



# Emisión de altas energías de galaxias con formación estelar activa

P. Kornecki<sup>1</sup>, J.F. Albacete Colombo<sup>2</sup>, L.J. Pellizza<sup>1</sup> & J.A. Combi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET, Argentina

<sup>2</sup> Dpto. de Investigación en Ciencias Exactas, Naturales e Ingeniería, CONICET-UNRN, Argentina

Contacto / paulakx@iar.unlp.edu.ar

**Resumen** / En los últimos años las detecciones de galaxias con formación estelar activa en el rango de energías de MeV a TeV realizadas por *Fermi* y los observatorios Cherenkov (H.E.S.S. y VERITAS), respectivamente, han comenzado una nueva era en el estudio de poblaciones de partículas relativistas de estas galaxias. Actualmente la muestra de este tipo de objetos observados por *Fermi* es aún pequeña, con solo cinco de estas galaxias fuera del Grupo Local detectadas. Dado que aún hay más de mil fuentes *Fermi* no identificadas, proponemos incrementar la muestra haciendo una correlación cruzada del último catálogo de *Fermi* con distintos catálogos de galaxias. Aquí presentamos los resultados preliminares de nuestro estudio, y discutimos su impacto a la futura identificación de galaxias con formación estelar activa con emisión  $\gamma$ .

**Abstract** / In recent years, the detection of star forming galaxies at GeV and TeV energies by *Fermi* and Cherenkov (H.E.S.S. y VERITAS) observatories, respectively, has opened a new era for the study of the cosmic-ray population of galaxies. The *Fermi* survey is still small, so far just five galaxies outside the Local Group have been detected. Given that there are more than one thousand of unidentified *Fermi* sources, we propose to increase this sample by doing a cross-correlation search of the last *Fermi* catalog with different galaxies catalogs. Here we report our preliminary results, and discuss the contribution of our results to the picture of cosmic-ray production in these objects.

**Keywords** / galaxies: star formation– gamma rays: galaxies –acceleration of particles

## 1. Introducción

Las galaxias con formación estelar activa (SFGs, por sus siglas en inglés) contienen una numerosa población de estrellas masivas y remanentes de supernova, los cuales son presumiblemente los principales productores de rayos cósmicos (CRs, por sus siglas en inglés). Tienen un medio interestelar denso y campos de radiación intensos, que al interactuar con los CRs pueden producir radiación  $\gamma$  (Rephaeli & Persic, 2014). En particular, las galaxias con brotes de formación estelar (SBGs, por sus siglas en inglés) son notables por su eficiencia de formación de estrellas masivas, sus altas densidades de gas y sus intensos campos de radiación (Acero et al., 2009). La detección reciente de SFGs por *Fermi*, H.E.S.S. y VERITAS las convierte en las primeras fuentes  $\gamma$  extragalácticas cuya emisión no proviene de núcleos activos (AGNs, por sus siglas en inglés), sino de su población estelar (Ackermann et al., 2012). La muestra actual contiene apenas nueve galaxias, por lo que su ampliación es crucial para comprender la naturaleza y origen de la emisión  $\gamma$  de las poblaciones estelares. El tercer catálogo de *Fermi* (3FGL; Acero et al., 2015) posee más de 1000 fuentes no identificadas con emisión en el rango de 20 MeV a 300 GeV, muchas de las cuales podrían estar asociadas SFGs.

masiva entre el 3FGL y una gran cantidad de catálogos de galaxias disponibles en la literatura. En este trabajo describimos el método estadístico utilizado, aplicándolo al *Updated catalog of GALEX nearby galaxies* (GALEX; Bai et al., 2015). Elegimos este catálogo por dos características: contiene galaxias cercanas y fue creado a partir de observaciones UV. Las SFGs son emisores intensos en esta banda debido a que contienen importantes poblaciones de estrellas masivas jóvenes. La cercanía de las galaxias hace además más probable detectar una eventual emisión  $\gamma$ . Analizamos la capacidad del método mediante la inspección visual de los resultados y su comparación con identificaciones previas de fuentes de rayos  $\gamma$ . Determinamos la distribución espectral de energía de las fuentes identificadas con nuestro método, y analizamos la existencia de indicadores basados en cocientes de flujos en las distintas bandas  $\gamma$ , que nos permitan identificar las SFGs.

Para aumentar la muestra de SFGs con emisión  $\gamma$ , pusimos en marcha un proyecto de correlación cruzada

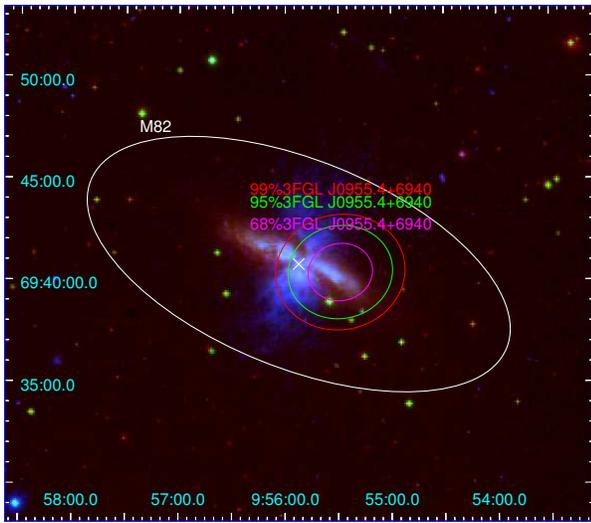


Figura 1: Imagen de la contraparte obtenida para M82, junto con las elipses que representan el tamaño de las galaxias dado por *GALEX* (blanca), y las elipses del 68 %, 95 % y 99 % de confianza de *Fermi* (rosa, verde y rojo respectivamente).

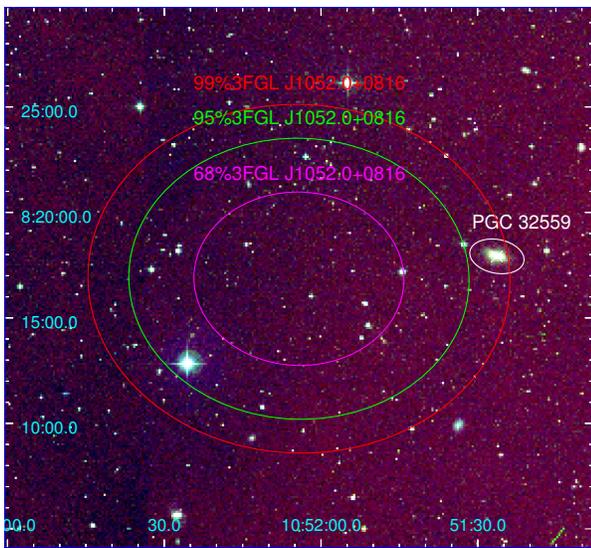


Figura 2: Imagen de la contraparte obtenida para PGC 32559, junto con las elipses que representan el tamaño de las galaxias dado por *GALEX* (blanca), y las elipses del 68, 95 y 99 % de confianza de *Fermi* (rosa, verde y rojo respectivamente).

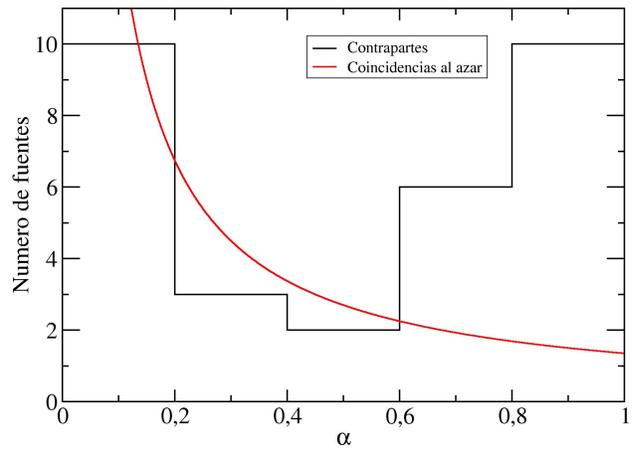


Figura 3: Histograma de la significancia  $\alpha$  para las fuentes con posibles contrapartes, junto con la distribución esperada para coincidencias por azar.

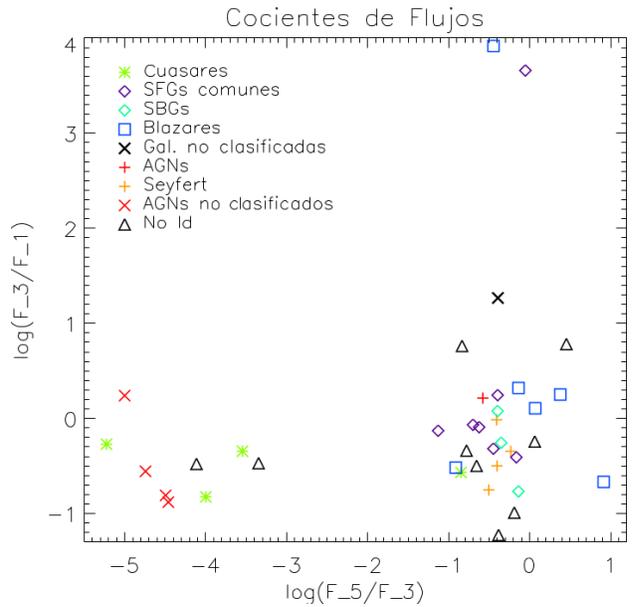


Figura 4: Cocientes de flujos  $F_3 / F_1$  en función de  $F_5 / F_3$ , en escala logarítmica para las fuentes con posibles contrapartes. Las fuentes se separan claramente en dos grupos, uno que incluye a los cuasares y a los AGNs de tipo no identificado (izquierda) y otro que incluye SFGs (normales, Seyfert, SBGs) junto con los blazares.

## 2. Correlación posicional

El telescopio de gran área (Large Area Telescope, LAT) a bordo del observatorio *Fermi*, posee una resolución angular del orden del minuto de arco. Suponemos que la posición de cada fuente  $\gamma$  obedece a una distribución normal bivariada, cuyos parámetros vienen dados por la posición nominal y la elipse del 68 % de confianza dadas por el 3FGL. Las posiciones de las galaxias de *GALEX*, en cambio, tienen una incerteza despreciable comparada con la de *Fermi*. Nuestro método consiste entonces en poner a prueba la hipótesis de que la verdadera posición de la fuente  $\gamma$  se encuentra dentro de la galaxia, para cada par fuente  $\gamma$  *Fermi* / galaxia *GALEX*. Tomamos como contrapartes posibles aquellos pares que satisfacen el test con una significancia mayor al 1%, y utilizamos la máxima significancia con que cada par pasaría el test como un estimador de la plausibilidad de la identificación. Desarrollamos un código IDL para aplicar este método en forma masiva a catálogos de galaxias que contienen millones de objetos. La Fig. 1 y la Fig. 2 muestran algunas de las contrapartes obtenidas. La Fig. 3 muestra la distribución obtenida para la significancia  $\alpha$ , junto con la esperada para coincidencias por azar. Se observan coincidencias de alta significancia que no pueden ser explicadas por simple azar, lo que indica una relación entre galaxias y fuentes *Fermi*.

## 3. Resultados de la correlación

De la correlación obtuvimos 31 posibles contrapartes de fuentes *Fermi*, nueve de las cuales corresponden a fuentes  $\gamma$  no identificadas, y las restantes 22 a fuentes identificadas. Diez de nuestras identificaciones coinciden con las realizadas por *Fermi* (3FGL; Acero et al., 2015). Usando los datos del 3FGL, analizamos la distribución espectral de energía de las 31 fuentes, y definimos como estimación de los índices espectrales los cocientes de flujos en distintas bandas de energía:  $F_3/F_1$ ,  $F_4/F_2$ ,  $F_5/F_3$ , donde los subíndices se refieren, en orden, a las bandas 0.1-0.3 GeV, 0.3-1 GeV, 1-3 GeV, 3-10 GeV y 10-100 GeV. La Fig. 4 y la Fig. 5 muestran los diagramas obtenidos comparando estos cocientes para las fuentes con posibles contrapartes. Agregamos además otras fuentes *Fermi*, relacionadas con SFGs, cuyas contrapartes ya han sido detectadas (Ackermann et al., 2012) y no se encuentran en *GALEX* (LMC, SMC, NGC 4945). Como puede observarse, las fuentes forman dos grupos, uno que incluye a los SFGs (normales, SBGs y Seyfert, a la derecha en las Figs. 4 y 5) junto con los blazares, y otro en el que predominan los cuasares (a la izquierda en las Figs. 4 y 5).

## 4. Discusión y trabajo a futuro

La identificación obtenida para algunas fuentes difiere de la del 3FGL. Esto sugiere que ambas identificaciones deberían ser revisadas mediante un análisis detallado. La plausibilidad de nuestra identificación ayudaría a seleccionar candidatos a la revisión.

Dos fuentes *Fermi* no identificadas se encuentran en el grupo de la izquierda en los diagramas mencionados,

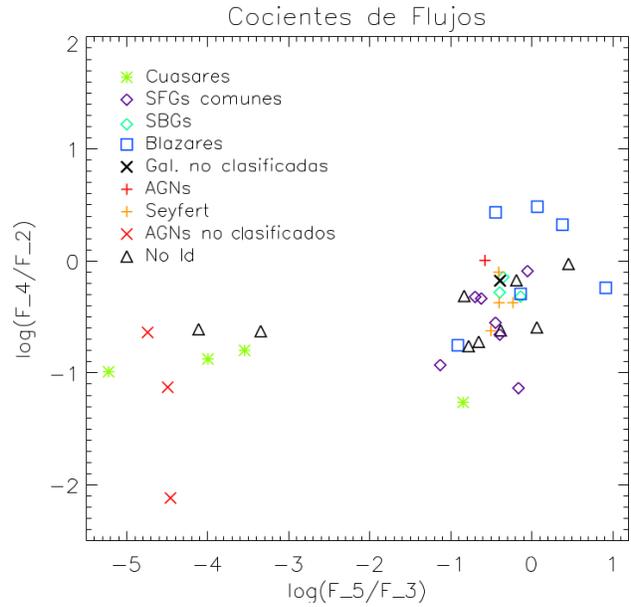


Figura 5: Cocientes de flujos  $F_4 / F_2$  en función de  $F_5 / F_3$ , en escala logarítmica para las fuentes con posibles contrapartes. Las fuentes se separan claramente en dos grupos, uno que incluye a los cuasares y a los AGNs de tipo no identificado (izquierda) y otro que incluye SFGs (normales, Seyfert, SBGs) junto con los blazares.

por lo que podrían ser nuevos cuasares.

El método de correlación cruzada utilizado permite identificar rápidamente los candidatos a contrapartes de las fuentes *Fermi*, además de dar una estimación de la plausibilidad para cada identificación. Las coincidencias observadas no pueden explicarse por puro azar.

Aplicado a un único catálogo, el método puede dar coincidencias espúreas, identificables por su baja plausibilidad. La potencia y robustez del mismo deberían maximizarse al aplicarlo a una gran cantidad de catálogos. Esto debería proveer los mejores candidatos para un análisis observacional exhaustivo tendiente a probar la relación entre la emisión  $\gamma$  y la galaxia en cuestión. En esta línea continuaremos el presente trabajo.

Los diagramas de índices espectrales  $\gamma$  permiten separar los cuasares y los AGNs de tipo no identificado, de otras fuentes. Sin embargo, los distintos tipos de SFGs se agrupan entre sí junto con los blazares. Investigaremos el uso de diagramas en otros rangos espectrales para separar estos grupos. Las luminosidades IR/radio, relacionadas con la tasa de formación estelar (Kennicutt, 1998), podrían separar SFGs de AGNs.

## Referencias

- Acero F., et al., 2009, Science, 326, 1080
- Acero F., et al., 2015, ApJS, 218, 23
- Ackermann M., et al., 2012, ApJ, 755, 164
- Bai Y., et al., 2015, ApJS, 220, 6
- Kennicutt Jr. R. C., 1998, ApJ, 498, 541
- Rephaeli Y., Persic M., 2014, Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 256, 252