

Microcuasares: fuentes de radiación de alta energía en nuestra galaxia

Durante una parte de su vida la fuente de energía de las estrellas es la fusión nuclear. Las regiones centrales de las estrellas son tan densas y calientes que los núcleos atómicos que componen el material estelar pueden fusionarse para dar núcleos más pesados. Este proceso libera una gran cantidad de energía, calentando el gas hasta temperaturas de millones de grados. La presión que ejerce este gas caliente evita que la estrella colapse debido a su propia gravedad.

En una primera etapa el combustible nuclear es el hidrógeno, el elemento más liviano de la Tabla Periódica: dos núcleos de hidrógeno se fusionan para dar un núcleo de helio, el siguiente elemento más pesado. Cuando todo el hidrógeno se ha consumido comienza la fusión del helio para dar carbono, oxígeno y otros elementos pesados. A medida que la estrella evoluciona a través de las distintas etapas de combustión, dependiendo principalmente del valor su masa, pueden ocurrirle distintos fenómenos. En particular las estrellas pierden masa por medio de fuertes vientos (como lo hace el Sol a través del viento solar), e incluso en algunos casos pueden eyectar completamente sus capas externas en forma violenta.

El proceso de fusión en el núcleo continúa hasta que este queda compuesto principalmente por hierro. Dada su particular estructura, cuando dos núcleos de hierro se fusionan no se libera energía, sino que por el contrario es necesario entregarles energía para que fusionen. La estrella se ha quedado entonces sin combustible y comienza a colapsar bajo el efecto de su propia gravedad.

La evolución posterior de la estrella depende de la masa que reste en el núcleo. Si la masa es menor a aproximadamente 1.4 veces la masa del Sol⁽¹⁾ (M_{Sol}) la estrella es capaz de detener su colapso y se forma una *enana blanca*. Las enanas blanca son estrellas “muertas”, que se han quedado sin fuentes de energía y se apagan lentamente a medida que el gas se va enfriando. Las enanas blancas tienen radios característicos de unos 7000 km (similares al radio de la Tierra) y la densidad en su interior es muy alta, típicamente de 10^6 g/cm^3 (una tonelada por cm^3). Debido a que la densidad es tan alta la materia no se comporta siguiendo las leyes de la Termodinámica clásica, sino que se rige por las leyes de la Mecánica Cuántica.

Si la masa del núcleo remanente es mayor a 1.4 M_{Sol} pero menor que aproximadamente 3 M_{Sol} , la estrella es aún capaz de detener su colapso, pero en lugar de una enana blanca termina su vida como una *estrella de neutrones*. Las estrellas de neutrones son aún más compactas que las enanas blancas, con radios característicos de unos 10 km y densidades de hasta 10^{15} g/cm^3 . Una variedad de fenómenos complejos ocurren alrededor de estos objetos. Los sistemas conocidos como *púlsares* son estrellas de neutrones con campos magnéticos muy fuertes.

Cuando la masa remanente en el núcleo estelar es mayor que el límite máximo para que se forme una estrella de neutrones, la estrella no es capaz de detener su colapso y se contrae hasta que se forma un *agujero negro*. Un agujero negro es una región del espacio (estrictamente del *espacio-tiempo*) limitada por una superficie conocida como *horizonte de eventos*.⁽²⁾ El horizonte de eventos tiene la particularidad de que una vez que se atraviesa no se puede volver a salir. Nada que cruza el horizonte de eventos, ni siquiera la luz, puede volver a escapar, y cae inevitablemente hacia el centro del agujero

negro. La existencia de los agujeros negros es predicha por las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General formulada por Albert Einstein.

No es posible observar un agujero negro directamente, así que su presencia debe inferirse indirectamente por las perturbaciones que generan en la región que los rodea. Existe fuerte evidencia de que existen en el Universo agujeros negros con masas desde algunas veces la masa del Sol, hasta millones y miles de millones de masa solares. Estos agujeros negros supermasivos ocupan los centros de muchas galaxias, incluyendo la nuestra, donde existe un agujero negro de unos 4 millones de masas solares. En lo que sigue nos ocuparemos de lo que puede ocurrir en el entorno de los agujeros negros de algunas masas solares, de los que se cree hay un gran número en nuestra galaxia.

Los agujeros negros de masa solar y las estrellas de neutrones no siempre están aislados: pueden formar sistemas binarios junto con una estrella compañera ordinaria.⁽³⁾ En estos sistemas una parte de la materia perdida por la estrella (ya sea en forma de vientos, o por algún otro mecanismo) cae hacia el objeto compacto (la estrella de neutrones o el agujero negro) a causa de la intensa atracción gravitatoria que este ejerce. Este proceso se conoce como *acreción*. El gas se calienta a medida que es acretado y comienza a emitir radiación electromagnética. Esta radiación es muy energética y ocupa típicamente la banda de los rayos X,⁽⁴⁾ por lo que estos sistemas reciben el nombre de *binarias de rayos X*. Hay más de 400 binarias de rayos X conocidas en nuestra galaxia (ver Figura 1), y también se han identificado algunas en galaxias vecinas.



Figura 1. Imagen en rayos X del centro de nuestra galaxia obtenida con el satélite *Chandra*. Los puntos pequeños son en su mayoría binarias de rayos X. El área blanca brillante en el centro de la imagen es el centro galáctico, que alberga un agujero negro supermasivo. Imagen disponible on-line en http://www-xray.ast.cam.ac.uk/xray_introduction/Blackholebinary.html.

El proceso de acreción de materia es complejo, formándose en realidad un sistema con varias componentes. La Figura 2 muestra una representación artística de una binaria de rayos X.

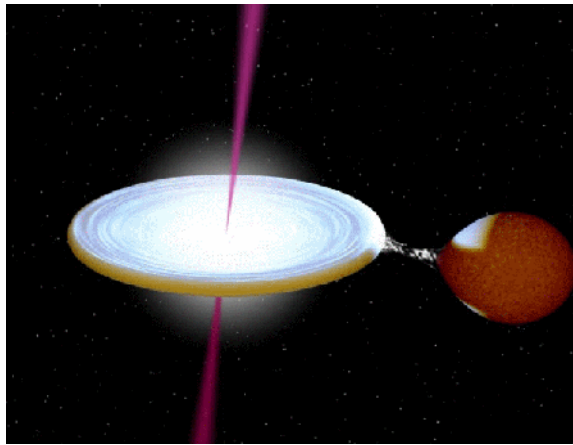


Figura 2. Representación artística de un microcuasar. Se muestran las componentes más importantes del sistema: la estrella compañera, el disco de acreción, la corona y los *jets*. El objeto compacto (un agujero negro o una estrella de neutrones) se ubica en el centro del disco de acreción. Este esquema fue realizado con el programa “BinSim” desarrollado por Rob Hynes, disponible on-line en <http://www.phys.lsu.edu/~rih/binsim/>.

Como el objeto compacto está siempre en rotación la materia no cae radialmente hacia él, sino que lo hace más lentamente y siguiendo una trayectoria de tipo espiral. Se forma entonces un disco alrededor del objeto central, conocido como *disco de acreción*. La materia en la parte más interna del disco de acreción está muy caliente, y puede a su vez “inflarse” formando una nube de gas caliente y menos denso llamada *corona*. Tanto la corona y el disco de acreción emiten rayos X. Finalmente, es posible que una fracción de la materia en acreción no sea tragada por el objeto compacto, si no que sea expulsada del sistema en forma de dos chorros colimados (con un ángulo de apertura pequeño) de partículas o *jets*. A las binarias de rayos X que presentan jets se las denomina *microcuasares*.

Los microcuasares deben su nombre a que comparten muchas características con los *cuasares*, fuentes extragalácticas conocidas con anterioridad que también presentan eyección de jets. Los cuasares (llamados así por la abreviatura de su nombre completo en inglés, *quasi-stellar radio sources*, fuentes de radio cuasi-estelares) son núcleos de galaxias donde existe un agujero negro supermasivo, que acreta materia del medio interestelar y es capaz de lanzar jets que se propagan por distancias de millones de años luz. Los cuasares pertenecen a un tipo más general de núcleos galácticos, los llamados *núcleos activos de galaxias* (AGN, Active Galactic Nuclei). Los microcuasares parecen ser entonces versiones en pequeña escala de los cuasares. Una comparación entre ambos tipos de fuentes, destacando sus analogías, se muestra en el esquema de la Figura 3.

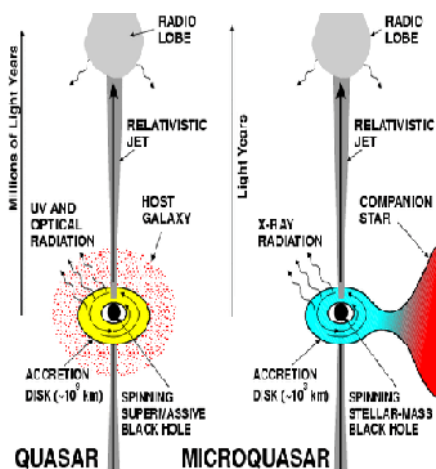


Figura 3. Comparación entre un cuasar y un microcuasar. Ambos sistemas comparten (con diferentes escalas de longitud, masa y tiempo) ciertas características, como un objeto central acretante, un disco de acreción y jets. Los procesos físicos básicos que operan en ambos sistemas son los mismos, aunque la presencia de la estrella compañera en los microcuasares da origen a cierta fenomenología distinta. Imagen disponible en la página personal del Dr. Félix Mirabel, <http://www.sc.eso.org/~fmirabel/>.

El primer microcuasar fue descubierto por Félix Mirabel, Luis Felipe Rodríguez y colaboradores en 1992. Se trata de la fuente 1E140.7–2942, cuyos jets fueron claramente observados debido a su emisión en ondas de radio (ver Figura 4). La materia que forma los jets de los microcuasares es lanzada a velocidades cercanas a la de la luz; se dice entonces que las eyecciones son *relativistas*.⁽⁵⁾ Los jets transportan una cantidad enorme de energía cinética, y pueden propagarse por distancias de miles de millones de km antes de frenarse o destruirse por interacción con el medio interestelar.⁽⁶⁾ En algunos casos los jets son tan poderosos que pueden modificar significativamente la región que los rodea, como se muestra en la Figura 4 en el caso de los jets del microcuasar Cygnus X-1.

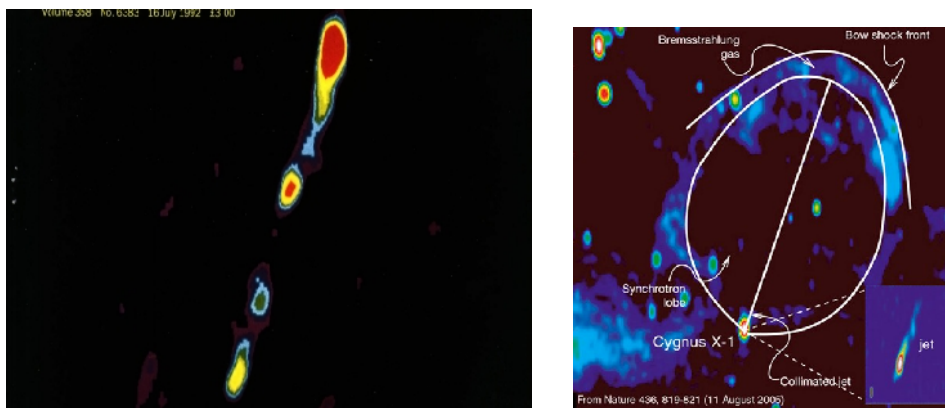


Figura 4. Izquierda: imagen en radio de los jets del microcuasar 1E140.7–2942, el primero en ser descubierto. Esta imagen fue tapa de la revista Nature en 1992 (Nature, 358, 215, 1992) y se encuentra disponible en la página personal del Dr. Mirabel, <http://www.sc.eso.org/~fmirabel/>. **Derecha:** imagen en radio de la nebulosa que rodea al microcuasar Cygnus X-1. Esta nebulosa fue “inflada” por acción de los jets; la región brillante en forma de arco es la zona donde el jet se frena por interacción con el medio interestelar. El recuadro en la parte inferior derecha de la imagen es una ampliación de la región más cercana al agujero negro donde los jets están bien colimados. Del trabajo de Gallo et al., Nature 436, 819-821, 2005.

Los jets en los microcuasares no son permanentes, sino que las fuentes alternan periodos con jets y sin jets. Cuando presenta jets se dice que el sistema está en el estado *low-hard*, y cuando no en el estado *high-soft*. El espectro radiativo en ambos estados es diferente: en el estado high-soft domina la emisión del disco de acreción, mientras que en low-hard la de la corona y posiblemente los jets.

El proceso físico que permite el lanzamiento de los jets no está aún hoy completamente entendido, aunque en general se acepta la idea de que está fuertemente relacionado con el campo magnético que existe en las cercanías del objeto compacto. Otros aspectos de la propagación de los jets, como por ejemplo el mecanismo que los mantiene colimados sobre grandes distancias, o las inestabilidades que pueden propagarse en el gas y llegar a destruirlos, son también problemas abiertos. El estudio de estos tópicos se aborda hoy en buena parte por medio de grandes y complejas simulaciones numéricas.

La composición de la materia que forma los jets también es desconocida. Se sabe por cierto que una fracción deber ser electrones muy energéticos o *relativistas*. Su presencia se infiere directamente del espectro de emisión en ondas de radio de los jets. La forma del espectro de radio indica claramente que la emisión se debe a un proceso conocido como *radiación sincrotrón*, que es el tipo de radiación que emiten partículas muy energéticas, en este caso electrones, cuando son aceleradas en presencia de un campo magnético.

Aunque se detectan por su emisión característica en radio, el espectro radiativo de los jets abarca casi todo el espectro electromagnético, desde radio hasta rayos X, y posiblemente rayos gamma (ver más abajo). Además de la radiación sincrotrón, otros procesos físicos pueden contribuir al espectro de emisión los jets de microcuasares. Estos procesos involucran la interacción de las partículas relativistas en el jet con otras partículas o con radiación, que pueden provenir del mismo jet o de la estrella compañera. Se dice que el espectro de emisión de los jets es *no térmico*, ya que radian por mecanismos diferentes del que lo hacen, por ejemplo, las estrellas normales o el disco de acreción. En estos casos se dice que el espectro es *térmico*, ya que la radiación es la que emite el gas por el sólo hecho de estar a temperatura muy alta. En la Figura 5 se muestra el espectro (no térmico) en rayos X de Cygnus X-1, junto con el espectro (térmico) del Sol.

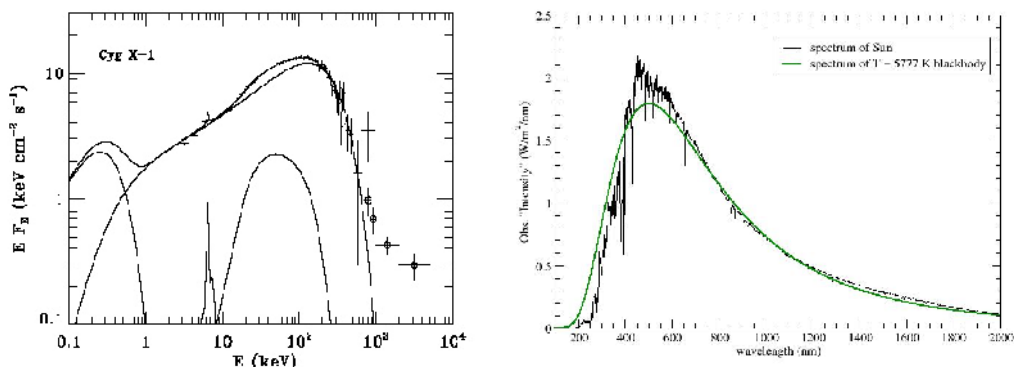


Figura 5. Izquierda: espectro de emisión en rayos X del microcuasar Cygnus X-1 en el estado low-hard. **Derecha:** espectro continuo de emisión del Sol (en negro), más el espectro teórico de emisión de un cuerpo a una temperatura de aproximadamente 6000° C (en verde), que es la temperatura de la superficie solar. El primero es un ejemplo de espectro de origen no térmico y el segundo un espectro térmico.

Se han propuesto algunos mecanismos que explican de qué manera podrían acelerarse partículas eficientemente hasta energías relativistas en las condiciones físicas presentes en los jets. Surgen aquí sin embargo dos preguntas: ¿pueden por estos mecanismos acelerarse además de electrones otros tipos de partículas, como por ejemplo protones, si

es que existen en los jets?, ¿es posible que estas partículas alcancen energías tan altas como para emitir rayos gamma, la radiación de más alta energía del espectro electromagnético?

Desde hace algunos años se sabe que la respuesta a la segunda pregunta es que, en efecto, al menos algunos microcuasares son fuentes de rayos gamma. Hasta el momento cuatro microcuasares han sido detectados a altas energías. En algunas fuentes la emisión es persistente, mientras que en otras (como es el caso de Cygnus X-1) se han observado fulguraciones transitorias. Imágenes de los microcuasares LS 5039 y Cygnus X-3, de los cuales se ha detectado radiación gamma, se muestran en la Figura 6.

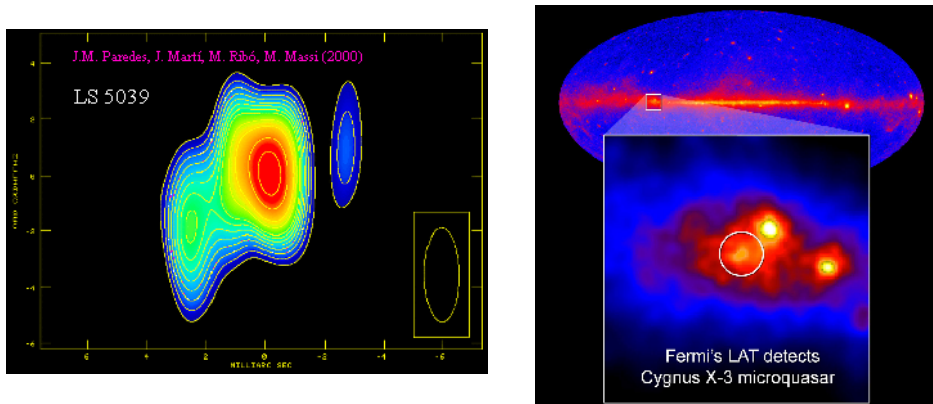


Figura 6. Izquierda: imagen en radio del microcuasar LS 5039. La posición de este objeto coincide con la de una fuente de rayos gamma detectada con el instrumento EGRET del satélite Compton en la década de 1990. Imagen tomada del trabajo de Paredes, Martí, Ribó y Massi, *Science*, 288, 2340 (2000). **Derecha:** imagen en rayos gamma del microcuasar Cygnus X-3 obtenida con el satélite *Fermi* en 2009. Cygnus X-3 ha sido detectado también por el satélite AGILE.

Existe un gran interés en la detección de más binarias de rayos X a altas energías, por lo que son el blanco frecuente de observación con telescopios de rayos gamma tanto terrestres, como los arreglos de detectores de rayos gamma HESS en Namibia, VERITAS en los EEUU y MAGIC en España, como instalados a bordo de satélites, como el satélite *Fermi* de la NASA, el satélite italiano AGILE y el satélite INTEGRAL de la Agencia Espacial Europea (ver Figura 7). Ya se planea la construcción de nuevos telescopios de rayos gamma con mayor sensibilidad que permitirán detectar fuentes más débiles. En particular, para los próximos años se planea la construcción y entrada en funcionamiento de un nuevo arreglo de telescopios terrestres de rayos gamma llamado CTA (Cherenkov Telescope Array). CTA contará en realidad con dos arreglos, uno en el hemisferio norte y otro en el hemisferio sur, con el objetivo de lograr una cobertura lo más completa posible del cielo. La Argentina es parte del consorcio de países que integran el proyecto CTA, y se están llevando a cabo actualmente trabajos para identificar posibles sitios para el emplazamiento del arreglo sur en nuestro país.

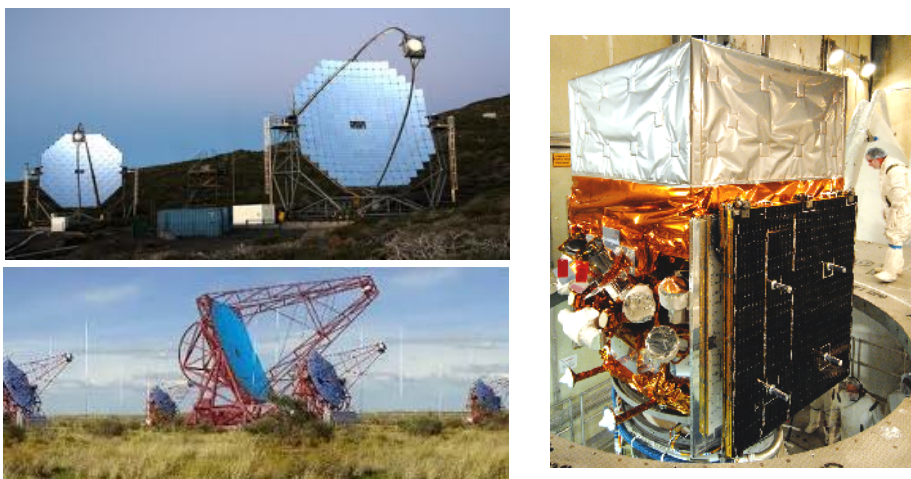


Figura 7. Izquierda: arreglos de telescopios detectores de rayos gamma MAGIC en La Palma, España (arriba) y HESS en Namibia (abajo). **Derecha:** el satélite de rayos gamma *Fermi* (antes conocido como GLAST) poco antes de ser lanzado.

La detección de los microcuasares a altas energías puede brindar información muy importante a la hora de responder a la primera de las preguntas planteadas. Se cree que la radiación gamma es emitida por las partículas relativistas en los jets. Sin embargo, para ser capaces de emitir radiación de tan alta energía, las partículas deben ser aceleradas hasta energías aún más altas. La energía máxima que pueden alcanzar las partículas depende tanto de cuán eficiente sea el mecanismo que las acelera como de cuán rápido pierden energía, ya sea mismo por radiación o por algún otro proceso. Los electrones son partículas “fáciles” de acelerar, pero a su vez también pierden energía muy rápidamente. Es posible entonces que la radiación de más alta energía en los jets sea emitida por protones relativistas, o por lo menos que la contribución de estas partículas sea significativa.

Esta posibilidad está siendo explorada desde el punto de vista teórico por varios grupos en distintos lugares del mundo, incluyendo nuestro Instituto. Se trata de construir modelos (más o menos sencillos) de jets y calcular su espectro radiativo suponiendo que existen allí protones relativistas. El objetivo es poder comparar, en el futuro cercano, las predicciones teóricas con observaciones a altas energías. Los datos observacionales ayudarán, a su vez, a poder conocer al menos en forma aproximada el valor de algunos de los parámetros de entrada de los modelos teóricos.

Además de su interés puramente astronómico, los microcuasares constituyen buenos “laboratorios” para poner a prueba algunos modelos físicos (como los de aceleración de partículas) en condiciones extremas que no pueden reproducirse en nuestros laboratorios en Tierra.

Por otro lado, al ser sistemas cercanos (en términos astronómicos) es posible estudiarlos en más detalle y aplicar lo aprendido al modelado de otros sistemas astrofísicos con jets fuera de nuestra galaxia, como los núcleos activos de galaxias y las *erupciones de rayos gamma* (GRBs, Gamma-Ray Bursts).⁽⁷⁾

⁽¹⁾ La masa del Sol es de $M_{\text{Sol}} = 2 \times 10^{30}$ kg, aproximadamente 330.000 veces la masa de la Tierra. A la masa límite de $1.4 M_{\text{Sol}}$ se la conoce como *masa de Chandrasekhar*. Su

valor fue determinado por el científico hindú Subrahmanyan Chandrasekhar en la década de 1930.

(2) Para una definición rigurosa de agujero negro puede consultarse el apunte de la materia *Introducción a la Astrofísica de Agujeros Negros*, disponible on-line en http://www.iar.unlp.edu.ar/garra/AR/apunte_BH.html. También el Capítulo 4 del libro *Compact Objects and their Emission*, disponible en la biblioteca del IAR. Ambos textos son de autoría del Dr. Gustavo E. Romero y están escritos en idioma inglés. El libro contiene además capítulos dedicados a casi todos los temas mencionados en este artículo.

(3) Estrella *ordinaria* significa aquí una estrella no colapsada, que aún se encuentra atravesando alguna etapa de combustión nuclear.

(4) Se conoce como rayos X a aquella región del espectro electromagnético ocupada por la radiación con longitudes de onda entre, aproximadamente, 10^{-8} m y 10^{-11} m, lo que corresponde a frecuencias entre 3×10^{16} Hz y 3×10^{19} Hz. Los rayos X tienen energías entre 100 eV y 10^5 eV. El eV (electronvolt) es una unidad de energía muy utilizada en física de partículas elementales. Un eV es una cantidad de energía muy pequeña en términos de las unidades típicamente usadas para describir fenómenos macroscópicos de la vida cotidiana: 1 eV equivale, por ejemplo, a $1,6 \times 10^{-16}$ Joules.

(5) El valor de la velocidad de la luz en el vacío (que generalmente se nota con la letra c) es de 299.792,458 km/s. Las velocidades típicas a las que se propagan los jets de los microcuasares son de $0.7 c - 0.8 c$.

(6) Algunas unidades de longitud muy usadas en astronomía son la *unidad astronómica* (UA ó AU), el *parsec* (pc) y el *año luz* (ly). Una unidad astronómica corresponde a la distancia media entre el Sol y la Tierra, $1 \text{ AU} = 149,598$ millones de km. Un parsec equivale a 3.1×10^7 millones de km, o $1 \text{ pc} = 206.265 \text{ AU}$. Un año luz es la distancia recorrida por la luz en un año, $1 \text{ ly} = 0.3 \text{ pc} = 9 \times 10^6$ millones de km.

(7) Las erupciones de rayos gamma ó *gamma-ray burts* (GRBs), se producen cuando una estrella masiva colapsa para formar un agujero negro. En el proceso se producen jets que radian en rayos gamma. La duración típica de estas erupciones, conocidas en particular como gamma-ray burts “largos”, es de sólo unos 10 segundos. Sin embargo la energía liberada por un único GRB es mayor que la emitida por toda la galaxia en la que se produce. Son los eventos más energéticos del Universo.