



Resumen

Presentamos los resultados de un estudio de variabilidad de flujo y espectral en las bandas del óptico de una muestra de blázares con emisión en TeV. Tenemos datos de cinco blázares tipo BL Lac y cuatro tipo FSRQ. Reportamos variabilidad de flujo en cinco de las fuentes, mientras que la variabilidad espectral se observó en la muestra completa. Además, tres BL Lacs y dos FSRQ presentan tendencias BWB y RWB, respectivamente. Para este estudio fue necesario desarrollar códigos en Python, los cuales están disponibles en un repositorio público (acceso desde el QR).

1. Blázares TeV

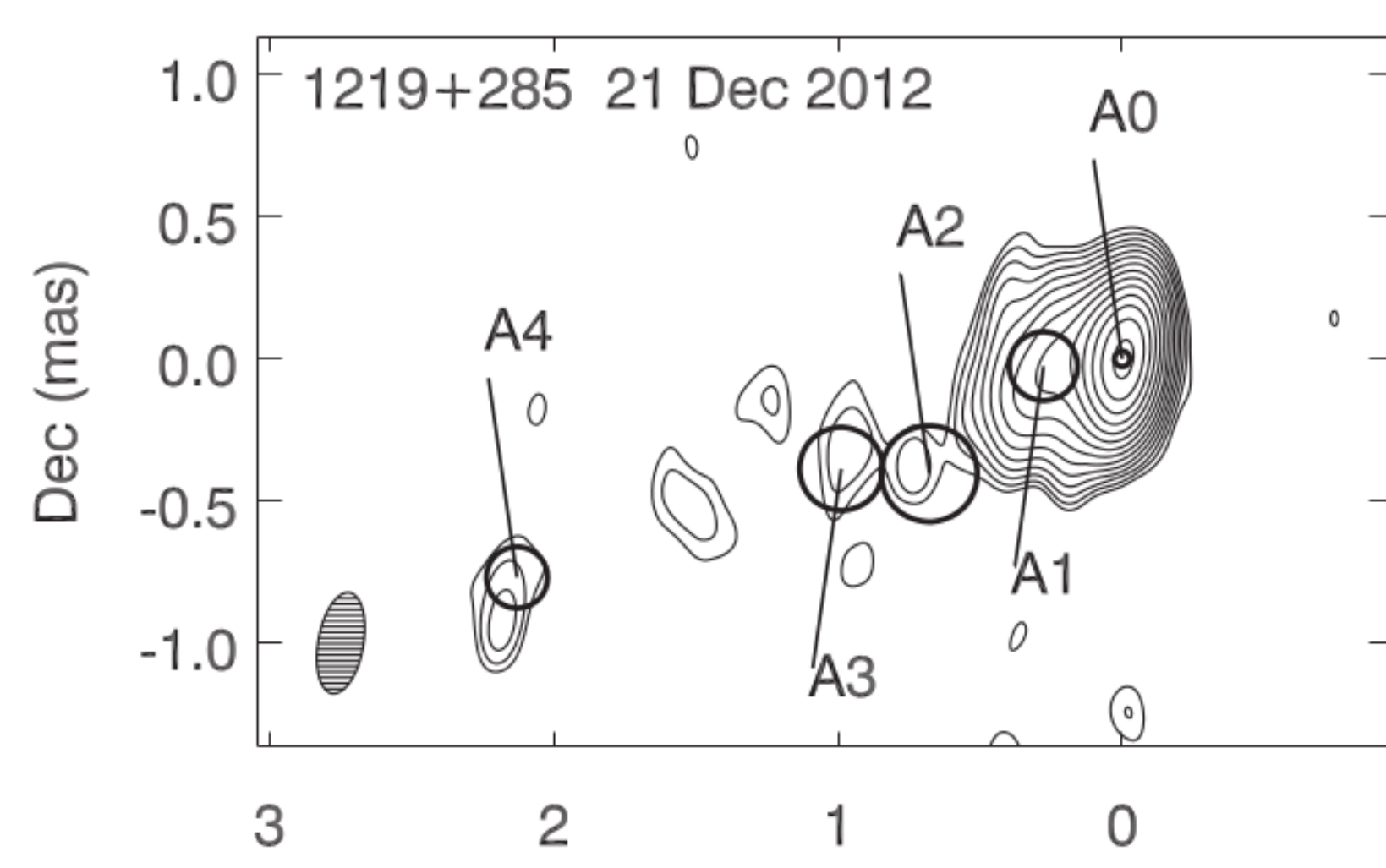
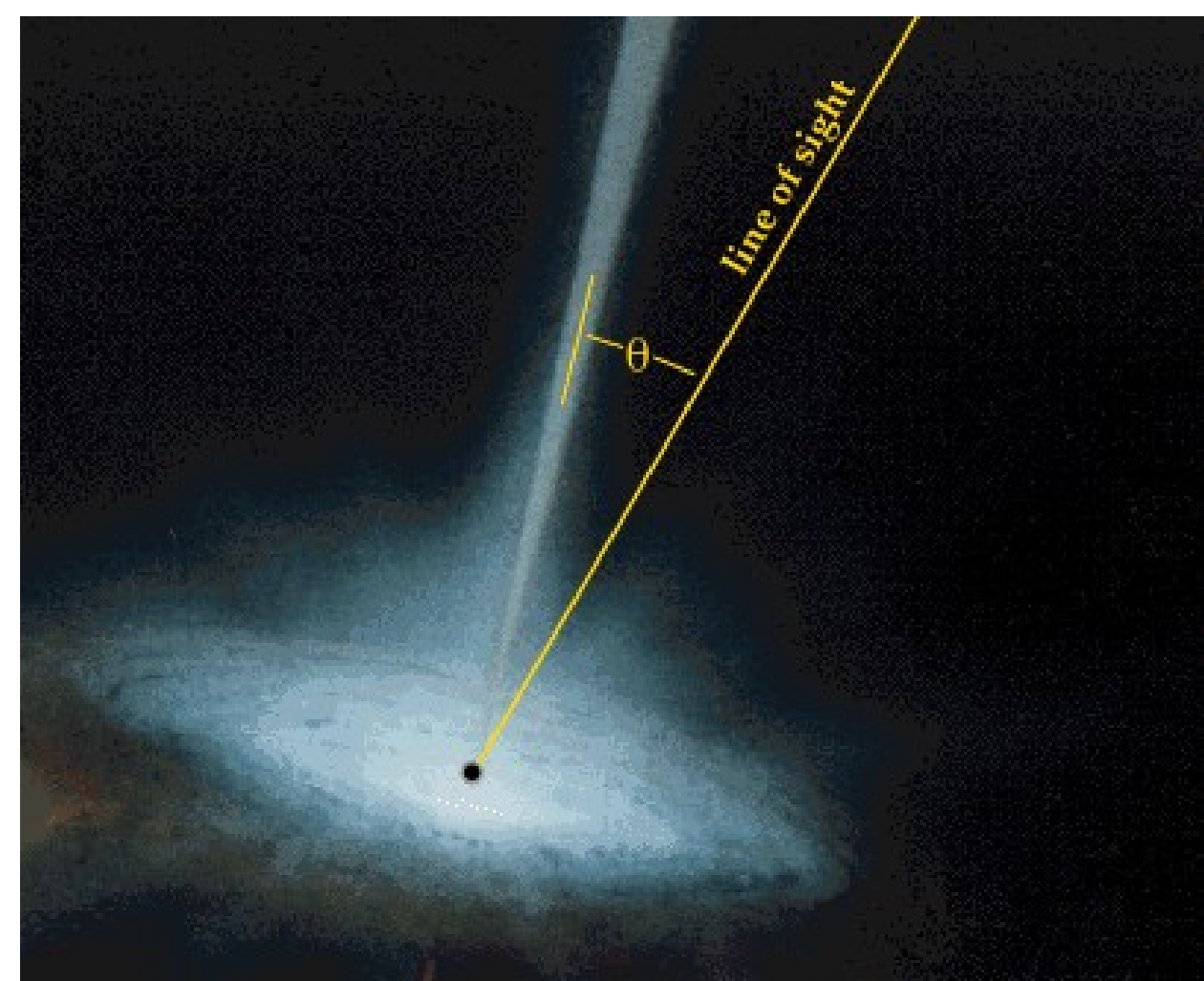


Figura 1: A la izquierda: representación artística del fenómeno blázar ($\theta < 15^\circ$). Tomada de <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/images/epo/gallery/agns/superluminal.gif>. A la derecha: Imagen de intensidad total del blázar ON 231 en 43 GHz, en escala de pc. A0 corresponde al núcleo del blázar, mientras que A1 es un nódulo que domina la emisión junto con el núcleo y el resto son rasgos que destacan y que forman parte del jet [2].

1.1. Efectos relativistas

Los blázares son conocidos como los más extremos de los AGN. Esto debido a que por la orientación del jet con el observador, se presentan los siguientes fenómenos relativistas:

- Aberración relativista: Emisión concentrada en un cono con apertura $1/\Gamma$
- Doppler boosting: Emisión intensificada en la dirección de movimiento del jet

$$E^{rec} = \frac{E^{em}}{\Gamma(1 - \beta_\Gamma \cos \theta)} = \delta E^{em}, \quad F^{rec} = F^{em} \delta^{3+\alpha}, \quad F_\nu^{em} \propto \nu^{-\alpha}$$

- Movimiento superlumínico aparente:

$$\beta_{\perp,app} = \frac{\beta_\Gamma \sin \theta}{1 - \beta_\Gamma \cos \theta}, \quad \cos \theta_{sl} = \beta_\Gamma$$

El Doppler boosting produce una sobre-intensificación de la radiación y el Doppler beaming, o aberración, produce radiación direccionada hacia el observador.

2. Análisis de variabilidad

Con los datos obtuvimos la distribución espectral de energía (SED) en las bandas del óptico de la muestra de blázares. Observamos variabilidad de flujo, de color y de índice espectral. Se obtuvieron diagramas color-magnitud B-V, V-R, R-I y B-I de cada fuente, en los que se estudió la correlación para determinar la presencia de comportamientos *bluer-when-brighter* (BWB, más azul cuando hay una mayor actividad en la fuente) o *redder-when-brighter* (RWB). Se ha reportado que los FSRQ presentan tendencias RWB, mientras que los BL Lacs tienen comportamientos BWB [3].

2.1. Curvas de luz y variabilidad de flujo

Con las observaciones obtuvimos el flujo por banda, y se aplicó una prueba de χ^2 para determinar la presencia de variabilidad en cada una de las épocas de observación. Finalmente, se estimaron la amplitud y escala (temporal) de variabilidad con las expresiones siguientes

$$A = \sqrt{(A_{max} - A_{min})^2 - 2\sigma^2}$$

$$\tau = \min \left(\frac{|t_2 - t_1|}{\ln(F_2/F_1)} \right), \quad t_d = \min \left(\frac{|t_{i+1} - t_i|}{\log_2(F_{i+1}/F_i)} \right)$$

2.2. SED, variabilidad de color y espectral

Primero se identificaron las observaciones cuasi-simultáneas (de la misma noche), para obtener la SED. Se construyeron además diagramas color-magnitud y se realizó un análisis de correlación. Con este se determinaron comportamientos RWB para una correlación negativa con $r < 0.2$ y $p < 0.01$, mientras que una correlación positiva con $r > 0.2$ y $p < 0.01$ indicaba un comportamiento BWB. Finalmente, se estudió la variación del índice espectral a lo largo de las noches de observación con un análisis equivalente al utilizado en las curvas de luz. El índice espectral, para cada color, se calculó mediante la expresión

$$\alpha_{\nu_1 \nu_2} = \frac{0.4(m_{\nu_1} - m_{\nu_2})}{\log_{10}(\nu_1/\nu_2)}$$

3. Resultados

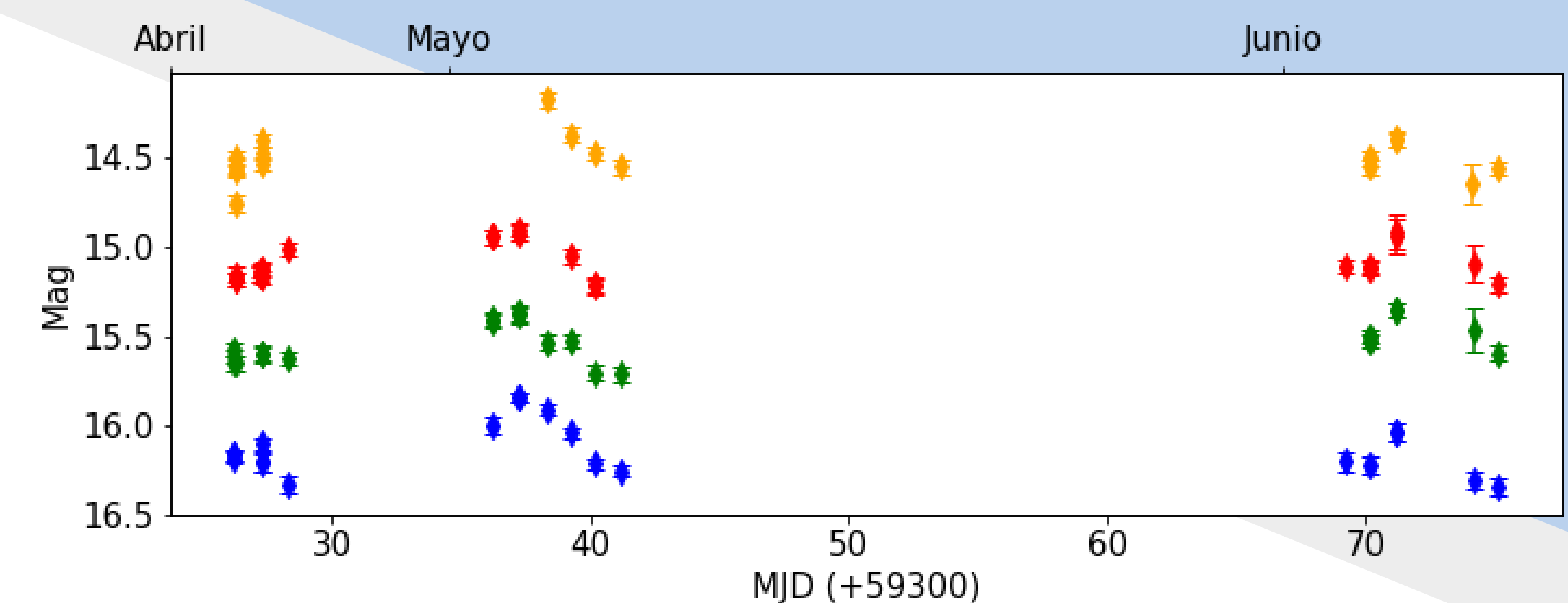


Figura 2: Ejemplos de curvas de luz de ON 231 con los datos de los tres meses de observación. El naranja corresponde al filtro I, el rojo al filtro R, el verde al filtro V y el azul al filtro B. La máxima amplitud de variabilidad se observó en la banda B con un valor de 0.41 mag y una escala de variabilidad de 6.44837 días, que corresponde a un tamaño de la región de emisión de 0.054 pc. Esto se obtuvo usando un $\delta=10$ [1].

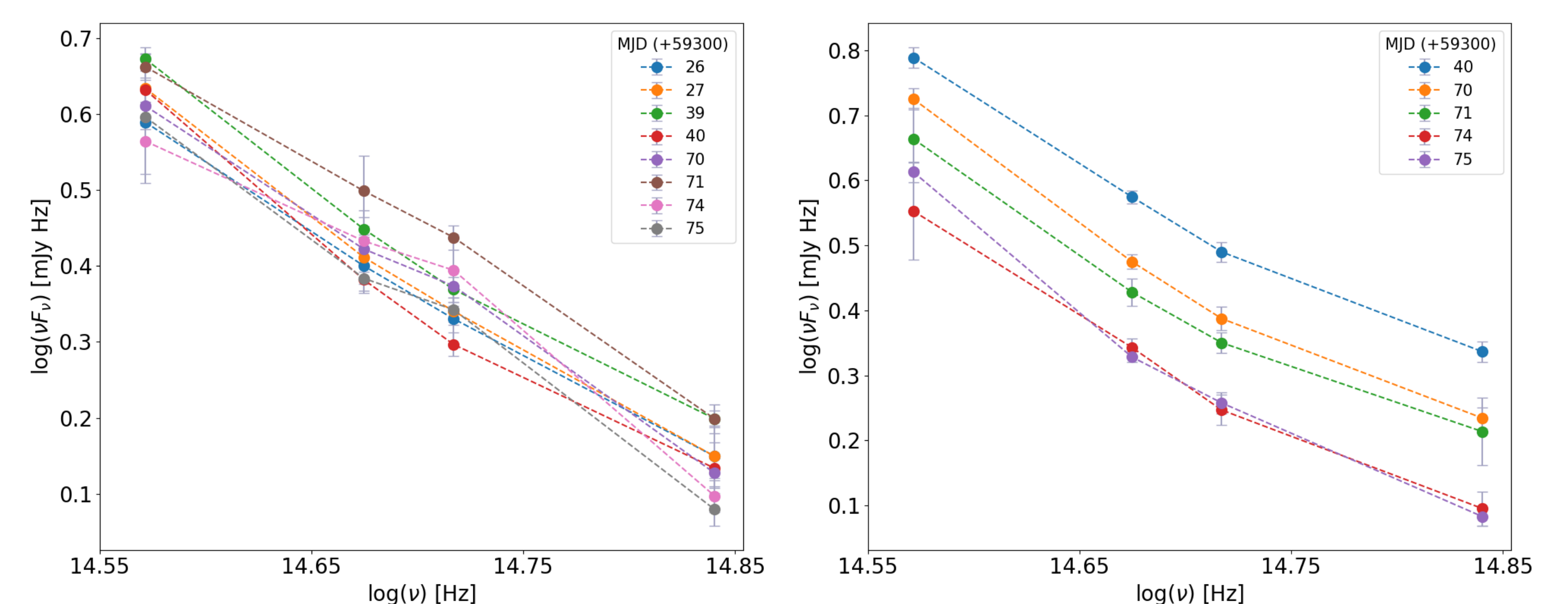


Figura 3: Ejemplos de SED en el óptico para diferentes noches de observación de dos objetos: ON 231 a la izquierda y del FSRQ 3C 279 a la derecha. La forma de la SED de ambas fuentes varía en cada noche de observación.

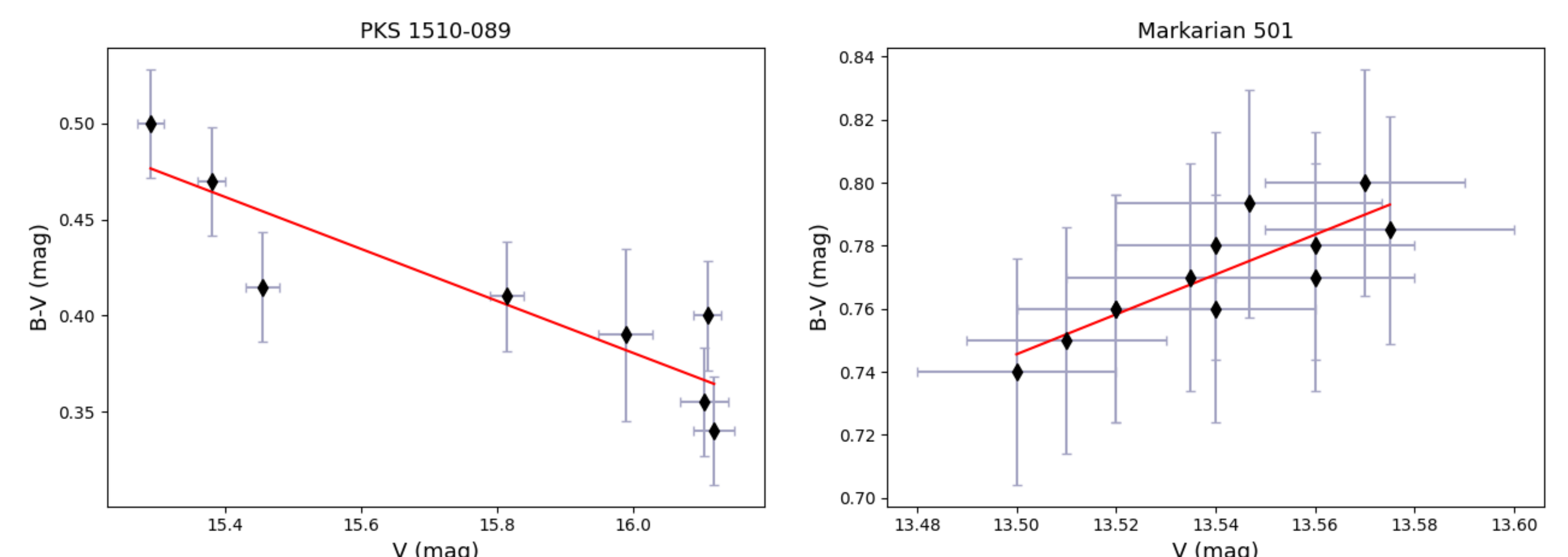


Figura 4: Diagramas color-magnitud con el índice de color B-V para PKS 1510-089 (izquierda) y Mrk 501 (derecha).

Encontramos que Mrk 501, OJ 287 y BL Lac presentan comportamientos BWB en al menos un color (B-V), mientras que PKS 1510-089 y 3C 273 muestran una tendencia RWB también en (B-V). Sin embargo, solo Mrk 501 y PKS 1510-089 cumplen con los criterios estrictos propuestos para el análisis. El resto de las fuentes presentan estas tendencias con un p -value mayor al límite propuesto. Los diagramas de estas dos fuentes se muestran en la Figura 4.

4. Conclusiones

Con los resultados encontrados se verifica que los blázares presentan alta variabilidad en el flujo, en este caso en el óptico, encontrando amplitudes de hasta 1.03 magnitudes en periodos de unos pocos días. También se comprueba que no solo hay variaciones en el flujo, sino también en la forma de la SED para algunas de las fuentes en la muestra. Por otro lado, parece haber una relación entre los comportamientos y el tipo de blázar que se estudia, como se ha reportado en estudios previos con grandes muestras. Esto abona a la teoría de una posible evolución entre los tipos de blázar, donde los FSRQ representan una etapa previa a los objetos tipo BL Lac.

Referencias

- [1] M. Boettcher, D. E. Harris, and H. Krawczynski. *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*. WILEY-VCH, 2012.
- [2] S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova, I. S. Troitsky, I. Agudo, C. Casadio, A. Foord, J. L. Gómez, N. R. MacDonald, S. N. Molina, A. ähteenmäki, J. Tammi, and M. Tornikoski. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program. *The Astrophysical Journal*, 846(2):98, Sept. 2017.
- [3] V. Negi, R. Joshi, K. Chand, H. Chand, P. Wiita, L. C. Ho, and R. S. Singh. Optical flux and colour variability of blazars in the ZTF survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(2):1791–1800, Feb. 2022.