



Producción de neutrones en *jets* de microcuásares: Inyección de partículas relativistas en el medio circundante

G.J. Escobar¹, L.J. Pellizza¹ & G.E. Romero¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA, Argentina

Contacto / gescobar@iar.unlp.edu.ar

Resumen / La composición y el mecanismo de lanzamiento de los *jets* astrofísicos son problemas abiertos en el área de la astrofísica relativista, aunque no del todo independientes según los modelos existentes. Con el fin de estudiar su composición, en este trabajo introducimos la componente de neutrones relativistas, producidos en el *jet* mediante interacciones hadrónicas. Estos neutrones escapan del sistema, y como consecuencia de su decaimiento inyectan partículas relativistas secundarias en el medio circundante. Si bien estas partículas podrían proveer una contraparte observacional por medio de interacciones con los campos magnético, de materia y radiación del medio, los mecanismos principales considerados producen muy bajos valores de luminosidad. Como consecuencia, estas partículas secundarias pueden escapar del sistema en forma de rayos cósmicos, llevándose una fracción de la energía de la población de neutrones.

Abstract / The composition and launching mechanism of astrophysical *jets* are open problems in the relativistic astrophysics area, though not at all independent as comes up from the proposed launching models. To study the *jet* composition we introduce the relativistic neutron component, produced in the *jet* through hadronic interactions. These neutrons escape from the system and inject secondary relativistic particles in the nearby medium through their decay. Although these particles may account as an observable counterpart of the system as consequence of interactions with matter, radiation and magnetic fields in the medium, the main considered mechanisms produce very low luminosities. Therefore, these secondary particles may escape from the system as cosmic rays, carrying with them a fraction of the neutron population energy.

Keywords / radiation mechanisms: non-thermal — stars: jets

1. Introducción

Un microcuásar es un sistema binario de rayos X que presenta flujos colimados de materia y radiación denominados *jets* astrofísicos. La composición y lanzamiento de estos *jets* son aún un problema abierto en el área de la Astrofísica Relativista. Se pueden clasificar dos tipos de *jets* según su composición: los *jets* denominados leptónicos están compuestos por radiación electromagnética y pares electrón-positrón, mientras que aquellos denominados hadrónicos se componen de un plasma de electrones y protones, más una componente de partículas relativistas.

Un camino posible para estudiar la composición de los *jets* es modelar la distribución espectral de energía (SED) producto de la radiación de las partículas relativistas que componen el sistema. La componente de neutrones aún no ha sido estudiada en *jets* de microcuásares, si bien algunos trabajos la han introducido en la población de partículas de la corona (Vila et al., 2014), o en *jets* de núcleos galácticos activos (Atoyan & Dermer, 2003).

En este trabajo introducimos la componente de neutrones relativistas a través de interacciones hadrónicas en el *jet*, con el fin de obtener una contraparte observacional que dé cuenta de la composición del sistema.

El cuerpo del presente trabajo se organiza como si-

gue: en la Sec. 2. se introduce el modelo empleado para determinar las poblaciones de partículas en el *jet* y calcular la radiación por los mecanismos considerados relevantes. En la Sec. 3. se muestran los resultados de las simulaciones y finalmente en la Sec. 4. se discuten estos resultados y las perspectivas a futuro que se obtienen de ellos.

2. Modelo

Para introducir la población de neutrones en la componente relativista del *jet*, consideramos como fuentes las colisiones entre protones térmicos del plasma y protones relativistas, a través del canal $p + p \rightarrow p + n + \pi^+ + \dots$. Resulta un sistema de ecuaciones de transporte acopladas, para las tres poblaciones de partículas consideradas para el *jet* (electrones, protones, neutrones), dado por

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E_e} [b_e N_e] &= Q_e + \Lambda_{n \rightarrow} - \frac{N_e}{t_{\text{esc}}}, \\ \frac{\partial N_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E_p} [b_p N_p] &= Q_p + \Lambda_{n \rightarrow} - \Lambda_{pp \rightarrow n} - \frac{N_p}{t_{\text{esc}}}, \\ \frac{\partial N_n}{\partial t} &= \Lambda_{pp \rightarrow n} - \Lambda_{n \rightarrow} - \frac{N_n}{t_{\text{esc}}}, \end{aligned} \quad (1)$$

donde $N_i = N_i(E_i)$, $Q_i = Q_i(E_i)$ y $b_i = b_i(E_i)$ son la densidad espectral, la inyección y la tasa de pérdida de energía de la partícula i , respectivamente, con $i = e, p, n$

según corresponda. El último término del lado derecho de cada ecuación corresponde a las pérdidas en la población por el escape de las partículas de la región de interés, siendo ésta aquella en la que se producen las interacciones que darán lugar a producción de neutrones y procesos radiativos. Los términos restantes corresponden a procesos de creación o destrucción de partículas. El término $\Lambda_{pp \rightarrow n}$ corresponde a la tasa de producción de neutrones por medio del canal de interacción mencionado más arriba, mientras que el término $\Lambda_{n \rightarrow}$ corresponde a un sumidero de neutrones (o fuente de electrones y protones) debido su decaimiento, $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$.

Para modelar las regiones de emisión y la energética del sistema y sus poblaciones de partículas relativistas nos basamos en el modelo desarrollado por Romero & Vila (2008) para microcuásares galácticos. Los procesos radiativos considerados en nuestro modelo son radiación sincrotrón de electrones y protones relativistas con el campo magnético del *jet* y decaimiento de piones neutros producto de interacciones protón-protón. Las expresiones para las pérdidas y emisividades de estos procesos pueden encontrarse en Blumenthal & Gould (1970) y Begelman et al. (1990).

Una vez que los neutrones se producen en el *jet*, prácticamente la totalidad de estos escapa del sistema, puesto que no interactúan con el campo magnético que confina el plasma. Estos neutrones libres decaerán según una ley exponencial en la distancia, e inyectarán electrones y protones secundarios en el medio circundante. Estas partículas relativistas secundarias son susceptibles de interactuar con los campos de materia, de radiación y magnético del medio, y podrán producir nuevos episodios radiativos.

Aplicamos el modelo a un *jet* del microcuásar Cygnus X1. Algunos de los parámetros del sistema fueron tomados del modelo ajustado en el trabajo desarrollado por Pepe et al. (2015), otros parámetros fueron seleccionados en base a valores típicos para sistemas galácticos. En la Tabla 1 se muestran los valores de los parámetros utilizados para aplicar el modelo de *jet*, donde z_0 y z_f son las distancias inicial y final, respectivamente, que definen la región de interés en un *jet* cónico de semiapertura θ_{jet} , L_{jet} es la potencia del *jet*, de la que una fracción q_{rel} es transportada por las poblaciones de partículas relativistas y se distribuye entre protones y electrones según la relación $L_{rel} = L_p + L_e$, con $L_p = a L_e$. Finalmente p es el índice espectral de la inyección de partículas, tanto para protones como para electrones, $Q_i(E_i) = Q_{0,i} E^{-p} \exp(-E/E_{max})$.

Tabla 1: Valores de los parámetros utilizados en el modelo.

Símbolo	Valor
z_0	2.8×10^8 cm
z_f	8.7×10^{11} cm
θ_{jet}	2°
L_{jet}	1×10^{38} erg s $^{-1}$
q_{rel}	0.1
a	0.07
η	3×10^{-3}
p	2.0

3. Resultados

En la Fig. 1 se muestra la producción de neutrones por interacciones protón-protón (panel superior). La forma de tipo ley de potencias que presenta el espectro es consecuencia directa de aquella del espectro de protones relativistas primarios. En el panel inferior se muestra la energía inyectada en forma de partículas secundarias producto del decaimiento de neutrones, en función de la distancia a la fuente. Vemos que a distancias $\gtrsim 10^{16}$ cm prácticamente todos los neutrones han decaído inyectando energía en forma de protones y electrones secundarios.

Los protones y electrones secundarios interactuarán con los campos de materia, magnético y de radiación presentes en el medio. Para valores típicos del medio interestelar, calculamos los caminos libres medios de los procesos radiativos considerados relevantes; radiación sincrotrón para electrones e interacciones protón-protón para protones. En el primer caso, el camino libre medio es del orden de $10^2 - 10^3$ kpc, dependiendo de la energía de los electrones, mientras que para el segundo proceso obtenemos caminos libres medios del orden del Mpc. En cualquier caso, estos valores permiten observar que las partículas no radiarán una fracción importante de su energía en regiones cercanas a la fuente.

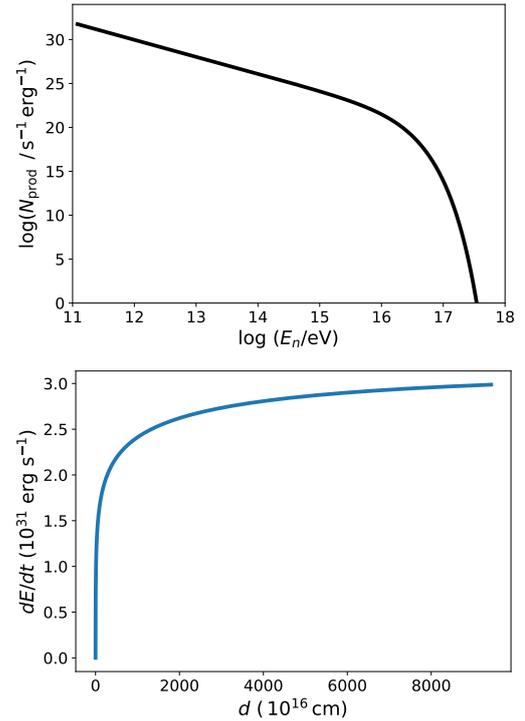


Figura 1: *Panel superior*: producción de neutrones relativistas dentro del *jet* mediante interacciones protón-protón. *Panel inferior*: inyección de partículas relativistas secundarias (electrones y protones) mediante el decaimiento de neutrones que escapan del *jet*, en función de la distancia al sistema.

Sin embargo, los resultados anteriores son una mera estimación de la distancia que han de recorrer estas

partículas, sin mayor especificación de su cinemática. Teniendo en cuenta la difusión que estas partículas sufren con las ondas de Alfvén que se generan en el plasma del medio interestelar, podemos encontrar la ecuación para la densidad de partículas una vez se alcanza el estado estacionario. Con este valor de densidad, mayor al esperado para un flujo de partículas sin difusión, calculamos el espectro de radiación sincrotrón de los electrones secundarios y lo comparamos con el espectro del *jet*. Este resultado se muestra en la Fig. 2

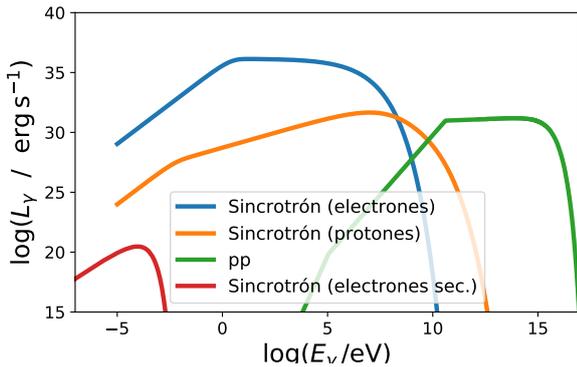


Figura 2: Distribución espectral de energía para el *jet* producto de los siguientes mecanismos: sincrotrón (azul para electrones, naranja para protones), decaimiento de piones neutros producto de interacciones protón-protón (verde), radiación sincrotrón de electrones secundarios inyectados en el medio circundante (magenta).

Observamos que la radiación emitida tiene un pico en una región del espectro en la que domina la emisión del *jet*. Resulta en este escenario que no podremos observar la emisión de la región alrededor del sistema, al menos con los observatorios de esta generación.

Vemos entonces que las partículas secundarias inyectadas por el decaimiento de neutrones no producen radiación electromagnética a longitudes de onda que permitan su observación, pero tampoco quedan confinadas en las regiones cercanas a la fuente formando un halo de partículas relativistas. Por lo tanto, la energía y el impulso que transportan ha de propagarse fuera de la región cercana al microcuásar.

4. Discusión y trabajo a futuro

Hemos introducido la componente de neutrones en las ecuaciones que gobiernan la población de partículas relativistas del *jet* modelado. Calculamos la tasa de pro-

ducción de éstos en estado estacionario dentro del *jet*, su escape y consecuente inyección de energía mediante su decaimiento en regiones alejadas de la fuente. Calculamos los valores representativos de caminos libres medios para procesos radiativos relevantes de las partículas secundarias inyectadas. Estos valores, acompañados de la emisión modelada para la radiación sincrotrón, son indicadores de que las partículas transportan energía hacia regiones lejanas al sistema, en forma de rayos cósmicos.

Esta fenomenología abre la posibilidad de tratar a los microcuásares como candidatos a fuentes de rayos cósmicos galácticos. Nos proponemos calcular la tasa de producción de rayos cósmicos y su espectro, una vez escapen de la región cercana al sistema. A continuación comparar estos valores con aquellos conocidos para los remanentes de supernova, tanto energética, espectral y temporalmente: los rayos cósmicos producidos por los microcuásares podrían presentar características distintivas en el espectro de energías respecto de aquellos producidos por remanentes de supernova. Por otro lado, los remanentes de supernova y los microcuásares ocurren a tasas distintas y por escalas temporales diferentes mientras la galaxia huésped evoluciona. Estas poblaciones de rayos cósmicos podrían tener diferentes características a distintas etapas evolutivas de la galaxia.

Por otro lado, actualmente el problema de reionización del Universo se encuentra abierto: aún no es posible explicar cómo se desarrolló el proceso a gran escala y cómo operaron las fuentes y la población de partículas ionizantes para distribuir la energía a lo largo de grandes distancias. El escape y decaimiento de neutrones propicia un mecanismo eficiente para depositar energía y momento en forma de partículas cargadas en regiones alejadas de la fuente. Estas partículas, o productos de ellas como radiación y partículas de siguientes generaciones, podrían actuar como agentes ionizantes a grandes distancias. Como trabajo a futuro nos proponemos explorar el impacto de este mecanismo en el problema de la reionización del Universo.

Referencias

- Atoyan A.M., Dermer C.D., 2003, *ApJ*, 586, 79
 Begelman M.C., Rudak B., Sikora M., 1990, *ApJ*, 362, 38
 Blumenthal G.R., Gould R.J., 1970, *Rev. Mod. Phys.*, 42, 237
 Pepe C., Vila G.S., Romero G.E., 2015, *A&A*, 584, A95
 Romero G.E., Vila G.S., 2008, *A&A*, 485, 623
 Vila G.S., Vieyro F.L., Romero G.E., 2014, *International Journal of Modern Physics Conference Series, International Journal of Modern Physics Conference Series*, vol. 28, 1460191