Astrofísica de altas energías

V

LUIS F. RODRÍGUEZ

V.1. EL INFINITO ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

EN LOS siglos venideros, seguramente los historiadores del futuro se preguntarán qué fue lo más importante que ocurrió en la astronomía del siglo XX.

Es muy probable que su respuesta no se refiera a los espectaculares descubrimientos que se hicieron durante nuestro siglo, sino que se enfoque al extraordinario desarrollo que ocurrió y sigue ocurriendo en nuestra capacidad de observar el Universo. No sólo se diseñaron y construyeron telescopios de enorme tamaño y poder, sino que se abrieron las "ventanas" de todo el *espectro electromagnético* (véase el recuadro V.1).

Desde tiempos inmemoriales, primero con el ojo desnudo, luego ayudándose de marcadores en el horizonte y finalmente con telescopios, el ser humano ha estudiado el Cosmos detectando la luz visible que los astros emiten. Pero, según quedó claro durante el siglo XIX, la luz era sólo parte de algo más grande, uno de los "colores" del espectro electromagnético.

En 1799, el astrónomo británico William Herschel realizó unos sencillos experimentos que indicaban la existencia de radiaciones invisibles que el ojo no captaba. Colocando un prisma en la trayectoria de un rayo de Sol, formó en una pantalla un espectro, un pequeño arco iris en el que se podían ver los colores en ordenada secuencia: el rojo, el naranja, el amarillo, el verde, el azul, y el violeta. Luego de haber formado este espectro con la luz solar, Herschel tomó un termómetro y lo fue colocando en la zona de cada uno de los colores. Como era de esperarse, la temperatura marcada por el termómetro subía al recibir éste la energía contenida en la luz solar. Herschel también notó que la temperatura aumentaba al ir hacia el extremo rojo del espectro. En una brillante intuición, colocó el termómetro antes del color rojo, donde no llegaba luz. La columna de mercurio se elevó aún más que en el

rojo. ¡Había, antes del color rojo, una forma de energía invisible! A esta radiación se le llama infrarroja, por encontrarse por debajo del color rojo.

Al año siguiente, en 1800, Johann Wilhelm Ritter descubrió que también había una radiación invisible más allá del otro extremo del espectro. Esta nueva radiación tenía el poder de ennegrecer el cloruro de plata de las placas fotográficas de antaño, aún más efectivamente que la luz visible. ¿Cómo bautizar a este nuevo color?, pues radiación ultravioleta (más allá del violeta), por supuesto.

Pasaron más de 50 años para que las radiaciones invisibles de Herschel y Ritter encontraran un marco teórico que las explicara. En 1864, el escocés James Clerk Maxwell unificó dos fuerzas que al parecer son muy distintas: la eléctrica y la magnética. Ya sabía que era posible producir electricidad a partir del magnetismo y magnetismo a partir de la electricidad, y de su formulación matemática pudo predecir que si uno hacía variar rápidamente las fuerzas eléctricas o las magnéticas se "desprendían" del cuerpo productor de dichas fuerzas (un electrón o bien un imán) unas misteriosas ondas que viajarían por el espacio, las llamadas ondas electromagnéticas. De acuerdo con sus ecuaciones, era posible encontrar a qué velocidad se movería esta curiosa radiación electromagnética. La velocidad resultante era exactamente la de la luz, 300 000 kilómetros por segundo. Visionariamente, Maxwell afirmó que la luz era radiación electromágnetica, que sólo tenía de especial el ser detectable por nuestra vista. Las radiaciones infrarrojas y ultravioletas, detectadas por primera vez alrededor de 1800, encontraban una explicación natural: eran otras formas de radiación electromagnética. Maxwell también predijo que sería posible crear en el laboratorio radiación electromagnética de cualquier longitud de onda.

La predicción teórica de Maxwell rebasaba la capacidad experimental de su época y pasaron un par de décadas más antes de que fuera posible producir en el laboratorio radiación electromágnetica, *luz* invisible. En 1888 Heinrich Hertz construyó los primeros receptores y transmisores de ondas de radio. Una chispa producida en el transmisor causaba una respuesta en el detector, colocado a cierta distancia. Hertz pudo demostrar que las ondas de radio tienen un comportamiento muy similar a la luz, por ejemplo, ambas se reflejan sobre las superficies metálicas pulidas. Como había predicho Maxwell, ambos fenómenos eran formas de radiación electromagnética. La radiación electromagnética queda caracterizada por su frecuencia (cuántas veces por segundo oscila el campo electromagnético).

En la actualidad, se divide el espectro electromagnético en seis *regiones*: radio, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Las ondas de radio son las de más baja frecuencia y los rayos gamma los de más alta frecuencia. La energía de la radiación es directamente proporcional a su frecuencia, de modo que las radiaciones ultravioletas, de rayos X, o de rayos gamma son, de hecho, dañinas para los seres vivos.

La radiación electromagnética tiene un comportamiento en cierto modo misterioso, digamos su lado oscuro. Hasta ahora nos hemos referido a ella como formada por ondas. Sin embargo, a veces su

comportamiento queda descrito mejor en términos de *fotones*, entes discretos que podemos imaginar como pedazos de onda, pero que se comportan como partículas, como pequeñas pelotas. Ésta es una de las paradojas de la mecánica cuántica; la dualidad de comportamiento partícula-onda que muestran todas las cosas en el nivel atómico.

Si bien el Universo se estudia principalmente por medio de los fotones (o sea, las partículas sin masa que constituyen la radiación electromagnética) que nos llegan de él, es importante mencionar que se ha obtenido información también muy importante a partir de los rayos cósmicos (partículas materiales como los electrones y protones) y de los neutrinos (partículas en las cuales se desconoce aún si tienen o no masa). Sin embargo, en este artículo nos concentraremos en la información obtenida a través de los fotones de energía más alta (rayos X y rayos gamma).

V.2. La astronomía descubre el espectro electromagnético

Ya desde principios del siglo XX la astronomía comenzó a incorporar aún más a la física y a las matemáticas como elementos que dieran base teórica a los estudios del Universo. De este matrimonio nació la astrofísica. Para los astrónomos que tenían conocimientos de física quedaba claro que, así como emitían luz, era de esperarse que los astros emitieran otras radiaciones electromagnéticas.

La segunda *ventana*, después de la región visible que se abrió al estudio del Universo fue la de las ondas de radio. En la década de los años treinta Karl Jansky detectó por primera vez ondas de radio provenientes del Cosmos. Después de la segunda Guerra Mundial hubo gran interés en comenzar a explorar las regiones de *altas energías* del espectro, ¿emitirían los astros rayos X y rayos gamma? Del considerable conocimiento acumulado ya a principios de siglo quedaba claro que las estrellas más o menos normales, como el Sol, no serían fuentes significativas de rayos X o gamma puesto que emiten prácticamente casi toda su energía en el infrarrojo, visible, y el ultravioleta. De entrada, era claro que para que hubiera una astronomía de altas energías tendría que haber en el Universo astros distintos a los que entonces se conocían.

Una limitante crucial al estudio del Universo en las otras bandas del espectro electromagnético es que la atmósfera es transparente (o sea, deja pasar) sólo a la luz y a las ondas de radio, pero es opaca (o sea, no deja pasar) a las otras radiaciones (véase el recuadro V.1). Entonces, no es fortuito que haya sido la radioastronomía la segunda astronomía en desarrollarse porque, al igual que la astronomía visible, se puede realizar desde la superficie de la Tierra. Para observar el Universo en las otras radiaciones era necesario elevarse por encima del manto protector de nuestra atmósfera. Y decimos protector porque si la atmósfera no fuera opaca a las radiaciones de alta energía no existiría la vida en la Tierra, al menos como la conocemos.

¿Cómo lograr esto? Pues colocando telescopios espaciales en globos, cohetes y satélites. Desde su origen, la astrofísica de altas energías y la exploración espacial han estado profundamente vinculadas. Pero no nos adelantemos a la historia y ubiquémonos a principios de la década de los cincuenta, unos años después del final de la segunda Guerra Mundial.

V.3. Los inicios de la astronomía de rayos X

Los experimentos realizados en los años cincuenta y sesenta parecían presagiar un mal futuro para la astronomía de rayos X. En esos años Richard Tousey y Herbert Friedmann, junto con otros investigadores del Laboratorio de Investigación de la Marina de los EUA (*Naval Research Laboratory*) mandaron cohetes V-2 alemanes, capturados al final de la segunda Guerra Mundial, por encima de la atmósfera. Estos cohetes llevaban detectores primitivos de fotones de altas energías y con ellos encontraron que el Sol emitía rayos X (además de emitir luz, radiación infrarroja, etc.). Pero esta emisión era relativamente débil, de modo que si las demás estrellas del Universo (mucho más alejadas que el Sol) emitían con similar intensidad, sería muy difícil detectarlas desde la Tierra. Este resultado descorazonó posibles intentos de buscar fuentes de rayos X en el Cosmos.

Sin embargo, en 1960, un grupo estadunidense encabezado por Riccardo Giacconi, Herbert Gursky, Frank Paolini y Bruno Rossi envió un cohete que por unos minutos estaría por encima de la atmósfera terrestre y que trataría de detectar rayos X provenientes de la Luna. Estos investigadores habían supuesto que la Luna podría absorber y reemitir parte de los rayos X que le llegaban del Sol. Con gran sorpresa detectaron una fuente muy intensa de rayos X en la constelación del Escorpión, en una posición distinta a la de la Luna. Esta fuente era mucho más intensa de lo que esperaban de la Luna. Más aún, pensaron que seguramente se encontraba

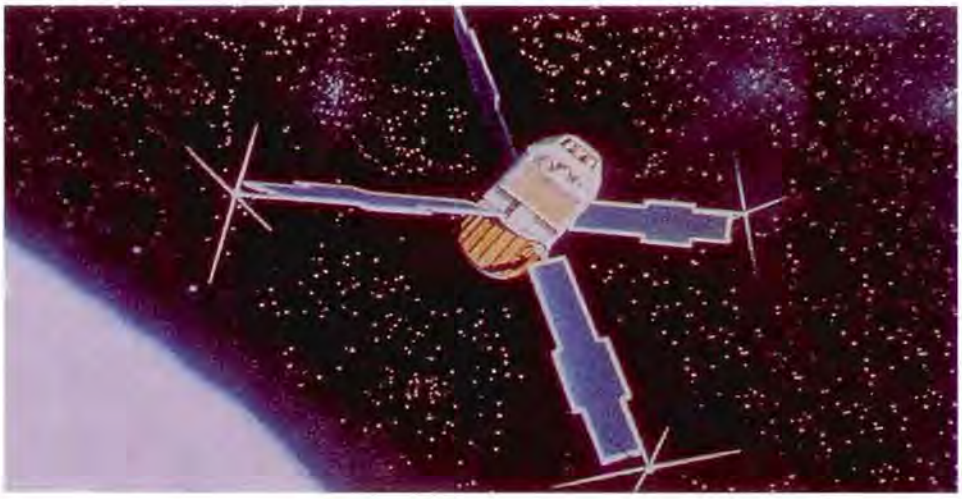


FIGURA V.1. Ilustración de cómo se vería desde el espacio el satélite de rayos X *Uhuru* (cortesía del Observatorio Astrofísico Smithsoniano).

fuera del Sistema Solar, y esto quería decir que la fuente era intrínsecamente muy luminosa en los rayos X. De hecho, si suponían que el objeto emisor de rayos X era una estrella colocada en el centro de nuestra Galaxia, resultaba ser 100 000 000 de veces más intensa en los rayos X que nuestro Sol. Varios grupos comenzaron a lanzar cohetes con detectores de rayos X, encontrando algunas nuevas fuentes, pero el verdadero alcance e importancia de la astronomía de rayos X sólo quedó claro con la construcción del primer satélite destinado a la busca de rayos X, que fue puesto en órbita el 12 de diciembre de 1970 desde Kenia. Como este día se celebra la independencia de ese país, se bautizó al satélite con el nombre de *Uhuru* (véase la figura V.1), que quiere decir "libertad" en *swahili*. La misión del satélite *Uhuru* duró poco más de dos años (pasado cierto tiempo, los fluidos que lleva el satélite para distintos usos se agotan y la electrónica comienza a fallar y el satélite "muere" quedando en órbita silenciosa alrededor de la Tierra), al final de los cuales produjo un catálogo de más de 300 fuentes cósmicas de rayos X. La mayoría de estas fuentes caían en una de las siguientes cuatro categorías: *1*) sistemas de estrellas binarias, 2) remanentes de supernova, ambos tipos de objetos que se hallan en nuestra Galaxia, *3*) las llamadas galaxias activas, y *4*) los cúmulos de galaxias. Si bien los cuatro tipos de objetos se conocían con anterioridad, la presencia de emisión de rayos X reveló nuevas facetas de ellos. En todos estos tipos de objetos la emisión de rayos X proviene de gas que ha sido calentado a temperaturas enormes, de decenas de millones de grados Kelvin o más. Para dar una referencia, la Tierra tiene una temperatura de alrededor de 300°K, mientras que la superficie del Sol está a unos 6 000°K.

¿Qué era lo que causaba estas altísimas temperaturas en las fuentes de rayos X celestes?

V.4. Las estrellas binarias emisoras de rayos X

Desde hace mucho tiempo los astrónomos sabían que, a diferencia del Sol, no todas las estrellas nacen solitarias. De hecho, actualmente se sabe que la mayoría de las estrellas se forman en parejas, en lo que se conoce como un sistema binario. Atadas la una a la otra por la fuerza de la gravedad, las dos estrellas permanecen girando alrededor del centro de masa del sistema (véase el recuadro V.2). Si las dos estrellas están relativamente alejadas, de modo que una no le pueda *donar* material a la otra, las estrellas simplemente siguen su evolución normal, como si fuesen estrellas aisladas. Pero cuando las estrellas están en un sistema binario cercano, esto es, un sistema en el cual se puede transferir masa de una a otra estrella, las historias particulares de las estrellas se ven totalmente alteradas. Es como si pensáramos en las posibles historias que hubieran tenido un hombre y una mujer que nunca se conocieron y permanecieron solteros *versus* su historia común si se hubieran casado.

Cuando tenemos un sistema binario cercano, es muy probable

que al final de su evolución se transforme en un sistema productor de rayos X. ¿Cómo ocurre esto? En un principio ambas estrellas evolucionan más o menos normalmente. Supongamos que una de las dos es de gran masa (más de 20 veces la masa de nuestro Sol), estrellas que viven poco tiempo, agotando su combustible termonuclear rápidamente. Al final de su vida (que puede durar unos 10 000 000 de años) explotan como supernovas y de ellas sólo queda un objeto colapsado, ya sea una estrella de neutrones o un hoyo negro. Pero la historia no acaba aquí. La otra estrella continúa su evolución y puede pasarle gas al objeto colapsado. Como el sistema binario está en continua rotación, el gas no entra directamente al objeto colapsado, sino que forma alrededor de él un disco de acreción (llamado así porque a través de él el objeto colapsado acrecienta su masa). En este disco de acreción el gas se mueve en espirales hacia el objeto colapsado, cada vez más rápidamente. Entre un anillo y otro adyacente del disco de acreción existe gran fricción porque los anillos internos se mueven con mayor rapidez que los externos. En la parte del disco de acreción cercana al objeto colapsado la fricción es enorme y se produce un calentamiento muy alto que eleva la temperatura del gas a decenas de millones de grados Kelvin o más. Es este gas muy caliente el que emite los rayos X (véase la figura V.2).

FIGURA V.2. Ilustración de un sistema binario cercano, con una de las estrellas ya transformada en objeto colapsado.

El estudio de las binarias de rayos X ha permitido proponer con un alto grado de probabilidad que en algunas de ellas el objeto colapsado es un hoyo negro. Generalmente estos estudios se llevan a cabo utilizando observaciones de todo el espectro electromagnético. En algunos sistemas binarios de rayos X se ha observado la eyección de nubes de gas con velocidades cercanas a las de la luz (véase la figura V.3). La gran potencia de estas eyecciones parece requerir de un hoyo negro que al mismo tiempo que traga masa por el disco de acreción la eyecta en dos chorros simétricos.

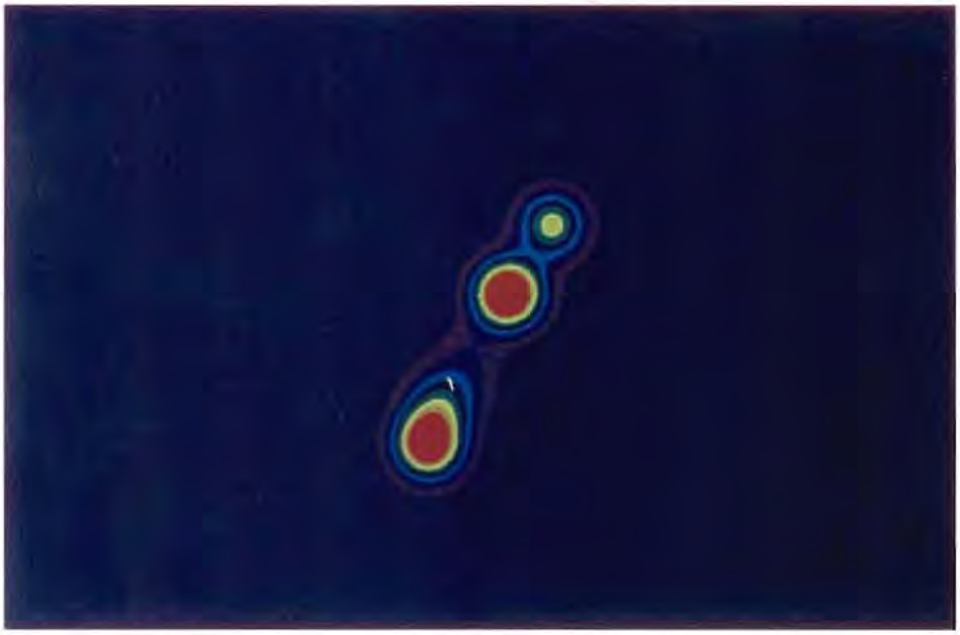


FIGURA V.3. La binaria de rayos X GRS 1915+105 (situada en la región brillante central de esta imagen hecha a partir de ondas de radio) eyecta periódicamente nubes de gas a velocidades cercanas a las de la luz (en esta imagen, tomada en 1994, las nubes aparecen en la parte superior derecha e inferior izquierda).

V.5. OTRAS FUENTES CÓSMICAS EMISORAS DE RAYOS X

Habíamos mencionado que el catálogo de 300 fuentes de rayos X observadas por el satélite *Uhuru* incluía de manera importante, además de los sistemas binarios de estrellas, a los remanentes de supernova, las galaxias activas y los cúmulos de galaxias.

Los remanentes de supernova son las cáscaras de gas que salen disparadas en la explosión que se produce cuando una estrella masiva muere. Estas cáscaras se mueven al principio a gran velocidad (hasta de 20 000 kilómetros por segundo). Aun cuando se van desacelerando conforme arrastran gas del medio interestelar, su velocidad continúa siendo muy grande por miles de años. Cuando la cáscara encuentra una nube de gas en el espacio, la choca, esto es, la calienta y arrastra en la dirección de su movimiento. El gas chocado se puede calentar a altas temperaturas y producir rayos X (véase la figura V.4).

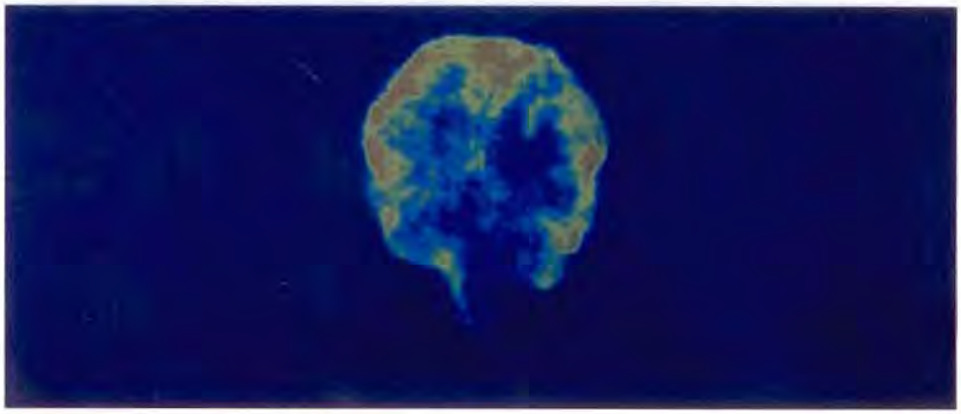


FIGURA V.4. Imagen de la supernova de la constelación del Cisne tomada en rayos X (cortesía del Observatorio Astrofísico Smithsoniano).

En el caso de las galaxias activas, se cree que la producción de rayos X se origina (como en los sistemas binarios) en un disco de acreción alrededor de un objeto colapsado. Sólo que en el caso de las galaxias activas este objeto colapsado no es una estrella de neutrones o un hoyo negro con una masa algo mayor a la del Sol, sino casi seguramente se trata de un hoyo negro con una masa millones de veces más grande que la del Sol. Este hoyo negro supermasivo se encuentra en el centro mismo de la galaxia anfitriona (en el *núcleo* de la galaxia, como acostumbran los astrónomos llamar al centro de una galaxia) y a su alrededor se forma un disco de acreción monstruoso que se calienta por fricción entre las capas adyacentes de él y puede emitir copiosamente rayos X. En el caso de los núcleos de las galaxias activas no hay una estrella (o en este caso superestrella) que le *done* gas al hoyo negro supermasivo. Pero hay mucho gas disponible a su alrededor (en los núcleos de las galaxias hay mucho más gas en el espacio que, por ejemplo, en la vecindad del Sol) y también puede el hoyo negro hacer reventar (por fuerzas de marea) a las estrellas que se acerquen a él y así alimentar su disco de acreción. Al igual que en el caso de los hoyos negros de masa estelar en sistemas binarios que vimos anteriormente, el estudio de los hoyos negros supermasivos en los núcleos de las galaxias se ha visto grandemente beneficiado por observaciones realizadas en todo el espectro electromagnético (véase la figura V.5).

Finalmente, también se detectan rayos X de muchos cúmulos de galaxias. Las galaxias parecen formarse a veces en grupos, los cuales se conocen como cúmulos. En ocasiones la cantidad de galaxias

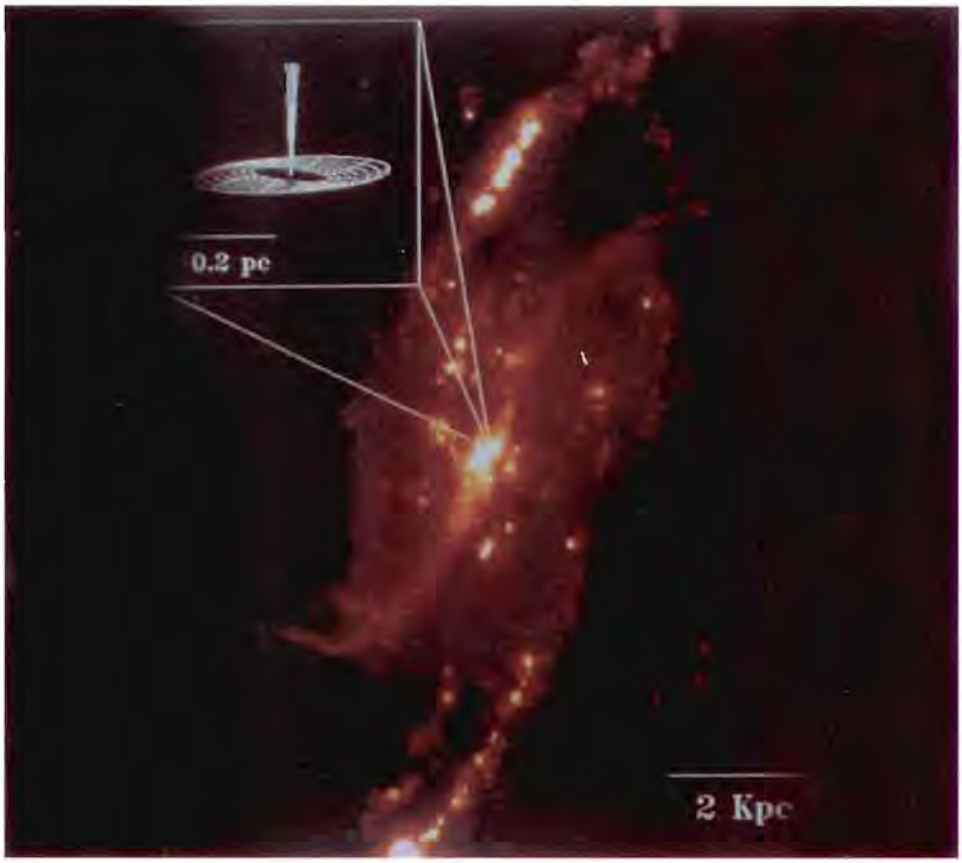


FIGURA V.5. La parte central de la galaxia espiral NGC4258 emite rayos X, supuestamente provenientes de un disco de acreción alrededor de un hoyo negro supermasivo. Observaciones hechas en la región de radio, han detectado gas molecular en este disco de acreción, un modelo del cual se muestra en la inserción en la esquina superior izquierda (cortesía del Observatorio Astrofísico Smithsoniano).

en estos cúmulos es del orden de 1 000. Se cree que cuando el cúmulo se formó no todo el gas disponible acabó en las galaxias sino que una cantidad comparable quedó en medio, entre las galaxias (el llamado medio intracúmulo). Las galaxias del cúmulo se mueven rápidamente y chocan contra este gas calentándolo a temperaturas muy elevadas que hacen que emita rayos X. Se encuentra que hay tanta masa en las galaxias en sí como en el gas intracúmulo. Resulta de interés saber que de estudios acerca de los movimientos de las galaxias, se sabe que debe haber mucha más masa en los cúmulos, posiblemente en forma de materia oscura (materia que no emite radiación electromagnética y que por lo tanto es muy difícil de detectar).

Con posterioridad al satélite *Uhuru* se han lanzado al espacio otros satélites que han enriquecido grandemente nuestro conocimiento del cielo en el campo de los rayos X. Estos satélites incluyen el estadunidense HEAO 2 (luego rebautizado *Einstein*) y el japonés ASCA. Se acaba de poner en órbita el gran proyecto AXAF (*Advanced X-Ray Astrophysics Facility*, rebautizado como *Chandra* en honor de un gran astrofísico hindú) coordinado por la Universidad de Harvard.

V.6. La astronomía de rayos gamma

Como hemos subrayado, la astronomía de rayos X estudia objetos que son extremadamente calientes. ¿Tendría sentido intentar observar el Universo en los rayos gamma, aún más energéticos que los rayos X? Seguramente animados por el éxito de la astronomía de rayos X, grupos de astrónomos comenzaron a explorar el cielo en busca de rayos gamma a partir de los años sesenta. Al igual que los rayos X, los rayos gamma no penetran la atmósfera terrestre y toda la investigación se hace desde satélites. Uno de los primeros satélites de gran éxito fue el COS-B, que duró más de seis años activo y descubrió 25 fuentes de rayos gamma en el cielo. Estas fuentes incluían los pulsares situados en el centro de las supernovas del Cangrejo y de Vela y el cuasar 3C273. Cuando las estrellas de neutrones que quedan después de una explosión de supernova tienen emisión de radio se les conoce como pulsares. Las estrellas de neutrones quedan girando rápidamente (a veces dando hasta 1 000 vueltas por segundo) y tienen regiones en su superficie que emiten ondas de radio, por lo que su señal se recibe en pulsos (de ahí el nombre de pulsares).

El 5 de abril de 1991 se puso en órbita el mayor instrumento jamás construido para el estudio del Universo en esta banda: el Observatorio de Rayos Gamma Compton (en inglés, CGRO o *Compton Gamma-Ray Observatory*, figura V.6). Bautizado en honor del físico Arthur Compton, el satélite pesa 17 toneladas, la carga espacial astronómica más grande de la historia. Lleva el nombre de quien explicó en 1922 la ahora llamada *dispersión de Compton*, fenómeno que se usa para la detección de los rayos gamma.

Posiblemente el resultado más importante del satélite Compton

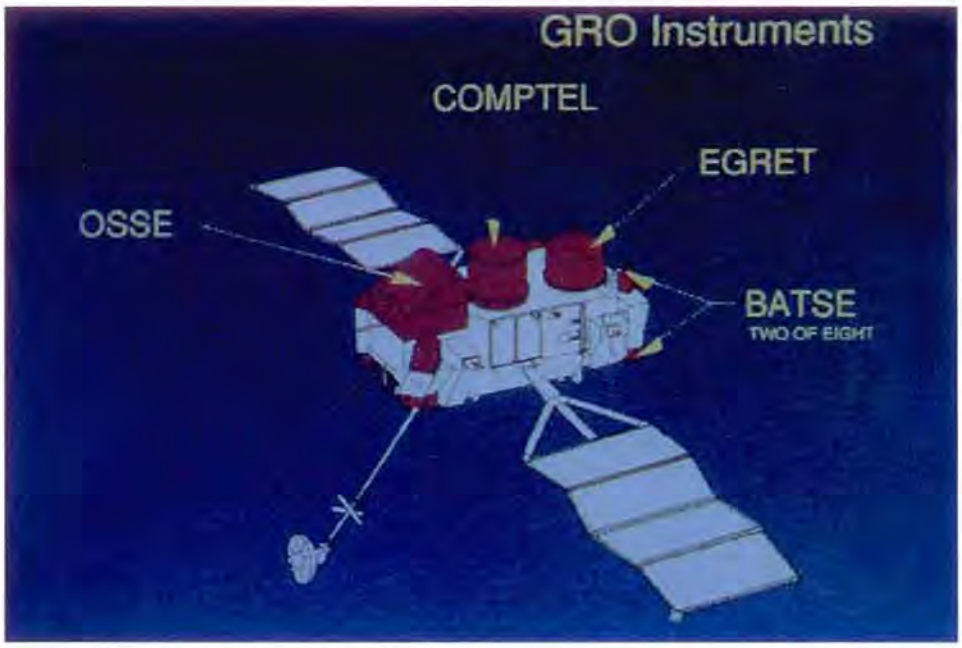


FIGURA V.6. Ilustración de cómo se vería desde el espacio el satélite de rayos gamma CGRO. Se indica la ubicación de los cuatro instrumentos a bordo de este satélite. Entre ellos el BATSE, dedicado a la detección de destellos de rayos gamma (cortesía de la NASA).

está relacionado con los misteriosos destellos de rayos gamma (en inglés, *gamma-ray bursts*) que, provenientes de distintas regiones en el cielo y aparentemente sin ton ni son, llegan a la Tierra en forma de breves pero energéticos chubascos de rayos gamma. La duración de estos destellos es corta, generalmente entre una décima de segundo y 100 segundos. No se sabe qué clase de astro produce las efímeras emisiones, pero conforme BATSE, el instrumento a bordo del satélite Compton que está diseñado para detectarlos, acumula más y más destellos a la tasa de aproximadamente uno al día, la profundidad del enigma se ha hecho evidente.

El fenómeno es verdaderamente espectacular y es una lástima que no se pueda ver a simple vista sino sólo con los detectores de rayos gamma en órbita. Podemos, sin embargo, imaginarnos cómo sería uno de estos destellos si hubiera un fenómeno equivalente (no lo hay) en la región visible del espectro electromagnético. Supongamos que en una noche oscura y despejada nos encontramos mirando la débil luz de las estrellas. Repentinamente, y de una parte cualquiera del cielo aparece por unos instantes una luz deslumbrante, tan brillante como el Sol, que se apaga de manera igualmente inesperada. Tratamos de averiguar cuál de los muchos astros que existen en esa dirección la produjo pero es inútil, hay demasiados y todo fue muy breve.

Alrededor de 1976 se habían detectado en total unos 60 destellos de rayos gamma con los distintos satélites hasta entonces puestos en órbita. Las posiciones se conocían tan mal que no se podía apoyar o descartar siquiera si las fuentes que los producían estaban en nuestra Galaxia. Si estas fuentes estuvieran distribuidas en nuestra Galaxia aparecerían preferentemente en la dirección de la Vía Láctea. Como se sabe, el Sol es una de las 100 000 000 000 de estrellas que forman nuestra Galaxia, un conglomerado de estrellas y nebulosas

tes extragalácticas, posiblemente en otras galaxias o incluso en los lejanos cuasares. En cualquier caso, la identificación de las fuentes de las cuales provienen los destellos de rayos gamma, las llamadas contrapartes, aún no se ha logrado. Las posiciones de los destellos son muy inciertas y éstos duran muy poco, de modo que para cuando se enteran los astrónomos que están utilizando otros telescopios, ya sea en la superficie terrestre o en órbita, el destello ya terminó. Se ha establecido una red de colaboradores internacionales de modo que cuando se detecta un destello su posición es transmitida en cosa de segundos a los observatorios que forman parte de la red. También se habla de construir telescopios especiales que pudiesen *ver* todo el cielo o al menos una parte muy grande de él y que trabajasen simultáneamente con algún telescopio de rayos gamma.

V.7. CONCLUSIONES

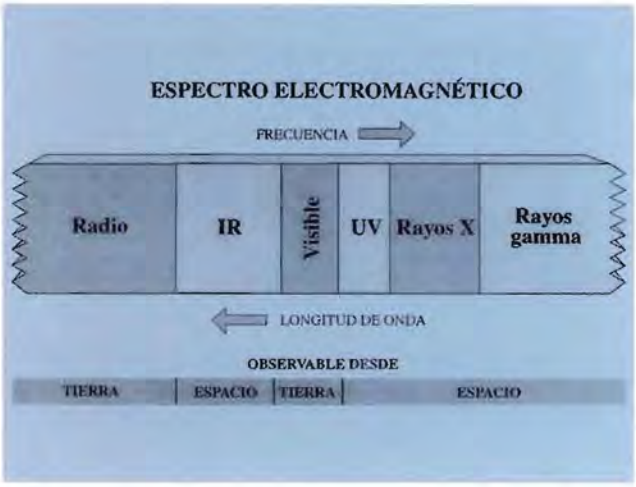
Como hemos podido ver, la astrofísica de altas energías ha enriquecido notablemente nuestra visión del Universo, en particular en lo que se refiere a los fenómenos de gran energía y violencia. En nuestro país hay muy pocos astrofísicos (menos de 100 en 1997), y los que se interesan por las altas energías son sólo un puñado. Dada la importancia de la astrofísica de altas energías, es de esperarse que el número de expertos en nuestro país crezca con el tiempo, en ésta y en las otras áreas de la astrofísica. El alto costo y la complejidad de los satélites astronómicos han impedido que los países del Tercer Mundo tengamos una participación más activa en la astrofísica de las altas energías.

RECUADRO V.1. REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En la actualidad, la astronomía estudia el Universo en todo el espectro electromagnético. Las observaciones en el visible, radio y parte del infrarrojo se pueden realizar desde la superficie terrestre. Las observaciones en el ultravioleta, rayos X, rayos gamma y lo que resta del infrarrojo se tienen que realizar desde el espacio, puesto que la atmósfera terrestre no permite el paso de estas últimas radiaciones.

sigue...

... continúa



Regiones del espectro electromagnético. La astronomía moderna se basa en resultados obtenidos en todos los dominios del espectro electromagnético.

V

Astrofísica de altas energías

RECUADRO V.2. ESTRELLA BINARIA

A un sistema de dos estrellas atadas gravitacionalmente una con la otra se le llama sistema binario. En la línea que une los centros de las estrellas hay un punto que se conoce como el centro de masa del sistema, alrededor del cual orbitan ambas estrellas. En el caso de dos estrellas de igual masa, el punto queda en el punto medio entre las dos; conforme más masiva es una estrella respecto a la otra, más cerca de la primera queda el centro de masa.

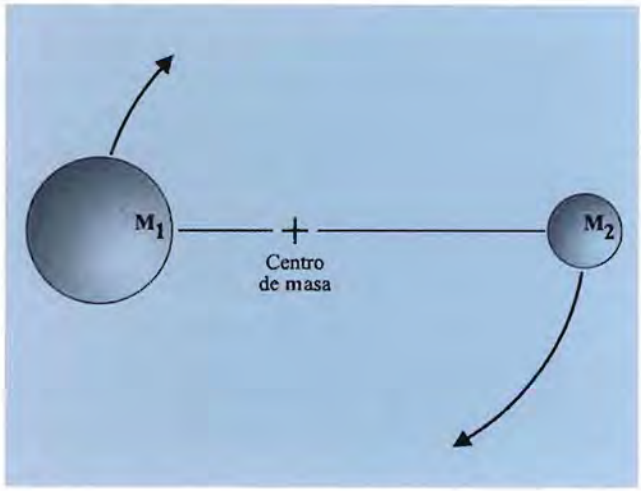


Diagrama esquemático de un sistema binario con dos componentes de masa distinta.