



## Emisión $\gamma$ de supervientos galácticos

P. Kornecki<sup>1</sup>, L.J. Pellizza<sup>1</sup>, J.F. Albacete Colombo<sup>2</sup> & A.L. Müller<sup>1,3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Departamento de Investigación en Ciencias Exactas e Ingeniería, UNRN - Sede Atlántica, Viedma, Argentina

<sup>3</sup> Institute for Nuclear Physics, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Alemania

<sup>4</sup> Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas, CNEA-CONICET-UNSAM, Argentina

Contacto / paulakx@iar.unlp.edu.ar

**Resumen** / Las galaxias con formación estelar activa son las primeras fuentes  $\gamma$  extragalácticas cuya emisión proviene mayormente de fenómenos vinculados a sus poblaciones estelares. Como evidencia a favor de esta interpretación suele presentarse la correlación cuasilínea observada por la misión *Fermi*, entre su luminosidad en rayos  $\gamma$  y su tasa de formación estelar. Recientemente se ha propuesto que la emisión  $\gamma$  de una de estas galaxias (NGC 253) podría explicarse por la interacción de partículas relativistas aceleradas en el superviento galáctico, con los campos de radiación y materia presentes en la burbuja formada por dicho viento. En el presente trabajo extendemos este modelo a galaxias con distinta tasa de formación estelar, y exploramos su habilidad para explicar la correlación antes mencionada. Encontramos que predice un cambio en la pendiente de la misma, a diferencia de aquellos que suponen que la emisión proviene del disco. Si bien el modelo describe en orden de magnitud las luminosidades observadas, la tendencia es apenas marginalmente consistente las observaciones.

**Abstract** / Star-forming galaxies are the first extragalactic  $\gamma$ -ray sources whose emission comes mostly from phenomena linked to their stellar populations. The strongest evidence supporting this interpretation is the quasi-linear correlation between their  $\gamma$ -ray luminosities and their star formation rates, observed by the *Fermi* mission. Recently, it has been proposed that the  $\gamma$ -ray emission of one of these galaxies (NGC 253) could be explained by the interaction of relativistic particles, accelerated in its galactic superwind, with radiation fields and surrounding matter. In this work we extend this model to galaxies with different star formation rates, and explore its ability to explain the aforementioned correlation. We find that the model predicts a change in the slope of the correlation, contrary to those in which the emission comes from the disk. Although the model describes the observed luminosities in order of magnitude, the trend is at most marginally consistent with observations.

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

### 1. Introducción

Las galaxias con formación estelar activa (SFGs, por sus siglas en inglés) son las primeras fuentes  $\gamma$  extragalácticas conocidas cuya emisión no proviene de núcleos galácticos activos, sino presumiblemente de sus poblaciones estelares. Estas fuentes fueron observadas en los últimos años por el instrumento espacial *Fermi* a energías de GeVs, y por los instrumentos terrestres VERITAS y H.E.S.S. en TeVs. Entre ellas se encuentran las galaxias con brote estelar (SBGs, por sus siglas en inglés), con tasa de formación estelar excepcionalmente alta. La evidencia más importante a favor del origen estelar de la emisión es la correlación cuasilínea entre su luminosidad en rayos gamma ( $L_\gamma$ ) y distintos indicadores de su tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés), como la luminosidad infrarroja (IR; Ackermann et al., 2012).

Las SFGs contienen poblaciones numerosas de estrellas masivas y tasas de supernovas elevadas, lo que sugiere que podrían ser sitios eficientes de producción de rayos cósmicos (CRs, por sus siglas en inglés). Los CRs interactuarían con el medio interestelar denso (concentrado mayormente en forma de nubes moleculares) y los campos de radiación intensos de las SFGs, generando

radiación  $\gamma$ . Ackermann et al. (2012); Lacki & Thompson (2013); Persic & Rephaeli (2010), entre otros, han propuesto que la emisión  $\gamma$  proviene de la interacción de los protones relativistas de los CRs con protones fríos en las regiones de formación estelar. El resultado de estos modelos es que  $L_\gamma \propto \text{SFR}$ .

En muchas SBGs se observaron evidencias super vientos (SWs, por sus siglas en inglés a escala galáctica, con velocidades de  $10^2 - 10^3 \text{ km s}^{-1}$  (Strickland & Heckman, 2009). Existen además observaciones en radio de SBGs cercanas (Heesen et al., 2009) que muestran un halo extendido de radiación sincrotrón. Esto apoya la idea de que los SWs acelerarían CRs, que podrían ser los responsables de la emisión  $\gamma$ . Romero et al. (2018) han modelado dicha emisión para el caso de NGC 253, pudiendo explicar las observaciones.

Los telescopios  $\gamma$  actuales no tienen la resolución angular suficiente para discernir de qué región de la galaxia proviene la emisión observada. Por lo tanto, es interesante explorar otras predicciones de los modelos que permitan discriminar entre ellos. La relación  $L_\gamma - \text{SFR}$  es una de ellas. En este trabajo investigamos la capacidad del modelo de vientos de Romero et al. (2018) para explicar la correlación observada.

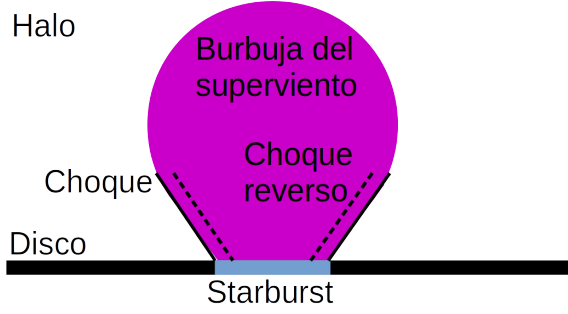


Figura 1: Esquema del escenario astrofísico considerado.

## 2. Modelo de vientos

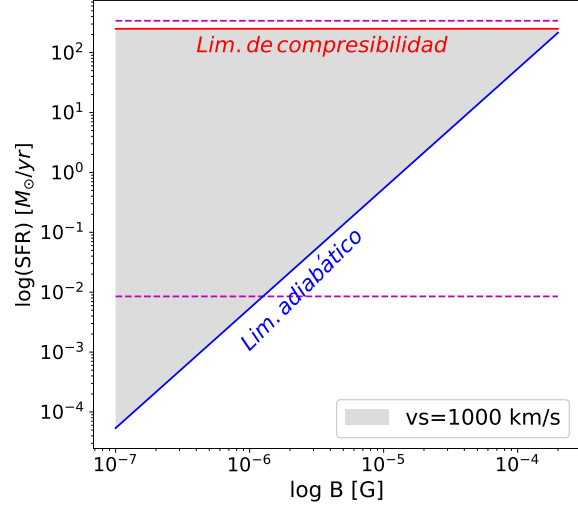
El material eyectado por las estrellas jóvenes y remanentes de supernova de las SBGs interactúa rápidamente a través de choques y se mezcla con el gas circundante. Los choques termalizan la energía liberada por las explosiones, creando una cavidad de gas caliente. Si la velocidad del gas en expansión excede la velocidad de escape de la galaxia, parte del medio barrido se transfiere al espacio intergaláctico creando un SW. El resultado es una burbuja muy caliente ( $T \sim 10^8$  K) con gas a alta presión, que se expande y barre el gas ambiente (Fig. 1). Cuando la burbuja alcanza el borde del disco, se expande adiabáticamente en el halo, creando una región de múltiples fases. El material barrido acumulado frente a los choques forma una capa fría y densa alrededor de la burbuja. Una discontinuidad separa el gas caliente del medio barrido. La velocidad del choque en el medio denso es mucho menor que en el gas caliente, por lo que un choque reverso se mueve a través de la región del viento. Este choque es adiabático, y capaz de acelerar eficientemente las partículas. La onda expansiva externa, en cambio, es radiativa.

En el modelo de Romero et al. (2018), la interacción de las partículas aceleradas con los campos magnéticos, de radiación y el medio del SW, produce radiación  $\gamma$  a través de distintos procesos. Los mecanismos involucrados son Bremsstrahlung relativista, emisión sincrotrón, y dispersión Compton inversa (con fotones del campo IR de la región de formación estelar) para los leptones, y dispersión inelástica protón-protón para los hadrones. Además las partículas pueden escapar de la región de aceleración, ya sea por difusión o advección. Los parámetros principales del modelo son la densidad  $n_{\text{sw}}$  del SW, el radio de la burbuja  $R_b$ , la velocidad  $v_{\text{sh}}$  del RS, y el campo magnético  $B$  del halo.

De acuerdo con Romero et al. (2018), podemos estimar la luminosidad en CRs producida como

$$L_{\text{CR}} = 4\pi\zeta R_b^2 n_{\text{sw}} m_p v_{\text{sh}}^3 \sim \zeta \dot{M} v_{\text{sh}}^2, \quad (1)$$

donde  $m_p$  es la masa del protón,  $\dot{M} = 3.12 \text{ SFR}$  (Romero et al., 2018) es la tasa de ingreso de masa al viento, y  $\zeta$  es la eficiencia de conversión de energía cinética de los choques en CRs.


 Figura 2: Región del plano  $B$ -SFR (sombreada), en que se verifican choques adiabáticos en un medio compresible. Entre líneas punteadas el rango de SFRs observado.

## 3. Extensión a distintas SFRs

Con el objetivo de investigar si el modelo de vientos reproduce la correlación observada por Ackermann et al. (2012), analizamos la posible variación de los parámetros con la SFR. No hay evidencia de fuertes dependencias del campo magnético, la velocidad del RS o el radio de la burbuja con la SFR, por lo que suponemos estas magnitudes constantes. Usando las relaciones para  $\dot{M}$  y  $L_{\text{CR}}$  obtenemos  $n_{\text{sw}} \propto R_b^{-2} v_{\text{sh}}^{-1} \text{SFR}$ .

Siguiendo a Romero et al. (2018), resolvemos la ecuación de transporte utilizando un modelo *One-Zone*, variando la SFR de modo de abarcar todo el rango observado ( $10^{-2} - 10^3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ). Para ello adoptamos como parámetros fiduciales  $B = 1 \mu\text{G}$ ,  $R_b = 5 \text{ kpc}$  y  $v_{\text{sh}} = 1000 \text{ km s}^{-1}$ , que luego variamos para explorar cómo se modifican los resultados, con las restricciones de que el medio sea compresible y el choque adiabático. La primera requiere que el tiempo de enfriamiento sea mayor a la edad del brote de formación estelar ( $\sim 10 \text{ Myr}$ ; cambios en este valor modifican levemente el rango de SFRs permitido). La segunda se cumple si la energía magnética es mucho menor que la cinética. Mostramos la región en el plano  $B$ -SFR en la que se cumplen ambas condiciones en la Fig. 2. Para cada conjunto de valores de los parámetros, calculamos la distribución espectral de energía emitida por cada proceso, y a partir de ella la luminosidad  $\gamma$  integrada en el rango de energía en el que observa el telescopio *Fermi* ( $0.1 \text{ GeV} - 0.1 \text{ TeV}$ ).

## 4. Resultados

En la Fig. 3 mostramos la variación de  $L_{\gamma}$  con la SFR, de acuerdo al modelo fiducial. La variación de los parámetros  $R_b$  y  $B$  no produce un cambio significativo en la predicción del modelo. La variación de  $v_{\text{sh}}$  dentro de va-

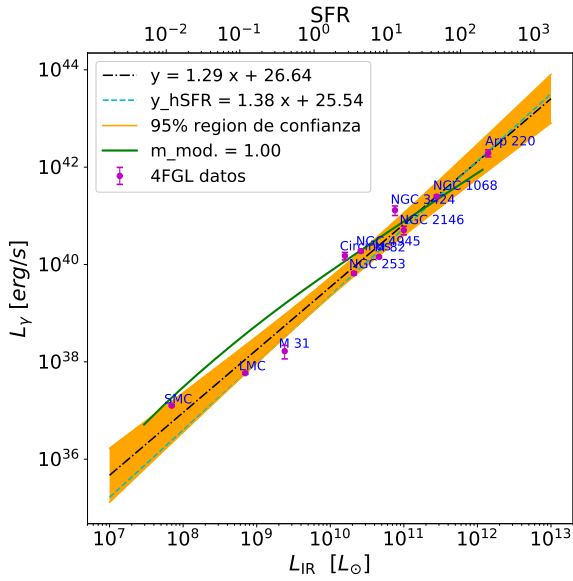


Figura 3:  $L_\gamma$  vs. SFR para el modelo fiducial (línea llena verde) y los datos del 4FGL (círculos). La línea de puntos y rayas muestra un ajuste lineal para todos los datos (el sombreado es la región de confianza del 95%), y la línea de rayas un ajuste restringido a altas SFR.

lores razonables produce un cambio en  $L_\gamma$  independiente de la SFR, idéntico al que produciría un cambio de la eficiencia  $\zeta$  en la Ec. 1, lo que implica una degeneración entre estos parámetros. Esta no afecta la pendiente ( $a$ ) de la relación  $\log L_\gamma - \log \text{SFR}$ , por lo que la misma puede usarse para contrastar el modelo de manera robusta. Este predice un comportamiento lineal ( $a = 1$ ) a alta SFR ( $\gtrsim 1 \text{ M}_\odot \text{ yr}^{-1}$ ). Por debajo de este valor, se produce una variación más rápida de  $L_\gamma$  con la SFR ( $a > 1$ ). Esto se debe a que la radiación  $\gamma$  es principalmente producida por el mecanismo protón-protón, muy eficiente a altas densidades del viento (que ocurren en galaxias de alta SFR). En este caso,  $L_{\text{CR}} \propto \text{SFR}$ . Por otro lado, a baja SFR la difusión domina, por lo que una fracción importante de la energía de los CRs no se radia (Fig. 4).

La predicción de  $L_\gamma$  coincide en orden de magnitud con las observaciones a alta SFR, pero sobreestima su valor a baja SFR. Un ajuste lineal para todas las SFGs del catálogo *Fermi* (4FGL, The Fermi-LAT collaboration, 2019) da  $a = 1.29 \pm 0.08$ , mientras que si se realiza sólo para las galaxias de alta SFR, la pendiente es  $a = 1.38 \pm 0.05$ . La predicción a alta SFR no coincide con la pendiente observada a un nivel de confianza de  $7.6 \sigma$ . A baja SFR la comparación es poco significativa, ya que solamente hay tres galaxias observadas.

## 5. Conclusión y trabajo futuro

El modelo de SWs es robusto y, si bien reproduce las observaciones de la correlación  $L_\gamma$ -SFR en orden de magnitud, la pendiente predicha no es consistente con los datos. Sin embargo, el modelo no puede descartarse completamente; una relación  $v_{\text{sh}} \propto \text{SFR}^{0.3-0.4}$  ajustaría

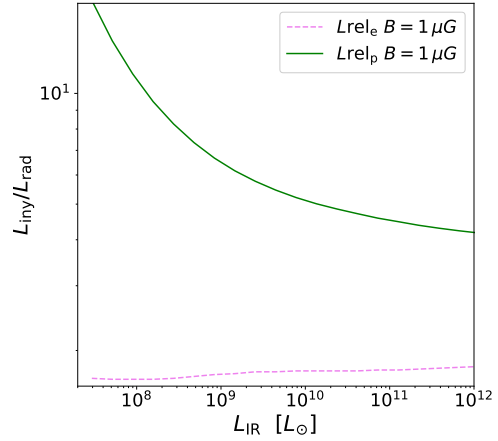


Figura 4: Razón entre la energía inyectada en CRs, y la radiada por protones (línea llena) y electrones (línea punteada).

la pendiente a alta SFR. Tal relación fue observada para la componente neutra y fría del viento (Weiner et al., 2009), pero no es claro que sea aplicable al RS de la componente ionizada caliente. Una muestra mayor de galaxias, y valores más precisos de  $L_\gamma$ , aportarían robustez a la conclusión.

La inclusión de más galaxias de baja SFR es crucial, ya que en ese régimen el modelo de SWs difiere de aquellos que proponen que la emisión  $\gamma$  se origina en el disco. Además, la muestra actual de galaxias podría no ser homogénea, y no es claro que todas presenten SWs, un aspecto que será abordado en trabajos futuros. Un estudio multifrecuencia podría aportar evidencias en este sentido. Otros factores a explorar son los efectos de las propiedades astrofísicas de las SFGs, entre ellas su edad y metalicidad. Es de esperar que ambas influyan en  $L_\gamma$ , debido a que afectan la tasa de supernovas.

La mejor comprensión del origen de la relación entre  $L_\gamma$  y la SFR, permitirá no solamente conocer los mecanismos de emisión de alta energía y de aceleración de CRs en las galaxias, sino también la inyección energética de las mismas sobre su entorno. Esto último es importante, particularmente si los resultados pueden extrapolarse al universo temprano, debido a que dicha inyección afecta la formación estelar cósmica y el estado termodinámico del medio (ionización, calentamiento).

*Agradecimientos:* Este trabajo fue financiado parcialmente por CONICET (PIP 2014-0265).

## Referencias

- Ackermann M., et al., 2012, ApJ, 755, 164
- Heesen V., et al., 2009, A&A, 494, 563
- Lacki B.C., Thompson T.A., 2013, ApJ, 762, 29
- Persic M., Rephaeli Y., 2010, MNRAS, 403, 1569
- Romero G.E., Müller A.L., Roth M., 2018, A&A, 616, A57
- Strickland D.K., Heckman T.M., 2009, ApJ, 697, 2030
- The Fermi-LAT collaboration, 2019, arXiv e-prints
- Weiner B.J., et al., 2009, ApJ, 692, 187