abstract

[90] Angelakis, E., Blinov, D., Marchili, N., Pavlidou, V., Myserlis, I., Karamanavis, V., ... & Zensus, J. A. (2016). RoboPol: First season rotation of optical polarisation plane in blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463(3), 3365–3380. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.463.3365A/abstract.

[91] Sorcia, M., Benítez, E., Hiriart, D., López, J. M., Cabrera, J. I., & Mújica, R. (2014). *Rotation of the optical polarization angle associated with the 2008 γ-ray flare of blazar W Comae*. The Astrophysical Journal, 794(1), 54. https://doi.org/10.1088/0004-637X/794/1/54

[92] Netzer, H. (2013). *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press.

[93] Richards, G. T., Fan, X., Newberg, H. J., Strauss, M. A., Vanden Berk, D. E., Schneider, D. P., ... & York, D. G. (2002). Spectroscopic target selection in the Sloan Digital Sky Survey: The quasar sample. *The Astronomical Journal*, 123(5), 2945–2975. https://doi.org/10.1086/340187

[94] Nieppola, E., Tornikoski, M., & Valtaoja, E. (2006). Spectral energy distributions of a large sample of BL Lacertae objects. *Astronomy & Astrophysics*, 445(2), 441–450. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053324

[95] Bade, N., Beckmann, V., Douglas, N. G., Barthel, P., Engels, D., Cordis, L., ... & Reimers, D. (1998). Spectroscopy of X-ray selected BL Lacertae objects: new redshifts and the question of evolution. *Astronomy and Astrophysics*, 334, 459–468.

[96] Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., ... & Zonca, A. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910

[97] Collett, J. L. (2005). *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*. SPIE Press.

[98] Abdo, A. A., Ackermann, M., Agudo, I., Ajello, M., Aller, H. D., Aller, M. F., Angelakis, E., et al. (2010). *The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars*. The Astrophysical Journal, 716(1), 30–70. Retrieved from `https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010ApJ...716...30A`

[99] Marscher, A. P., & Gear, W. K. (1985). *Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273*. Astrophysical Journal, 298, 114–127.

[100] Hughes, P. A., Aller, H. D., & Aller, M. F. (1985). *Polarized radio outbursts in BL Lacertae. II — The flux and polarization of a piston-driven shock*. Astrophysical Journal, 298, 301–315.

[101] Marscher, A. P., et al. (2010). *Probing the inner jet of the quasar PKS 1510–089 with multi-waveband monitoring during strong gamma-ray activity*. Astrophysical Journal Letters, 710(2), L126–L131.

[102] Lyutikov, M., Pariev, V. I., & Gabuzda, D. C. (2005). *Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 360(3), 869–891.

[103] Collett, E. (2005). *Polarized Light: Fundamentals and Applications*. CRC Press, Optical Sciences Series.

[104] Hiriart, D., Valdez, J., Quirós, F., García, B., & Luna, E. (2000). *POLIMA (Polarímetro Óptico de Imagen). Reporte Técnico*. Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

[105] Hiriart, D., Valdez, J., Quirós, F., García, B., & Luna, E. (2000). *POLIMA (Polarímetro Óptico de Imagen). Manual de Usuario*. Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

[106] Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. (2024). *Telescopio de 0.84 m*. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: `https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/telescopios/tel84`. Sitio consultado en julio de 2025.

[107] Schmidt, G. D., Elston, R., & Lupie, O. L. (1992). *The Hubble Space Telescope Northern-Hemisphere Grid of Stellar Polarimetric Standards*. Astronomical Journal, 104, 1563–1567. doi:10.1086/116339

[108] *Telescopio 0.84 m OAN-SPM*. `https://labunam.unam.mx/micrositio/infraestructura.php?il=218`

[109] Hiriart, D., Valdez, J., Quirós, F., García, B., & Luna, E. *POLIMA: Polarímetro Óptico de Imagen (Manual Técnico)*. Instituto de Astronomía, UNAM. Disponible en: `http://www.astrossp.unam.mx/instrumentos/imagen/polima1/polimatecnico.pdf`

[110] Hiriart, D., Valdez, J., Quirós, F., García, B., & Luna, E. *POLIMA: Polarímetro Óptico de Imagen (Manual de Usuario)*. Instituto de Astronomía, UNAM. Disponible en: `https://www.astrossp.unam.mx/instrumentos/imagen/polima1/polimausuario.pdf`