

¡Cygnus X-1 sigue dando que hablar!

Lic. Carolina Pepe

Allá por los años 60, los astrónomos no contábamos con telescopios espaciales suficientemente potentes como para detectar la emisión en rayos X proveniente del espacio. En su lugar, debían utilizarse cohetes que sólo conseguían estar por encima de nuestra atmósfera por algunos minutos, lo cual es necesario pues la atmósfera absorbe gran parte (sino toda) la emisión en rayos X que llega desde el espacio, volviendo luego a la superficie Terrestre. En una de estas misiones fue que identificaron por primera vez a la binaria de rayos X llamada Cygnus X-1 [1]. Más tarde, en diciembre de 1970, se lanzó al espacio el primer satélite cuyo propósito era investigar la emisión en rayos X: Uhuru (que en Swahili significa “libertad”). Este satélite confirmó la existencia de la fuente Cygnus X-1 y midió la posición de la fuente junto a otras características interesantes de la misma [2].

Las binarias de rayos X constan de una estrella donante y un objeto compacto, el cual acreta el material entregado por la primera. Llamamos proceso de acreción a la *ingesta* del material que llega a las inmediaciones del objeto compacto que puede ser o bien una estrella de neutrones o bien un agujero negro. Cygnus X-1 es el candidato con más alta probabilidad de contener un agujero negro, dentro de las binarias de rayos X de nuestra Galaxia. Un agujero negro es, a grandes rasgos, un objeto para el cual la intensidad del campo gravitatorio que genera es tan alta que ni la luz puede salir de él (para más detalles ver este [post](#)). Cuánto más grande es el cociente M/R (donde M es la masa del objeto y R su radio), más compacto es el objeto en cuestión. Esto los hace unos de los objetos más fascinantes que pueden encontrarse en el espacio. Cómo es posible que Cygnus X-1 haya sido detectada en rayos X y contenga un agujero negro, si estos últimos no permiten siquiera que escape la luz? En otras palabras, cómo detectamos un agujero negro?

Por definición, los agujeros negros parecerían indetectables. Sin embargo, sus efectos sobre el entorno son imponentes y a partir de ellos podemos inferir la presencia de estos objetos. Ahora bien, qué tipo de información nos llega desde el espacio? En qué idioma nos comunicamos con las estrellas y todos los objetos del cielo? Si bien existen varios tipos de “portadores de información” (ver este [post](#) sobre *rayos cósmicos*), la *radiación electromagnética* (o, simplemente, radiación) es nuestro principal canal de comunicación con el espacio. La luz es radiación. Las ondas de radio, las de telecomunicaciones, las del microondas... todo eso también es radiación! Por qué no vemos *toda* la radiación? Nuestros ojos no están preparados para ello, solo vemos lo que se llama *luz visible*; la diferencia entre todos los tipos de radiación mencionadas es la energía que lleva esa radiación. Para ordenar las cosas, los científicos hemos nombrado de distinta manera a la radiación, según su energía: radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X (como los de Cygnus X-1!) y rayos gamma. En esta lista están ordenados de menor a mayor energía. A todo este “abanico” de energías posibles de la radiación se lo llama *espectro electromagnético*. Como dije antes, nuestros ojos no pueden ver la radiación X de Cygnus X-1 (ni de ningún otro objeto!) pero sí pueden hacerlo telescopios preparados especialmente para ello, como *Uhuru*. Así, entonces, nos llega la información.

En el caso de Cygnus X-1, la estrella compañera es una estrella masiva con intensos vientos, siendo este material el acretado por el objeto compacto. Este material se calienta durante el proceso de acreción y, dado que la materia acretada posee momento angular (i.e., está girando en torno al agujero negro), se forma un *disco de acreción* que alcanza temperaturas de hasta 10^7 K. Como todos los cuerpos cuya temperatura se encuentra por encima del *cero absoluto de temperatura* emiten radiación, este disco, con sus temperaturas tan altas, es uno de los responsables de lo que se llama *emisión térmica* (o *radiación térmica*) de la binaria de rayos X. También existe una nube de gas caliente y menos densa llamada *corona*, consecuencia de la expansión de las zonas internas del disco de acreción debido a las altas temperaturas que allí se alcanzan. La corona, igual que el disco,

emite en rayos X. En la Fig. 1 se muestra la relación entre la temperatura y el rango del espectro electromagnético en el cual emite un cuerpo a dicha temperatura. Sin embargo, no se le puede atribuir al disco la emisión de rayos X más energéticos (hasta los MeV) [3] detectada en Cygnus X-1, pues esto implicaría temperaturas todavía más altas que la observada. Así, la presencia de tal emisión e incluso algunas detecciones todavía más energéticas (en rayos gamma) [4] revelaron que estos objetos son capaces de acelerar partículas a velocidades muy altas, cercanas a la de la luz. Estas son las responsables de lo que llamamos emisión *no térmica*. Además, se descubrió la presencia de una intensa emisión colimada, en radio, a la que se llama *jet* [5]. Éstos son eyecciones del material entregado por la estrella que no llega a ser “tragado” por el agujero negro sino que son lanzados con un ángulo de apertura muy pequeño, alcanzando distancias unas 100 veces más grandes que la distancia de separación entre el objeto compacto y la estrella donante. Aquellas binarias de rayos X que presentan jets reciben el nombre de *microcuásares* (en la Fig. 2 muestro un esquema de los elementos de un microcuásar) . Este llamativo nombre se debe a la similitud que presentan estos objetos con los *cuásares*. Éstos, llamados así por la abreviatura de su nombre en inglés *quasi-stellar radio sources* (fuentes de radio cuasi-estelares) son núcleos de galaxias donde existe un agujero negro supermasivo (que puede tener de millones a miles de millones de veces la masa de nuestro Sol!) que acreta materia del medio interestelar que lo rodea y es capaz de lanzar *jets* que recorren distancias enormes (millones de años luz!). Resulta que los microcuásares parecerían ser objetos a escala de los cuásares. Cabe entonces preguntarse: si se ha observado en Cygnus X-1, y otros microcuásares, emisión no térmica, entonces... cuál es el mecanismo de emisión?

Cuando las partículas, electrones y protones, que forman el *jet* alcanzan velocidades relativistas (i.e., cercanas a la velocidad de la luz), su energía es suficiente para que distintos procesos ocurran. Al día de hoy la presencia de electrones en los jets de microcuásares está aceptada mientras que la presencia de protones sólo ha sido confirmada en dos microcuásares (SS 433 [6] y 4U 1630C47 [7]) y este es un tema de discusión actual. Por ejemplo, si la energía de los fotones (un fondo de fotones posible es el producido por la estrella compañera) es mayor que cierto umbral entonces pueden crearse otro tipo de partícula subatómica, *piones*, a partir de la interacción de estos fotones con protones de alta energía. Este proceso es relevante para la emisión de radiación de alta energía (X y gamma) pues el tiempo que transcurre hasta la *desintegración* (también llamada *decaimiento*) de los piones es corto y, al hacerlo, emiten fotones energéticos. Este es solo un ejemplo de todo un abanico de procesos relativistas que pueden ocurrir. A las partículas que conforman la distribución inicial de partículas energéticas las llamamos *partículas primarias*, mientras que aquellas que son el resultado de la interacción de estas partículas primarias con fondos de radiación o materia, las llamamos *partículas secundarias* . En algunos casos, como el proceso mencionado previamente, las vidas medias de las partículas secundarias son cortas y su posterior decaimiento produce fotones, generando así la radiación asociada al proceso (de aquí el nombre de *procesos radiativos*). En otros casos tales como el proceso Compton inverso, en el que un fotón simplemente choca con un electrón energético de modo tal que el último le cede energía al primero, la radiación no es consecuencia de ningún decaimiento. Varios procesos similares se llevan a cabo en el jet e, incluso, se entrelazan: la radiación resultante de cierto proceso es *reprocesada* al interactuar con otras partículas (ya sean primeras o secundarias) dando lugar al espectro radiativo final. Este es un problema complejo, todavía vigente al día de hoy. Como dije anteriormente, todavía no existe consenso sobre la composición de los jet (si tiene electrones y protones o solo los primeros) y se contrastan los resultados de los dos tipos de modelos (con y sin protones) con las observaciones, de manera de decidir qué escenario es favorecido [8].

Es interesante notar que los microcuásares no emiten *jets* de manera permanente: el estado *low-hard* es caracterizado por la presencia de jets, dominado por la emisión no térmica, mientras que en el estado *high-soft* no hay jets y la emisión térmica domina el espectro de la fuente. También existe un estado de transición entre dichos estados llamado *intermediate*. En el caso de Cygnus X-1, ha sido

observada en todos sus estados, aunque la mayor parte del tiempo se encuentra en el estado low-hard. El proceso físico que da lugar a la formación de jets es todavía un problema abierto, aunque existe cierto consenso sobre el protagonismo del campo magnético que se genera en las cercanías del agujero negro [9]. Del mismo modo, no está del todo entendido el mecanismo que mantiene colimado al jet en distancias tan grandes. Sin embargo, existe cierto acuerdo sobre la necesidad de un medio externo que confine al jet. El estudio de los procesos de formación y colimación de *jets* ha avanzado significativamente en los últimos años gracias a trabajos numéricos que permiten simular el comportamiento dinámico del jet [10]. Se ha modelado, en particular, la interacción del *jet* con el medio que lo rodea: el medio circundante es perturbado por el abrupto y energético paso del *jet*, y las partículas que lo conforman pueden ser aceleradas y calentadas, de modo de emitir radiación en rayos X. Esta radiación puede, entonces, interactuar con los electrones (y tal vez protones) relativistas que conforman al *jet*, entrelazando así los procesos dinámicos con los radiativos. Así, el estudio completo y general de la emisión de radiación electromagnética de los *jets* es un área compleja que en los últimos años ha empezado a cobrar más relevancia gracias a las herramientas computacionales disponibles. En el caso de Cygnus X-1 se ha detectado una región “brillante”, lejos de la binaria, producto del frenado del *jet* a causa del material interestelar que lo rodea (Fig. 3).

El estudio de *jets* relativistas es investigado por numerosos científicos en distintas partes del mundo. En particular en nuestro instituto, se llevan a cabo tanto estudios numéricos como observacionales. Cygnus X-1 ha sido blanco de varios de dichos trabajos. En los últimos años, con la puesta en marcha de telescopios como *FERMI-LAT* (*Fermi Large Area Telescope*) o *MAGIC* (*Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope*; ver este [post](#) por una explicación detallada de radiación Cherenkov) hemos obtenido observaciones de esta fuente en muy altas energías por primera vez! Se ha hecho mucho trabajo y queda otro tanto por hacer, pues, después de 51 años Cygnus X-1... sigue dando que hablar!

Referencias:

- [1] Bowyer, S. et al., 1965, *Science* 147, 394
- [2] Oda, M. et al., 1999, *ApJ*, 166, L1–L7
- [3] Miller, J. M. et al., 2005, *ApJ*, 620, 398
- [4] Malyshev, D., Zdziarski, A. A., & Chernyakova, M. 2013, *MNRAS*, 434, 2380
- [5] Stirling, A. M., Spencer, R. E., de la Force, C. J., et al. 2001, *MNRAS*, 327, 1273
- [6] Migliari, S., Fender, R., & Méndez, M. 2002, *Science*, 297, 1673
- [7] Díaz Trigo, M., Miller-Jones, J. C. A., Migliari, S., Broderick, J.W., & Tzioumis, T. 2013, *Nature*, 504, 260
- [8] Vila, G. S., Romero, G. E., & Casco, N. A. 2012, *A&A*, 538, A97
- [9] Beskin V. S. 2010, *Physics Uspekhi*, 53, 12, 1199-1233. Disponible en inglés en arXiv: 1103.3375.
- [10] Perucho, M.; Bosch-Ramon, V., 2012, *A&A*, 539, 57

Figuras:

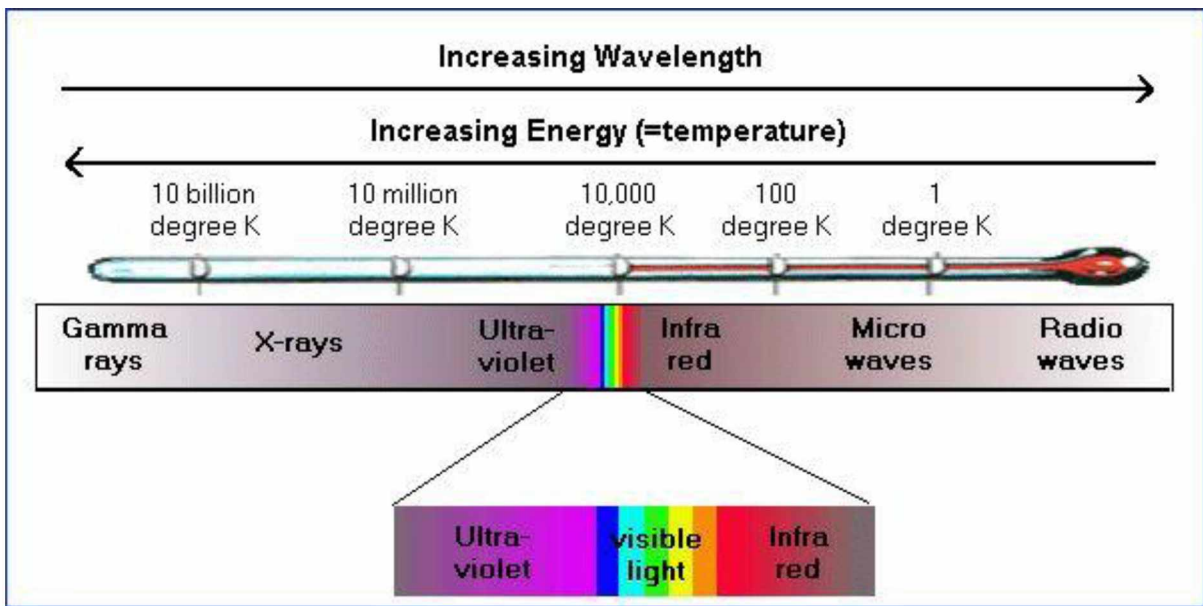


Fig. 1 : Relación entre la temperatura de un cuerpo y la energía que emite.

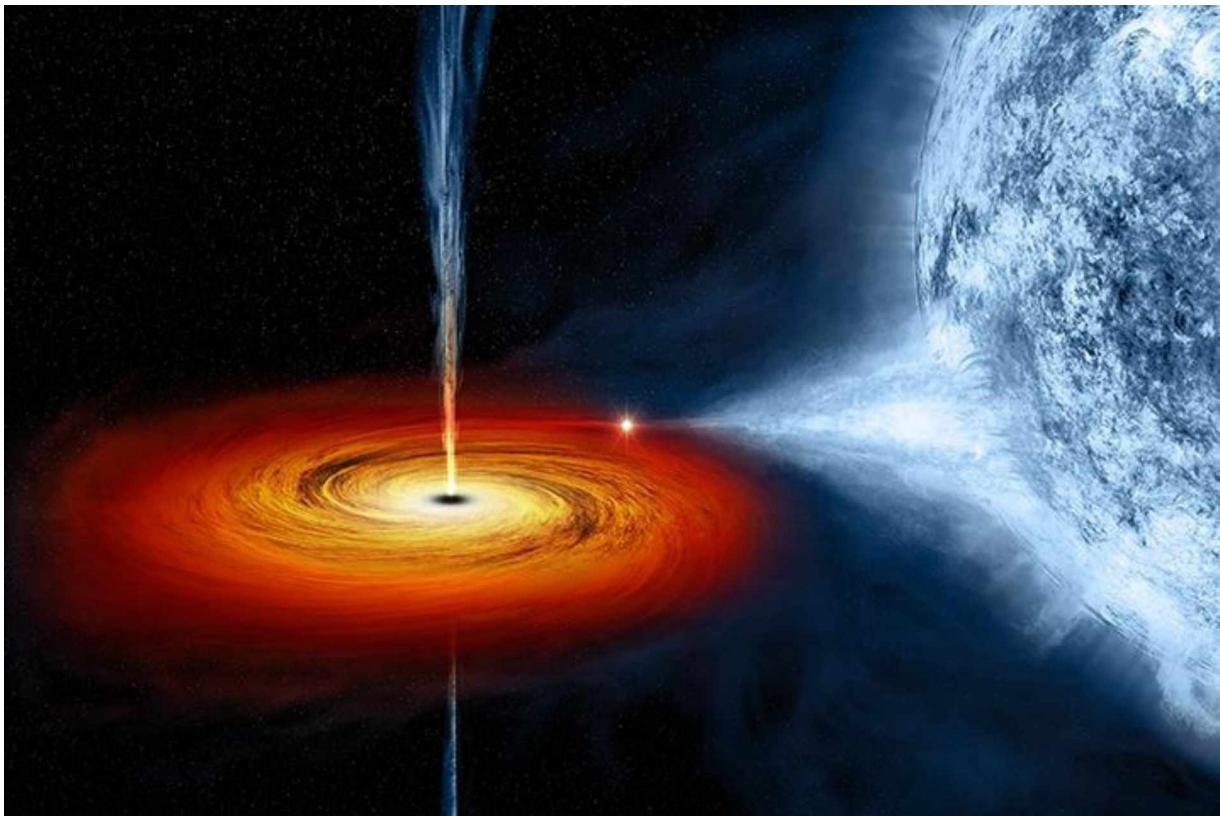


Fig. 2 : Representación artística de Cygnus X-1. Puede observarse el *jet*, el disco de acreción y la estrella compañera.

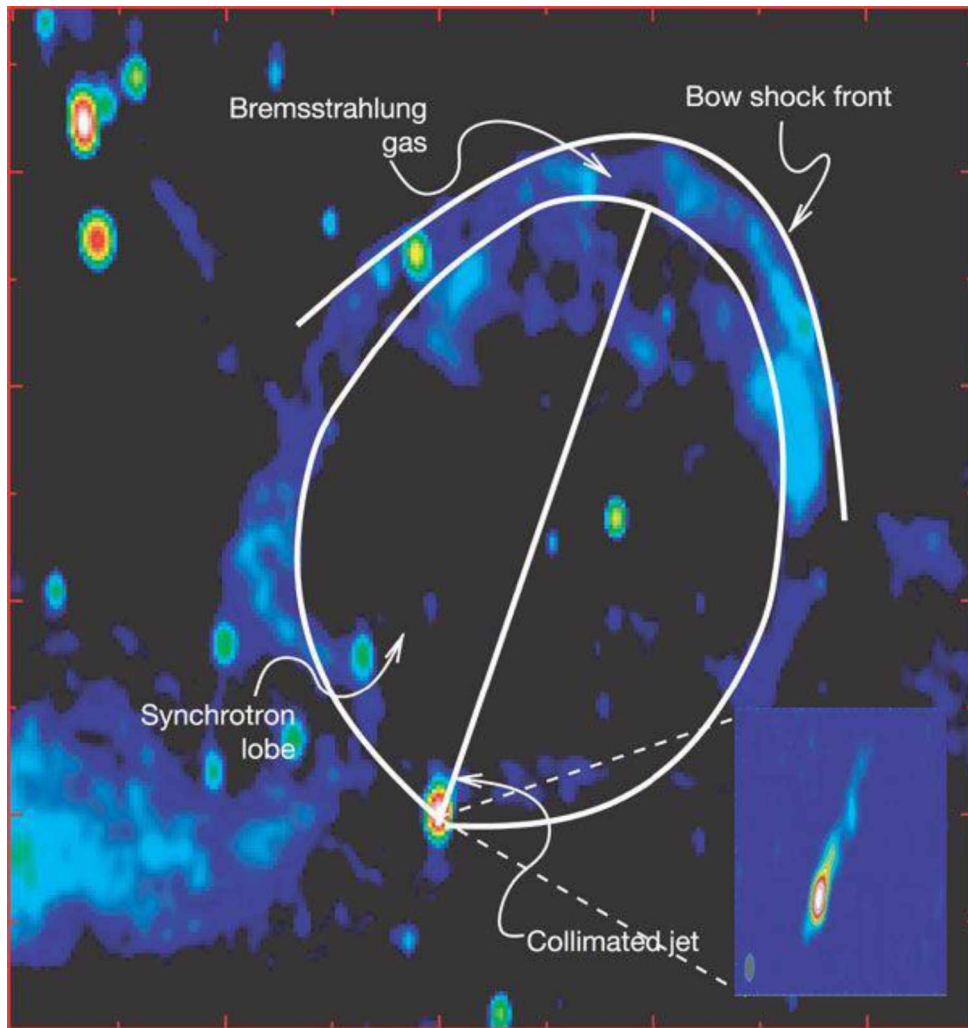


Fig. 3 : Imagen en radio de la *nebulosa* que rodea a Cygnus X-1. La región brillante en forma de arco es producto de la interacción del *jet* con el medio circundante. En la parte inferior se muestra la región donde el *jet* se encuentra colimado.