

EL CIELO DE RAYOS GAMMA EXTRAGALÁCTICOS

UNA VISIÓN DEL FENÓMENO MÁS POTENTE DEL UNIVERSO

MONICA ORIENTI

El cielo de rayos gamma nos permite observar los procesos más energéticos y violentos del universo. En los últimos años, los satélites de rayos gamma están explorando el cielo para ayudarnos a comprender los procesos físicos que gobiernan estas emisiones. Hoy en día tenemos una gran cantidad de información sobre los procesos físicos relacionados con el cielo de rayos gamma gracias a los satélites que orbitan la Tierra. Hasta ahora, se han detectado cerca de tres mil fuentes de rayos gamma, y la cifra aumentará mientras estas misiones sigan explorando el cielo. El cielo de alta energía está dominado por los objetos extragalácticos. Gran parte de las fuentes detectadas no tiene un equivalente en los catálogos de otras longitudes de onda, lo cual deja abierto el debate sobre su naturaleza. Este artículo se centra en el cielo de rayos gamma extragalácticos, en sus propiedades y procesos, para analizar los principales problemas que se debaten en la comunidad astrofísica.

Palabras clave: rayos gamma, astronomía extragaláctica, mecanismos no térmicos, galaxias activas, cuásares.

■ LA ASTROFÍSICA DE RAYOS GAMMA: UN VISTAZO AL UNIVERSO ENERGÉTICO

En una noche completamente despejada, las estrellas, los planetas y las galaxias inundan el cielo con su luz. Lo que vemos con nuestros ojos es solo una pequeña fracción de lo que emiten los cuerpos celestes. La radiación producida por procesos astrofísicos cubre un amplio rango de energías. La atmósfera terrestre es opaca a la mayoría del espectro electromagnético, pero dos pequeñas ventanas, en los rangos óptico y de radio, permiten que la luz en esas frecuencias pase y llegue al suelo.

Para resolver esta limitación observacional, se han ubicado telescopios para investigar la radiación infrarroja, ultravioleta, de rayos X y de rayos gamma a bordo de satélites que orbitan la Tierra. La radiación gamma representa la «luz» más energética del espectro electromagnético. Los fotones de rayos gamma tienen energías superiores a unos pocos MeV¹ y pueden llegar incluso a superar los 100 TeV. Estas energías tan altas son producidas por algunos de los procesos más potentes y violentos del universo.

Podemos encontrar emisores de rayos gamma a todas las escalas: la Luna y el brillante Sol de nuestro Sistema Solar, los restos de supernovas, las binarias de gran masa y los púlsares de nuestra galaxia, así como los chorros relativistas producidos por los agujeros negros supermasivos localizados en galaxias activas a distancias cosmológicas. Estas fuentes discretas se añaden a la radiación dispersa, compuesta principalmente de dos elementos: uno llena el plano galáctico y está producido por las interacciones de rayos cósmicos con la materia interestelar y el campo de radiación de la Vía Láctea, mientras que el otro –probablemente de origen extragaláctico– está distribuido isotrópicamente por el cielo y podría ser el brillo colectivo de fuentes débiles que no se detectan de forma individual.

Aunque la emisión de rayos gamma del espacio interestelar se predijo a finales de los años cuarenta del siglo pasado (véase, por ejemplo, Feenberg y Primakoff, 1948), los rayos gamma cósmicos de alta energía provenientes de fuentes galácticas y extragalácticas se identificaron por primera vez en los sesenta, gracias al instrumento de rayos gamma construido y diseñado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) que se instaló en el Tercer Observatorio Solar en Órbita (OSO 3) (Kraushaar et al., 1972). Más tarde, el saté-

¹ eV: *electron-volt*, energía ganada por un electrón al atravesar una diferencia de potencial eléctrico de un Volt.

lite europeo COS-B detectó fotones en el rango entre 50 y 500 MeV del cuásar 3C 273 (Swanenburg et al., 1978). Sin embargo, hubo que esperar hasta la década de los noventa, al EGRET (Telescopio del Experimento de Rayos Gamma Energéticos, en sus siglas en inglés), ubicado a bordo del Observatorio Compton de Rayos Gamma, para sondear el cielo de rayos gamma por completo. EGRET observó el cielo entre 30 MeV y cerca de 20 GeV durante casi una década, y reveló el carácter variable y heterogéneo del cielo de alta energía. Este telescopio detectó cerca de 300 fuentes de rayos gamma por encima de los 100 MeV, pero solo una pequeña fracción (~30%) se identificó como el equivalente de alta energía a objetos conocidos observados en otras longitudes de onda. La gran mayoría de las fuentes identificadas era de origen extragaláctico (Hartman et al., 1999).

Desde 2007, la astrofísica de rayos gamma ha vivido una edad de oro. El lanzamiento del satélite italiano AGILE ese año fue seguido en 2008 por el del LAT (Telescopio de Gran Área, en sus siglas en inglés) a bordo del satélite Fermi (Fermi-LAT) y renovó el interés de la comunidad astrofísica por el cielo de rayos gamma. Pese a la cobertura no uniforme del cielo, durante su primer año de observación, AGILE detectó cerca de 50 fuentes de rayos gamma con alto nivel de confianza (Pittori et al., 2009). Por otro lado, la labor principal del Fermi-LAT es sondear el cielo: completa un mapa entero del cielo cada tres horas.

Con su amplio rango energético, que va desde los 20 MeV hasta unos pocos TeV, y su sensibilidad mejorada, Fermi-LAT llegó a detectar cerca de 200 fuentes de rayos gamma en solo tres meses (Abdo et al., 2009). Después de cuatro años de observaciones, Fermi-LAT había detectado más de 3.000 fuentes de rayos gamma y descubierto emisiones de alta energía de tipos de fuentes que no se habían detectado anteriormente. La mayoría de las fuentes de rayos gamma asociadas (cerca del 60%) son de naturaleza extragaláctica, mientras que unos 250 objetos son de nuestra galaxia, entre los cuales los púlsares son el tipo de fuente galáctica más común (Acero et al., 2015).

Estas cifras pueden parecer ínfimas comparadas con los cientos de miles o incluso cientos de millones de objetos registrados en catálogos de radio, infrarrojo, rango óptico y rayos X. Debemos tener en cuenta que no todos los cuerpos celestes son emisores fuertes

de rayos gamma. Por ejemplo, la emisión del Sol o de la Luna es observable solo porque estos cuerpos están muy cerca de nosotros. Por otra parte, la emisión de las estrellas y del polvo y el gas interestelar es fácil de observar en infrarrojo, en el rango óptico, en ultravioleta y en rayos X, pero su contribución a la banda de alta energía está por debajo del umbral de detectabilidad de los telescopios actuales.

Este artículo se centra en la emisión de rayos gamma del cielo extragaláctico y se ocupa de las diferentes poblaciones de fuentes detectadas por los telescopios hasta ahora. Comentaré la compleja tarea de encontrar el equivalente de baja energía a una fuente de rayos gamma, y el papel crítico de las observaciones multi-banda para lograr una identificación sólida de las fuentes. Finalmente, se ofrece un breve repaso al cielo de alta energía y a la próxima generación de telescopios de rayos gamma.

■ EL CIELO DE RAYOS GAMMA EXTRAGALÁCTICOS

Las galaxias son los principales bloques de construcción del universo. Las estrellas, el gas y el polvo son responsables de la emisión procedente de la galaxia en todo el espectro electromagnético, incluyendo los rayos gamma, que se producen por la interacción de las partículas de los rayos cósmicos—aceleradas, por ejemplo, por las supernovas— con el gas interestelar. Sin embargo, esta emisión es muy débil y, hasta ahora, solo se

ha detectado en Andrómeda y en la Gran y Pequeña Nube de Magallanes.

Además de las tres galaxias del Grupo Local (Andrómeda, Vía Láctea y Galaxia del Triángulo), Fermi-LAT detectó emisiones de alta energía provenientes de un puñado de galaxias que presentan un brote estelar. En estas galaxias, el ritmo al que se producen estrellas (y al que estas explotan) es mucho mayor que en galaxias como la Vía Láctea. Esto se refleja en un mayor índice de supernovas y, por tanto, de rayos cósmicos, que son la base de la emisión de rayos gamma.

Las galaxias normales y con brotes estelares son órdenes de magnitud menos luminosas que las galaxias activas. Cerca de un 10% de las galaxias tienen un núcleo activo en el centro. Los núcleos activos de galaxias son la manifestación de la extraordinaria cantidad de energía liberada en el entorno de un agujero negro supermasivo (Blandford, Netzer y Woltjer, 1990).

«DESDE 2007, LA
ASTROFÍSICA DE RAYOS
GAMMA HA VIVIDO
UNA EDAD DE ORO. EL
LANZAMIENTO DEL SATÉLITE
ITALIANO AGILE ESE AÑO
FUE SEGUIDO EN 2008 POR
EL DEL LAT A BORDO DEL
SATÉLITE FERMI»



Figura 1. Emisión de radio (en rosa) superpuesta a una imagen óptica. La emisión de radio de las radiogalaxias se extiende mucho más allá de la galaxia en la que se originan los chorros relativistas.

**«LAS ESTRELLAS, EL GAS
Y EL POLVO SON RESPONSABLES
DE LA EMISIÓN PROCEDENTE DE
LA GALAXIA EN TODO EL ESPECTRO
ELECTROMAGNÉTICO, INCLUYENDO
LOS RAYOS GAMMA»**

En cerca del 10% de los núcleos activos de galaxias, el agujero negro supermasivo crea y expulsa un flujo bipolar de partículas relativistas que se puede extender mucho más allá de la propia galaxia (figura 1). En el extremo de los dos chorros, las partículas relativistas interactúan con el medio a su alrededor y forman espectaculares estructuras de emisión dispersa.

Las partículas relativistas liberan energía al interactuar con los campos magnéticos del chorro y producen radiación de sincrotrón, visible desde la banda de radio hasta la de rayos X. Además, las partículas relativistas también interactúan con los campos de radiación circundantes. Durante esta interacción, las partículas relativistas transfieren parte de su energía a los foto-

nes menos energéticos. Como consecuencia, los fotones ganan energía y acaban convirtiéndose en fotones de rayos gamma. Este proceso de dispersión se conoce como efecto Compton inverso.

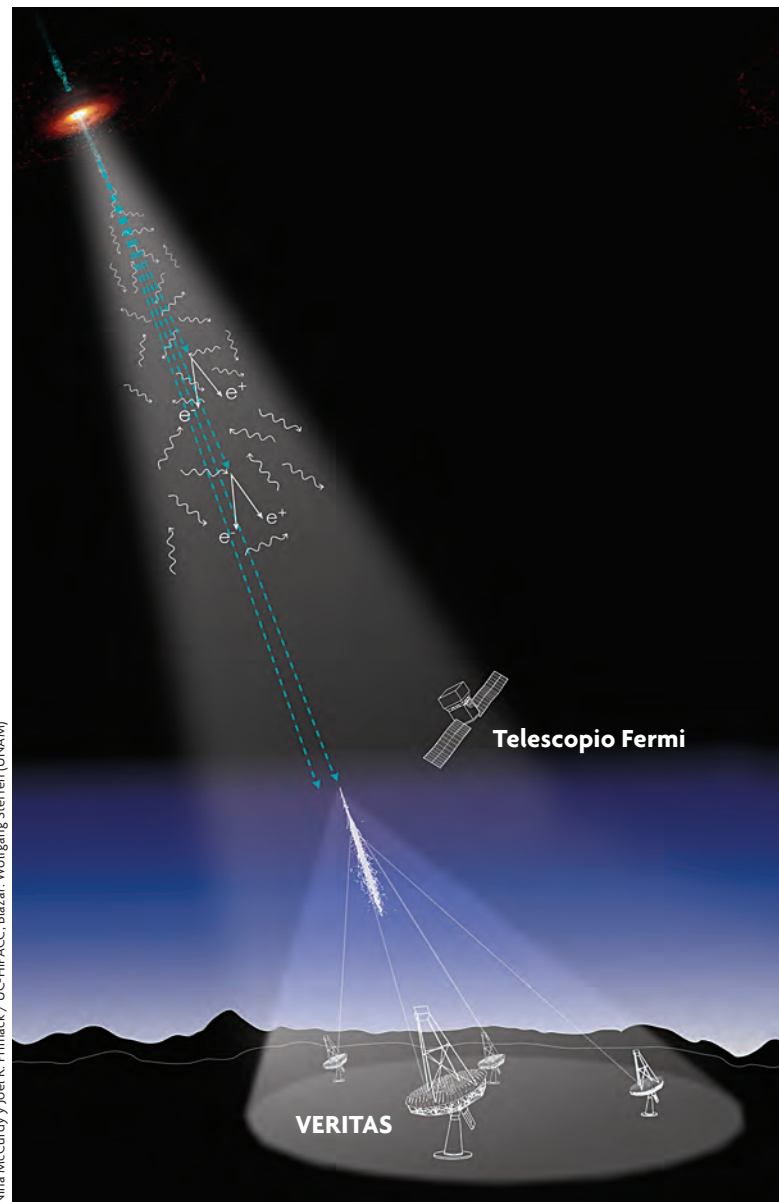
En la subpoblación de núcleos activos de galaxias que conocemos como blazares, el eje del chorro relativista apunta hacia la Tierra y su emisión en nuestra dirección se amplifica gracias a los efectos relativistas (figura 2). Como consecuencia, estos objetos parecen más brillantes de lo que son en realidad, lo que facilita su detección. La luminosidad de los blazares varía, de media, entre 10^{45} erg/s² y 10^{47} erg/s, pero puede alcanzar, en algunos casos, valores de hasta 10^{50} erg/s. Además, cada perturbación, como la formación y la propagación de una onda de choque, se amplifica haciendo que la emisión del blazar sea muy variable en todas las longitudes de onda.

El cielo de rayos gamma extragalácticos observado por Fermi-LAT está dominado casi por completo por blazares, que representan el 98 % de las fuentes detectadas. Por otro lado, los núcleos activos de galaxias con actividad en radio y cuyos chorros relativistas no apun-

«LA POBLACIÓN DE FUENTES DE RAYOS GAMMA HA AUMENTADO DE FORMA DRÁSTICA DESDE EL DESCUBRIMIENTO DEL PRIMER CUÁSAR EN LA DÉCADA DE LOS SETENTA DEL SIGLO PASADO»

tan hacia la Tierra no presentan ningún aumento en la luminosidad (se les conoce como fuentes no alineadas), lo que convierte su detección a altas energías en una tarea complicada. El número de «fuentes» no alineadas observadas ha aumentado constantemente con la mejora de la sensibilidad de los instrumentos. Ha pasado de la detección únicamente de Centaurus A por parte de EGRET hasta la detección de 30 objetos por parte de Fermi-LAT (Ackermann et al., 2015). Su luminosidad en rayos gamma se encuentra entre 10^{41} erg/s, para la radiogalaxia cercana Centaurus A, y 10^{44} erg/s, es decir, en la cola de baja luminosidad de los blazares; y solo se encuentran a unas decenas o cientos de millones de años luz de nosotros. Sin embargo, los objetos no alineados detectados en rayos gamma hasta ahora están mucho más cerca de nosotros que los blazares. Como la luminosidad observada disminuye con el cuadrado de la distancia, los objetos más lejanos deben ser más luminosos intrínsecamente para poder ser detectados. Esto

² Un ergio (erg) equivale a 10^{-7} joules (J).



Nina McCurdy y Joel R. Primack / UC-HIPACC; Blazar: Wolfgang Steffen (UNAM)

Figura 2. Detección de la emisión de rayos gamma de un blazar. Los fotones de alta energía se observan mediante los telescopios de rayos gamma que orbitan la Tierra, mientras que los fotones de muy alta energía interactúan con la atmósfera terrestre y producen cascadas de partículas que se pueden observar mediante los telescopios Cherenkov de la superficie. No toda la emisión de un blazar llega hasta nosotros porque, durante su camino hasta la Tierra, interactúa con los fotones del fondo cósmico y genera partículas.

«LAS FUENTES DE MUY ALTA ENERGÍA OBSERVADAS HASTA AHORA PROBABLEMENTE SON SOLO LA PUNTA DEL ICEBERG, DEBIDO A LAS LIMITACIONES DE LOS TELESCOPIOS CHERENKOV ACTUALES»



implica que si una fuente como Centaurus A estuviera a la distancia media de los blazares, su luminosidad sería imposible de detectar con los instrumentos actuales. Pese a ser indetectables individualmente, su emisión acumulada contribuye al fondo disperso de rayos gamma observado en el cielo de forma prácticamente isotrópica.

■ FUENTES IDENTIFICADAS, ASOCIADAS Y NO ASOCIADAS: ¿QUÉ SIGNIFICAN?

Como se ha mencionado en el apartado anterior, los núcleos activos de galaxias, y los blazares en particular, son el tipo más grande de fuentes extragalácticas asociadas. La resolución espacial de los telescopios de rayos gamma no es muy precisa. Fermi-LAT, por ejemplo, es en la actualidad el telescopio de rayos gamma con mejor resolución espacial, con un índice de incertidumbre posicional de cerca de 0,5 grados a 1 GeV, lo que corresponde aproximadamente al tamaño del Sol tal y como lo observamos desde la Tierra. En una región de incertidumbre de ese tamaño, ¿se podrían llegar a observar cientos o miles de posibles equivalentes en el rango óptico o de infrarrojo!

Identificar claramente el equivalente de baja energía de una fuente de rayos gamma es muy complicado. Para lograrlo, es necesario tener acceso a datos de monitorización multibanda, y esto no suele ser posible. Por esta razón, solo una pequeña parte de las fuentes de rayos gamma tienen una identificación inequívoca. Por ejemplo, entre las 3.033 fuentes detectadas por Fermi-LAT, solo 238 se han identificado de forma inequívoca, y 66 de estas son núcleos activos de galaxias.

El proceso de asociar una fuente de rayos gamma con un objeto conocido de los catálogos astronómicos de otras longitudes de onda (principalmente el rango óptico, de radio, de rayos X e infrarrojos) se basa principalmente en argumentos estadísticos. Los catálogos considerados para la comparación comprenden los tipos de objetos que son posibles emisores de rayos gamma. La asociación depende sobre todo de la estrecha correspondencia posicional entre los equivalentes de alta y baja energía. Después se verifica la naturaleza del equivalente. Si uno de los posibles equivalentes es un blazar, un tipo bien conocido de emisor de rayos gamma, se propondrá como asociación para la fuente de alta energía.

No obstante, una gran parte de los objetos no tiene un equivalente claro en otros rangos de energía. En el tercer catálogo EGRET, las fuentes no asociadas sumaban más del 60 % de las fuentes de rayos gamma detectadas (Hartman et al., 1999), aunque han descendido hasta el 30 % en el tercer catálogo de fuentes de Fermi-LAT (Acero et al., 2015).

Cabe observar que los procedimientos de asociación dependen de la disponibilidad de catálogos con alta sensibilidad y que cubran un área del cielo tan grande como sea posible. Este punto ha sido crucial en el hemisferio sur, en el que los océanos cubren más superficie que en el hemisferio norte, hecho que imposibilita la construcción de tantas instalaciones de observación como en el norte. Lo mismo ocurre con el plano galáctico, para el que no disponemos de muchos catálogos de objetos extragalácticos.

Aparte del exceso mencionado, las fuentes no asociadas están distribuidas de manera uniforme en el cielo, lo que sugiere un posible origen extragaláctico. Con el objetivo de ampliar los catálogos de posibles equivalentes, se han desarrollado varias campañas de observación en diferentes longitudes de onda, y los catálogos siguen creciendo gracias a nuevas observaciones.

**«EL CIELO DE RAYOS
GAMMA EXTRAGALÁCTICOS
OBSERVADO POR FERMI-LAT
ESTÁ DOMINADO CASI POR
COMPLETO POR BLAZARES,
QUE REPRESENTAN EL
98 % DE LAS FUENTES
DETECTADAS»**

■ CAMPAÑAS MULTIFRECUENCIA DE NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS VARIABLES

La variabilidad es una característica clave de los blazares. Los cambios en la luminosidad se observan en todas las longitudes de onda y están relacionados con períodos de diferente actividad: estados de quietud intercalados con períodos de mayor actividad. En ocasiones, se dan brotes abruptos.

Hasta la fecha, las propiedades de la emisión de alta energía se han investigado con la ayuda complementaria de campañas de monitorización multibanda. El análisis de la curva de luz, es decir, de cómo el flujo de la luz observada a una determinada frecuencia cambia en función del tiempo, apunta a una posible relación entre los episodios de destello de rayos gamma y la variabilidad observada en el resto del espectro electromagnético, lo que sugiere que la variabilidad multibanda y el episodio de destello de alta energía tienen un origen común.

Pese a décadas de esfuerzos, muchos aspectos sobre la emisión de alta energía y su variabilidad siguen

siendo esquivos. El satélite Fermi, con su habilidad para sondear todo el cielo cada tres horas, permite una caracterización precisa del cielo variable de alta energía. Cientos de blazares se monitorizan continuamente y sus brotes se capturan de inmediato. La alerta de un destello de rayos gamma se transmite rápidamente a los telescopios que monitorizan diferentes bandas electromagnéticas, lo que proporciona un seguimiento multibanda lo más complejo posible.

De la aparición del brote en las diferentes bandas de energía observadas se obtiene información importante sobre el origen y la localización del proceso que lo provoca. Se ha descubierto que los brotes de rayos gamma se dan simultáneamente en las bandas de rayos X, óptica y de infrarrojos, mientras que en la longitud de onda de radio, el brote se retrasa varios días, semanas, o incluso meses (Fuhrmann et al., 2014; Marscher et al., 2008). Esto se explica por una onda de choque producida en la parte central del núcleo activo de la galaxia, que se desplaza a lo largo del haz junto con el chorro (Marscher y Gear, 1985). Dependiendo de la longitud de onda de la observación, estamos sondeando regiones localizadas a una distancia diferente del agujero negro supermasivo: cuanto más alta es la banda de energía estudiada, más podemos adentrarnos en el seno del núcleo activo de la galaxia. Por el contrario, la banda de radio, que se encuentra en el límite inferior del espectro electromagnético, es ajena a lo que ocurre en las regiones centrales y comienza a ver el brote cuando la onda de choque ya ha viajado cierta distancia a lo largo del chorro. La hipótesis de la onda de choque ha recibido apoyos gracias al descubrimiento de componentes brillantes del chorro expulsados de la región central cerca de un brote de rayos gamma, que se desplazan por el haz a velocidad aparentemente superlumínica. ¡Por supuesto, su velocidad real no excede en realidad la velocidad de la luz! Sin embargo, la combinación de efectos relativistas y de proyección hace que su velocidad nos parezca más rápida que la luz. Estos nudos superlumínicos se interpretan como la manifestación observacional de una onda de choque en movimiento (Marscher y Gear, 1985).

Ni todos los brotes de rayos gamma presentan un equivalente en otras longitudes de onda, ni todos los brotes en bandas de baja energía se corresponden a un estallido de rayos gamma. El origen de estos brotes no correlacionados sigue siendo muy discutido.

■ UN VISTAZO AL CIELO DE MUY ALTA ENERGÍA

Los telescopios de rayos gamma que orbitan alrededor de la Tierra son sensibles a los rayos gamma con energías de hasta unos pocos centenares de GeV. Es difícil que los satélites de rayos gamma detecten fuentes por encima de esta energía. Afortunadamente, nuestra atmósfera nos ayuda a detectar los fotones de muy alta energía... ¡desde la superficie del planeta! De hecho, estos fotones interactúan con los átomos y las moléculas que se encuentran en su camino a través de la atmósfera terrestre. La interacción origina una cascada de partículas que se propaga aproximadamente en la dirección original del fotón de muy alta energía entrante. Estas partículas secundarias son ultrarelativistas y su velocidad es mayor que la velocidad de la luz en la atmósfera (por

supuesto, no son más rápidas que la velocidad de la luz en el vacío, porque esa es la velocidad máxima a la que puede viajar cualquier tipo de materia y de ondas electromagnéticas). La diferencia de velocidad entre las partículas y la luz provoca la emisión de radiación, conocida como radiación Cherenkov, que es detectada por los telescopios Cherenkov de la superficie.

Hasta la fecha, se han detectado cerca de 200 fuentes de muy alta energía, divididas casi por igual entre las de origen galáctico, extragaláctico y aquellas cuyo origen es desconocido. La pequeña cantidad de objetos de muy alta energía se

debe al hecho de que solo unos pocos fenómenos celestes pueden producir energías tan altas. Además, los telescopios Cherenkov actuales no observan todo el cielo, sino que apuntan a objetos individuales, normalmente en estado de actividad, siguiendo los indicios de otras longitudes de onda, y solo cuando no existen limitaciones de observación, como las nubes o la luna llena. Como en el caso del cielo de rayos gamma de alta energía, las fuentes de muy alta energía extragaláctica son principalmente blazares, y solo se han descubierto cuatro radiogalaxias cercanas.

Todas estas fuentes están a una distancia máxima de 7.000 millones de años luz de la Tierra. Por el momento, no se han encontrado objetos a mayor distancia. La falta de detección de objetos distantes no se debe a las limitaciones en sensibilidad, sino que se relaciona con los procesos físicos que sufren los fotones de alta energía en su viaje a través del universo. La luz de fondo extragaláctica está formada por fotones producidos por estre-

«LA SENSIBILIDAD MEJORADA Y LA ESTRATEGIA DE OBSERVACIÓN DE LOS TELESCOPIOS DE RAYOS GAMMA ACTUALES PERMITE UNA CARACTERIZACIÓN DETALLADA DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE FUENTES QUE PUEBLAN EL CIELO DE ALTA ENERGÍA»



llas y galaxias desde el comienzo del universo. Cuando los fotones de alta energía se propagan por el universo, interactúan con los fotones de la luz de fondo extragaláctica en longitudes de onda que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Si la energía de los fotones que interactúan es suficiente, los fotones se aniquilan mutuamente y crean pares electrón-positrón (Gould y Schreder, 1967). Esto resulta en una atenuación de las fuentes de rayos gamma por encima de una energía crítica que depende de la distancia. El universo es transparente para los fotones de energía inferior a 20 GeV. A partir de ese punto, se vuelve progresivamente opaco a energías cada vez más altas, y la distancia de visibilidad disminuye.

■ OBSERVACIONES FINALES

El cielo de rayos gamma brilla con unos pocos miles de cuerpos celestes potentes y variables. La población de fuentes de rayos gamma ha aumentado de forma drástica desde el descubrimiento del primer cuásar en la década de los setenta del siglo pasado. La sensibilidad mejorada y la estrategia de observación de los telescopios de rayos gamma actuales permite una caracterización detallada de los principales tipos de fuentes que pueblan el cielo de alta energía. Sin embargo, todavía estamos lejos de comprender muchos de los aspectos físicos implicados en estos procesos violentos. La disponibilidad de catálogos cada vez más amplios nos permitirá ocuparnos de las cuestiones aún abiertas desde un enfoque estadístico. Este aspecto será crucial para nuestra comprensión del cielo de alta energía.

Tal y como hemos visto, las fuentes de muy alta energía observadas hasta ahora probablemente son solo la punta del iceberg, debido a las limitaciones de los telescopios Cherenkov actuales y a su estrategia de observación. La próxima generación de telescopios terrestres de muy alta energía está en camino. El Cherenkov Telescope Array se construirá en los próximos años con el objetivo de mejorar y expandir nuestro conocimiento sobre el universo de muy alta energía (Actis et al., 2011). La construcción se llevará a cabo en dos lugares diferentes, en la isla de La Palma (España) para el hemisferio norte y en Chile para el hemisferio sur. Gracias a la mejora en sensibilidad y cobertura energética, junto con el desarrollo de nuevas estrategias de observación, este dispositivo tendrá un gran potencial de descubrimiento en áreas clave de la investigación astronómica, astrofísica y de física fundamental. El Cherenkov Telescope Array, junto con observaciones multibanda y multimensajero, se ocupará del estudio sobre el origen de los rayos cósmicos, la investigación sobre la aceleración de las partículas en los chorros

relativistas, la naturaleza última de la materia y la física más allá del modelo estándar, la búsqueda de la materia oscura y los efectos de la gravedad cuántica. Todas ellas cuestiones clave de la física de la emisión de alta energía. ⊕

REFERENCIAS

- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., ... Ylinen, T. (2009). Fermi/Large Area Telescope bright gamma-ray source list. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 183(1), 46–66. doi: [10.1088/0067-0049/183/1/46](https://doi.org/10.1088/0067-0049/183/1/46)
- Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., Atwood, W. B., Axelsson, M., ... Zimmer, S. (2015). Fermi Large Area Telescope third source catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 218(2), 23–64. doi: [10.1088/0067-0049/218/2/23](https://doi.org/10.1088/0067-0049/218/2/23)
- Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., ... Zimmer, S. (2015). The third catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi Large Area Telescope. *The Astrophysical Journal*, 810(1), 14–48. doi: [10.1088/0004-637X/810/1/14](https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/14)
- Actis, M., Agnetta, G., Aharonian, F., Akhperjanian, A., Aleksić, J., Aliu, E., ... Zychowski, P. (2011). Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: An advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental Astronomy*, 32(3), 193–316. doi: [10.1007/s10686-011-9247-0](https://doi.org/10.1007/s10686-011-9247-0)
- Blandford, R. D., Netzer, H., & Woltjer, L. (1990). *Active galactic nuclei*. Berlín, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Feenberg, E., & Primakoff, H. (1948). Interaction of cosmic-ray primaries with sunlight and starlight. *Physical Review*, 73(5), 449–469. doi: [10.1103/PhysRev.73.449](https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.449)
- Fuhrmann, L., Larsson, S., Chiang, J., Angelakis, E., Zensus, J. A., Nestoras, I., ... Pearson, T. J. (2014). Detection of significant cm to sub-mm band radio and γ -ray correlated variability in Fermi bright blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(3), 1899–1909. doi: [10.1093/mnras/stu540](https://doi.org/10.1093/mnras/stu540)
- Gould, R. J., & Schreder, G. (1967). Opacity of the universe to high-energy photons. *Physical Review Letter*, 16, 252–254. doi: [10.1103/PhysRevLett.16.252](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.252)
- Hartman, R. C., Bertsch, D. L., Bloom, S. D., Chen, A. W., Deines-Jones, P., Esposito, J. A., ... Dingus, B. L. (1999). The third EGRET catalog of high-energy gamma-ray sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123(1), 79–202. doi: [10.1086/313231](https://doi.org/10.1086/313231)
- Kraushaar, W. L., Clark, G. W., Garmire, G. P., Borke, R., Higbie, P., Leong, V., & Thorsos, T. (1972). High-energy cosmic gamma-ray observations from the OSO-3 satellite. *The Astrophysical Journal*, 177, 341–363. doi: [10.1086/151713](https://doi.org/10.1086/151713)
- Marscher, A. P., & Gear, W. K. (1985). Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. *The Astrophysical Journal*, 298, 114–127. doi: [10.1086/163592](https://doi.org/10.1086/163592)
- Marscher, A. P., Jorstad, S. G., D’Arcangelo, F. D., Smith, P. S., Williams, G. G., Larionov, V. M., ... Ryle, W. T. (2008). The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to-gamma-ray outburst. *Nature*, 452(7190), 966–969. doi: [10.1038/nature06895](https://doi.org/10.1038/nature06895)
- Pittori, C., Verrecchia, F., Chen, A. W., Bulgarelli, A., Pellizzoni, A., Giulliani, A., ... Salotti, L. (2009). First AGILE catalog of high-confidence gamma-ray sources. *Astronomy & Astrophysics*, 506, 1563–1574. doi: [10.1051/0004-6361/200911783](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911783)
- Swanenburg, B. N., Hermsen, W., Bennett, K., Bignami, G. F., Caraveo, P., Kanbach, G., ... Sacco, B. (1978). COS B observation of high-energy gamma radiation from 3C273. *Nature*, 275, 298. doi: [10.1038/275298a0](https://doi.org/10.1038/275298a0)

Monica Orienti. Investigadora del Instituto de Radioastronomía (INAF-IRA) de Bolonia (Italia). Obtuvo su doctorado en la Universidad de Bolonia trabajando en la emisión de radio a gran resolución angular de fuentes extragalácticas.