

Producción y propagación de neutrones en *jets* de *microcuasares*

G.J. Escobar¹, L.J. Pellizza¹, P. Kornecki¹, F.A. Fogantini¹, M.M. Reynoso¹, G.E. Romero¹

¹ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICBA, Argentina

Contacto / gje245@gmail.com

Resumen / Una línea de investigación usual para abordar el estudio de la naturaleza y composición de los *jets* consiste en estudiar la energética de las poblaciones de partículas relativistas presentes en los mismos, y la radiación electromagnética emitida por ellas. La componente de neutrones energéticos, originados *in situ* por medio de interacciones de protones relativistas con materia o radiación, no se ha estudiado en *microcuasares*. Estos neutrones, en parte por su decaimiento y en parte al interactuar con campos de materia y radiación, introducen fuentes para la producción de protones y electrones relativistas, redistribuyendo sus poblaciones a lo largo del *jet*. Al no interactuar con el campo de inducción magnética, los neutrones presentan una dinámica muy diferente a la de las partículas cargadas, pudiendo escapar más fácilmente de la región de aceleración y llevándose una fracción de la energía depositada en ellos previamente. En este trabajo introducimos la componente de neutrones relativistas en el estudio de la energética de partículas relativistas en *jets* de *microcuasares*. Modelamos las distribuciones utilizando un modelo *One-Zone* para resolver las ecuaciones de transporte correspondientes.

Abstract / A usual investigation line to address the study of jets nature and composition is to determine the energetics of the relativistic particles populations which are present in the jet, and the electromagnetic radiation emitted by them. The neutron component, originated *in situ* through interactions of relativistic protons with matter or radiation, has not been studied in microquasars. The neutrons, when decaying or interacting with matter or radiation fields, introduce new relativistic electron and proton sources, distributing the latter populations along the jet. Since neutrons do not interact with magnetic fields, their dynamics are distinct to that of charged particles. This allows neutrons to escape from the acceleration region easier than other particles, taking an energy fraction away of the system. In this work we introduce the relativistic neutron component in the study of energetics of relativistic particles of microquasar jets. We model the spectral energy distributions with a *One-Zone* approximation to solve the appropriate transport equations.

Keywords / X-rays: binaries — radiation mechanisms: non-thermal — relativistic processes — stars: jets

1. Introducción

La composición de los *jets* es un problema abierto en el área de la Astrofísica Relativista, así como su mecanismo de lanzamiento. En general, se distinguen dos grupos de *jets*, clasificados según su composición: los *jets leptónicos* están compuestos principalmente por radiación electromagnética y pares electrón-positrón, mientras que los *jets hadrónicos* son un plasma de protones y electrones térmicos, con una componente relativista (Romero & Vila, 2014). Los neutrones pueden producirse solo en estos últimos, por lo que el estudio esta componente podría ayudar a identificar *jets* hadrónicos, mediante evidencias observacionales distintivas predichas por los modelos. Además, las interacciones de neutrones con otros campos de materia y sucesivos decaimientos puede producir neutrinos, agregando un observable de diferente naturaleza que la radiación electromagnética. En este trabajo obtuvimos las distribuciones espectrales de energía y las densidades de las poblaciones de partículas relativistas al introducir la componente neutrónica, aún no estudiada en *jets* de *microcuasares*.

En la Sec. 2. describimos el modelo de *jet* utilizado para calcular las distribuciones espectrales de energía.

Los métodos numéricos empleados para resolver las ecuaciones de transporte correspondientes se describen en la Sec. 3.. Finalmente, se muestran y discuten los resultados en la Sec. 4..

2. Modelo

Para estudiar los efectos de una componente de neutrones, en la ecuación de transporte que gobierna la energética de las partículas debemos acoplar las respectivas fuentes y sumideros que estos introducen en las distintas poblaciones (un esquema similar se encuentra en Atoyan & Dermer 2003, para interacciones protón-fotón). Resulta así, un sistema de ecuaciones de transporte acopladas para las partículas de interés. Si tenemos en cuenta electrones, protones y neutrones, las ecuaciones de transporte resultan:

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

Tabla 1: Parámetros del modelo de jet.

Parámetro	Valor
Potencia del jet	1×10^{38} erg s ⁻¹
Distancia a la base de la región	1×10^8 cm
Distancia al fin de la región	5×10^8 cm
Factor de Lorentz del jet	1.5
Eficiencia de aceleración	0.1
Índice espectral de la inyección	2.2

donde, en todos los casos, los subíndices e , p y n corresponden a electrones, protones y neutrones, respectivamente. Las distintas cantidades dependen de la energía de la partícula correspondiente. Así, las tasas de pérdida de energía están dadas por $\left|\frac{dE}{dt}\right|_i = b_i = b_i(E_i)$, las densidades espectrales de partículas por $N_i = N_i(E_i)$, y las fuentes de partículas inyectadas en el jet con $Q_j = Q_j(E_j)$, siendo $i = e, p, n$ y $j = e, p$. Representamos a estas fuentes como una ley de potencias en la energía: $Q_{\{e,p\}}(E_{\{e,p\}}) = Q_{0\{e,p\}} E^{\alpha_{\{e,p\}}}$, donde $\alpha_{\{e,p\}}$ es el índice espectral de la distribución. Los términos $\Lambda_{n \rightarrow e}$ y $\Lambda_{n \rightarrow p}$ corresponden a la producción de electrones y de protones, respectivamente, debido al decaimiento de los neutrones relativistas (por unidad de tiempo y para un intervalo de energía del neutrón entre E_n y $E_n + dE_n$), mientras que $\Lambda_{pp \rightarrow n}$ corresponde a la producción de neutrones producto de la interacción $p+p \rightarrow p+n+\pi^++\dots$ y $\Lambda_{n \rightarrow \{e,p\}}$ al sumidero de neutrones debido al decaimiento $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$.

El modelo de jet en este trabajo se basa en el desarrollado por Romero & Vila (2008) para *microcuasares* galácticos. En este modelo se supone que los jets están poblados tanto por electrones como por protones relativistas. La región de aceleración se divide en 10 secciones equiespaciadas en distancia. Los parámetros del modelo utilizados se muestran en la Tabla 1. Los procesos radiativos que hemos considerado para obtener las distribuciones espectrales de energía son radiación sincrotrón con el campo de inducción magnética del jet y decaimiento de piones neutros producto de interacciones protón-protón. Además, consideramos las pérdidas de energía debidas al escape de partículas de la región de aceleración y el decaimiento de las mismas, así como la variación de energía por pérdidas adiabáticas.

3. Método numérico

La resolución numérica de las ecuaciones de transporte se llevó a cabo dividiendo la región de interés (aquella en la que actúan los mecanismos de aceleración y enfriamiento de partículas relativistas) en varias secciones, y resolviendo dichas ecuaciones en cada una de ellas en la aproximación *One-Zone*. Esto permite introducir al modelo dependencias funcionales con la posición de las distintas cantidades en juego, como el campo magnético del jet, la inyección de partículas relativistas o la densidad de partículas térmicas.

Se utilizó un método de Euler explícito para la integración temporal, partiendo de una densidad nula para todas las partículas, e integrando hasta obtener una distribución estacionaria. Las derivadas respecto de la

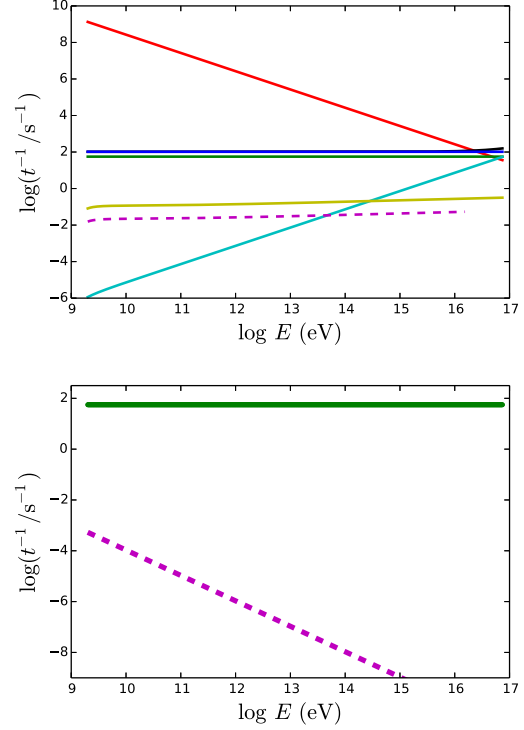


Figura 1: *Panel superior*: tasas de pérdidas y aceleración de protones. Se muestran las pérdidas por sincrotrón (celeste), por interacción protón-protón (amarillo), por conversión de protones en neutrones (magenta), la tasa de escape (verde), y las pérdidas por advección (azul), que dominan en casi todo el rango de interés. *Panel inferior*: tasas de decaimiento (magenta) y de escape (verde) de neutrones.

energía de las mismas se calcularon mediante diferencias centradas. Las integrales requeridas por los términos de fuentes se calcularon por el método de los trapecios. Se eligió usar métodos sencillos para poder escribir un código numérico modular, que permitiera incluir cualquier proceso de enfriamiento, pérdida o fuente arbitrario.

4. Resultados y discusión

Las tasas de pérdidas y aceleración obtenidas para protones se muestran en la Fig. 1. La energía máxima que alcanzan estas partículas es del orden de 10^{16} eV. En la Fig. 2 se muestran las densidades espectrales de protones y neutrones relativistas, en estado estacionario. Se observa que las densidades de neutrones son 4 – 5 órdenes de magnitud menores a las de protones, para cada sección de la región de interés.

Las distribuciones espectrales de energía del jet se muestran en la Fig. 3. Hasta energías del orden de 10^{14} eV la SED está dominada por radiación sincrotrón, mientras que a partir de este valor domina la radiación producto de colisiones protón-protón.

Los neutrones que escapan de la región de aceleración decaerán luego de un tiempo $t_d \approx (E_n/m_n c^2)t_0$, donde $t_0 \approx 887.5$ s es el tiempo de decaimiento característico de un neutrón en reposo. Estos, al decaer, depositan protones energéticos (con 99% de la energía del

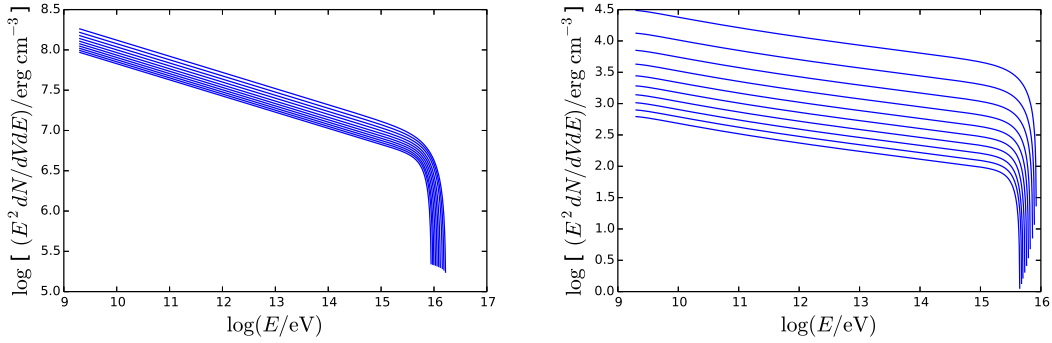


Figura 2: *Izquierda*: densidad espectral de protones relativistas. *Derecha*: densidad espectral de neutrones. En ambos gráficos se muestra una curva para cada sección del modelo considerada (10 secciones en total). Estos se obtuvieron una vez el sistema alcanzó el régimen estacionario.

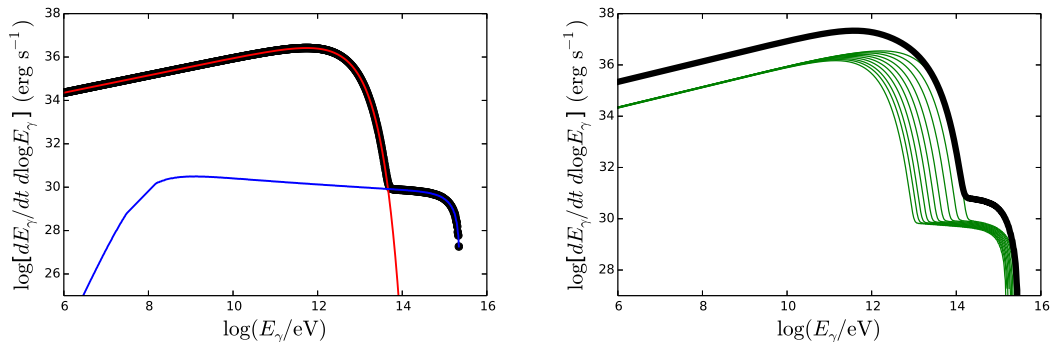


Figura 3: *Izquierda*: distribución espectral de energía para una sección del *jet*. Se muestran las contribuciones por sincrotrón (rojo) y protón-protón (azul), junto al total de la sección (negro). *Derecha*: Distribución espectral de energía por sección (curvas verdes, 10 en total) y SED total del sistema (negro).

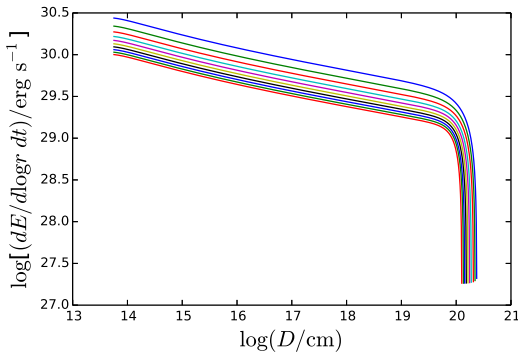


Figura 4: Potencia por unidad logarítmica de distancia inyectada por protones producto de decaimiento de los neutrones que escapan del *jet*, en función de la distancia a la fuente, para cada sección de la región de aceleración.

neutrón, aproximadamente) que pueden interactuar con el medio externo al *jet*, produciendo entonces nuevos episodios radiativos que caracterizarán la presencia de neutrones en el sistema. En la Fig. 4 se muestran gráficos de la energía inyectada por unidad de tiempo y por década de distancia a la fuente, en forma de protones depositados por los neutrones relativistas, versus la distancia a la región de aceleración, para cada sección.

5. Conclusiones

Desarrollamos modelos para la componente de neutrones producidos por interacciones protón-protón en un *jet* de *microquasar* típico. Nuestros resultados indican que la mayor parte de los neutrones escapan, produciendo una densidad dentro del *jet* 4 – 5 órdenes de magnitud menor que la de protones. Los neutrones que escapan decaen a distancias en el rango 10^{13-20} cm. Esto produce una inyección de protones energéticos al medio circundante (además de la de protones que escapan del *jet*) que podría resultar en consecuencias observables, si el medio contiene un campo de protones térmicos que puedan enfriar a los primeros. La energética de esta población de protones sugiere que el proceso podría generar emisión gamma con luminosidades máximas unos 3 – 4 órdenes de magnitud por debajo de la emisión del *jet*. Estas luminosidades podrían detectarse con próximas generaciones de instrumentos de detección en rayos gamma.

Referencias

- Atoyan A. M., Dermer C. D., 2003, ApJ, 586, 79
 Romero G. E., Vila G. S., 2008, A&A, 485, 623
 Romero G. E., Vila G. S., eds., 2014, Introduction to Black Hole Astrophysics, Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag, Vol. 876