

Movimientos superlumínicos en la galaxia

JOSÉ F. RODRÍGUEZ Y FÉLIX MIRABEL



La ciencia ha producido un gran número de ideas y leyes fascinantes. Desafortunadamente, pocas de éstas llegan a ser del dominio público. Una excepción a esta lamentable regla es una ley muy bien conocida: el hecho de que los cuerpos materiales no pueden alcanzar, mucho menos exceder, la velocidad de la luz. Encontramos esta ley, parte crucial de la relatividad especial, no sólo en el contexto científico, sino también en novelas y películas de ciencia-ficción. Así, en su conocida novela *Fundación*, Isaac Asimov pone en boca de uno de sus personajes que no se puede exceder esta velocidad, lo cual limita los viajes interestelares (por

supuesto, los autores de ciencia-ficción se las arreglan para que sus héroes viajen a través del cosmos más rápidamente que la luz con artilugios de dudosa base física).

En general, la afirmación de que la velocidad de la luz puede ser excedida, se asocia (al menos en el medio científico) con charlatanes y chiflados. Los autores de este artículo observamos, a principios de 1994, un astro que lanza nubes hacia el medio circundante. Vistas desde la Tierra, estas nubes parecen moverse en el plano del cielo más rápido que la luz. ¿Cuál es la explicación a este fenómeno? ¿Fue violado el principio fundamental de la Relatividad Especial de Einstein?

¿Hubo algún error en nuestras observaciones?

Como era de esperarse, el descubrimiento (publicado en el número del 1° de septiembre de 1994 en la revista británica *Nature*) despertó gran interés no sólo entre los astrónomos, sino también entre la comunidad científica y el público en general.

Pero, vayamos un poco atrás en el tiempo para ubicar mejor al lector en las circunstancias que nos llevaron a este resultado.

Quizá el avance más importante que ha tenido la astronomía del siglo XX es que ahora observamos al universo ya no sólo mediante la luz visible que emiten las estrellas y galaxias, sino también por medio de otras formas de radiación que son invisibles al ojo humano o aún al más poderoso de los telescopios, pero que pueden ser estudiadas con un aparato detector adecuado. Ya el físico escocés Maxwell había predicho a fines del siglo pasado que la luz era sólo parte de un fenómeno mucho más general: la radiación electromagnética, y que existían ondas que no podíamos "ver", pero que no por eso eran menos reales. En la actualidad, estas ondas invisibles forman parte de nuestra vida diaria. Las ondas de radio se usan en la comunicación e inclusive en los hornos de microondas. Los rayos ultravioleta son los que broncean nuestra piel en la playa y los rayos X permiten a los médicos estudiar el interior de nuestro cuerpo.

Estas distintas ondas se diferencian entre sí por su longitud de onda. En sus otras características son muy similares. Al ser radiación (y no materia) sí alcanzan a viajar a la velocidad de la luz, de hecho, es a la única velocidad a la que pueden viajar (todo esto, por supuesto, en el vacío). Como parte de este gran avance, la astronomía ha descubierto que las estrellas y otros astros conocidos emiten, además de luz visible, ondas electromagnéticas de los otros tipos (invisibles). Pero lo más sorprendente ha sido el descubrimiento de fuentes y fenómenos que, por

distintas razones, no emiten luz visible pero si otras ondas. Por ejemplo, los pulsares son generalmente invisibles en la región visible, pero emiten ondas de radio copiosamente. Durante las últimas décadas han "nacido" las nuevas astronomías pues una manera de enfocar esta ciencia se relaciona con la longitud de onda estudiada. Así, tenemos (en orden descendente de longitud de onda estudiada) la radioastronomía, la astronomía infrarroja, la astronomía visible (o clásica), la astronomía ultravioleta, la astronomía de rayos X, y finalmente la astronomía de rayos gamma. A fines del siglo XX sabemos que el universo es de una riqueza y diversidad inimaginables para el astrónomo de principios de siglo.

Es pues ahora común que, al estudiar algún tipo de astro, el investigador utilice ya no sólo los telescopios clásicos sino también radiotelescopios y obser-

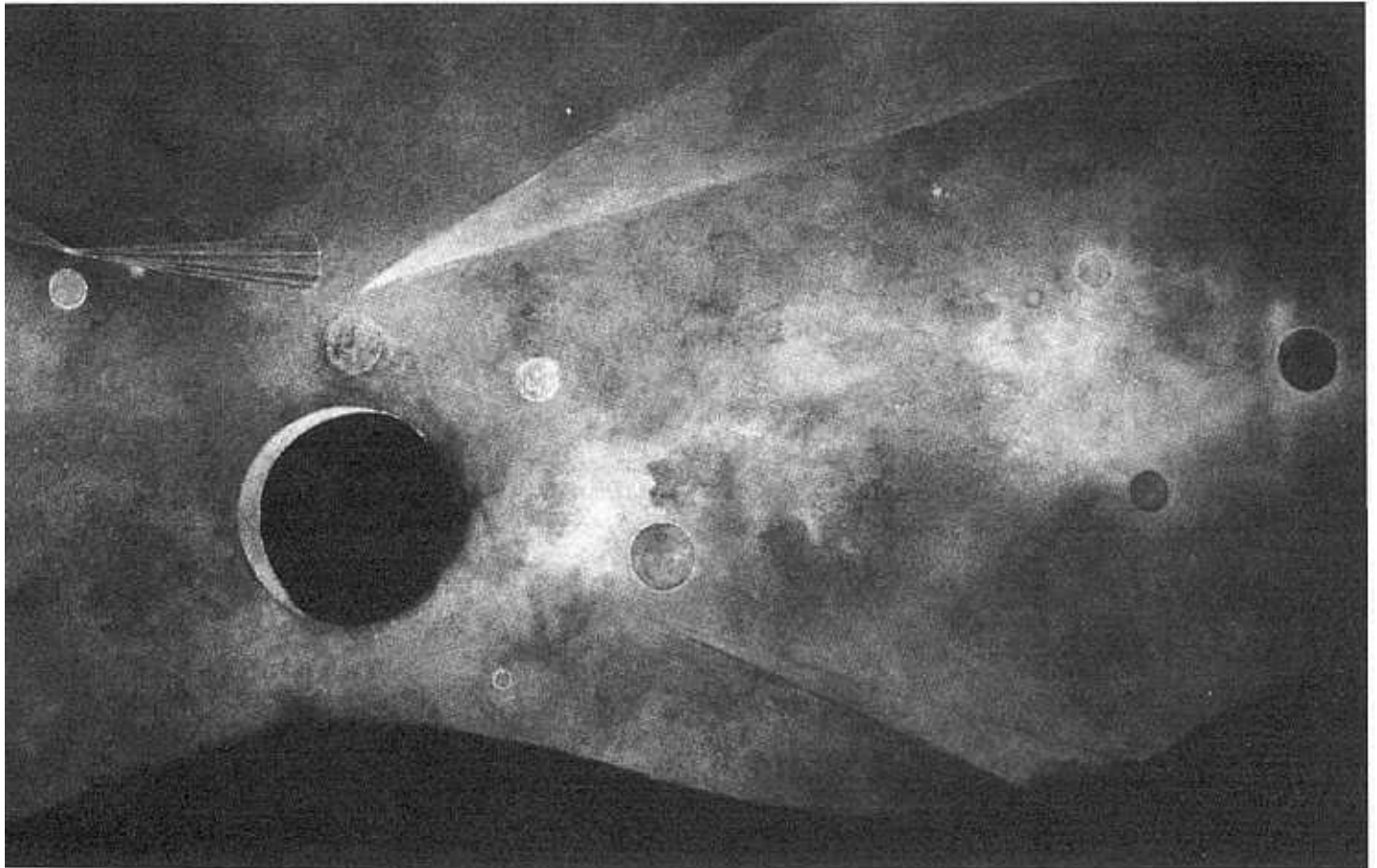
vatorios en órbita (también llamados satélites astronómicos) para lograr una mejor comprensión de lo que ocurre en dichos astros.

Con este enfoque, alrededor de 1990 comenzamos un programa para buscar contrapartes de las fuentes de rayos gamma que por esas fechas descubría el satélite ruso-francés GRANAT-SIGMA, lanzado al espacio el 1° de diciembre de 1989.

Para entender la naturaleza de estas nuevas fuentes, planeamos hacer observaciones en tres bandas adicionales: radio, infrarrojo y visible. Con esta combinación de bandas esperábamos contribuir al mejor estudio de estos astros. Para ser francos, ya sospechábamos de qué tipo de objetos se trataba. Las estrellas normales (como el Sol) simplemente no emiten una radiación significativa de muy alta energía (como lo es la radiación gamma), de hecho emiten la mayor parte de su

energía en el visible. A partir de los estudios hechos en años anteriores y de los conceptos teóricos desarrollados alrededor de ellos, se encontró que en nuestra galaxia sólo podría haber un tipo de fuentes que pudieran producir radiación gamma tan intensamente como lo hacen las fuentes detectadas por el satélite GRANAT-SIGMA. Estas fuentes serían sistemas binarios (de dos estrellas) en los que una de las componentes fuera una estrella más o menos normal mientras que la otra sería una estrella ya muerta, pero de naturaleza extraordinaria.

La mayoría de las estrellas al morir acaban como enanas blancas, esferas con una masa equivalente a la del Sol pero con un radio cien veces menor que el de éste (más bien con un radio comparable al de la Tierra). Sólo una fracción pequeña de estrellas, las más densas, acaban como estrellas de neutrones o bien como un ob-



Hombre frente al infinito, Rufino Tamayo (detalle)

jeto aún más enigmático y controversial: el hoyo negro. Tomando en cuenta el pequeño tamaño de las estrellas de neutrones y el de los hoyos negros (radios del orden de 10 kilómetros), respecto al tamaño de una estrella normal (del orden de un millón de kilómetros), se les llama objetos colapsados.

La tan intensa emisión de rayos gamma que se observaba en las fuentes detectadas por el satélite GRANAT-SIGMA requería, de acuerdo con modelos teóricos de los astrofísicos rusos Sunyaev y Titarchuk, que la compañera colapsada fuera un hoyo negro.

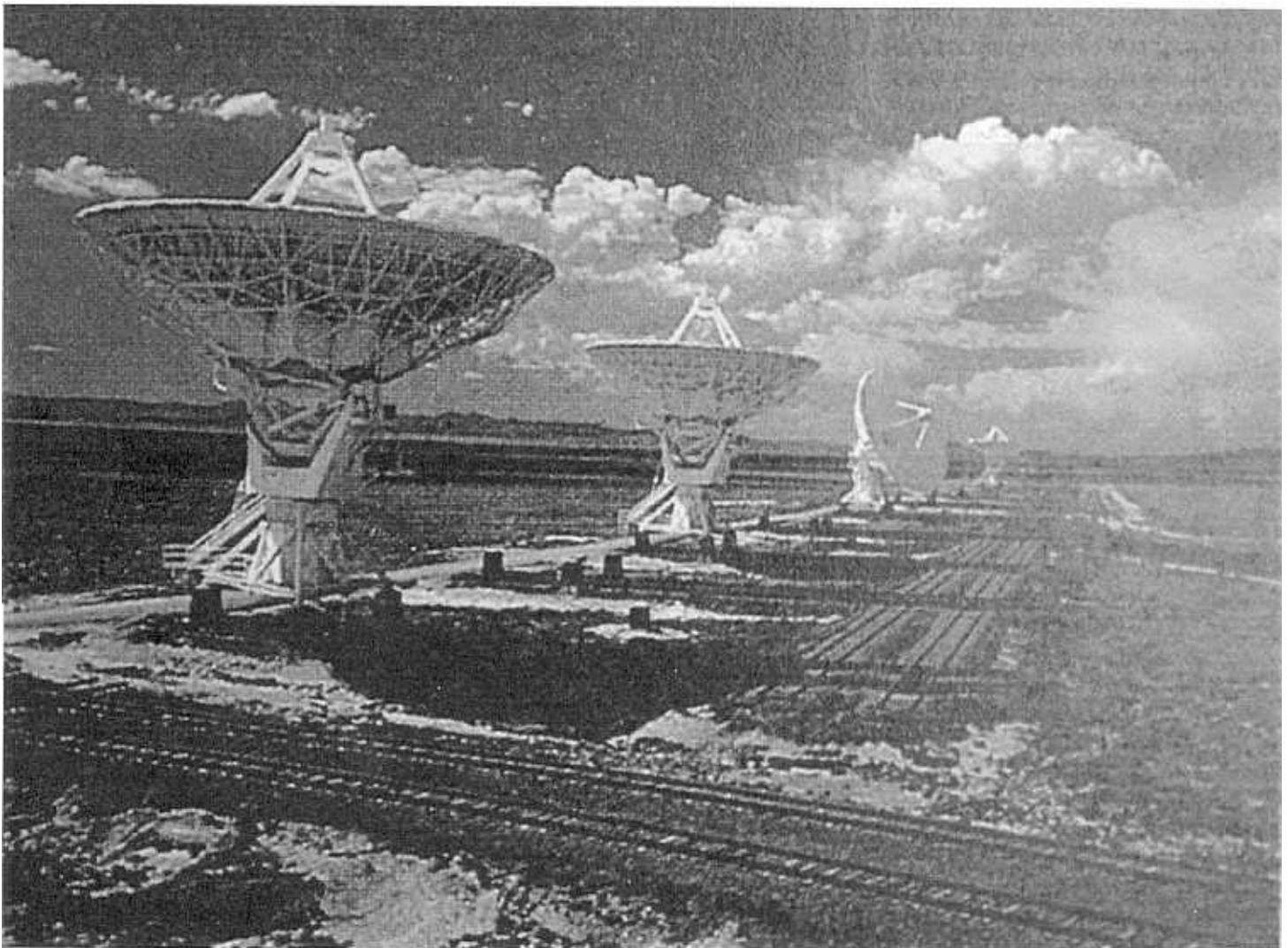
Se cree que la radiación de altas energías se produce en estos sistemas binarios de la siguiente manera: las capas exter-

nas de la estrella "normal" son arrebatadas gravitacionalmente por la compañera colapsada sin que pasen directamente a ésta, sino que primero forman parte de un disco que rota a su alrededor. Ya en este disco, el gas, en movimiento espiral, va cayendo hacia la compañera colapsada. En este disco existe mucha fricción, y el gas que lo compone se calienta a enormes temperaturas (del orden de mil millones de grados Kelvin), superiores a las temperaturas que existen en el centro de las estrellas (diez millones de grados Kelvin) y es este gas extremadamente caliente en el disco el que emite la radiación de rayos X y rayos gamma.

Las observaciones que realizamos desde el radiotelescopio conocido como el

Gran Conjunto de Radiotelescopios (Very Large Array) resultaron ser de gran utilidad desde un principio. El Gran Conjunto está formado (véase Figura 1) por 27 antenas metálicas parabólicas, cada una de 25 metros de diámetro, que apuntan al mismo objeto celeste. Está ubicado en Nuevo México y es propiedad del Observatorio Nacional de Radio de los EUA, pero afortunadamente está abierto al uso de la comunidad internacional calificada (esta política de "cielos abiertos" no es tan común como sería deseable; muchos observatorios restringen la asignación de tiempo de acuerdo con criterios, por ejemplo, de institución o de nacionalidad).

Figura 1. El Gran Conjunto de Radiotelescopios.

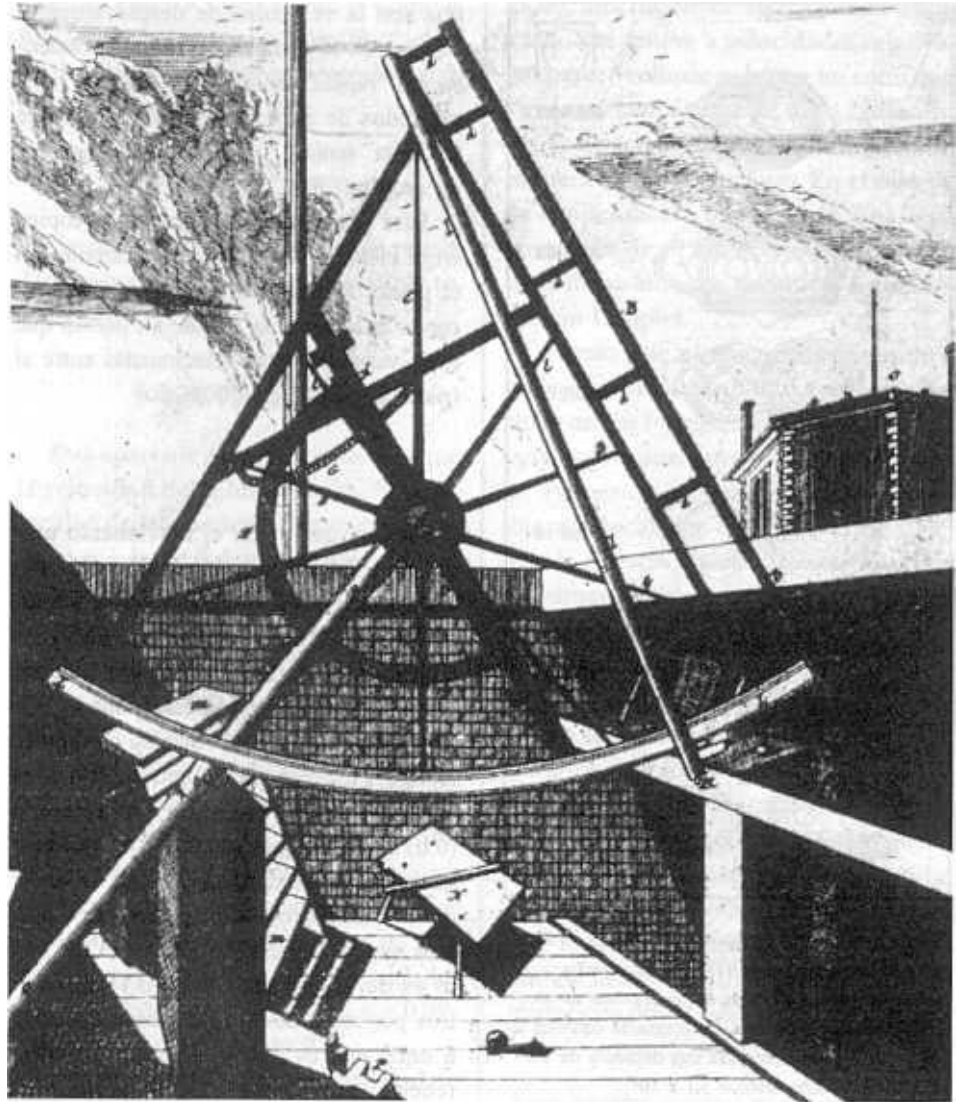


Las razones principales por las que las observaciones en la banda de radio resultaron tan útiles fueron dos: primero, la mayoría de las fuentes GRANAT-SIGMA, si bien están en nuestra galaxia, tienden a ser escasas y típicamente están bastante lejos del Sol. Mientras más lejos está una fuente, más polvo cósmico existe entre nosotros y ellas. Este polvo es opaco a la luz visible e inclusive a la infrarroja, pero por fortuna es prácticamente transparente a las ondas de radio. Por lo tanto, es en esta banda donde pudimos observar mejor estos relativamente remotos objetos galácticos. La segunda razón es que las técnicas de interferometría de radio, como las utilizadas por el Gran Conjunto de Radiotelescopios, permiten alcanzar gran resolución angular, que es la capacidad de ver detalles muy pequeños en una fuente.

La interferometría se realiza, grosso modo, de la siguiente manera: la señal que llega a los radiotelescopios es combinada electrónicamente entre sí (o correlacionada, para ser más técnicos). Las señales de cada par de radiotelescopios "interfieren" entre sí de manera tanto positiva (cresta con cresta) como negativa (cresta con valle) y esta información permite saber la forma de la fuente estudiada. Después de procesar bastante los datos, obtenemos el equivalente a una "fotografía" del objeto, sólo que hecha a partir de las ondas de radio que emite y no de la luz visible.

De las diversas fuentes que estudiamos, una se destacó pronto por ciertas peculiaridades en su comportamiento. Primero, variaba su flujo de un día a otro (la mayoría de las fuentes cósmicas no muestran una variabilidad tan rápida). Pero lo que más llamó nuestra atención fue que también su posición parecía cambiar de una a otra observación. Los astros normalmente mantienen su posición fija en el cielo, desplazándose con gran lentitud en el transcurso de los siglos.

Comenzamos a prestarle más atención a esta fuente, conocida como GRS 1915 +



105. Los nombres de las fuentes celestes ya nos dicen mucho de ellas. En este caso, GRS es la abreviatura de "GRanat Source", mientras que los números 1915 y +105 son las coordenadas celestes del objeto. Al aparecer la bóveda celeste ante nosotros como una proyección bidimensional, bastan dos números para ubicar un objeto (la tercera coordenada sería la distancia al objeto, la cual generalmente no se incluye en el nombre porque muchas veces se desconoce).

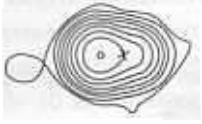
En los meses de marzo y abril de 1994 pudimos al fin realizar observaciones de esta fuente aproximadamente una vez por semana. Todo astrónomo quisiera tener los telescopios para él solo, por lo que hay

una gran competencia por el tiempo en ellos. En nuestro caso, fue después de explicar detalladamente las peculiaridades de la GRS 1915+105 y justificar cuidadosamente nuestro proyecto que pudimos obtener estos bloques de tiempo. La suerte también nos ayudó porque el 19 de marzo de 1994, la fuente tuvo una explosión y lanzó dos condensaciones que se movían alejándose de ella (Figura 2).

Las características espectrales y de polarización de la radiación nos indicaron que el mecanismo de emisión de estas dos condensaciones es la llamada radiación sincrotrónica, que se produce por electrones relativistas atrapados en campos magnéticos.



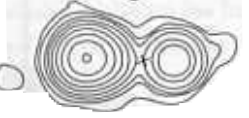
MAR 27



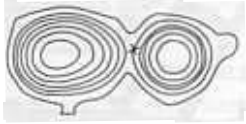
ABR 03



ABR 09



ABR 16



ABR 23



ABR 30



Figura 2. Mapas de contornos de la emisión de la fuente GRS 1915+105 para varias fechas de 1994. La escala de un segundo de arco en la parte inferior del diagrama equivale a 3.1×10^{17} centímetros para una distancia de 1.5 kiloparsecs (1 kiloparsec = 3.1×10^{21} centímetros). La posición de la fuente central está marcada con una cruz. La condensación a la izquierda parece moverse más rápido que la luz.

Una característica de estas condensaciones llamó nuestra atención. La condensación que se desplaza en el cielo hacia el sureste (el lado izquierdo en la figura 3) no sólo se movía casi al doble de la velocidad que la condensación con movimiento antiparalelo (el lado derecho en la Figura 3), sino que también era marcadamente más brillante.

¿A qué se debía esta aparente asimetría en las condensaciones lanzadas?

Lo que los astrónomos podemos medir a partir de los datos obtenidos son los llamados "movimientos propios", denotados usualmente con la letra griega μ , y

que son la velocidad de desplazamiento angular en el plano del cielo. La condensación "rápida" tenía $\mu_a = 17.6 \pm 0.4$ milisegundos de arco por día, mientras que la "lenta" tenía $\mu_r = 9.0 \pm 0.1$ milisegundos de arco por día.

Para pasar estos movimientos propios en el cielo, μ , a velocidades aparentes en el plano del cielo, v , es necesario conocer la distancia a la fuente, D , puesto que estas variables están relacionadas entre sí (para ángulos pequeños) por

$$v = D \mu$$

donde hay que poner el movimiento propio en unidades angulares adimensionales (radianes). Para ejemplificar la importancia de conocer la distancia podemos pensar en la siguiente analogía. Supongamos que una persona está sentada junto a una ventana y ve volar un avión a lo lejos. El movimiento propio del avión es tal que recorre un grado por segundo (0.017 radianes por segundo). Si sabemos que el avión se encuentra a una distancia de 10 kilómetros de nosotros, encontramos que su velocidad en el plano del cielo es de aproximadamente 0.17 kilómetros por segundo. Una mosca que pasara a unos metros frente a nosotros podría tener el mismo movimiento propio que el avión, pero por supuesto su velocidad sería mucho menor (porque la distancia también lo es).

La determinación de la distancia a los objetos astronómicos es uno de los problemas más antiguos y al mismo tiempo más vigentes de la astronomía: una lámpara situada a 100 metros nos parece más brillante que cualquier estrella. Queda claro entonces que es fundamental saber la distancia a un objeto para poder interpretarlo.

Afortunadamente, en el caso de GRS 1915+105, pudimos utilizar una técnica muy bien establecida y confiable para determinar su distancia. El plano de nuestra galaxia está lleno de nubes de gas y polvo. Mucho de este gas está en forma de hidró-

geno atómico, el cual tiene una línea espectral muy famosa y estudiada a la longitud de onda de 21 centímetros. Es entonces posible utilizar a GRS 1915+105 como si fuera una fuente de fondo y observar, al absorber su radiación, al hidrógeno atómico entre la fuente y nosotros. La cantidad de gas entre la fuente y el observador es ya un indicador de la distancia, a mayor cantidad mayor distancia. Pero podemos hacerlo aún mejor. Como nuestra galaxia tiene rotación diferencial (o sea, no rota como un cuerpo rígido, de modo que de acuerdo con su distancia al centro de la galaxia las nubes tienen diferente velocidad), es posible detectar líneas de absorción a distintas velocidades (provenientes de distintas nubes), lo cual indica que la fuente estudiada está detrás de ellas. De igual manera, el que ciertas nubes no sean detectadas, nos indica que la fuente estudiada está delante de ellas. Con esta técnica y otras consideraciones nos fue posible determinar que la distancia a GRS 1915+105 es 12.5 ± 1.5 kiloparsecs (1 kiloparsec = 3.1×10^{21} centímetros). En la figura 3 mostramos un esquema de las posiciones relativas del Sol y de GRS 1915+105 en la galaxia.

Al conocer la distancia es posible encontrar las velocidades de las condensaciones como aparecen proyectadas en el plano del cielo, las cuales resultan ser de

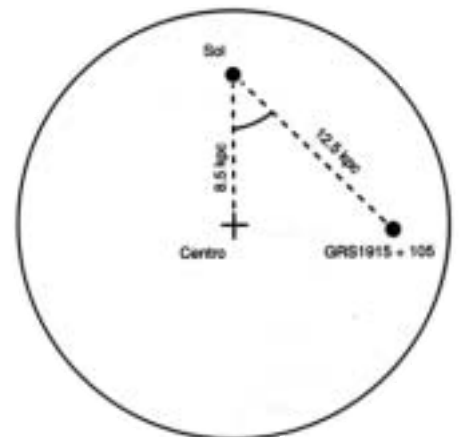


Figura 3. Esquema de las posiciones relativas del Sol y de GRS 1915+105 en la Galaxia, la cual se muestra vista de cara.

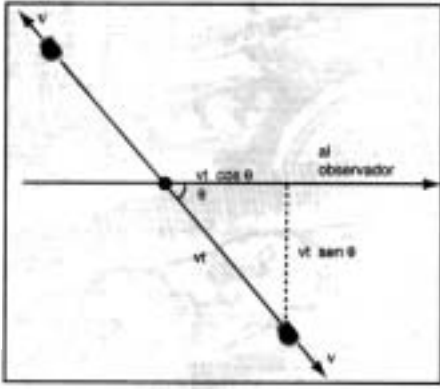


Figura 4. Esquema del modelo de eyección antiparalela de condensaciones.

1.25 y 0.65 veces la velocidad de la luz en las condensaciones "rápida" y "lenta", respectivamente. Nos preocupó poco que una de ellas pareciera moverse más rápido que la luz, pues recordamos que movimientos superlumínicos similares (así se llama a estos movimientos aparentemente más rápidos que la luz) habían sido detectados en los quásares en 1971. Después de una considerable controversia al respecto, la explicación a dicho fenómeno aceptada por la mayoría de los astrónomos fue que estábamos en presencia de una *ilusión relativista*.

Consideremos un astro estacionario (véase Figura 4) que lanza dos condensaciones con direcciones antiparalelas y velocidad v , de modo que la que se acerca oblicuamente a nosotros forma un ángulo θ con la línea de visión. Después de un tiempo t , las condensaciones se han movido una distancia vt . Desde el punto de vista del observador la condensación que se acerca se ha desplazado $vt \cos(\theta)$. Sin embargo, como la condensación se acerca a nosotros, su radiación cada vez tiene que recorrer un camino menor para llegar al observador. En el ejemplo dado, el recorrido que la condensación "ganó" por su movimiento es $vt \cos(\theta)$. O sea, que como la radiación se mueve a c , la velocidad de la luz, el tiempo "ganado" es $vt \cos(\theta)/c$. Entonces, desde el punto de vista del observador, la condensación no tardó t en moverse hasta el punto observado,

sino tan sólo $t' = t - vt \cos(\theta)/c$. Como la velocidad aparente, v_a es $vt \cos(\theta)/t'$, obtenemos que la velocidad aparente de la condensación que se acerca es:

$$v_a = \frac{v \cos(\theta)}{1 - (v \cos(\theta)/c)}$$

De igual manera, se tiene que la velocidad aparente de la condensación que se aleja (se aleja) es:

$$v_r = \frac{v \cos(\theta)}{1 + (v \cos(\theta)/c)}$$

Esta aparente asimetría se debe a que la velocidad de la luz es finita. Si la velocidad de las condensaciones es pequeña, $v \ll c$, es fácil demostrar que ambas velocidades aparentes son prácticamente iguales con $v_a = v_r = v \cos(\theta)$ (éste sería el caso no-relativista). Sin embargo, si la velocidad se aproxima a la de la luz, la asimetría comienza a aparecer y, en particular, si es lo suficientemente cercana a la de la luz, uno puede obtener que $v_a > c$.

Al tener las dos ecuaciones anteriores y dos incógnitas, v y θ , podemos resolver el sistema obteniendo $v = 0.92c$ y $\theta = 70^\circ$. En la Figura 5 mostramos las velocidades aparentes para un sistema con $v = 0.92c$ como función del ángulo θ .

En otras palabras, la velocidad real de las condensaciones es 0.92 de la luz. Debido a la velocidad finita de la luz, vemos la condensación que se acerca moverse más rápido que la velocidad real y a su vez más lentamente a la que se aleja.

Un segundo efecto que observamos es que aun cuando las condensaciones sean idénticas, la que se acerca parece ser mucho más brillante que la que se aleja. También analizamos en nuestros datos este segundo efecto, con valores compatibles con los predichos en los modelos (comparados con la misma separación de la fuente central, la condensación que se acerca es 8 veces más brillante que la que se aleja). Este efecto lo causa en buena parte el que, desde el punto de vista de un observador en re-

poso, una fuente de radiación isotrópica que se mueve a velocidades relativistas parece colimar su luz en un cono que "enfoca" la mayor parte de la radiación en la dirección del movimiento, como si fuera el faro de un auto. En el caso de la condensación que se aleja, nos llega muy poca de su radiación. A este efecto se le llama enfoque relativista o ampliación Doppler.

Puesto que el efecto superlumínico ya había sido descubierto muchos años atrás en los lejanos quásares, ¿qué es lo que hace únicas nuestras observaciones?

Primero, que no se pensaba que hubiera velocidades tan grandes en objetos de nuestra aparentemente humilde y ordinaria galaxia. En contraste, los quásares son cuerpos extraordinarios que sólo existieron en el pasado del universo y en los que se sospecha que un hoyo negro superdenso en su centro da energía a los chorros relativistas. En nuestra galaxia, los movimientos de materia más rápidos que se conocían hasta 1979 eran las eyecciones de cáscaras que se producen cuando explota una supernova, y que llegan a alcanzar 0.07 de la velocidad de la luz. En 1979, se descubrió un misterioso objeto en nuestra galaxia, conocido como SS433, el cual lanza cho-

Ángulo entre línea de visión y eje de eyección (grados)

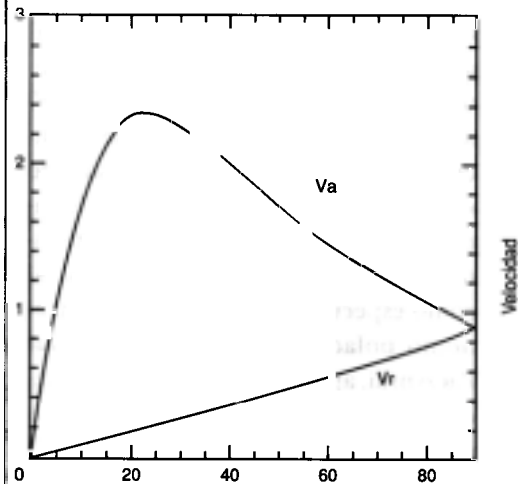


Figura 5. Velocidades aparentes para la condensación que se acerca, v_a y la que se aleja v_r , como función del ángulo θ para el caso de una velocidad real igual a $0.92c$.



rrros de gas con $0.26c$. Por 25 años esta fuente mantuvo el récord de velocidad galáctico, hasta el descubrimiento de GRS 1915+105, que con $0.92c$ la superó ampliamente. De nuevo, para ser francos, nosotros andábamos a la caza de movimientos superlumínicos en las fuentes de rayos gamma. Ya anteriores investigaciones nuestras y de otros grupos, así como especulaciones teóricas del astrónomo polacoestadounidense Bohdan Paczynski, apuntaban hacia la identificación de las fuentes galácticas de rayos gamma como posibles “microcuásares”, cuerpos que tenían algunas de las características de los cuásares pero en mucho menor escala de tamaño y potencia. ¿Si los cuásares tenían movimientos super-

lumínicos, por qué no habrían de tenerlos los microcuásares?

La segunda razón que hace el descubrimiento de movimientos superlumínicos en GRS 1915+105 importante es que por primera vez se pudo ver a la condensación que se aleja. En los cuásares sólo se detecta la condensación que se acerca. El efecto de amplificación Duppler es tal que la condensación que se acerca, como ya lo explicamos anteriormente, es miles de veces más brillante que la que se aleja, lo cual permite la detección de aquella, pero imposibilita la detección de ésta. En GRS 1915+105 hemos podido, gracias a que vemos ambos componentes, confirmar más allá de cualquier duda razonable que estamos vien-

do movimientos y efectos relativistas. En el caso de los cuásares, aún había quien sostenía la explicación de que estaban mucho más cercanos y que por esa razón no se daban los movimientos superlumínicos.

A los pocos meses de nuestro descubrimiento, varios grupos reportaron la detección de una segunda fuente superlumínica en la galaxia. El estudio detallado de este nuevo fenómeno galáctico nos debe llevar a una mejor comprensión de la formación de chorros de gas relativistas en el universo.

Luis Felipe Rodríguez
 Instituto de Astronomía, UNAM.
 Félix Mirabel
 Centro de Estudios de Saclay, Francia.