



Diez años de observaciones desde radio hasta rayos gamma del blazar Markarian 501

A. Pichel¹ & A.C. Rovero¹

¹ *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina*

Contacto / anapichel@iafe.uba.ar

Resumen / El blazar Mrk 501 es observado constantemente desde su descubrimiento en muy altas energías en 1996. En este trabajo presentamos las observaciones tomadas de los últimos diez años (2008–18) que incluyen instrumentos de radio, óptico, rayos X y rayos gamma. A partir de las curvas de luz, buscamos períodos de alta y baja actividad, para estudiar la variabilidad y las correlaciones entre las diferentes bandas de energía. A partir de esos resultados, se quiere conseguir una manera de predecir los *flares* de muy alta energía y determinar para las observaciones si hay un origen común para diferentes períodos de actividad en las distintas bandas. Encontramos una correlación moderada para los rayos X y los rayos gamma.

Abstract / The blazar Mrk 501 is constantly observed since the discovery at very high energies in 1996. We present, in this work, the observations taken from the last ten years (2008–18) including radio, optical, X-ray and gamma-ray instruments. From the light curves, we look for periods of high and low activity, to study the variability and correlations between the different energy bands. From these results, we want to get a way to predict very high energy flares and determine for the observations if there is a common origin for different periods of activity in the different bands. We found a moderate correlation between gamma-ray and X-ray.

Keywords / galaxies: active — BL Lacertae objects: individual: Mrk 501

1. Introducción

Los blazares forman parte de los núcleos activos de galaxias (AGN, por sus siglas en inglés), en donde los jets apuntan hacia la línea de visual del observador. Presentan una alta luminosidad y tienen emisiones rápidas de forma irregular, en espacios temporales cortos, del orden minutos a horas, hasta meses. Esta variabilidad está posiblemente asociada con regiones de emisión compactas cercanas a la base del jet y del agujero negro. La caracterización de esta variabilidad presenta un desafío para los observatorios actuales, ya que requiere un monitoreo constante durante meses en todo el espectro electromagnético. Por otro lado, la variabilidad de los blazares puede tomarse como una herramienta ya que a partir de las observaciones multifrecuencia simultáneas o cuasi contemporáneas, durante *flares*, se podrían romper degeneraciones entre los distintos modelos de emisión (e.g. Krawczynski et al. 2001).

Markarian 501 es un blazar cercano ($z = 0.034$) tipo *high-frequency-peaked* (HBL), y fue detectado por primera vez a muy altas energías por el telescopio Whipple en 1996 (Quinn et al., 1996). En los años subsiguientes, Mrk 501 fue observado regularmente en varias bandas de energía, presentando bajo estado de actividad. En particular, durante 1997, fue detectado un *flare* excepcionalmente fuerte con niveles de flujo máximos de hasta 10 veces el flujo de la Nebulosa del Cangrejo, que fue detectado a muy altas energías y en rayos X (Aharonian et al., 1999). Varios *flares* han sido observados en el transcurso de estos 20 años (e.g. Albert et al. 2007; Aliu et al. 2016) aunque ninguno de tal magnitud como el de

1997. En los últimos años se ha cambiado el enfoque y se realizaron varias campañas de 4-5 meses de duración (Aleksić et al., 2015; Ahnen et al., 2017), independientemente de la actividad de la fuente, para poder estudiar los estados de baja y alta actividad. En este trabajo nos concentramos en el estudio de la variabilidad de períodos largos de meses/años, buscando correlaciones entre los distintos instrumentos. Las observaciones utilizadas en este trabajo fueron obtenidas de base de datos públicas, salvo las de *Fermi-LAT* y *Swift-XRT* que fueron analizadas por los autores.

2. Curvas de luz

2.1. Variabilidad

Mrk 501 es monitoreado frecuentemente en todo el espectro electromagnético, con observaciones que van desde todos los días, cada varios días o semanas, dependiendo del nivel de intensidad de la fuente y la dedicación que tenga disponible el instrumento. En la Fig. 1 se pueden observar los resultados para el monitoreo durante 2008–2018, desde radio hasta rayos gamma. Como primera prueba para encontrar variabilidad, se realizó un ajuste con una función constante para todas las bandas de energía. Se encontraron pocos datos de archivo del VLBA en 15 GHz, con la fuente variable en esos años, con un pico en su actividad alrededor del período 1 (p1: MJD 54940–54960), y un mínimo de actividad alrededor del período 2 (p2: MJD 55860–56000).

En la banda *V* del óptico, se observó que la fuente se mantuvo estable durante el período MJD 54500–56500,

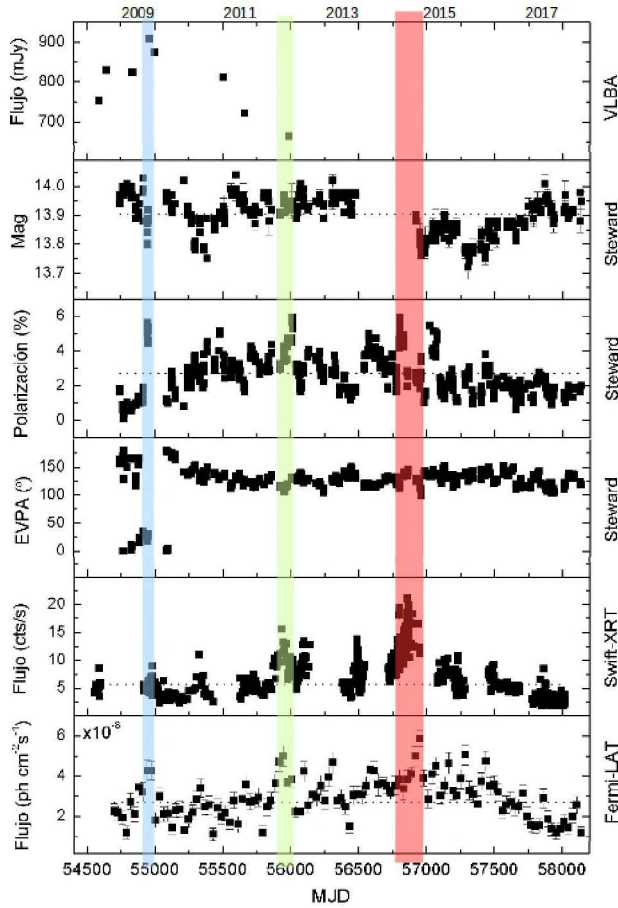


Figura 1: Curvas de luz para Mrk 501. *Primero (desde panel superior):* VLBA a 15 GHz. *Segundo:* Banda V medida en el Observatorio Steward. *Tercero:* Polarización óptica medida en el Observatorio Steward. *Cuarto:* EVPA medido en el Observatorio Steward. *Quinto:* Cuentas obtenidas en la banda 0.3–10 keV tomadas con Swift-XRT. *Sexto:* Flujo obtenido en la banda de los rayos gamma de alta energía con Fermi-LAT. Los distintos períodos de alta actividad están marcados en colores, siendo el período de 1 en azul, el período 2 en verde y el período 3 en rojo.

con picos de mayor actividad, del $\sim 10\%$ con respecto al promedio (13900 ± 0.005 mag). En el segundo período (MJD 56900–58300) hubo una disminución en la intensidad durante la primera parte, para luego aumentar hasta llegar al valor promedio. El grado de polarización lineal en el óptico presentó variaciones diarias, sobre todo en el 2008–09 con variaciones del 30–40%, con un mínimo en 54750–54850, llegando a un máximo para abril–mayo de 2009 (p1). Esta variabilidad también puede apreciarse en la Fig. 2. Para el ángulo de polarización del vector eléctrico (EVPA) se obtuvo un promedio de $125.7 \pm 2.6^\circ$, manteniéndose estable a lo largo de los 10 años de estudio, pero con la particularidad que durante los períodos 54829–59, 54886–55080 y 55091–94 tuvo una rotación abrupta, disminuyendo su valor de $\sim 120^\circ$ a valores entre 5 y 30° . Justo en el último período (p1) la fuente presentó un *flare* a muy altas energías observado con VERITAS (Aliu et al., 2016). Luego se observó un

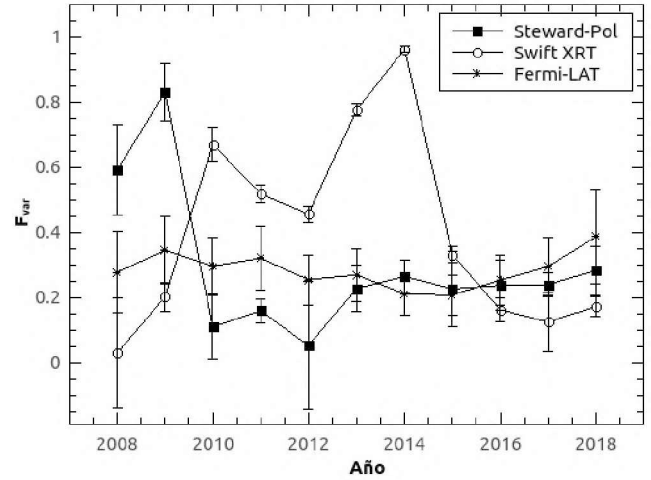


Figura 2: F_{var} para rayos gamma con Fermi-LAT, rayos X obtenidos para Swift-XRT y la polarización lineal en el óptico medido en el Observatorio Steward.

incremento en el EVPA llegando a un máximo de ~ 175 durante los días 55122–54. En la banda de los rayos X, Mrk 501 se mostró variable con picos en la actividad entre 3 a 5 veces la emisión a baja actividad (4.88 ± 0.03 cuentas s^{-1}). Esta variabilidad también puede verse a lo largo de los años en la Fig. 2, con mayor variabilidad entre 2010–14. En la banda de los rayos gamma, la fuente se mantuvo estable, con pequeños *flares*. Durante el p2 la fuente presentó un estado de actividad alto en rayos X, con el triple de intensidad que el *baseline*. Este aumento también puede observarse en rayos gamma y en la polarización, mientras que en radio se obtuvo un mínimo de intensidad.

Durante el período 3 (p3: MJD 56750–5700), Mrk 501 estuvo en un alto estado de actividad en rayos X, con una intensidad máxima 4.3 veces mayor que la emisión promedio en los 10 años estudiados. Cabe destacar que la polarización lineal tuvo un aumento del doble que la emisión promedio unos días antes que el *flare* en rayos X. Unos días después del *flare*, hubo un aumento en la intensidad en rayos gamma, que se mantuvo en un estado de alta actividad durante varios meses. Dentro de ese período hubo otro *flare*, detectado a muy altas energías por H.E.S.S. (Cologna et al., 2017) sin detectar la contraparte en rayos X, gamma o en el óptico.

Una correlación de la variabilidad en las diferentes longitudes de onda puede dar indicaciones sobre los procesos que intervienen en los mecanismos de emisión. A lo largo de estos años, se han observado correlaciones entre los flujos en rayos X y rayos gamma (e.g. Horan et al. 2009). También hay casos donde no se encontró esa correlación a partir de observaciones simultáneas en rayos X y rayos gamma (e.g. Krawczynski et al. 2004). A su vez, en otras observaciones se han encontrado correlaciones entre la polarización óptica y rayos gamma sin correlacionar con rayos X (Aliu et al., 2016). Con el fin de ir más allá en la cuantificación de la variabi-

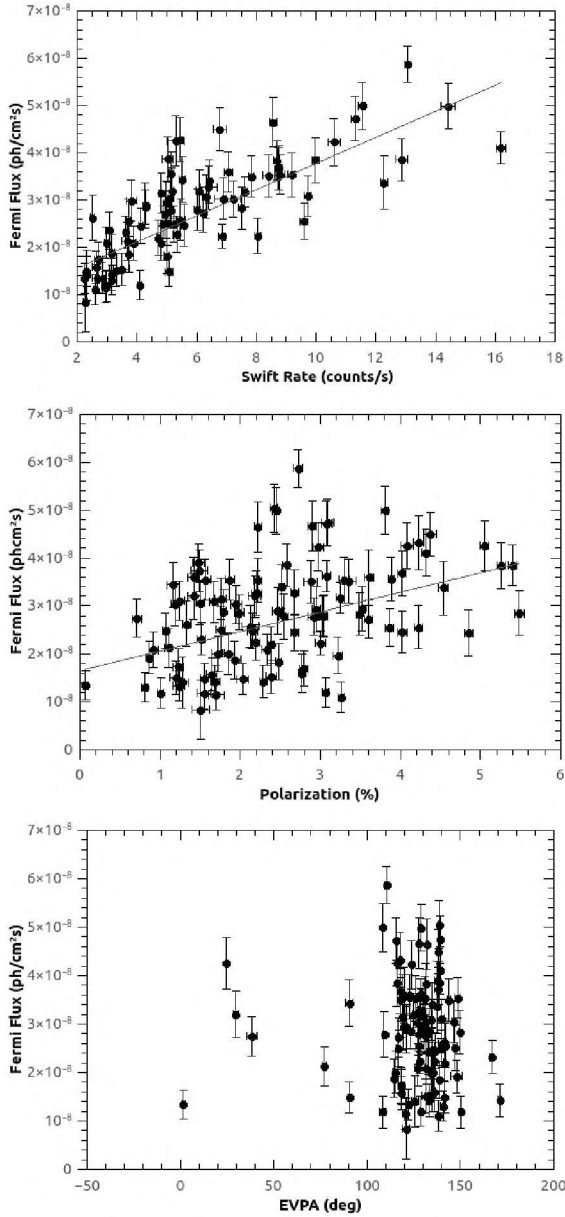


Figura 3: Flujos promediados mensualmente de *Fermi-LAT* vs. *Swift-XRT* (*panel superior*); vs. el grado lineal de polarización óptica con promedios mensuales (*medio*); y vs. el ángulo del vector eléctrico de polarización con promedios mensuales (*panel inferior*).

lidad del flujo presente en las curvas de luz, se obtuvo la variabilidad en la amplitud fraccional, F_{var} (Zhang et al., 2005) para todos los instrumentos involucrados y para los distintos años considerados en este trabajo, utilizando la siguiente expresión:

$$F_{var} = \sqrt{(S^2 - \sigma^2)/F^2}, \quad (1)$$

donde F es el flujo promedio, S es la desviación estándar y σ el error cuadrático medio. F_{var} es utilizada principalmente para medir la variabilidad de un conjunto de observaciones en donde no se mantiene constante el intervalo de tiempo (e.g. Edelson et al. 2002). Si presenta un valor cercano a cero indica que no hubo variabilidad significativa, y un valor cercano a uno indica variabilidad. En la Fig. 2 se observa los resultados de la F_{var} BAA 61A (2019)

calculada para rayos gamma, rayos X y la polarización lineal para cada año de observación. Se observa que la fuente presentó variabilidad moderada para rayos gamma, y una alta variabilidad, por ejemplo 2008–09, para la polarización óptica, y 2010–14 para rayos X, con un pico máximo en el *flare* detectado en el 2014.

2.2. Correlaciones

Se estudió para los años de observación si hubo una correlación entre los flujos de rayos gamma, rayos X y la polarización en el óptico, utilizando un ajuste lineal entre ambos. Una correlación fuerte entre dos bandas de energía se asocia con un origen en común de ambas poblaciones de fotones. Se puede apreciar en la Fig. 3, una modesta correlación ($r=0.7$) entre los rayos X y los rayos gamma, mientras que no se observa ninguna tendencia entre rayos gamma con la polarización óptica ($r=0.2$) y el *EVPA*. Se puede observar que el *flare* detectado en el período 1, detectado por VERITAS, corresponde a los 4 puntos donde el *EVPA* es muy pequeño, del orden de 0–30 °, que no se correlaciona con la actividad de *Fermi-LAT*.

3. Discusión

Markarian 501 es un blazar constantemente monitoreado en todos los rangos de energía. Este blazar tuvo estados de alta y baja actividad desde el 2008 al 2018, exhibiendo varios períodos de unos meses de alta actividad en rayos X y rayos gamma (p2: MJD 55860–56000; p3: MJD 56800–57000), con varios *flares* detectados a muy altas energías con VERITAS y H.E.S.S. Estudiando la correlación con datos promediados mensualmente, se obtuvo una correlación moderada para la emisión de rayos X y rayos gamma. Este comportamiento no se encontró para otras longitudes de onda. El monitoreo constante diario o cada varios días es importante y necesario para detectar *flares* rápidos y estados de alta actividad, y así poder explicar su origen, como se producen y alguna manera para poder predecirlos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido parcialmente financiado por subsidios otorgados por CONICET y por ANPCyT.

Referencias

Aharonian F.A., et al., 1999, *A&A*, 349, 11
 Ahnen M.L., et al., 2017, *A&A*, 603, A31
 Albert J., et al., 2007, *ApJL*, 666, L17
 Aleksić J., et al., 2015, *A&A*, 573, A50
 Aliu E., et al., 2016, *A&A*, 594, A76
 Cologna G., et al., 2017, *6th International Symposium on High Energy Gamma-Ray Astronomy, American Institute of Physics Conference Series*, vol. 1792, 050019
 Edelson R., et al., 2002, *ApJ*, 568, 610
 Horan D., et al., 2009, *ApJ*, 695, 596
 Krawczynski H., et al., 2001, *ApJ*, 559, 187
 Krawczynski H., et al., 2004, *ApJ*, 601, 151
 Quinn J., et al., 1996, *ApJL*, 456, L83
 Zhang Y.H., et al., 2005, *ApJ*, 629, 686