

Galaxias con formación estelar activa como emisores de radiación gamma

P. Kornecki¹, L.J. Pellizza¹, J.F. Albacete Colombo², G.J. Escobar¹, F.A. Fogantini¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA, Argentina

² Departamento de Investigación en Ciencias Exactas, Naturales e Ingeniería, UNRN, Argentina

Contacto / paulakx@iar.unlp.edu.ar

Resumen / Las galaxias con formación estelar activa son las primeras fuentes γ extragalácticas cuya emisión total, o al menos una gran parte de ella, provendría de interacciones de rayos cósmicos acelerados en frentes de choque existentes en poblaciones estelares jóvenes y no de los núcleos galácticos activos. La evidencia más fuerte a favor de este hecho es la correlación cuasi-lineal entre la luminosidad de rayos γ de estas galaxias y distintos indicadores de su tasa de formación estelar. En el presente trabajo analizamos en detalle esta correlación, cuantificando la no-linealidad en las distintas bandas de energía que provee el catálogo de *Fermi*. Descartamos la linealidad con alto nivel de confianza y observamos posibles variaciones con la energía. Estos resultados abren nuevos interrogantes acerca del origen de la correlación. La respuesta requiere del desarrollo de modelos teóricos que describan la producción de rayos cósmicos en estas galaxias, y la emisión γ debida a la interacción de estos últimos con los campos de materia y radiación de las mismas.

Abstract / Star-forming galaxies are the first extragalactic sources whose total emission, or at least a large amount of it, comes from the cosmic rays interactions accelerated by shock fronts in a young stellar population environment but not from the active galactic nuclei. A strong evidence of this fact is the quasi-linear correlation between the γ -ray luminosity of these galaxies and different indicators of their star formation rate. In this work, we report a detailed analysis of this correlation, by quantifying its nonlinearity in the different energy bands provided by the *Fermi* catalog. We discarded the linearity with a high level of confidence and we observed possible variation with the energy. These results raise the question of the origin of the correlation, which answer required the development of theoretical models that describe the cosmic rays production inside these galaxies and the γ -ray emission due to the cosmic rays interacting with their matter and radiation fields.

Keywords / galaxies: star formation — gamma rays: galaxies — acceleration of particles

1. Introducción

Las galaxias con formación estelar activa (*star-forming galaxies*, SFGs) contienen una numerosa población de estrellas masivas y remanentes de supernova, los cuales se consideran actualmente los principales productores de rayos cósmicos (*cosmic rays*, CRs). Tienen además un medio interestelar denso y campos de radiación intensos, que al interactuar con los CRs pueden producir radiación γ (Rephaeli & Persic, 2014). En particular, las galaxias con brotes de formación estelar (*starburst galaxies*, SBGs) 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 estas galaxias por *Fermi*, VERITAS y HESS las convierte en las primeras fuentes γ extragalácticas cuya emisión no proviene de núcleos activos (*active galactic nuclei*, AGNs), sino de su población estelar. La evidencia más fuerte a favor de este hecho es la correlación cuasi-lineal entre la luminosidad de rayos γ de estas galaxias e indicadores de su tasa de formación estelar (*Star Formation Rate*, SFR) como la luminosidad total en el infrarrojo (L_{FIR} [8-1000 μm]), obtenida por Ackermann et al. usando datos del segundo catálogo de fuentes *Fermi* (2FGL; Nolan et al., 2012).

En este trabajo reexploramos la correlación de Ackermann et al. con datos más recientes del tercer catálogo de fuentes *Fermi* (3FGL; Acero et al., 2015), y extendemos el análisis a las distintas bandas de energía que provee el catálogo. Describimos además el desarrollo de modelos teóricos para explicar las correlaciones observadas.

2. Correlaciones entre las luminosidades γ e infrarroja de SFGs

Usando los datos del tercer catálogo de fuentes *Fermi* (3FGL; Acero et al., 2015) graficamos la relación entre la luminosidad total en rayos γ (de 0.1 a 100 GeV) y la luminosidad infrarroja (Gao & Solomon, 2004) para M82, NGC 253, NGC 4945, NGC 1068, SMC, LMC, M31, galaxias con formación estelar activa (ver Fig. 1), recreando lo realizado por Ackermann et al.. El ajuste de una ley de potencias ($\log L_\gamma = \alpha \log L_{FIR} + \beta$) resulta en $\alpha = 1.22 \pm 0.10$, en acuerdo con los resultados de Ackermann et al., y permite descartar la linealidad de la relación ($\alpha = 1$) con más del 97% de confianza.

Analizamos la misma relación en las cinco bandas de energía que provee el catálogo de *Fermi* (0.1–0.3 GeV, 0.3–1 GeV, 1–3 GeV, 3–10 GeV y 10–100 GeV respec-

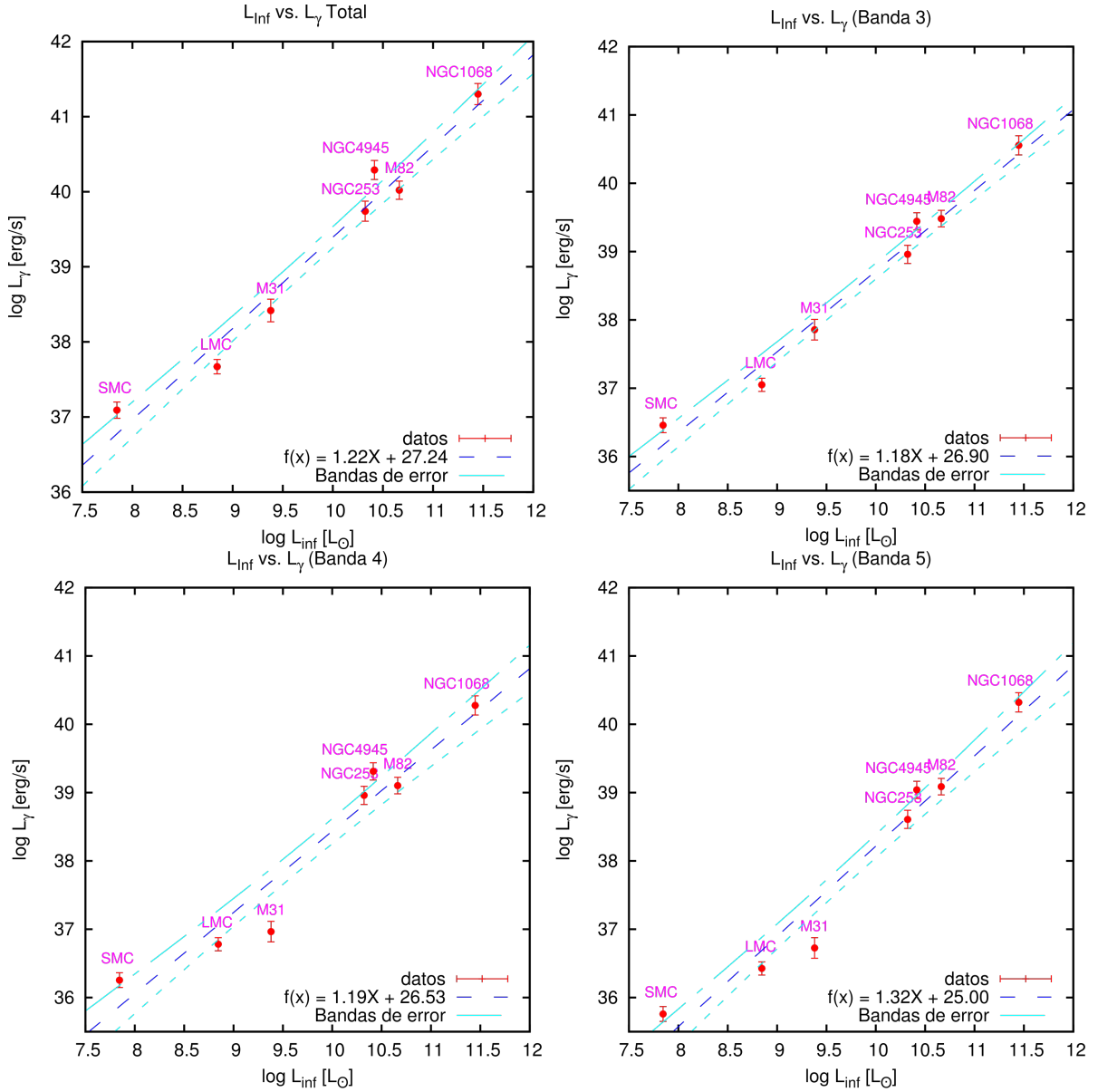


Figura 1: Luminosidad γ vs. luminosidad infrarroja para SFGs. En color azul se muestra el ajuste de una ley de potencias ($\log L_{\gamma} = \alpha \log L_{FIR} + \beta$) para la luminosidad total y las bandas 3, 4 y 5 del catálogo de *Fermi* (1–3 GeV, 3–10 GeV y 10–100 GeV respectivamente), en color celeste se muestran las bandas de error del ajuste y en puntos rojos los datos para las 7 galaxias.

tivamente), ver Tabla 1. Nuevamente la linealidad de la relación puede descartarse en cada banda, con al menos 86% de confianza (en la mayoría de los casos por encima de 93%). Dado que cada banda corresponde a una medición independiente de las demás, la probabilidad de que las pendientes observadas en las cinco bandas sean distintas a la unidad solamente como producto del azar es apenas del orden de 10^{-7} . Esta probabilidad es aún menor si consideramos que el signo de las fluctuaciones es el mismo en los cinco casos.

3. Modelos de emisión

Para comprender el origen de las correlaciones observadas es necesario modelar la emisión γ en SFGs. Para

Banda (GeV)	α	Error	Nivel de confianza
0.1–0.3	1.25	0.12	0.96 (2.1σ)
0.3–1	1.18	0.10	0.93 (1.8σ)
1–3	1.18	0.08	0.98 (2.2σ)
3–10	1.19	0.13	0.86 (1.5σ)
10–100	1.32	0.12	0.99 (2.7σ)
Total	1.22	0.10	0.98 (2.2σ)

Tabla 1: Índice α de la ley de potencias ajustada a la relación en la banda total y en las 5 bandas, su incerteza, y el máximo nivel de confianza con que puede descartarse la linealidad.

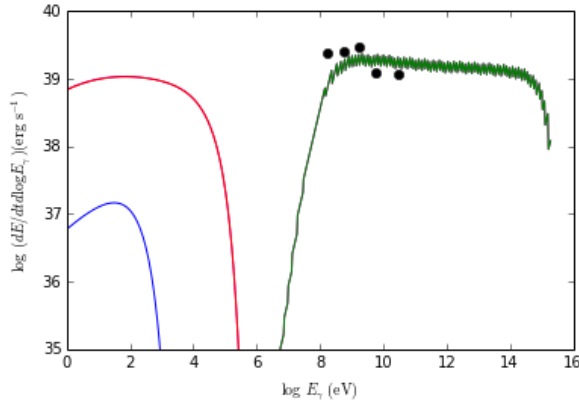


Figura 2: Distribución espectral de energía para la dispersión protón-protón inelástica (verde), sincrotrón de electrones y protones (rojo y azul, respectivamente), y observaciones *Fermi* de M82 (negro).

ello es necesario resolver la ecuación de transporte que gobierna la energética de las partículas que originan dicha emisión. Si tenemos en cuenta electrones y protones, y consideramos un término de inyección de partículas $Q(E)$ y de pérdidas $b(E)$ la ecuación de transporte resulta:

$$\frac{\partial N_i(E_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E_i} [b(E_i)N_i(E_i)] = Q(E_i) - \frac{N_i(E_i)}{t_{\text{esc}}} \quad (1)$$

donde $N_i(E_i)$ es la densidad volumétrica y espectral de partículas (con $i=1, 2$ para protones o electrones). Para una SFG asumimos que la producción de la radiación proviene de una región esférica de intensa formación estelar en el centro de la galaxia, con radio del orden de 0.3 kpc. Los procesos radiativos considerados para obtener las distribuciones espectrales de energía son: radiación sincrotrón con un campo de inducción magnética del orden de $1 \mu\text{G}$ en la región de formación estelar, y decaimiento de piones neutros producto de la interacción de protones relativistas con protones fríos del medio interestelar (con densidades del orden de 100 cm^{-3}). Además, tuvimos en cuenta el escape de las partículas de la región de aceleración por advección producida por los fuertes vientos que presentan estas galaxias, el enfriamiento adiabático y la transferencia de energía a protones térmicos en colisiones elásticas.

Para resolver la ecuación se utilizó un método de Euler explícito para la integración temporal, partiendo de una densidad nula para todas las partículas, hasta obtener un valor estacionario. Las derivadas respecto de la energía se calcularon mediante diferencias centradas. Las integrales requeridas por los términos de fuentes se calcularon por el método de los trapecios. El código numérico es modular y permite incluir cualquier proceso de enfriamiento. El problema fue resuelto seccionando la región de interés (aquella en la que actúan los mecanismos de aceleración y enfriamiento de las partículas relativistas) y trabajando en la aproximación donde los campos son uniformes y homogéneos en cada una de las secciones. En la Fig. 2 se muestra una distribución espectral preliminar del modelo para la galaxia M82.

4. Discusión y trabajo a futuro

Al extender el análisis de la correlación entre la luminosidad γ y la luminosidad infrarroja a las distintas bandas de energía, mostramos que la linealidad de la relación puede descartarse en cada banda, con al menos 85 % de confianza. La probabilidad de que las pendientes observadas en las cinco bandas sean distintas a la unidad por puro azar es muy pequeña. Este resultado implica que la emisión observada no es la simple suma de un conjunto de fuentes que trazan la formación estelar (e.g., estrellas masivas, remanentes de supernovas), sino que hay otros efectos cuya naturaleza es necesario explorar. Cabe destacar que el resultado es robusto a pesar de la baja estadística de la muestra. En este trabajo nos hemos restringido a las galaxias estudiadas por Ackermann et al., pero posteriormente se han reportado más detecciones de radiación gamma proveniente de SFGs como Circinus (Hayashida et al., 2013), NGC 2146 (Tang et al., 2014), Arp 220 (Peng et al., 2016). En un futuro trabajo pretendemos extender el análisis de la correlación entre la luminosidad γ y la luminosidad infrarroja incluyendo estas últimas detecciones.

La naturaleza de los efectos a explorar puede ser diversa. Podrían consistir en la existencia de otros tipos de fuentes de CRs, o en efectos de edad o metalicidad de las poblaciones estelares de las SFGs. Para investigarlos es necesario desarrollar modelos teóricos que describan la producción de rayos cósmicos en las galaxias con formación estelar activa, y la emisión γ de las mismas. En este trabajo se mostraron los primeros pasos en el desarrollo de dichos modelos. Nuestro modelo preliminar logró describir bien la emisión γ observada por el telescopio *Fermi* para el caso de M82. En el futuro, con el objeto de explicar las correlaciones observadas, realizaremos una exploración exhaustiva del espacio de parámetros de los modelos, e incluiremos dependencias de los mismos con las características básicas de las galaxias (SFR, metalicidad, etc.).

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
 Gao Y., Solomon P. M., 2004, *ApJS*, 152, 63
 Hayashida M., et al., 2013, *ApJ*, 779, 131
 Nolan P. L., et al., 2012, *ApJS*, 199, 31
 Peng F.-K., et al., 2016, *ApJL*, 821, L20
 Rephaeli Y., Persic M., 2014, *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, 256, 252
 Tang Q.-W., Wang X.-Y., Tam P.-H. T., 2014, *ApJ*, 794, 26