

CIENCIAHOY

Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la
Asociación Ciencia Hoy

ARTÍCULO

Fenómenos Violentos en Quasars

Gustavo E. Romero y Héctor Vucetich

Instituto Argentino de Radioastronomía y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)

Durante más de treinta años los quasars han sido una fuente de perplejidad para los astrofísicos que se han aventurado a su estudio. La historia del descubrimiento de estos objetos comenzó en 1960, cuando las técnicas radioastronómicas permitieron determinar la ubicación en el cielo de algunas fuentes de radio puntuales con suficiente precisión como para identificarlas con objetos ópticos. Un radiotelescopio es un instrumento que consta de una superficie que refleja las ondas de radio emitidas por cuerpos celestes y de un receptor que las colecta y amplifica. La capacidad del radiotelescopio para determinar la posición de una fuente de radioemisión depende del tamaño de la superficie colectora o antena. Hacia comienzos de los 60 la capacidad de algunos radiotelescopios era tal que resultó posible identificar la fuente de radio-ondas 3C48 con un objeto luminoso de apariencia estelar. Se trataba, aun por los mayores telescopios ópticos de la época, de un punto de luz en el cielo. En poco tiempo, los astrónomos identificaron muchas otras radiofuentes con estrellas, o al menos con objetos que parecían serlo.

Los astrofísicos, sin embargo, se resistían a aceptar la idea de que existieran radioestrellas potentes, esto es, estrellas que emitiesen la mayor parte de su energía en forma de ondas de radio. Si bien es cierto que el Sol emite en radiofrecuencias, lo hace muy débilmente. La nueva clase de objetos detectados, en cambio, parecía emitir señales en frecuencias de radio con una intensidad sin precedentes.

Pronto se comprobó que esta emisión decrecía al aumentar la frecuencia de observación y que, además, era altamente polarizada (ver "[¿Un Universo Retorcido?](#) ").

Estas son las características típicas de un mecanismo de emisión electromagnético conocido como radiación sincrotrón. La radiación sincrotrón es producida por electrones (o positrones) que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz (relativistas) mientras son afectados por campos magnéticos. Nadie entendía cómo era posible que en las estrellas pudiese acelerarse una población de electrones hasta alcanzar estas velocidades.

El problema se agravó al notarse que los espectros tomados de distintas fuentes parecían contener marcas de emisión y absorción producidas por elementos desconocidos en la Tierra. Cada elemento químico emite (y absorbe) radiación en frecuencias determinadas por las leyes de la mecánica cuántica. Si un elemento abunda en una estrella, al graficar la curva de intensidad de radiación emitida en función de la frecuencia (espectro), veremos un máximo pronunciado. El máximo estará localizado exactamente en la frecuencia que corresponde al elemento en cuestión. Cada elemento tiene una firma característica en el espectro de un objeto celeste, lo cual nos permite conocer la composición química de cuerpos lejanos. Con la única excepción del helio, que fue encontrado antes en el Sol que en la Tierra, todos los elementos detectados en las estrellas han sido siempre elementos ya conocidos. En las radioestrellas, en cambio, todos los elementos parecían ser desconocidos. ¿Estarían estos astros hechos enteramente de materia extraña para nosotros? La respuesta la aportó el astrónomo holandés Maarten Schmidt, en 1963. Estudiando las líneas de emisión del objeto de apariencia cuasiestelar llamado 3C273, Schmidt se percató de que lo que estaba viendo eran en realidad líneas producidas por elementos ordinarios, pero desplazadas hacia la parte menos energética del espectro. El causante del corrimiento de las marcas espectrales es un fenómeno conocido como *efecto Doppler*. Si una fuente de ondas se aleja del observador, este recibe la emisión con una separación entre los máximos de cada pulso mayor que la que recibiría si la fuente estuviera en reposo. Se trata del mismo efecto que produce la variación de tono en el silbido de un tren que se aleja. Lo sorprendente en el caso estudiado por Schmidt era la velocidad a la que debía estar alejándose la fuente: alrededor de 50.000 km s^{-1} . Dado que se sabía que las velocidades más grandes a las que se mueven objetos galácticos son de unos pocos centenares de kilómetros por segundo, 3C273 debía ser un objeto extragaláctico.

En pocos meses se comprobó que todas las radiofuentes de apariencia cuasiestelar presentaban espectros corridos "hacia el rojo", o sea, hacia energías más bajas: los objetos estaban, literalmente, huyendo de nosotros a velocidades fantásticas. Más aún, si esta velocidad de recesión era de origen cosmológico (Big-Bang) y no debida a un problema local entonces, por la ley de Hubble que relaciona velocidades con distancias, las fuentes cuasiestelares deberían encontrarse asombrosamente lejos de nosotros. A esas distancias la potencia emitida por las radiofuentes debería ser miles, y en algunos casos millones de veces la potencia radiada por una galaxia normal en las frecuencias de radio.

Hacia fines de 1963 estaba claro que las fuentes de apariencia cuasiestelar eran cualquier cosa menos estrellas. Sin embargo, a falta de un nombre mejor y, sobre todo, debido a la ignorancia sobre su verdadera naturaleza, se fue popularizando la denominación quasar, basada en la contracción de las palabras inglesas "quasi-stellar" (cuasiestelar).

Los quasars estaban lejos de dejar de sorprendernos. En 1965 se observaron las primeras variaciones en la intensidad de la emisión en radiofrecuencia de estos objetos. Estas variaciones se manifestaron en intervalos del orden de apenas, un par de años, un lapso brevísimo en astrofísica. Más adelante se observaron cambios violentos en la emisión, que afectaron hasta el 50% del flujo total de energía, en lapsos de meses e incluso menos. La conclusión de estas dramáticas variaciones fue que los quasars debían ser extremadamente pequeños. Dado que ninguna perturbación puede propagarse más rápidamente que la luz (de acuerdo con los postulados de la teoría de la relatividad), el tamaño del quasar no puede ser mayor que la distancia que recorre la luz en el lapso en que se produjo la variación de la emisión. Para entender esto, imaginemos que todas las personas de la Argentina están sentadas. En algún momento, alguien da la orden de ponerse de pie. El tiempo en que tardan en pararse todas las personas dependerá de la velocidad con que se extienda la información con la orden impartida: $t \sim l/c$, donde l es la distancia a lo largo de la cual están distribuidas las personas y c es la velocidad de propagación de la información. En el caso de los quasars un análisis similar indica que la mayor parte de la energía se produce dentro de una región

muy pequeña, del orden de 10^8 cm (unas 50.000 veces menor que el radio de nuestra propia galaxia).

Durante las décadas de los 70 y 80 se siguieron sumando enigmas a los ya existentes sobre los quasars. En los 70 se utilizaron nuevos sistemas de interferencia basados en radiotelescopios con el fin de obtener imágenes de muy alta resolución del núcleo de ciertos *quasars*. Para desconcierto de los astrónomos se detectaron componentes luminosos que parecían alejarse del centro del *quasar* a velocidades aparentemente mayores que la de la luz. Estas velocidades "supralumínicas", como se las llamó, no resultaron ser una violación del límite superior de velocidades posibles que impone la teoría de la relatividad sino que se trataba en realidad de un efecto aparente, producido por el movimiento hacia el observador de una fuente de radiación con velocidad cercana a la de la luz (ver recuadro "Fuentes Supralumínicas"). En esa época, se detectó también la presencia de finos filamentos de luz que emanaban del núcleo de ciertos *quasars*. Se los llamó *jets* (chorros) y hoy se consideran el producto de la eyección de plasma por parte del mecanismo central que genera la energía del *quasar*. Estos jets pueden extenderse a lo largo de enormes distancias por el espacio intergaláctico (más de 10^{24} cm en algunos casos), y parecen estar muy bien colimados, como si hubieran sido producidos por algún tipo de tobera.

A fines de los 80 se agregó otro hecho asombroso: una gran cantidad de quasars (aquellos en los que la intensidad de la emisión en radio permanece constante al aumentar la frecuencia) presentan variaciones ultrarápidas en su luminosidad. Hasta entonces se sabía de la presencia de variabilidad sobre escalas temporales del orden de meses y hasta semanas, pero con este descubrimiento resultó evidente que una gran cantidad de fuentes cambian violentamente su intensidad en sólo unos pocos días e incluso en algunas horas.

El caso de variabilidad más extremo a frecuencias de radio fue detectado por los autores en el objeto llamado PKS 0537-441, en enero de 1993. La intensidad de esta fuente cambió un 45% en un lapso de apenas unas tres horas (ver Fig 1).

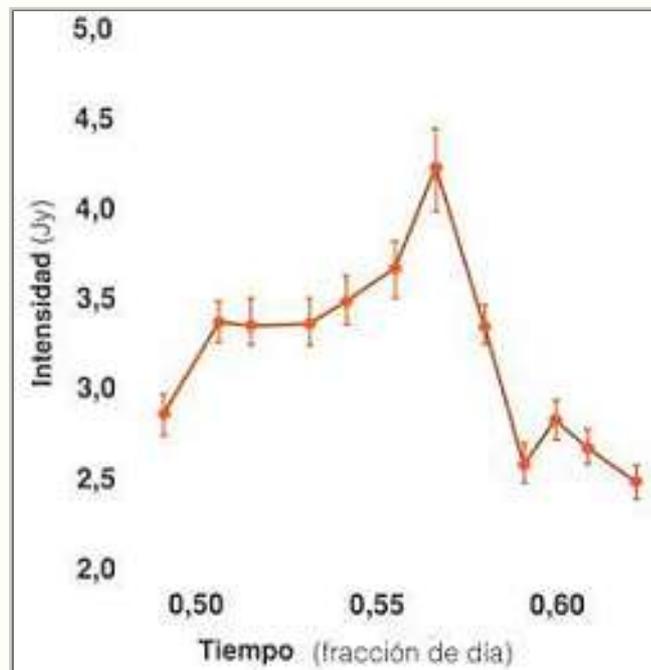


Fig. 1

Evento de variabilidad en la emisión de radio del quasar PKS 0537-441 ocurrido en enero de 1993.

Hasta el momento, la última pieza en el rompecabezas de los *quasars* la aportó el satélite Compton, un observatorio orbital de rayos gamma lanzado por la NASA en 1991 y así bautizado en honor al físico estadounidense A.H. Compton (1892-1965). Este satélite mostró que alrededor de 50 de los *quasars* más potentes emiten la mayor parte de su radiación no en radio, como se había creído hasta entonces, sino en rayos gamma, la forma más energética de radiación electromagnética. Se ha estimado que alguno de estos objetos emiten rayos gamma con potencias totales de 10^{48} erg seg^{-1} , valor que puede ser comparado con los 10^{45} erg seg^{-1} de su emisión en radio y con los 10^{39} erg seg^{-1} que radia nuestra galaxia. En algunos *quasars*, como por ejemplo 3C279, esta emisión se presenta a energías mayores de 100 MeV, mientras que en otros (como 3C273) el pico máximo está alrededor de los 8 MeV. En ambas clases de objetos la luminosidad gamma varía en tiempos muy cortos, del orden de las semanas o incluso menos.

Como hemos visto, los *quasars* parecen ser lugares donde ocurren cosas muy violentas. ¿Qué es lo que produce tanta radiación? ¿Cómo se forman los jets? ¿Qué causa las variaciones abruptas en su emisión? Veamos ahora, después de treinta años de investigación sobre *quasars*, las respuestas que podemos dar.

La primera sugerencia bien orientada sobre la naturaleza de la fuente última de energía en los *quasars* provino del astrofísico ruso Y. B. Zel'dovich en 1964. En una conferencia celebrada en Londres durante junio de 1965, I. Novikov, único colaborador de Zel'dovich autorizado a salir de la Unión Soviética, sugirió que la energía liberada en los *quasars* podía ser de origen gravitatorio, y propuso considerar la posible presencia de agujeros negros supermasivos en el centro de estas fuentes. Los agujeros negros (ver "[Agujeros Negros](#)") son objetos compactos resultado del colapso gravitatorio de objetos hechos de materia ordinaria como, por ejemplo, las estrellas. El campo gravitatorio en estos objetos es tan intenso que nada, ni aun la luz, puede escapar de ellos. Los agujeros negros sólo se manifiestan en el



Imagen de radio del objeto 3C449, donde pueden observarse el núcleo y un par de jets emitidos en direcciones opuestas.

universo a través de su interacción gravitatoria con otros cuerpos.

Zel'dovich, Novikov y después de ellos los ingleses D. Lynden-Bell y Martin Rees, señalaron que si uno de estos objetos, con una masa del orden de 10^8 masas solares, se encontrase en el centro de una galaxia ordinaria la materia de esta se precipitaría sobre él y formaría un disco, llamado *disco de acreción*. El disco mantiene una estructura estable debido al equilibrio entre la fuerza gravitatoria, que arrastra la materia hacia el agujero central, y la fuerza centrífuga originada en la rotación, que tira en sentido opuesto. Si una partícula del disco no perdiese energía, permanecería orbitando en torno al agujero negro como si fuese un planeta que describe una órbita Kepleriana. Sin embargo, los distintos anillos concéntricos que forman el disco ejercen entre sí una fuerza de naturaleza viscosa que resulta en la transformación en calor de la energía de las partículas. Al perder energía, las partículas van cambiando de órbita y se acercan cada vez más al agujero. Luego de pasar por la última órbita estable, la caída dentro del agujero negro no puede evitarse y las partículas son engullidas por este. Al caer, la materia es acelerada y emite radiación electromagnética. Desde la cara interna del disco y hasta la superficie del agujero (llamada *horizonte de eventos*, ya que debajo de ella nada puede ser detectado) existe un puente de materia radiante que es engullido permanentemente. La producción de energía en el disco es muy eficiente: depende del tipo de agujero, entre el 6% y el 40% de la masa que se devora es transformada en energía radiante (de acuerdo con la equivalencia entre masa y energía $E=mc^2$). A fin de proporcionar la luminosidad de un *quasar*, es necesario que caigan en el agujero entre 1 y 10 masas solares por año (recordemos que una galaxia como la nuestra contiene unos 100.000.000.000 de estrellas).



CIENCIAHOY

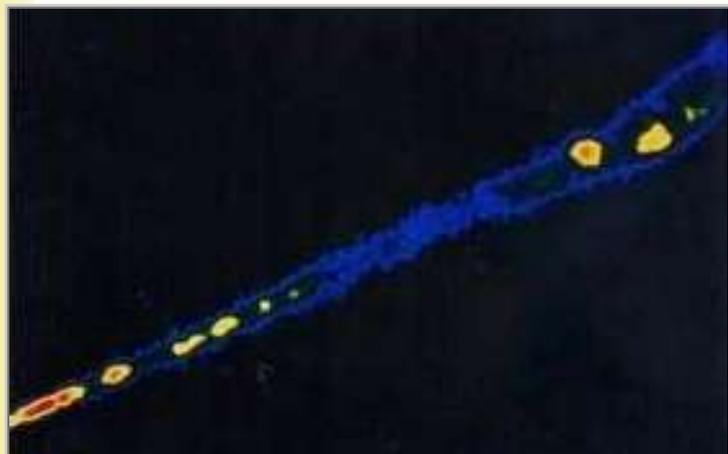
Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la
Asociación Ciencia Hoy

ARTÍCULO

Fenómenos Violentos en Quasars

Gustavo E. Romero y Héctor Vucetich

Instituto Argentino de Radioastronomía y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)



Los agujeros negros no sólo permiten explicar cómo se produce la energía del *quasar*, sino que también proporcionan un mecanismo para la formación de los jets y la generación de rayos gamma.

Cuando el disco de acreción es suficientemente grueso, o sea, cuando su espesor es mucho mayor que las dimensiones del agujero, se forman dos canales sobre los polos de este. Las paredes de los canales están constituidas por la cara interna del disco.

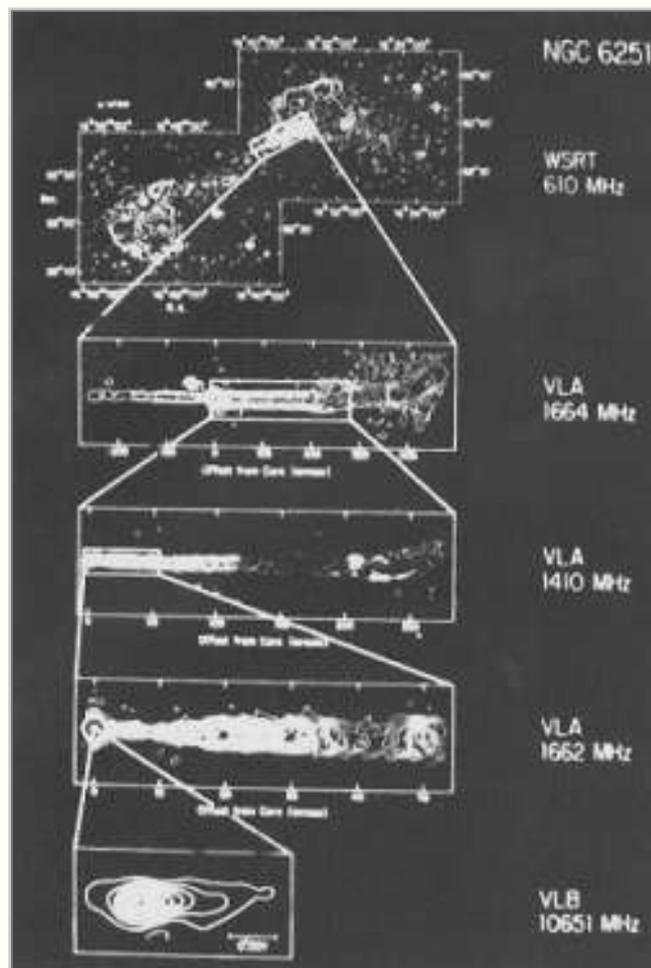
Detalle de alta resolución del radiojet del objeto NGC 6251

La presión de la radiación dentro de cada canal acelera a los electrones libres que allí se encuentran según la dirección del eje de rotación del sistema, lo que forma dos haces bien colimados de partículas relativistas que son inyectadas en el espacio circundante. Este es el origen de los jets del *quasar*. Los electrones que componen el jet interactúan con los fotones emitidos por la superficie externa del disco de acreción, lo que da lugar a una poderosa emisión de rayos gamma por medio del efecto Compton inverso. Este efecto se produce cuando la partícula, que es extremadamente energética, pasa parte de su energía al fotón y lo convierte en un rayo gamma. Estos rayos gamma se llevan una fracción importante de la energía cinética del jet, y dominan en muchos casos el espectro del *quasar*. Ciertas inestabilidades en el disco pueden hacer variar el flujo de fotones emitidos desde su superficie, por lo que se produce, a su vez, una emisión gamma variable como la detectada por el satélite Compton. En general, esta emisión tendrá energías mayores de 100MeV. En aquellos *quasars* en los cuales el máximo de la potencia emitida se encuentra en el rango 1-10MeV, es posible que la aniquilación de electrones y positrones sea importante. Los positrones son partículas idénticas en todo a los electrones pero de carga opuesta, que tienen la propiedad de aniquilarse cuando se encuentran con un electrón, producen energía de acuerdo con la interacción $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$, donde e^- simboliza un electrón, e^+ simboliza un positrón y 2 son dos rayos gamma. La energía liberada, $2m_e c^2$, debería ser observada en el rango antes citado entre 1 y 10MeV.

A medida que el jet se aleja del agujero negro, va abriéndose camino por el espacio interestelar de la galaxia que contiene al *quasar* y puede encontrarse con obstáculos como, por ejemplo, nubes de plasma más frío. Cuando el jet se estrella contra estas nubes se originan ondas de choque, semejantes a las que producen los aviones al romper la barrera del sonido. Estas ondas son discontinuidades en las variables que caracterizan al fluido que avanza a velocidades cercanas a la de la luz. En el caso de que el jet del quasar apunte aproximadamente hacia la Tierra, la región golpeada por la onda de choque se ve como una [componente supralumínica](#) que se separa del quasar central.

Los jets se propagan hasta grandes distancias del *quasar*. Finalmente, luego de haber recorrido varios cientos de miles de años-luz, son frenados por el medio intergaláctico y forman regiones de emisión sincrotrón conocidas como "manchas calientes" (*hot spots*, en inglés). Las partículas del jet son reaceleradas en estas regiones por ondas de choque y se mantienen emitiendo en radio-frecuencias por el mecanismo sincrotrón.

Vemos, pues, cómo es posible explicar las diversas características observables de los *quasars* suponiendo la existencia en ellos de un objeto que es en sí mismo invisible: un agujero negro. Si bien el agujero negro no es observable ya que no emite luz, las consecuencias de su interacción gravitatoria con el medio que lo rodea sí lo son. Este procedimiento es usual en la investigación científica. Toda teoría con un alto nivel predictivo supone la existencia de entidades teóricas que no son directamente observables. Entre muchos otros, el electrón, los *quarks* y la mente humana han compartido ese status. La validez de las suposiciones teóricas sólo puede contrastarse al comparar las teorías que las contienen con la realidad. Al aumentar el rigor de los tests empleados puede suceder (como en el caso de la mente, por ejemplo) que las entidades supuestas sean reemplazadas por otras de nivel más profundo (por ejemplo, subsistemas neurales plásticos del cerebro).



Montaje fotográfico de distintas imágenes del objeto NGC 6251, donde pueden observarse detalles de la estructura del objeto a distintas resoluciones. La imagen inferior corresponde al núcleo, la superior a todo el objeto, y en las restantes se aprecian distintas partes de uno de los jets. A la derecha de cada imagen se detalla el nombre del instrumento (radiotelescopio) con que se le observó y la frecuencia de observación.

En los próximos años, el satélite Compton, el telescopio espacial Hubble y toda una nueva generación de instrumentos astronómicos, como el telescopio Gemini, continuarán aportando datos para contrastar, corregir, y si es necesario reemplazar el modelo de los *quasars* hecho sobre la base de los agujeros negros. Agujeros negros que se han transformado desde un concepto casi de ciencia ficción en la década de 1960 en una de las herramientas teóricas fundamentales para intentar conocer, aunque sea en sus aspectos más rudimentarios, la estructura del universo.

Pequeño Glosario

| | |
|------------------------------|--|
| Agujero negro: | objeto colapsado por la acción de su propio campo gravitatorio. |
| Año luz: | distancia recorrida por la luz en un año (del orden de 10^{18} cm). |
| Disco de acreción: | disco formado por materia que orbita un objeto masivo. |
| Electrón-voltio (eV): | energía que adquiere un electrón cuando atraviesa una diferencia de potencial eléctrico de un voltio |
| Fotón: | partícula sin masa que transmite la interacción electromagnética. |
| Jet: | chorro de plasma altamente colmado. |
| Luminosidad: | energía radiada por unidad de tiempo. |
| Quasar: | objeto extragaláctico muy compacto de extraordinaria luminosidad. |
| Plasma: | materia completamente ionizada, esto es, en ella los electrones han sido separados de los átomos. |
| Rayo gamma: | radiación electromagnética de energía mayor de 1MeV ($=10^6$ eV). |
| Radiotelescopio: | instrumento diseñado para recibir y registrar señales de radio provenientes de objetos astronómicos |

Lecturas sugeridas

ROMERO, G.E., COMBI, J.A., VUCETICH, H., 1995, *Astrophysics and Space Science*, Vol. 225, p. 218.

THORNE, K, 1994, *Black holes and time warps*, Norton & Company, New York.

WEEDMAN, D.W., 1986, *Quasar astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge.

