



# Candidatos a blazares como asociaciones de fuentes $\gamma$ en el relevamiento vvv

L.G. Donoso<sup>1</sup>, M.V. Alonso<sup>1,2</sup>, A. Pichel<sup>3</sup>, L.D. Baravalle<sup>1</sup> & D. Minniti<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>2</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

<sup>4</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Andrés Bello, Chile

<sup>5</sup> INAF-Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Italia

Contacto / lauradsj@gmail.com

**Resumen** / Existen pocas detecciones de blazares a bajas latitudes galácticas, principalmente debido a la presencia de nuestra galaxia donde la densidad estelar y la extinción por polvo interestelar son importantes. En este trabajo se presentan los lineamientos generales para identificar candidatos a blazares en estas regiones. Los criterios de selección de candidatos como asociaciones de fuentes de altas energías se definen en base a las propiedades fotométricas en el infrarrojo cercano y medio de cuatro blazares conocidos. Estos criterios son utilizados como referencia para encontrar asociaciones de fuentes de rayos  $\gamma$  no identificadas en estas regiones. Se muestran los primeros resultados de aplicar el método fotométrico desarrollado a una pequeña muestra.

**Abstract** / There are only a few blazars detected at low galactic latitudes mainly due to the high stellar density and interstellar extinction in these regions. In this work, we present the general outline of a method to select blazar candidates as associations of high-energy sources in these regions. The criteria are defined based on photometric properties of near- and mid-infrared of four known blazars. These are used as a reference to find and characterize unidentified gamma-ray sources. We show our first results applying our method to a small sample of these unidentified sources.

**Keywords** / surveys — catalogs — gamma rays: galaxies — infrared: galaxies

## 1. Introducción

El Cuarto Catálogo de fuentes *Fermi*-LAT (4FGL, Abdollahi et al. 2020) incluye 5064 fuentes  $\gamma$ , de las cuales 1336 permanecen sin identificación, llamadas UGS. Los blazares son un tipo de galaxias con núcleos activos (AGNs, por sus siglas en inglés) cuya emisión intensa y variable va desde longitudes de onda de radio hasta los rayos  $\gamma$ . Deben su comportamiento energético a la presencia de un *jet* relativista alineado con la dirección del observador (Blandford & Rees 1978). Los blazares representan más de la mitad de los objetos detectados por *Fermi*-LAT en el 4FGL. Ackermann et al. (2012) mostraron que hay un exceso de UGS a bajas latitudes galácticas ( $|b| < 10^\circ$ ) y una deficiencia de AGNs asociados. Si se asume que la distribución de AGNs es isotrópica entonces debería existir un mayor número de AGNs asociados a fuentes energéticas en estas latitudes. Dado que las incertezas en las posiciones de las fuentes  $\gamma$  son grandes ( $\approx 0.07^\circ$ ) resulta aún más difícil encontrar fuentes asociadas a esta emisión en estas bajas latitudes por la presencia de la Vía Láctea. Ésta aporta una elevada densidad estelar aumentando la confusión entre objetos y a su vez, la extinción galáctica atenúa el brillo de los mismos por el gas y polvo. Para poder asociar las UGSs con relevamientos en otras longitudes de onda es necesario buscar posibles correlaciones con propiedades fotométricas de fuentes encontradas en las regiones del

error de las fuentes  $\gamma$  identificadas como blazares.

Nuestro objetivo es desarrollar una metodología para seleccionar candidatos a blazares como asociaciones de las UGS en estas regiones de bajas latitudes galácticas. Para ello utilizamos el relevamiento Vista Variables in the Vía Láctea (vvv, Minniti et al. 2010). Este es un estudio del *bulge* de la galaxia en el IR cercano (NIR, por sus siglas en inglés), específicamente en las bandas Z, Y, J, H and  $K_s$ , así como de la parte sur del disco de la galaxia. Además se han usado datos en el IR medio (MIR, por sus siglas en inglés) de la misión *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE, Wright et al. 2010) en las bandas de 3.4, 4.6, 12, y 22  $\mu\text{m}$ .

## 2. Datos, metodología y resultados con blazares conocidos

Cuatro blazares (5BZBJ1717-3342, 5BZUJ1731-3003, 5BZQJ1802-3940 y 5BZUJ1823-3454) catalogados en el relevamiento Roma-BZCAT (Massaro et al., 2009) asociados a fuentes *Fermi*-LAT se encuentran en las regiones del relevamiento vvv, a bajas latitudes galácticas. Estos blazares fueron caracterizados fotométricamente en el NIR y MIR utilizando los relevamientos vvv y WISE, respectivamente. Para estos blazares se obtuvo la fotometría de todos los objetos en un radio de 2 veces el semieje mayor de la incerteza en la posición de la fuente  $\gamma$ . Se utilizó el código SEXTRACTOR+PSF (Bertin

2011) en las cinco bandas del relevamiento vvv y se obtuvieron magnitudes, colores y parámetros morfológicos. En el MIR se utilizaron los datos del relevamiento WISE y se aplicó el método WISE Gamma-ray Strip (WGS) a todos los objetos para encontrar blazares (D’Abrusco et al., 2013). Este método explota el hecho que los blazares se encuentran en una región determinada, separados de los demás objetos (estrellas, fuentes extragalácticas, etc.), cuando se realizan diagramas color-color en las bandas 3.4, 4.6, 12, 22  $\mu\text{m}$ .

En los diagramas color-magnitud (CMD, (J- $K_s$ ) vs  $K_s$ ) y color-color (CCD, (H- $K_s$ ) vs (J-H) y (J- $K_s$ ) vs (Y-J)) en el NIR, los blazares ocupan regiones bien diferenciadas de las estrellas y fuentes extragalácticas y en menor medida en el diagrama (J-H) vs (Y-J). Se ha encontrado una fuente NIR del relevamiento vvv cuya posición coincide con la de los blazares Roma-BZCAT. En este sentido, los resultados están en acuerdo con los trabajos de Cioni et al. (2013) y de Massaro & D’Abrusco (2016). En los CCDs en el MIR, dos de los cuatro blazares se encontraron aplicando el método WGS.

Se analizó la variabilidad utilizando la base de datos del vvv, y las curvas de luz en la banda  $K_s$  de los blazares, las estrellas cercanas y de todos los objetos dentro de las regiones de búsqueda. El análisis de variabilidad se realizó a través de parámetros, como la pendiente del ajuste lineal de la variación (Cioni et al. 2013) y de la amplitud de la variabilidad fraccional (Sandrinelli et al. 2014). Usando el código FEETS (Cabral et al. 2018) se extrajeron características de las curvas de luz para los blazares y una muestra de comparación. Las amplitudes encontradas para los blazares difieren notablemente de estrellas y otros objetos extragalácticos. La metodología propuesta se desarrolla y describe en detalle en Pichel et al. (2020).

Entre los principales resultados de este trabajo podemos mencionar que el blazar 5BZQJ1802-3940, clasificado como un objeto FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar), es el único con todas las propiedades de IR cercano en los CMD y CCD muy diferentes de las estrellas y objetos extragalácticos en la región estudiada. Es una fuente con morfología estelar con la amplitud más alta en la curva diferencial de luz en la banda  $K_s$  y muestra los resultados más importantes en todas las propiedades analizadas de variabilidad. Por último, tiene la incerteza en la posición *Fermi*-LAT más pequeña y es la fuente WISE más brillante de nuestra muestra. Los cuatro blazares tienen valores mayores en las amplitudes en comparación con los de las estrellas en las regiones analizadas, con variabilidad distintiva de los blazares.

Los objetos 5BZUJ1731-3003 y 5BZQJ1802-3940 tienen datos de IR cercano y medio en ambos relevamientos. Los otros dos solo tienen fotometría en el IR cercano. En los CMD y CCDs del IR cercano, los cuatro blazares se encuentran en diferentes lugares en comparación con las estrellas y las fuentes extragalácticas, con la excepción del CCD (J - H) vs (Y - J) cuyos colores no se separan tanto del resto de las fuentes. Definimos el blazar 5BZUJ1731-3003 como un objeto BL Lac (BL Lacertae) de acuerdo a la posición que ocupa en los CCDs de IR medio con datos WISE. Encontramos que los cortes de color (J -  $K_s$ ) > 1.0 mag y (H -  $K_s$ ) > 0.5 mag

pueden usarse para identificar blazares en los datos del IR cercano. El único blazar con una clara diferencia en el color (J - H) es 5BZQJ1802-3940.

El candidato a blazar 5BZBJ1717-3342 es el objeto más débil sin detección en las bandas Z e Y del vvv. Usando los CCDs en las otras bandas, encontramos un candidato vvv bien separado del resto de los objetos, en coincidencia con la posición reportada por Roma-BZCAT. En los datos WISE no pudimos encontrar ningún candidato a blazar debido a la contaminación de una estrella cercana. Por lo tanto, no podríamos descartar el origen galáctico de este objeto y necesitamos observaciones espectroscópicas para determinar su naturaleza extragaláctica.

### 3. Metodología aplicada a las UGSs

Encontramos 221 UGS detectadas por *Fermi*-LAT en las regiones del relevamiento vvv a bajas latitudes galácticas y comenzamos a analizar una muestra piloto de 13 UGSs cuyas incertezas posicionales son menores a 2.5 arcmin y que se localizan en zonas de baja extinción galáctica ( $A_{K_s} < 1.2$  mag). Para agilizar el proceso de análisis de las fuentes UGS se decidió utilizar los datos fotométricos producidos por Cambridge Astronomical Survey Unit (CASU, Emerson et al. 2006; Lewis et al. 2006) que incluyen posiciones, magnitudes y un clasificador que divide las estrellas de las galaxias. Además el área de análisis se redujo al tamaño de la incerteza en la posición alrededor de la fuente UGS, que es bastante grande. El estudio de uno de los blazares conocidos analizados en Pichel et al. (2020) utilizando SEXTRACTOR+PSF y datos CASU dan resultados similares.

De las 13 fuentes estudiadas, solamente 4 UGS presentan candidatos a blazares. A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra los NIR CMD (J -  $K_s$ ) vs  $K_s$  y CCDs: (H -  $K_s$ ) vs (J - H), (J - H) vs (Y - J) y (J -  $K_s$ ) vs (Y - J) en la región centrada en la fuente 4FGL J1759.1-3849 con los objetos vvv en la región estudiada. Hay objetos clasificados como estrellas y como galaxias a través de los diferentes criterios utilizados descripto en Pichel et al. (2020). En la figura, las estrellas son representadas en color magenta, las galaxias con triángulos azules y los candidatos a blazares, que en este caso satisfacen el criterio de galaxias, con círculos negros. Las zonas grises y rosadas representan los cortes de color utilizados. El rectángulo definido en líneas de trazos define la zona propuesta por Massaro et al. (2011) y D’Abrusco et al. (2013) y el rectángulo en líneas continuas, la definida por Cioni et al. (2013). En la figura se observan los candidatos a blazares (círculos negros) que cumplen con todos los criterios analizados.

La Figura 2 muestra los MIR CCDs de la misma fuente 4FGL J1759.1-3849: (3.4 - 4.6) vs (4.6 - 12) y (3.4-4.6) vs (12-22) con los objetos WISE detectados en la región de búsqueda. Las regiones conteniendo las dos clases de blazares de BZB (BL Lac) y BZQ (FSRQ) se delinean en líneas de puntos y trazos, respectivamente. Se observa que ningún objeto WISE es candidato a blazar siguiendo los criterios de color definidos para los blazares conocidos (Pichel et al. 2020).

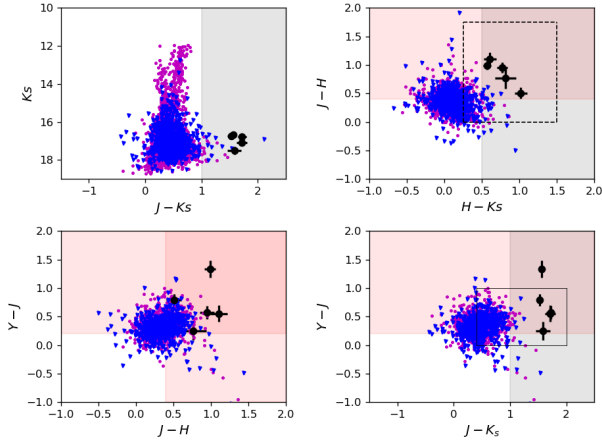


Figura 1: 4FGL J1759.1-3849. CMD:  $(J - K_s)$  vs  $K_s$  y CCDs:  $(H - K_s)$  vs  $(J - H)$ ,  $(J - H)$  vs  $(Y - J)$  y  $(J - K_s)$  vs  $(Y - J)$  utilizando datos del IR cercano del relevamiento VVV en la región centrada en la fuente de rayos  $\gamma$ . Los objetos estelares se representan con pequeños puntos de color magenta, las galaxias con triángulos azules y los candidatos a blazares tipo galaxia en círculos negros. En líneas de trazos se delimita la región definida por Massaro et al. (2011) y en líneas continuas la de Cioni et al. (2013). Las regiones grises y rosadas corresponden a los cortes de color utilizados. Figura extraída de Donoso (2020).

#### 4. Conclusiones y perspectivas futuras.

Se seleccionaron candidatos a blazares entre las fuentes de rayos  $\gamma$  sin previa identificación de *Fermi*-LAT a bajas latitudes galácticas y se utilizó la metodología desarrollada a partir de los cuatro blazares conocidos (Pichel et al. 2020) en estas regiones. Para ello se utilizaron datos en el IR cercano y medio y se distinguieron regiones en los diagramas color-magnitud y color-color donde se sitúan los candidatos a blazares. Se muestran los primeros resultados de aplicar esta metodología en las 13 fuentes con menores errores en la posición situadas en regiones de más baja extinción interestelar. De estas fuentes, sólo 4 tienen candidatos a blazar que deben ser estudiados con más detalle incluyendo datos en otras longitudes de onda como radio.

Se pretende aplicar esta metodología al resto de las UGS que se localizan en la región del VVV a través de los cortes apropiados en color como un buen separador de estrellas y galaxias normales de las fuentes AGNs como blazares. La combinación de los colores tanto en el IR cercano como medio utilizando datos VVV y WISE, y la variabilidad en la banda  $K_s$  resultan ser una herramienta confiable para seleccionar este tipo de objetos.

Los blazares son objetos dominantes del universo de rayos  $\gamma$  no térmico, y los estudios multifrecuencia como el presentado en este trabajo ayudan a comprender estas poderosas fuentes y responder preguntas abiertas en relación a los núcleos activos de galaxias.

*Agradecimientos:* Agradecemos al comité científico la oportunidad de presentar este trabajo en esta 62a. Reunión Anual de la AAA y al revisor del artículo por sus constructivos comentarios. Este estudio fue realizado con subsidios del Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas y Secretaría de Ciencia y Técnica de

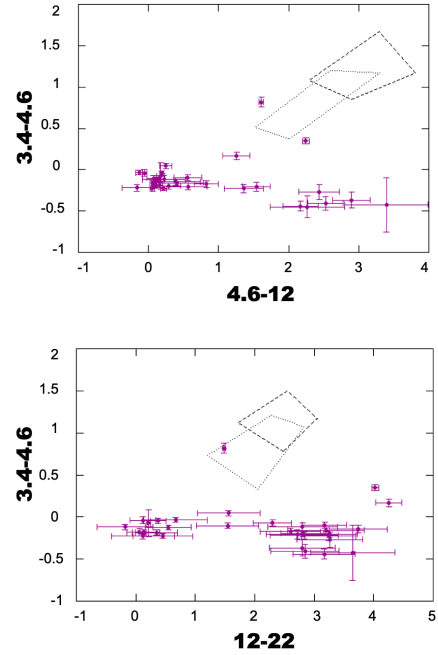


Figura 2: 4FGL J1759.1-3849. CCDs  $(3.4 - 4.6)$  vs  $(4.6 - 12)$  y  $(3.4 - 4.6)$  vs  $(12 - 22)$  usando datos WISE del IR medio. Las regiones conteniendo las dos clases de blazares BZB (BL Lac) y BZQ (FSRQ) se delimitan en líneas de puntos y trazos, respectivamente. Figura extraída de Donoso (2020).

la Universidad Nacional de Córdoba. Agradecemos el acceso a los datos del ESO Public Survey (Programa 179.B-20002) obtenidos con el telescopio VISTA y los datos producidos por CASU.

#### Referencias

Abdollahi S., et al., 2020, *ApJS*, 247, 33  
 Ackermann M., et al., 2012, *Astrophys. J.*, 753, 83  
 Bertin E., 2011, I.N. Evans, A. Accomazzi, D.J. Mink, A.H. Rots (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 442, 435  
 Blandford R.D., Rees M.J., 1978, A.M. Wolfe (Ed.), *BL Lac Objects*, 328–341  
 Cabral J.B., et al., 2018, *Astron. Comput.*, 25, 213  
 Cioni M.R.L., et al., 2013, *aap*, 549, A29  
 D’Abrusco R., et al., 2013, *Astrophys. J. Suppl.*, 206, 12  
 Donoso L., 2020, Tesis Doctoral. Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, Universidad Nacional de Córdoba.  
 Emerson J., McPherson A., Sutherland W., 2006, *The Messenger*, 126, 41  
 Lewis J.R., et al., 2006, C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, S. Enrique (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 351, 255  
 Massaro E., et al., 2009, *Astron. Astrph.*, 495, 691  
 Massaro F., D’Abrusco R., 2016, *ApJ*, 827, 67  
 Massaro F., et al., 2011, *Astrophys. J. Let.*, 740, L48  
 Minniti D., et al., 2010, *NewA*, 15, 433  
 Pichel A., et al., 2020, *MNRAS*, 491, 3448  
 Sandrinelli A., Covino S., Treves A., 2014, *A&A*, 562, A79  
 Wright E.L., et al., 2010, *Astron. J.*, 140, 1868-1881