



Estallidos violentos en núcleos activos de galaxias: el caso del blázar 3C 454.3

Erika M. Benítez Lizaola

Los núcleos de galaxias que emiten energías equivalentes a las de millones de millones de estrellas son un ejemplo de fenómenos extremos que existen en el universo. Tomando como ejemplo a los blázares, aquí se explica qué métodos se usan para estudiarlos y cuáles son las interrogantes que todavía persisten para entender su comportamiento.

Núcleos activos de galaxias

Existen en el universo un subconjunto de galaxias cuyos centros o núcleos son extraordinariamente luminosos (para cuantificar, emiten del orden de 10^{42-47} ergios por segundo; es decir, que su luminosidad equivale a la luz que emiten varios billones de estrellas juntas).

Resulta aún más sorprendente que la energía emitida por estos núcleos es producida en una región cuyo volumen es significativamente menor a un pársec cúbico (el pársec equivale a unos 3 años luz, o 10 billones de kilómetros). En la literatura astronómica estos objetos se conocen como *núcleos activos de galaxias* (NAGs). El estudio de los núcleos activos de galaxias comenzó en la década de los sesenta, a raíz del descubrimiento de los cuásares (acrónimo de *quasi-stellar objects*, objetos cuasi-estelares). Desde entonces, el objetivo central de esta disciplina ha sido determinar qué procesos físicos se hallan detrás de la enorme cantidad de energía que emiten. La idea es descubrir qué tipo de mecanismos juegan un papel importante en producir la actividad de los núcleos. Esto implica conocer la cantidad y tipo de combustible que requiere la “máquina central”, término utilizado para referirse al objeto que produce la energía emitida y, en su momento, entender su evolución y su posible cese de actividad.

El estudio del fenómeno núcleos activos de galaxias está además íntimamente conectado con la evolución misma de la galaxia anfitriona que alberga al núcleo

activo y, por consiguiente, con el estudio de la formación y evolución de las galaxias en general, ambos cruciales para la comprensión del universo.

El modelo estándar

Zel'dovich y Novikov (1964) propusieron el llamado “modelo estándar” para explicar el origen de la enorme cantidad de energía que emiten los núcleos activos de galaxias. Dicho modelo propone que en el núcleo de estos objetos existe un agujero negro supermasivo (de diez y hasta mil millones de veces la masa del Sol) el cual está rodeado por gas del centro de la galaxia. Este gas forma una especie de remolino de plasma (técnicamente llamado *disco de acreción*), el cual provee del combustible necesario para encender la máquina central, la cual se encarga de transformar energía gravitacional en energía de radiación.

En general, resulta que es precisamente el gas del disco de la galaxia anfitriona el que se usa como combustible para encender los núcleos activos de galaxias. Para que dicho gas llegue a la región nuclear, es necesario que pierda una gran cantidad de momento angular. Así, uno de los problemas por resolver en el campo de los núcleos activos de galaxias radica en establecer el tipo de mecanismos necesarios para lograr que el gas pierda momento angular y pueda llegar al lugar apropiado. Se estima que la tasa de masa absorbida por el agujero negro para encender un núcleo activo es de una milésima de masas solares por año, para los núcleos activos de galaxias de baja luminosidad, y de una a diez masas solares por año para los objetos más luminosos.

Clasificación de los núcleos activos de galaxias

Los núcleos activos se han clasificado empíricamente desde su descubrimiento, dando lugar a una familia de objetos, grande y

compleja. No obstante, para comprender sus propiedades más importantes, los podemos dividir en tres clases importantes:

Núcleos activos de baja luminosidad

Los núcleos activos de galaxias con luminosidades bajas son los más fáciles de estudiar, debido a su cercanía (están dentro de lo que llamamos el “universo local”). En esta clase se encuentran los objetos conocidos como *liners* y también las *galaxias Seyfert* (véase Figura 1). Las galaxias anfitrionas de esta clase de núcleos activos son la mayoría de las veces de tipo espiral.

Los núcleos activos de galaxias suelen dividirse además en *tipo 1* y *tipo 2*, como consecuencia de las propiedades espectrales que muestran en la región del óptico (es decir, las características de la luz visible que emiten). La diferencia radica exclusivamente en identificar en el espectro observado la presencia de líneas de emisión “anchas”. Esta emisión proviene de gas ionizado localizado (en algunos objetos) a tan sólo unos cuantos pársecs de la fuente central y que se mueve con velocidades del orden de miles de kilómetros por segundo. Las líneas anchas se observan solamente en núcleos activos de galaxias de Tipo 1. No obstante, ambos tipos de núcleos activos de galaxias presen-

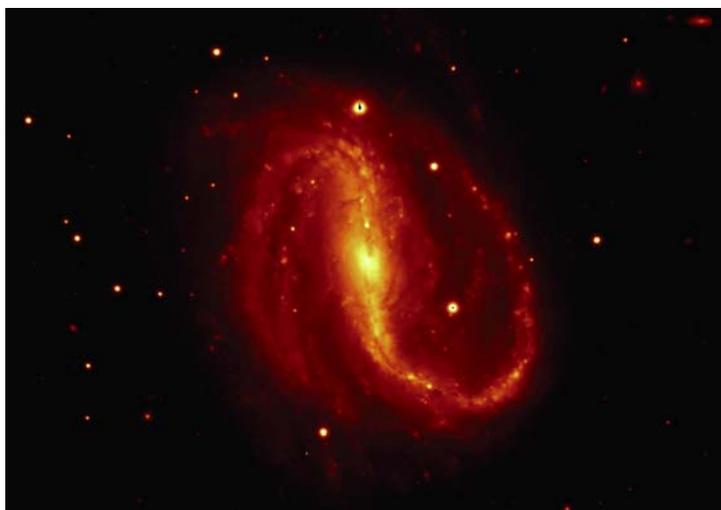
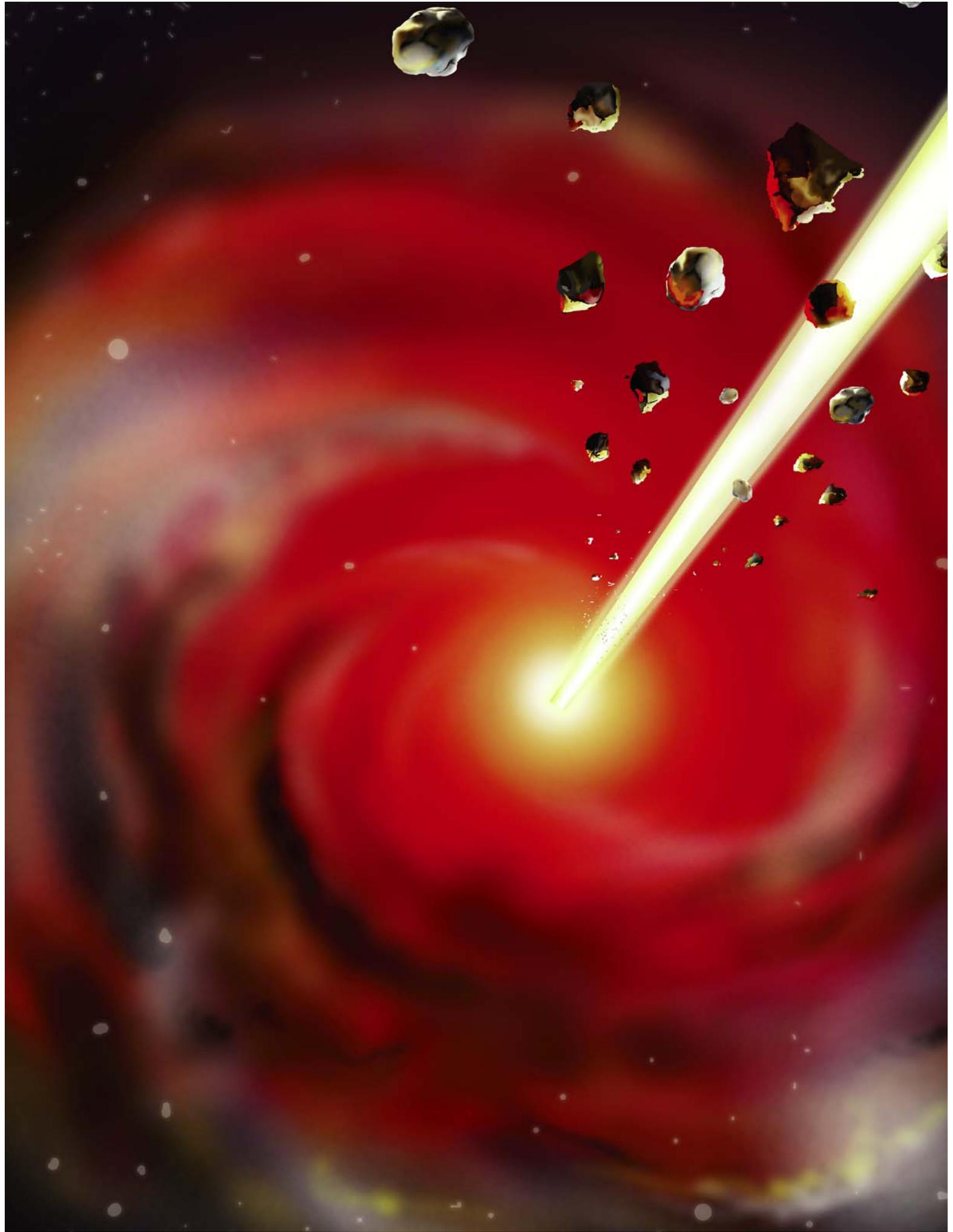


Figura 1. Ésta es una imagen en luz visible de la galaxia Seyfert NGC7479, obtenida con el telescopio Nórdico (perteneciente a los países escandinavos y Dinamarca, y ubicado en las islas Canarias), cuyo espejo mide 2.5 metros. La imagen fue tomada por la autora en agosto de 2006, y es el resultado de combinar digitalmente varias imágenes tomadas con diferentes filtros (azul, verde y rojo). NGC7479 se encuentra a una distancia aproximada de 107 millones de años luz. La galaxia anfitriona muestra una estructura espiral con la presencia de una barra. El núcleo de NGC7479 se clasifica como Seyfert 2 (núcleos activos de galaxias tipo 2). El norte es hacia arriba, y el este a la izquierda.



tan también en su espectro óptico líneas de emisión “angostas” (con velocidades del orden de cientos de kilómetros segundo). De cualquier modo, estas líneas son notablemente más anchas que las líneas emitidas por nubes de gas que es ionizado por estrellas en nuestra galaxia.

Núcleos activos de alta luminosidad

En esta categoría encontramos a los cuásares. Estos objetos se ven en el cielo como fuentes puntuales (como “estrellas” azules; de ahí el acrónimo de objetos cuasi estelares). Debido a que la luz de estos núcleos es más intensa y a que están mucho más lejos, la observación directa de la galaxia anfitriona resulta difícil. Sin embargo, se ha logrado determinar que la mayoría de las veces la morfología de la galaxia anfitriona es de tipo elíptico.

Un resultado empírico importante en relación con los cuásares se refiere a que esta población presenta un máximo en su densidad numérica, el cual corresponde a una distancia de 18 mil 500 millones de años luz (a esta distancia, la edad del universo es de 2 mil 900 millones de años). Por tanto, debido a que hay pocos cuásares antes y después de esa época, se puede argumentar que los núcleos activos de galaxias representan tan sólo una fase en la evolución de las galaxias.

Blázares

El término *blázar* surge de combinar los nombres de dos clases de núcleos activos de galaxias altamente variables en brillo:

a) Los *objetos tipo BL Lacertae* o *BL Lac*, llamados así porque el prototipo estaba clasificado en catálogos de estrellas variables como una “estrella algo peculiar” en la constelación del Lagarto (*Lacertae*), aunque después se determinó que era un objeto extragaláctico. Los objetos tipo BL Lac en general no suelen mostrar líneas en emisión, como los núcleos activos de galaxias tipo 1 y tipo 2. Esto se debe a que emiten un espectro de continuo muy

intenso desde el radio hasta los rayos X, y en algunos casos hasta los rayos gamma.

b) Los *cuásares violentamente variables*. Estos objetos se encuentran más lejos que los objetos tipo BL Lac, y muestran en su espectro óptico líneas de emisión muy intensas (similares a las que muestran los núcleos activos de galaxias tipo 1), sobrepuestas a la emisión de continuo.

Así, los blázares son los objetos más brillantes y variables dentro de la familia de los núcleos activos de galaxias. Las variaciones de brillo en ocasiones son muy rápidas, y pueden observarse en longitudes de onda que van desde el radio hasta los rayos X. Otra propiedad distintiva de los blázares es que emiten luz polarizada, la cual también resulta ser variable.

En algunos blázares se puede detectar claramente la base de un pequeño chorro (*jet*) el cual se observa en las bandas del radio. Esto se debe a que los blázares son exclusivamente núcleos activos de galaxias del tipo “radio fuerte”. La división más general de los núcleos activos de galaxias en “radio fuertes” y “radio callados” se hace con base en la intensidad de flujo que emiten en ciertas bandas del radio. En particular, si el flujo es diez veces mayor al emitido en las bandas del óptico (Ivezic y colaboradores, 2002) se trata de un objeto radio fuerte. Sin embargo, 90 por ciento de los cuásares no cumple con este criterio y por tanto se clasifican como radio callados (lo cual no significa necesariamente que sean totalmente “radio silenciosos”, ya que la definición es básicamente empírica). Esto indica que tan sólo 10 por ciento de los cuásares son radio emisores potentes. Una característica notable de estos últimos es que eyectan desde su núcleo un plasma o chorro de material extremadamente colimado (*jet*) que se mueve bilateralmente con velocidades relativistas (cercasas a la de la luz).

Modelo del jet relativista

Este modelo, sugerido inicialmente por Blandford y Rees (1978), propone que la intensidad observada en los blázares puede explicarse suponiendo que dichos objetos presentan una orientación particular al observador. De esta forma, el chorro emitido por los blázares debe formar un ángulo pequeño con respecto a la línea de visión, y sólo con esta geometría es posible explicar los fenómenos relativistas presentes en los blázares, a saber:

a) *Movimiento superlumínico*: se observan nódulos de plasma en la base del jet y alineados a éste, que se desplazan con velocidades mayores que la de la luz con respecto del núcleo

FENOMENOLOGÍA DE LOS BLÁZARES

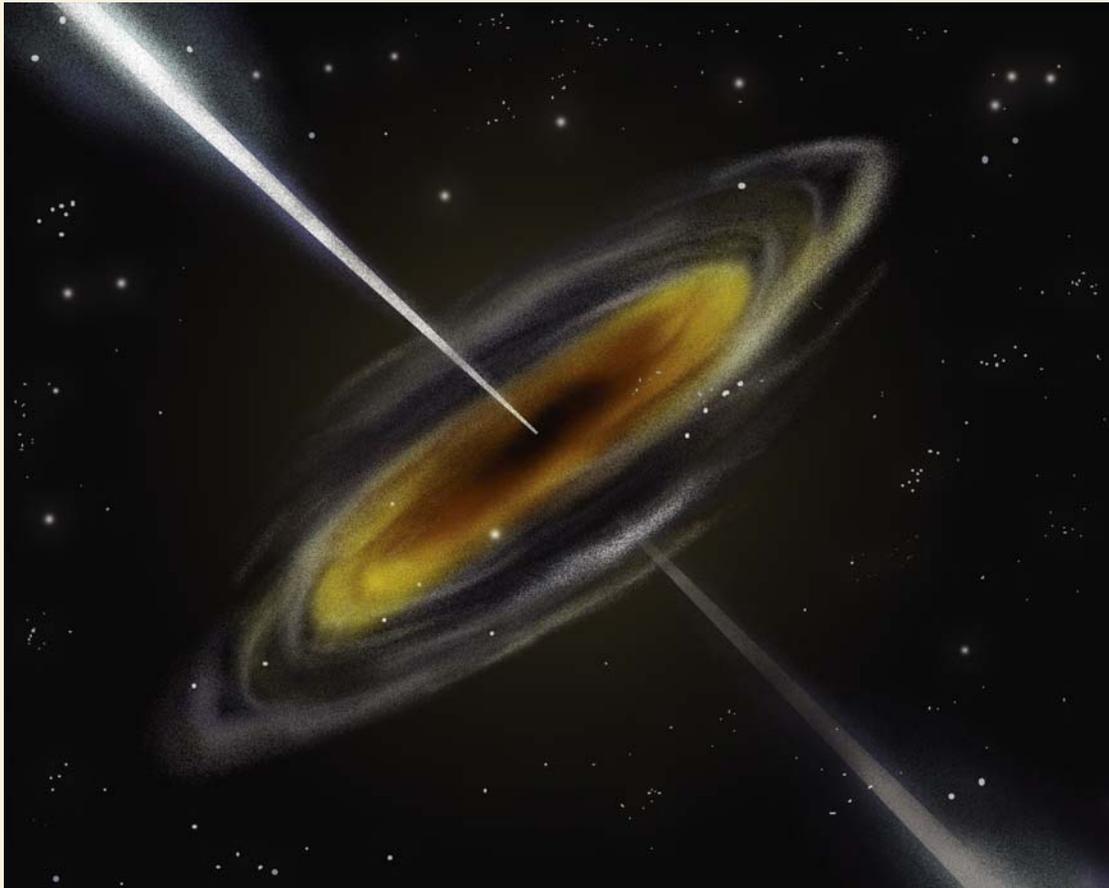
1) En el cielo se observan como fuentes puntuales. Por lo general, la detección de la galaxia anfitriona asociada a estos núcleos activos de galaxias es difícil, debido a que la intensidad de la emisión producida por el chorro (*jet*) relativista domina por efectos de contraste.

2) Su espectro continuo es diferente al de las estrellas, y no muestra líneas de absorción. Los objetos tipo BL Lac presentan un espectro dominado por la emisión de continuo no-térmico. En algunos casos se ha observado la presencia de líneas de emisión de muy baja intensidad. En cuanto a los otros tipos de blázares, en sus espectros se observan líneas de emisión intensas sobrepuestas al continuo.

3) Los blázares emiten radiación polarizada linealmente, la cual es variable en las bandas del óptico y radio (el porcentaje de polarización medido es de 3 por ciento, y en algunas fuentes llega hasta 15 por ciento).

4) Los blázares muestran variaciones de brillo, con amplitudes mayores que las que muestran los cuásares en todas las bandas del espectro electromagnético y en escalas de tiempo que van desde horas, pasando por días, semanas y meses, hasta años.

5) Se han encontrado muy pocos blázares que emiten en rayos gamma (lo que depende también de la sensibilidad de los detectores, por supuesto). Pero en estas frecuencias algunos emiten su máxima potencia.



desde el cual fueron expulsados. Esta velocidad no es real, pues nada en el universo viaja más rápido que la luz. El valor correcto de la velocidad se obtiene cuando se toma en cuenta que la orientación de los nódulos está casi alineada con la línea de visión.

b) *Direccionamiento por efecto Doppler* (Doppler-beaming): en este caso la radiación originalmente emitida de manera isotrópica se observa concentrada en un haz que tiene un ángulo pequeño.

c) *Amplificación por efecto Doppler* (Doppler-boosting): la intensidad de la radiación emitida se observa amplificada. Esto se debe a que los nódulos del jet se mueven hacia el observador con velocidades cercanas a la de la luz.

Esquema unificado

A mediados de los noventa se propuso formalmente un esquema llamado comúnmente “unificado” (por ejemplo, Urry y Padovani, 1995), el cual propone que todos los núcleos activos de galaxias son esencialmente lo mismo. Es decir, todos tienen un agujero negro central, el cual está rodeado por un disco de acreción, y ambos se encuentran a su vez rodeados por un toro de polvo (véase Figura 2). En particular, el modelo pretende explicar las diferencias encontradas entre objetos tipo 1 y tipo 2.

En el caso de los núcleos activos de galaxias radio fuertes, el modelo unificado resulta exitoso, pues logra explicar propiedades observadas entre ellos. Esto se logra considerando exclusivamente la orientación que presenta el chorro con respecto a la línea de visión del observador. Este esquema propone que en el caso de los blázares, el chorro asociado se encuentra formando un ángulo muy pequeño con respecto a la línea de visión y esto nos impide ver al chorro proyectado en el plano del cielo, como ocurre con las radiogalaxias. Debido a esto, la emisión en los blázares está amplificada e intensificada por efectos relativistas y

resulta muy difícil detectar en su espectro líneas de emisión. Estas líneas sólo pueden observarse cuando por alguna razón el brillo del objeto disminuye.

Variabilidad de los núcleos activos de galaxias

Los núcleos activos suelen presentar variaciones en su brillo en todas las longitudes de onda, y en ocasiones presentan también variaciones en su tipo espectral; es decir, cambian de tipo 1 a tipo 2.

En particular, se tienen registros del comportamiento variable de algunos núcleos activos (básicamente de blázares, que son los que muestran mayor variabilidad) desde hace varias décadas, debido a que inicialmente fueron descubiertos y catalogados como estrellas variables. Estos registros permiten comparar los estados de brillo en periodos de tiempo largos (poco más de un siglo) y así distinguir cuando una fuente presenta un notable aumento o disminución en su brillo. De esta forma, en las últimas dos décadas los estudios de variabilidad en multifrecuencias (es decir, desde el radio hasta los rayos gamma) se intensificaron.

Gracias a ello, se han podido conocer algunas de las propiedades fundamentales de estos objetos, que se encuentran entre

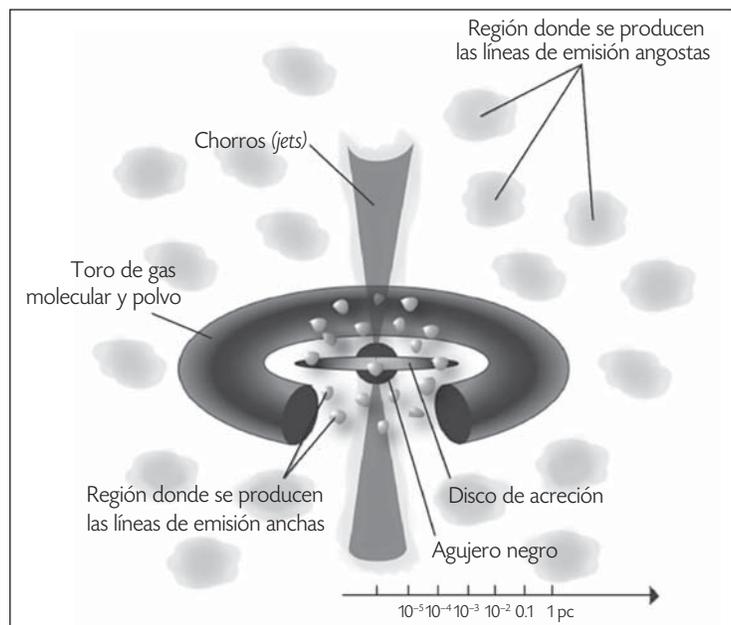


Figura 2. Esquema unificado para los núcleos activos de galaxias. En la parte central se muestra el agujero negro supermasivo, rodeado por el disco de acreción, los chorros (jets) y las nubes de gas que producen la emisión observada en líneas. Puede existir una estructura llamada “toro de gas molecular y polvo”, por su forma toroidal.

los más luminosos del universo (véase Benítez, 1997). En particular, estos estudios han permitido estimar las distancias entre la fuente de ionización (básicamente el disco) y la región que emite las líneas anchas (observadas en el espectro óptico en las Seyfert 1). Esta información, aunada al descubrimiento de que la luminosidad del bulbo de la galaxia anfitriona está correlacionada con la masa del agujero negro central, ha permitido cuantificar la masa de los agujeros negros a partir de observaciones directas en muchos de ellos. Para aquellos núcleos activos de galaxias en los que la galaxia anfitriona no se puede observar directamente, existen otros métodos que permiten estimar la masa del agujero negro central, las cuales a su vez se han determinado de forma empírica. Esto ha resultado particularmente útil para estimar las masas de agujeros negros en cientos de cuásares.

La distribución de energía en los blázares

La energía que emiten los núcleos activos de galaxias y, en particular los blázares, se comporta de forma muy diferente a lo observado en estrellas y galaxias “normales” (es decir, sin actividad en sus núcleos). Los núcleos activos de galaxias son emisores en *multifrecuencias*, es decir, emiten en todo el espectro electromagnético, desde las bajas frecuencias (radio ondas), hasta las más altas frecuencias observables (rayos gamma de altas energías). En consecuencia, su estudio representa un reto observacional excepcional, pues para obtener un esquema completo de los fenómenos que están ocurriendo en ellos es necesario realizar observaciones con una amplia gama de telescopios (en Tierra y en el espacio), de preferencia simultáneamente.

Para comprender los procesos físicos involucrados en la emisión de la energía en los blázares estudiamos la *distribución espectral de energía* (SED) completa. Hace más de dos décadas se descubrió que la distribución espectral de energía de los blázares tiene dos componentes prominentes: una es la llamada *componente de baja energía*, que tiene su máxima potencia en las bandas que van del infrarrojo al óptico, y otra componente llamada *de alta energía*, cuya potencia máxima se da entre la radiación ultravioleta de la de rayos X.

En distintos tipos de blázares, una de las dos componentes puede ser la dominante. Por ejemplo, en algunos blázares la emisión dominante se observa en la región de los rayos gamma de altas energías, por lo que se conocen como “blázares TeV”. Estos objetos se detectaron con uno de los instrumentos del Observatorio Espacial Compton (en órbita de 1991 a 2000).

Este telescopio detectó 66 blázares y 27 fuentes más como posibles blázares (Hartman y colaboradores, 1999).

Se considera que la componente de baja energía en la distribución espectral de energía de los blázares es producida por *radiación sincrotrónica*, emitida por los electrones que se mueven a velocidades relativistas y a través del campo magnético en el chorro. La componente de alta energía suele interpretarse en términos del efecto conocido como *Compton-inverso*; es decir, dispersados por los mismos electrones relativistas del chorro, los cuales les transfieren energía y, en consecuencia, se convierten en fotones de rayos X o rayos gamma. Probablemente éste no sea el único mecanismo involucrado, pero sí el dominante en la mayoría de los blázares.

El caso del blázar de rayos gamma 3C 454.3: el mejor estudiado

El objeto 3C 454.3 es conocido por la gran variabilidad de su luz visible desde hace muchos años. Las primeras observaciones se registraron en 1900 (usando placas fotográficas), y posteriormente, en los setenta, se comenzó a observar en las frecuencias de radio. Ahora se sabe que no es una “estrella variable”, sino un blázar. Se encuentra a una distancia de 9 mil 600 millones de años luz. Fue detectado por su emisión de rayos gamma, por lo que se le denomina como “blázar de rayos gamma”. Se ha reportado que el chorro relativista de 3C 454.3 muestra una curvatura pronunciada (Paulini-Toth y colaboradores, 1987) y nódulos con movimientos superlumínicos.

El gran estallido de brillo de 3C 454.3

Analizando su curva de luz histórica (variaciones de su brillo en luz visible registradas desde 1900) se encontró que el brillo

El estudio de la distribución espectral de energía y sus variaciones implica esfuerzos observacionales monumentales: decenas de telescopios espaciales y en Tierra, monitoreando un solo objeto

intrínseco de este blázar en luz visible cambia por un factor de un poco más de 6; es decir, presenta fluctuaciones entre las magnitudes 15 a la 17.

No obstante, a partir de 2001 se observó que dichas fluctuaciones comenzaron a aumentar en amplitud. El 9 de mayo de 2005 se detectó un estallido de brillo extraordinario, ya que el brillo en el óptico (luz visible) aumentó por un factor 40, lo cual representa un abrillantamiento sin precedente en los blázares, y corresponde al estado más luminoso observado en este tipo de objetos.

A partir de esa fecha, los astrónomos asociados al consorcio WEBT (*Whole Earth Blazar Telescope*, “telescopio de blázares de la tierra entera”, consorcio formado por astrónomos profesionales dedicados al estudio del fenómeno blázar) comenzaron a monitorear de manera continua el brillo de este objeto durante varios meses. Este monitoreo se coordinó simultáneamente en radio e infrarrojo usando telescopios terrestres, y también con telescopios espaciales para detectar emisión de rayos X y rayos gamma.

Observaciones simultáneas en multifrecuencias

Después de varios meses de observaciones, en el WEBT se reunieron datos en multifrecuencias de la distribución espectral de energía de 3C 454.3. Con telescopio Chandra se monitoreó la región de los rayos X, y desde Tierra con telescopios ópticos-infrarrojo cercano infrarrojo (de 1 a 6 micrómetros, aproximadamente) y con radiotelescopios (a 43 gigahertz) y en las bandas del milimétrico. En paralelo, se colectaron datos de observaciones previas al estallido de brillo con la idea de formar una base de datos multifrecuencias que abarcara un tiempo largo (desde junio del 2004 hasta septiembre de 2005). En total, se analizaron 5 mil 584 observaciones en el óptico, provenientes de 18 telescopios ubicados alrededor del mundo (entre éstos están los telescopios de 1.5 metros y de 84 centímetros del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, con observaciones realizadas entre mayo y junio de 2005). En la Figura 3 mostramos una imagen óptica obtenida con el telescopio de 1.5 metros.

La distribución espectral de energía de 3C 454.3 durante el estallido de brillo

Durante las fases más brillantes del estallido de brillo de 3C 454.3, en mayo de 2005, se realizaron observaciones con satélites de altas energías como el INTEGRAL. En par-

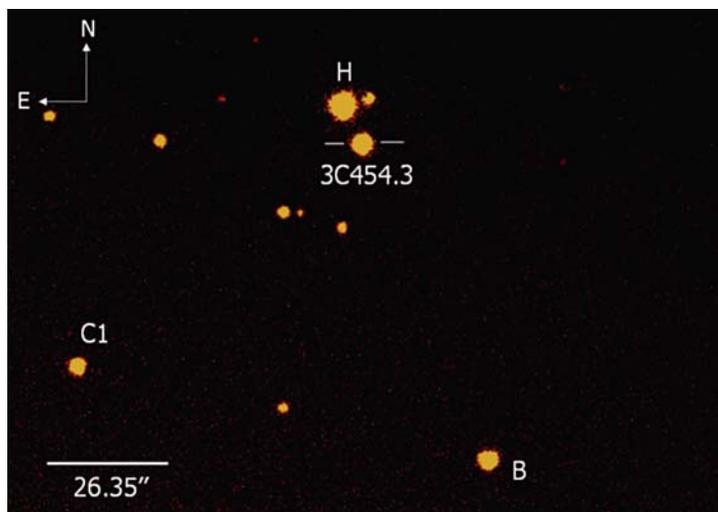


Figura 3. Imagen de 3C 454.3 tomada con el filtro rojo, el 3 de noviembre de 2005, en el telescopio de 1.5 metros del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. Se indica la posición de las estrellas estándares B, C1 y H, que son estrellas de brillo constante y permiten estimar el brillo del objeto. El norte es hacia arriba y el este a la izquierda.

ticular, el satélite INTEGRAL monitoreó el brillo durante el mes de mayo en bandas de frecuencia de 3 a 200 kiloelectrón-volts. En la Figura 4 (tomada de Villata y colaboradores, 2006) se muestran en color azul los datos obtenidos en dos apuntamientos (mayo 15 a 18 y mayo 19 a 22). Durante estos periodos se detectaron variaciones de casi un orden de magnitud (factor 2.5 en brillo) en el visible. También se muestran en azul dos estados de actividad (alto y bajo). Para septiembre de 2005, el brillo había disminuido considerablemente, como se aprecia de los puntos en color rojo en la distribución espectral de energía.

El estudio en multifrecuencias reveló que hubo variaciones intensas de brillo que ocurrieron casi simultáneamente en las bandas del óptico, infrarrojo cercano, longitudes de onda milimétricas y en los rayos X. Un resultado importante del análisis es que el flujo del radio no está correlacionado con las variaciones en estas frecuencias.

Lo que se puede inferir

El estallido violento de 3C 454.3 puede explicarse en términos del esquema unificado, es decir, en términos del ángulo formado por la línea de visión y la dirección de propagación del chorro relativista. Las observaciones obtenidas en las bandas

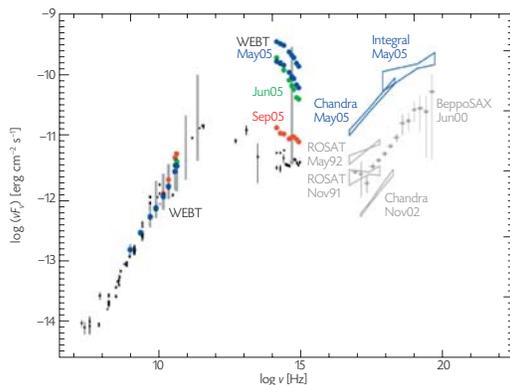


Figura 4. Distribución Espectral de Energía de 3C 454.3 (tomado de Villata *et al.*, 2006). El eje vertical representa el flujo medido por banda espectral para las distintas longitudes de onda. El eje horizontal cubre desde las ondas de radio, seguido por el cercano IR, la luz visible, los rayos-X y los rayos gamma. Los puntos en azul son las observaciones simultáneas realizadas en mayo del 2005 con el fin de monitorear el estallido de brillo. Estas observaciones se realizaron en las bandas del radio, cercano infrarrojo y visible (WEBT), así como en rayos X (Chandra) y rayos gamma (Integral). Los puntos en verde (junio05) y naranja (sep05) son observaciones posteriores al estallido de brillo y muestran una clara disminución en el flujo emitido por la fuente en las bandas del óptico.

del óptico y hasta los rayos X muestran que el chorro de 3C 454.3 tiene un ángulo muy pequeño respecto a la visual del observador, por lo que dicha emisión presenta los efectos relativistas de direccionamiento (“enfoque”) y de amplificación de la intensidad.

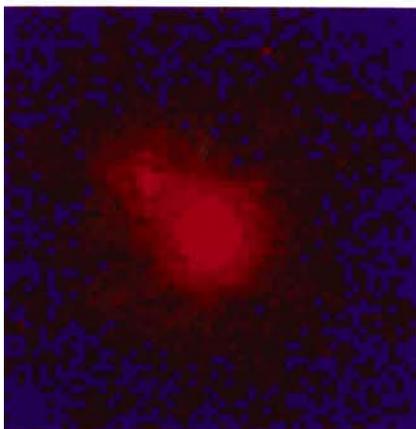
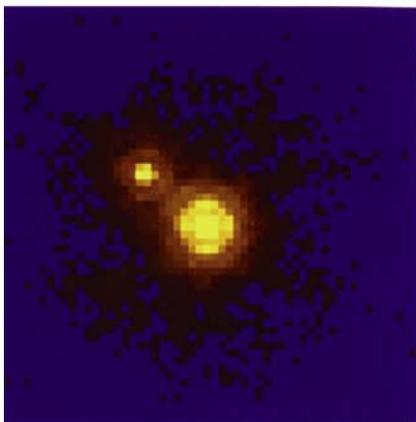
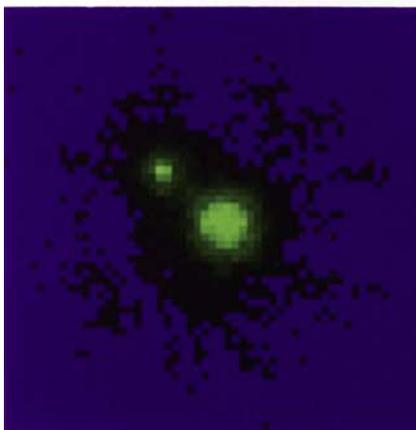
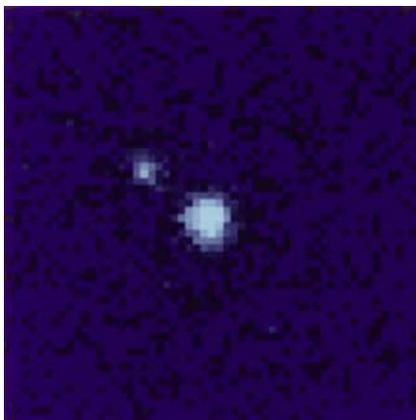
En cuanto al chorro observado en ondas de radio, resulta evidente que al mostrar una morfología curva pudiera tratarse de emisión que se origina en una región distinta (más lejana al núcleo) y que no está alineada con el chorro. Esta idea surge del análisis de los datos obtenidos en radio, los cuales respondieron al estallido de brillo cuatro meses después. Esto explica por qué la emisión en radio no está correlacionada con la emisión del óptico y los rayos X. Esto es muy importante para refinar los modelos teóricos propuestos para explicar la emisión en chorros relativistas.

Conclusión

El estudio de la distribución espectral de energía y sus variaciones implica esfuerzos observacionales monumentales: decenas de telescopios espaciales y en Tierra, monitoreando un solo objeto.

Esto es muy difícil de coordinar y lograr, pero este monitoreo simultáneo en multifrecuencias es la herramienta más poderosa que tenemos para obtener información relevante sobre los procesos físicos involucrados en la emisión de los núcleos activos de galaxias más peculiares: los blázares. En el caso de 3C 454.3, el consorcio WEBT aunado a telescopios espaciales logró obtener resultados importantes.

No es un caso único; sin embargo, los esfuerzos realizados a la fecha por los estudiosos del fenómeno blázar aún no permiten construir modelos físicos lo suficientemente detallados para explicar el origen de los estallidos de brillo en estos objetos, por lo que falta aún mucho trabajo por hacer en este campo de la astronomía extragaláctica.



Agradecimientos

Agradezco a Silvia Torres Peimbert la invitación hecha para colaborar con este volumen temático. También agradezco a Alfredo Díaz por la ayuda brindada para mejorar la calidad de las figuras.

Bibliografía

- Benítez, E. (1997), *Estudios de variabilidad en núcleos activos de galaxias*, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral.
- Blandford, R. y M. J. Rees (1978), en Wolfe, A. (compilador), *Pittsburg Conference on BL Lac Objects*, Pittsburg, University of Pittsburg, p. 328.
- Hartman, R. C., D. L. Bertsch y colaboradores (1999), *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 123, p. 79.
- Ivezić, Z. Y. y colaboradores (2002), *Astronomical Journal*, vol. 124.
- Mukherjee, R. (2001), en Aharonian, F. A. y H. J. Völk (compiladores), *High energy gamma-ray astronomy*, Melville, AIP, 538, p. 324.
- Pauliny-Toth, I. I. K. y colaboradores (1987), *Nature*, vol. 328, p. 778.
- Urry, M. y Padovani, P. (2001), *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 107, p. 803.
- Villata, M., C. M. Raiteri, T. J. Balonek y colaboradores (2006), *Astronomy and astrophysics*, vol. 453, p. 817.
- Zel'dovich, Y. B. e I. D. Novikov (1964), *Soviet Physics Dok.*, vol. 158, p. 811.

Erika M. Benítez Lizaola nació en la Ciudad de México. Actualmente es investigadora del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Realizó estudios de licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y estudios de maestría y doctorado en astronomía en el Instituto de Astronomía de la UNAM, los cuales concluyó en 1997. Ha sido profesora de la Facultad de Ciencias de la misma universidad desde 1991, y profesora invitada de la *Florida International University* de 1998 a 1999. Su campo de trabajo es la astronomía extragaláctica observacional, y es especialista en el estudio de los núcleos activos de galaxias.

erika@astroscu.unam.mx