

La isla de la Palma fue el lugar elegido para el simposio científico “20 MAGIC years”, con el motivo de celebrar los 20 años en los que el experimento MAGIC ha estado funcionando en el observatorio Roque de los Muchachos. Este evento ocurrió entre el 4 y el 6 de Octubre del 2023, y albergó a más de 150 personas.



David Paneque
Max Planck Institute for Physics
dpaneque@mpp.mpg.de

Portavoz de la colaboración MAGIC

LOS TELESCOPIOS MAGIC Y LA ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

El sistema de telescopios MAGIC (*Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov*) está diseñado para realizar astronomía de rayos gamma en el rango de energía desde aproximadamente 20 GeV hasta más de 100 TeV. La instalación consiste en dos telescopios, cada uno con un espejo de 17 metros de diámetro, ubicados en el Observatorio Roque de los Muchachos (ORM). Los telescopios MAGIC son operados por una colaboración internacional de más de 270 físicos (incluyendo estudiantes y científicos asociados) de trece países, en la cual España ha desempeñado un papel muy importante desde el principio.

El campo de la astronomía de rayos gamma de alta energía es una disciplina relativamente nueva, que comenzó a fines de la década de 1980 y principios de la década de 1990 con el descubrimiento (a un nivel de significancia superior a 5σ) de algunas fuentes de rayos gamma. Desde entonces, ha evolucionado considerablemente y hoy nos brinda una nueva ventana para estudiar con precisión los objetos astrofísicos, y una gran cantidad de posibilidades que antes no existían. Los instrumentos más sensibles para llevar a cabo la astronomía de rayos gamma por encima de aproximadamente 20 MeV son los telescopios que realizan una detección directa de los rayos gamma desde el espacio. Por encima de aproximadamente 20 GeV, los instrumentos más sensibles son los telescopios Cherenkov (IACT, *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes*) que detectan los rayos gamma a través de la medición de los fotones Cherenkov emitidos en las cascadas atmosféricas extendidas (EAS, *Extended Air Shower*) inducidas por los rayos gamma en la atmósfera terrestre. En este caso, la atmósfera sirve como elemento del detector (calorímetro), y se pueden lograr áreas efectivas de recolección grandes, aproximadamente de 10^5 m^2 , lo que permite la medición precisa de cantidades muy pequeñas de rayos gamma.

MAGIC fue inaugurado el 10 de octubre de 2003, y comenzó su operación científica con un solo telescopio (observaciones mono) en 2004 [Albert et al., 2008a] y, junto con H.E.S.S. (que comenzó en 2002) y VERITAS (que comenzó en 2007), pertenece a la llamada segunda generación de IACTs. Después de



Figura 1. Telescopios MAGIC, de 17 m de diámetro, en el Observatorio Roque de los Muchachos. El edificio entre los dos telescopios es la casa de control, que contiene la electrónica para hacer el primer filtrado estereoscópico de los datos.

la construcción del segundo telescopio (MAGIC-II), la operación científica con dos telescopios (observaciones estéreo) comenzó en 2009 [Aleksic et al., 2012]. El sistema fue mejorado aún más, entre otras cosas, con una mejor cámara de tubos fotomultiplicadores (PMTs, *photomultiplier tubes*) para el primer telescopio (similar a la del segundo telescopio) y un mejor sistema de lectura de datos, y reinició las operaciones científicas con un rendimiento mejorado en 2013 (ver detalles en [Aleksic et al., 2016a, 2016b]).

Con el tiempo, debido a varias intervenciones de hardware y mejoras en el software y las estrategias de análisis, la sensibilidad de MAGIC ha mejorado aproximadamente en un factor 4 alrededor de 0.4 TeV (la energía en la que la sensibilidad de MAGIC es mejor), y en más de un factor 10 por debajo de 0.2 TeV. Esta evolución de la sensibilidad de MAGIC con el tiempo se representa en la Fig. 2. Debido a que la sensibilidad está limitada por el fondo (*background*), la capacidad de medir con precisión la emisión de una fuente de rayos gamma escala con la raíz cuadrada del tiempo. Por lo tanto, a energías por debajo de 0.1 TeV, actualmente, 1 hora de observación de MAGIC es comparable a más de 100 horas de MAGIC durante sus primeros años de operación. Lo que ha impulsado el potencial de descubrimiento científico de MAGIC.

La operación de MAGIC es gestionada por la colaboración del mismo nombre, que es responsable desde su diseño y construcción hasta su operación y explotación científica. Las observaciones se llevan a cabo por grupos de investigadores pertenecientes a los 13 países colaboradores, y de un equipo local de apoyo.

200 PUBLICACIONES CIENTÍFICAS Y SUMANDO

El primer telescopio MAGIC comenzó a funcionar en octubre de 2003, pero la puesta en funcionamiento no terminó hasta el otoño del año 2004, cuando el instrumento empezó a realizar observaciones científicas regulares. Las primeras publicaciones científicas con datos MAGIC aparecieron en el año 2006, y desde entonces, la colaboración MAGIC ha publicado más de 200 publicaciones en revistas de referencia, incluidas 6 en *Science* y 3 en *Nature*. En general, estas publicaciones abordan diversas esferas científicas, desde la astrofísica convencional, como las relacionadas con el núcleo galáctico activo de galaxias (AGN), los remanentes de supernovas (SNRs) y los púlsares, hasta estudios de física fundamental como la búsqueda de partículas de materia oscura (DM, *Dark Matter*), la violación de la invariancia de Lorentz (LIV, *Lorentz Invariance Violation*) y la cosmología relacionada con la luz de fondo extragaláctica (EBL, *Extragalactic Background Light*).

Hay una gran cantidad de ciencia en las 200 publicaciones de las últimas dos décadas, que no se puede describir en un breve informe como este. Pero vale la pena mencionar que algunos de estos artículos con datos de MAGIC llevaron a la primera detección de una nueva clase de fuente o un nuevo evento. Este es el caso de la primera detección de variabilidad de flujo con escala de tiempo de minutos detectada en un objeto tipo BL Lac (Mrk501) [Albert et al., 2007], la primera detección de un Radio Cuásar de Espectro Plano (FSRQ, *Flat Spectrum Radio Quasar*) a muy altas energías (3C279) [Albert et al., 2008b], la primera detección de emisión pulsada de muy alta energía (pulsar de Cangrejo) [Aliu et al., 2008], la primera detección de variabilidad de flujo con escalas de tiempo de minutos para un

FSRQ (PKS1222+21) [Aleksic et al., 2011] y una radio-galaxia (IC310) [Aleksic et al., 2014], el primer blazar con lente gravitacional a muy altas energías [Ahnen et al., 2016], la primera detección de emisión pulsada que alcanza energías TeV [Ansoldi et al., 2016], la primera asociación significativa (3σ) entre un neutrino de alta energía y una fuente de rayos gamma (TXS 0506+056) [Aartsen et al., 2018], el primer GRB detectado a muy altas energías (GRB190114C) [Acciari et al., 2019a], la primera detección del componente Compton inverso de un GRB [Acciari et al., 2019b], la primera evidencia de aceleración de protones en una explosión de Nova (RS Ophiuchi, junto con la colaboración H.E.S.S.) [Acciari et al., 2022a], y la primera fuente VHE más allá de $z=1$ (GRB 201216C) [Abe et al., 2023a].

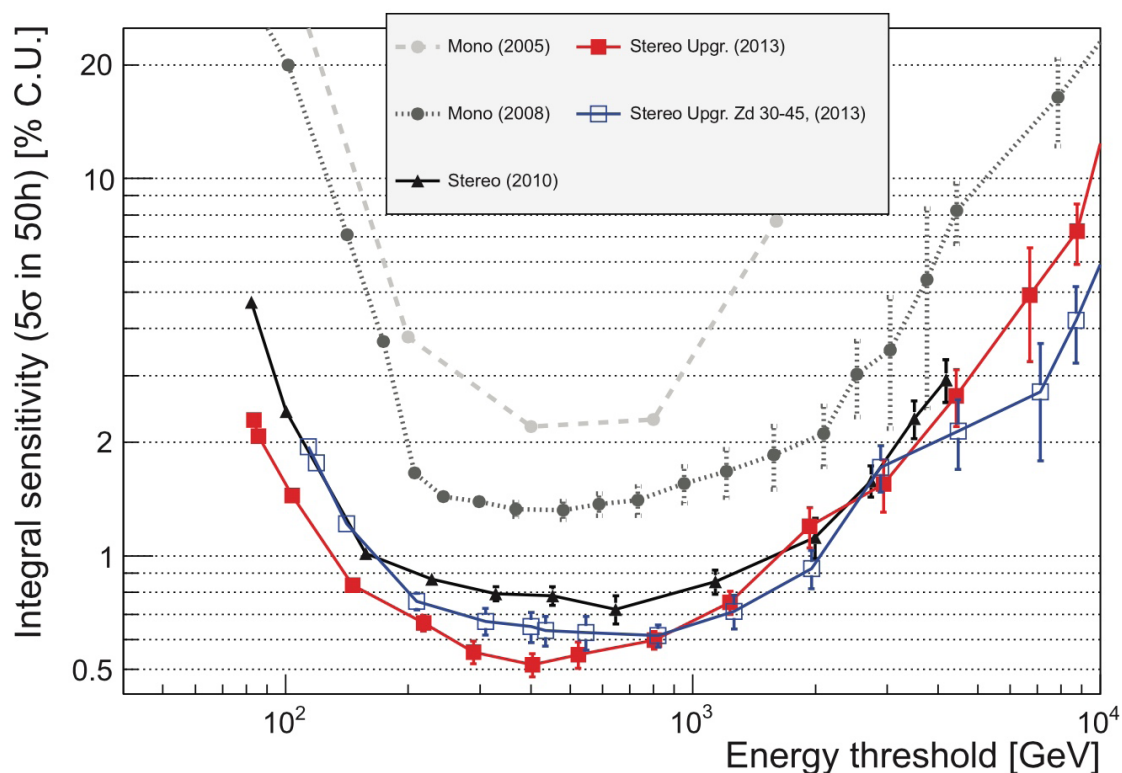


Figura 2. Evolución histórica de la sensibilidad integral de los telescopios MAGIC. La sensibilidad nos informa sobre la habilidad del instrumento para detectar flujos (pequeños) de rayos gamma, y está definida como el flujo integrado de una fuente por encima de una energía dada para la cual $N_{\text{exceso}} / \sqrt{N_{\text{fondo}}} = 5$ después de 50 horas de tiempo efectivo de observación. Figura extraída de [Aleksic et al., 2016b].

Se puede ver que la palabra “*primer*” se usa en todas estas publicaciones que han tenido un gran impacto en la comunidad científica. MAGIC fue concebido inicialmente como un instrumento para explorar, para medir cosas nuevas, y esto es algo que la colaboración MAGIC ha estado haciendo durante los últimos años.

Entre los recientes logros realizados por MAGIC, me gustaría explicar con algún detalle dos de ellos, la primera detección de explosiones de rayos gamma (GRBs), y el papel de MAGIC en esta nueva disciplina llamada astronomía de multi-mensajeros.

EL INICIO DE UNA NUEVA ERA PARA ESTUDIAR LAS EXPLOSIONES DE RAYOS GAMMA

Las explosiones de rayos gamma (GRB, *Gamma Ray Bursts*) fueron descubiertas de forma casual a finales de la década de 1960 como explosiones esporádicas de rayos gamma MeV que aparecen en ubicaciones celestes aleatorias, y que se convierten en los objetos más brillantes en el cielo durante escalas de tiempo del orden de minutos. La emisión de un GRB consta de dos componentes, el *prompt* y el *afterglow*. El primero ocurre principalmente en energías MeV y dura hasta cientos de segundos. El segundo abarca un rango de energía mucho más amplio, desde las frecuencias en radio a los rayos gamma de alta energía, y decae gradualmente en escalas de tiempo mucho más largas, siendo detectable incluso meses después del inicio del GRB. Según el modelo “firefall” [Piran 1999], que es uno de los escenarios teóricos más utilizados para interpretar el fenómeno GRB, tanto las emisiones *prompt* como las de *afterglow* se producen en jets de plasma colimados que son lanzados desde un motor central y que se mueven a velocidades relativísticas. Se cree que el *prompt* se produce en los choques dentro del propio jet (*internal shocks*) y el *afterglow* en los choques producidos cuando el jet interactúa con el medio exterior (*external shocks*). Desde el punto de vista observacional, utilizando la duración de su fase *prompt*, los GRB se clasifican en dos grupos, cortos y largos, con duración típica observada más corta o más larga que 2 segundos, respectivamente. Las dos clases están vinculadas a diferentes sistemas progenitores que en última instancia conducen a la formación del jet en el GRB. Los GRB largos se observan en asociación con explosiones de supernovas de estrellas masivas, mientras que los GRB

cortos se cree que son producidos por la fusión de estrellas de neutrones binarias. (BNS, *Binary Neutron Stars*). La detección conjunta de las ondas gravitacionales (GW) y los rayos gamma de GW 170817/GRB170817A [Abbott et al., 2017] demostró que, al menos algunos de los GRB cortos, se originan en los sistemas BNS fusionados.

Durante muchos años, se había teorizado que los GRB también deberían emitir rayos gamma de muy alta energía (VHE), pero tal detección había permanecido elusiva durante más de tres décadas debido a dos desafíos observacionales. El primero es que los GRB ocurren en tiempos y ubicaciones celestes impredecibles, y su emisión de rayos gamma suele desaparecer en escalas de tiempo que van desde segundos a horas. El pequeño campo de visión de los IACTs (de solo unos grados) les obliga a confiar en las alertas externas de instrumentos de gran campo de visión, como Swift-BAT y Fermi-GBM, para recibir las coordenadas de los GRB, lo que introduce un retraso en el inicio de las observaciones. Además, los IACTs sólo pueden operar durante las noches con buenas condiciones atmosféricas y luz lunar “no demasiado brillante”, por lo que tienen ciclos de operación relativamente cortos (aproximadamente 1000 horas por año). Los eventos explosivos pueden ocurrir durante el día o durante las condiciones meteorológicas adversas, lo que significa que las observaciones con IACTs pueden no ser posibles. El segundo desafío, que es muy específico para la banda de muy altas energías, es el efecto de la luz de fondo extragaláctica (EBL, *Extragalactic Background Light*). El EBL es el fondo difuso de la radiación infrarroja, óptica y ultravioleta que penetra en el espacio intergaláctico, constituyendo la emisión integrada a través de la historia del Universo, desde las primeras estrellas. Los rayos gamma de muy alta energía que provienen de objetos extragalácticos distantes, como los de GRBs, pueden colisionar con los fotones EBL y producir un par electrón-positrón. Esto provoca una atenuación del flujo de rayos gamma que es más severa para las energías fotónicas más altas y las distancias (o *redshifts* z) más grandes. Por lo tanto, la detección de esos rayos gamma VHE requiere no sólo telescopios con bajo umbral de energía, buena sensibilidad, capacidades de reposicionamiento rápido y un ciclo de operación largo, sino también GRBs que ocurren a *redshifts* inferiores a $z \sim 1$, lo que es raro porque la mayoría de ellos vienen de distancias más lejanas.

Los telescopios MAGIC fueron diseñados con el objetivo de detectar GRBs. El bajo umbral de energía está garantizado por el gran reflector y por métodos de análisis específicamente diseñados para ello, mientras que la estructura de fibra de carbono ligera (70 toneladas en total) permite una velocidad de reposición rápida de 7 grados/s (unos cuantos segundos para apuntar a cualquier parte del cielo). Esto es fundamental para el seguimiento de fuentes variables o explosiones como los GRB, dada su naturaleza impredecible. Gracias a estas características, después de muchos años con múltiples intentos, el 14 de enero de 2019, MAGIC logró la primera detección firme de un GRB en VHE, la detección del GRB 190114C. Este acontecimiento fue inmediatamente comunicado a la comunidad de astrofísica (ATel #12390, <https://www.astronomerstelegram.org/?read=12390>), que desencadenó un gran número de observaciones con instrumentos que cubrieron un gran rango de energías, de radio a rayos gamma de muy alta energía.

GRB 190114C fue detectado por primera vez con los instrumentos Swift-BAT y Fermi-GBM, lo que mostró que era un GRB largo, y desencadenó, entre otras cosas, observaciones ópticas con el Gran Telescopio de Canarias (GTC), en el Roque de los Muchachos, que se utilizaron para determinar la distancia de este objeto a $z = 0.4245 \pm 0.0005$ (GCN CIRCULAR 23708). Los telescopios MAGIC comenzaron las observaciones de GRB 190114C a partir de un zenit de unos 56 grados, 57 segundos después del inicio del GRB, para una exposición total de 4,1 horas bajo la iluminación de la luna (aproximadamente 6–8 mayor que la luz de fondo

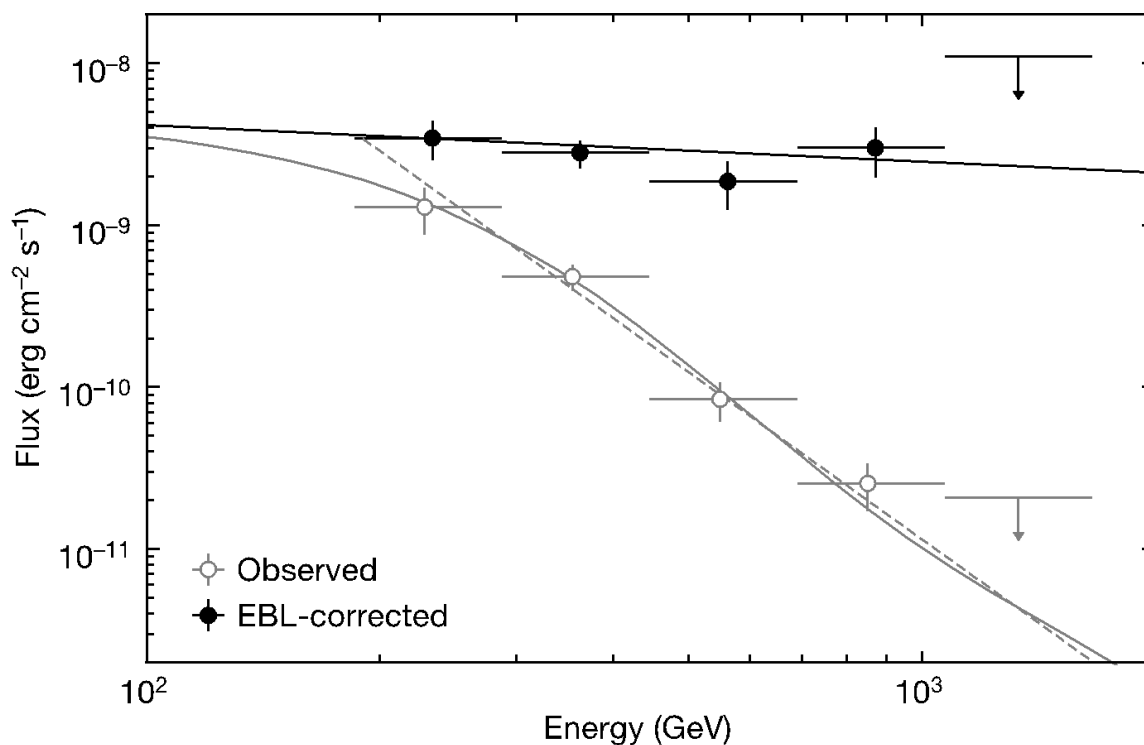


Figura 3. Espectro de rayos gamma de GRB 190114C por encima de 0.2 TeV, integrado durante los primeros 40 minutos de observación con MAGIC. Figura extraída de [Acciari et al., 2019a].

durante una noche sin luna). A pesar de las difíciles condiciones de observación, que disminuyeron la sensibilidad y aumentaron las energías mínimas de rayos gamma que se podían detectar con MAGIC, este GRB fue claramente detectado (50σ) por encima de 300 GeV. La capacidad de los telescopios MAGIC para operar con éxito durante la presencia de la luna (sin precedentes entre los telescopios Cherenkov) fue un factor crucial para lograr esta notable detección. La figura 3 muestra el espectro de rayos gamma VHE observado e intrínseco (es decir, corregido para el efecto de absorción de EBL) integrado en el tiempo en los primeros 40 minutos de la observación. El espectro observado está dominado por los fotones de baja energía, con un pronunciado índice espectral $\alpha_{\text{obs}} \sim 5$ debido a la fuerte absorción de EBL, mientras que el intrínseco es consistente con un espectro plano ($\alpha_{\text{int}} \sim 2$).

Los fotones de alta energía detectados por MAGIC tienen energías muy superiores a la energía máxima que es alcanzable con la emisión de sincrotrón originada en una sola región donde los electrones se aceleran (lo que se denomina el límite "burnoff", véase [Acciari et al., 2019a] para más detalles). Por lo tanto, los resultados con MAGIC indican claramente la necesidad de un mecanismo de radiación adicional, aparte de la emisión de fotones sincrotrón. Varios modelos teóricos proponen la emisión Compton inversa (*inverse Compton*), en su variante sincrotrón-auto-Compton (SSC, *synchrotron self-Compton*), como uno de los principales modelos leptónicos que permiten la producción de fotones hasta energías TeV. Por esta razón, la emisión espectral extendida de rayos X a los rayos gamma VHE se modeló en dos bandas temporales diferentes (con datos simul-

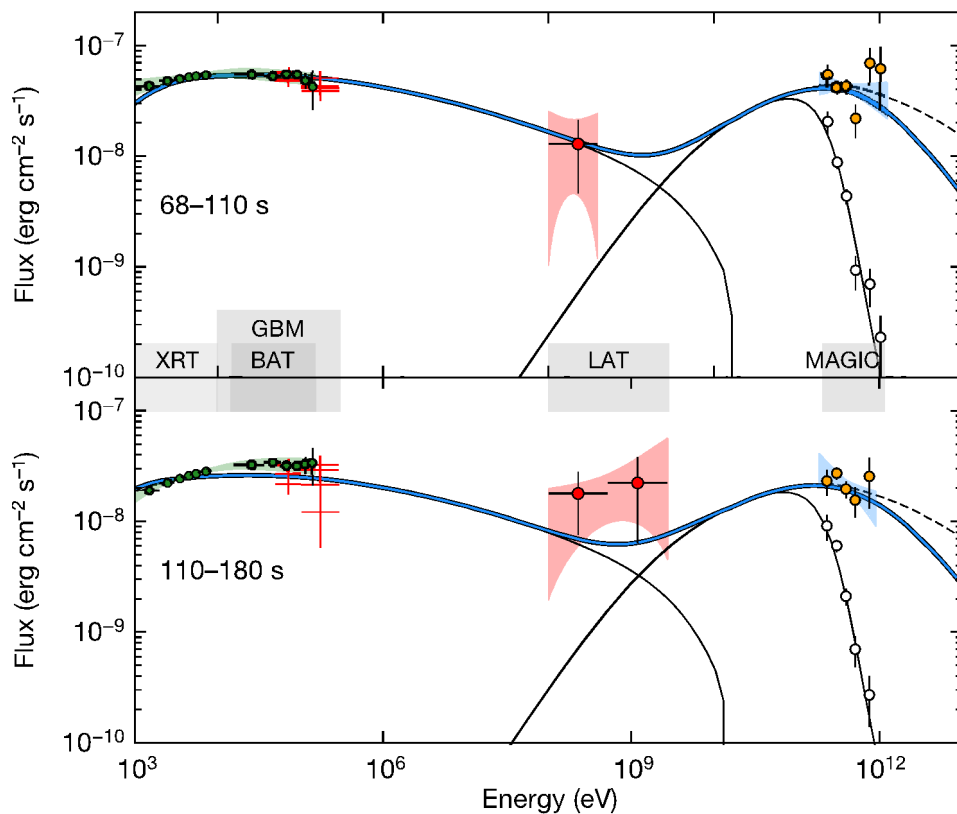


Figura 4. Modelo teórico del espectro extendido de GRB 190114C en los intervalos de tiempo 68-110 s y 110-180 s después del inicio. Figura extraída de [Acciari et al., 2019b].

táneos XRT, LAT y MAGIC) con un modelo de *afterglow* en el choque externo (*external shock*). El modelo considera dos componentes de emisión (Fig. 4), el sincrotrón hasta la banda Fermi-LAT, y el SSC para los datos de MAGIC. Comparando las emisiones de sincrotrón y SSC, se puede ver que la cantidad de energía emitida por estos dos procesos es muy similar. Esto es importante para comprender la física del *afterglow*, y para estimar correctamente la energía que puede ser transferida en última instancia a las partículas o el campo magnético.

El anuncio de la detección de GRB 190114C con MAGIC marcó el comienzo de una nueva era para estudiar GRBs. Después de eso, la colaboración H.E.S.S anunció la detección en VHE de dos GRB largos adicionales en el año 2019 (GRB 180720B y GRB 190829A), y la colaboración MAGIC anunció un cuarto GRB largo a finales del año 2020 (GRB 201216C). Finalmente, la colaboración LHAASO informó de la detección de fotones TeV de un quinto evento, GRB221009A, el GRB más brillante de todos los tiempos.

Además de las detecciones mencionadas anteriormente, existen otros dos GRB observados con MAGIC, GRB 160821B y GRB 201015A, que se detectaron de manera marginal (3σ). El primero es de gran interés porque, a diferencia de los cinco GRB detectados significativamente ($>5\sigma$) en VHE hasta la fecha, este es un GRB corto, y la emisión de kilonova se confirmó con observaciones en visible. Esta es la indicación de que el progenitor de este GRB fue probablemente un sistema BNS, cuyos GWs podrían haber sido detectados por interferómetros terrestres si hubieran estado operativos en el momento del evento [Acciari et al., 2021]. La evidencia de la señal observada por MAGIC en GRB 160821B es muy prometedora para las detecciones conjuntas GW-GRB, dado el cuarto ciclo de operación de LIGO, Virgo y Kagra que ya comenzó en el año 2023.

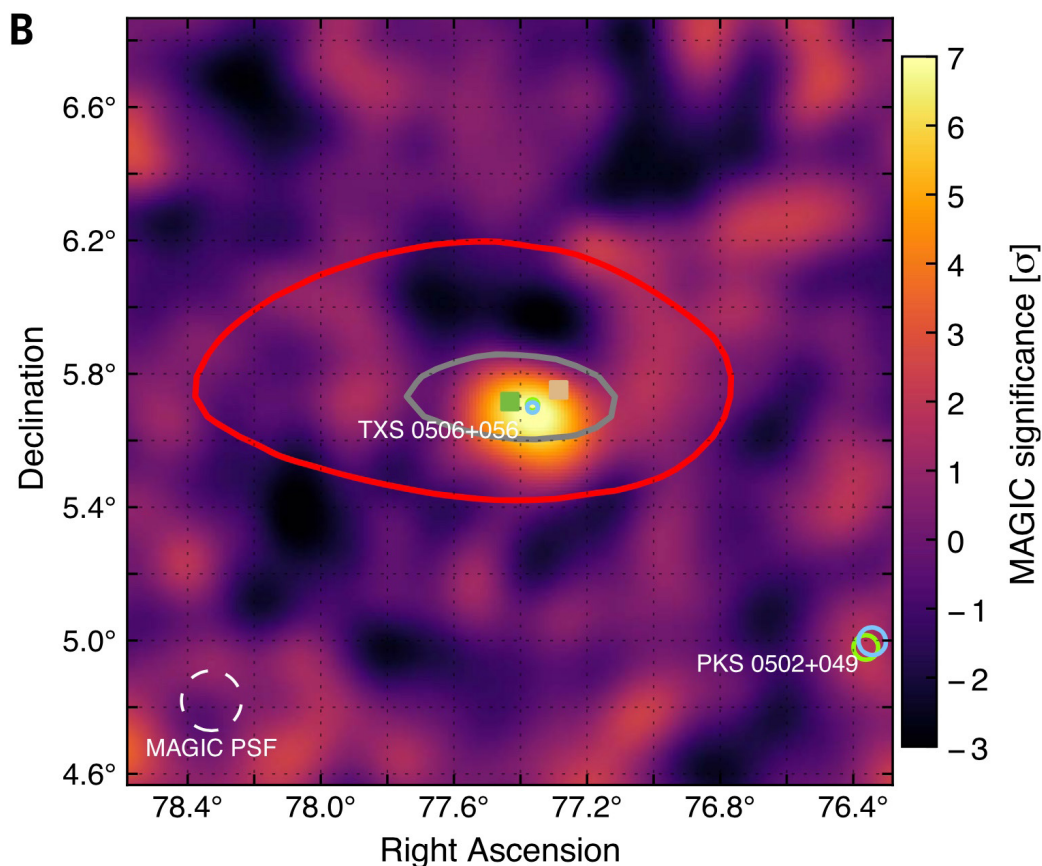
EL PAPEL DE MAGIC EN LA ASTROFÍSICA DE MULTI-MENSAJEROS

Después de más de 100 años desde el descubrimiento de los rayos cósmicos (CRs, *Cosmic Rays*), su origen astrofísico sigue sin resolverse, lo que lo convierte en una de las cuestiones clave en la astrofísica de altas energías. Esto se refiere tanto al ori-

gen de las energías Galácticas (hasta PeV) como a las extragalácticas de alta energía (UHECRs; hasta $\sim 10^{20}$ eV). La observación de estos CRs energéticos implica la existencia de fuentes y mecanismos de aceleración que operan en condiciones extremas. El estudio de estos excepcionales entornos astrofísicos a través de observaciones astronómicas permite explorar la física fundamental y hacer descubrimientos revolucionarios, como ha ocurrido muchas veces en la historia. Dado que los CRs tienen carga eléctrica y se desvían en diversos campos magnéticos (por ejemplo, el campo magnético intergaláctico y el de nuestra propia galaxia), uno no puede relacionar directamente, por ejemplo, las mediciones UHECR realizadas en la Tierra (por el Observatorio Pierre Auger) con sus fuentes, sino que tiene que confiar en información complementaria, como la que viene de sus productos secundarios neutrales: los fotones de alta energía (HE) y los neutrinos. Sin embargo, la sensibilidad de los instrumentos de neutrino actuales (como IceCube, Baikal o KM3Net) todavía no es lo suficientemente buena como para detectar significativamente ($> 5\sigma$) fuentes astrofísicas individuales. En este contexto, los rayos gamma desempeñan un vínculo crucial entre la astronomía de fuentes variables (*time-domain astrophysics*) y la astrofísica de multi-mensajeros porque son la forma más energética de luz, y, por lo tanto, las energías más cercanas a los neutrinos de alta energía detectados por IceCube, y los rayos cósmicos de Ultra Alta Energía detectados por Pierre Auger. Se espera que los rayos gamma también se produzcan en algunos de los eventos explosivos que producen GWs.

Además del Sol y SN 1987A, que se detectaron en fotones y neutrinos de baja energía hace varias décadas, los eventos multi-mensajeros más importantes, recientemente detectados por la comunidad astronómica, son los siguientes tres: 1) GW170817/GRB 170817A, una fusión binaria de estrellas de neutrones detectada con ondas gravitacionales y con rayos gamma [Abbott et al. 2017]; 2) IceCube170922/TXS 0506+056, la asociación más significativa de un neutrino de alta energía con un blazar de rayos gamma [Aartsen et al. 2018]; y 3) NGC 1068, la fuente más importante de neutrinos TeV hasta la fecha, donde la ausencia de rayos gamma de muy alta energía tiene una fuerte implicación para la comprensión de la producción de neutrinos de gran energía [Abbasi

Figura 5. Posición celeste de IceCube-170922A en las coordenadas ecuatoriales J2000, superpuesto a un mapa de significancia de señales gamma por encima de 90 GeV obtenidas con MAGIC. Figura extraída de [Aarsten et al., 2018].



et al. 2022]. De los tres acontecimientos mencionados, los datos de MAGIC desempeñan un papel fundamental en dos de ellos: en la detección VHE de TXS 0506+056 y en la falta de detección VHE de NGC 1068. En los párrafos siguientes describiré brevemente la situación relacionada con estos dos notables descubrimientos.

IceCube170922/ TXS 0506+056: primera coincidencia de un blazar con un neutrino de alta energía

El 22 de septiembre de 2017, el observatorio de neutrinos IceCube midió un evento de ~ 290 TeV (denominado IceCube-170922A) cuya ubicación fue reconstruida con una precisión mejor que 0.1 grados, y que coincidía posicionalmente con el blazar TXS 0506+056. En menos de un minuto de esta detección, la colaboración de IceCube alertó a la

comunidad científica (GCN Circular, 21916), desencadenando búsquedas de seguimiento por muchos telescopios sobre un amplio rango de longitudes de onda. Este esfuerzo de observación mostró, entre otras muchas cosas, que había rayos gamma de alta energía (HE) y muy alta energía (VHE) procedentes de este objeto, como se midió por Fermi-LAT (ATel, #10791) y los telescopios MAGIC (ATEL, # 10817). La figura 5 muestra el mapa del cielo con datos gamma de MAGIC con eventos por encima de 90 GeV. Los otros IACT de segunda generación, H.E.S.S. y VERITAS, no pudieron detectar TXS 0506+056 en ese momento, a pesar de haberlo observado simultáneamente con MAGIC. Esta falta de detección se explica con la menor sensibilidad de estos dos telescopios Cherenkov, con respecto a MAGIC, para detectar energías de rayos gamma por debajo de

0.2 TeV. Debido a la absorción de las interacciones gamma-gamma, que pueden ocurrir tanto en el interior de la fuente (debido a los fotones locales de baja energía) y en la propagación de los rayos gamma de TXS 0506+056 (redshift $z=0.34$) a la Tierra (debida a la luz de fondo extragaláctica), la cantidad de rayos gamma por encima de 0.1 TeV que llegan a la tierra disminuye sustancialmente, y es difícil detectar rayos gamma con energías por encima de 0.4 TeV. H.E.S.S. y VERITAS tienen una sensibilidad ligeramente mejor que MAGIC por encima de 0.3 TeV, pero esta fuente era difícilmente detectable en estas energías. Esto mostró, una vez más, la importancia de las observaciones altamente sensibles por debajo de 0.2 TeV, y el gran potencial de descubrimiento de los telescopios MAGIC con respecto a los otros telescopios Cherenkov que están actualmente en funcionamiento.

La probabilidad de que el neutrino de alta energía se detecte por coincidencia aleatoria con este blazar en estado de explosión (*flare*), detectado por Fermi-LAT y MAGIC, se puede excluir con un nivel de confianza de 3σ , principalmente debido a la determinación precisa de la dirección de IceCube-170922A. Este acontecimiento es la asociación más significativa entre una fuente de rayos gamma y un neutrino de alta energía, lo que sugiere que los blazares pueden de hecho ser una de las fuentes de los rayos cósmicos de gran energía, y por lo tanto parcialmente responsables del flujo cósmico de neutrinos observado por IceCube. Estas investigaciones, que se realizaron junto con las colaboraciones IceCube y Fermi-LAT, entre muchos otros grupos, fueron publicadas en la revista Science en 2018 [Aarsten et al., 2018].

Estas mediciones ofrecieron una oportunidad única para explorar la interacción entre los fotones energéticos, los neutrinos y los rayos cósmicos, y, por consiguiente, muchos autores utilizaron estos datos y los interpretaron dentro de diferentes escenarios teóricos. Una observación importante, en particular en [Ansoldi et al., 2018], es que el prominente cutoff espectral observado por MAGIC por encima de ~ 0.1 TeV, durante la alta y baja actividad de los rayos gamma, confirma la absorción interna de gamma-gamma que se espera como consecuencia de la producción de un neutrino ~ 290 TeV a través de interacciones proton-gamma. Así, la interpretación derivada con es-

tos datos refuerza la asociación entre las señales que vienen de mensajeros múltiples: fotones y neutrinos.

NGC 1068, la mayor señal de neutrino de altas energías en los datos de IceCube

La detección coincidente de neutrinos de alta energía y rayos gamma del blazar TXS 0506+056 da una prueba convincente (alrededor de 3σ) de la primera fuente extragaláctica de neutrinos [Aarsten et al., 2018]. Sin embargo, varios análisis independientes indican que los blazares sólo pueden representar menos del 30% del flujo de neutrino difuso medido por IceCube [Aarsten et al., 2017], y por lo tanto vale la pena investigar otros tipos de fuentes potenciales de neutrinos, como las galaxias formadoras de estrellas (*starburst galaxies*) incluyendo AGNs del tipo Seyfert. Se espera que la emisión de rayos gamma y neutrinos en las galaxias formadoras de estrellas se produzca por rayos cósmicos que interactúan con el medio interestelar y producen piones cargados y neutrales que se descomponen rápidamente en rayos gamma y neutrinos.

Los espectros de rayos gamma producidos por las galaxias Seyfert y las que forman estrellas (*starburst galaxies*), según los modelos teóricos AGN jet y AGN wind difieren significativamente en la banda VHE, donde los IACTs son más sensibles que Fermi-LAT. Específicamente, el modelo leptónico AGN jet presenta un corte a energías de alrededor de 100 GeV, mientras que los modelos de *starburst* y *AGN wind* se extienden en la banda VHE, pero con diferentes formas espectrales. Esto significa que una detección en la banda VHE desempeñaría un papel clave en la ruptura de las degeneraciones entre los diversos modelos teóricos. Por esta razón, la colaboración MAGIC llevó a cabo una extensa observación de 125 horas sobre NGC 1068, que es la más brillante de todas las galaxias *starburst* y Seyfert-2 detectadas en energías GeV con Fermi-LAT. A pesar de la fuerte señal de rayos gamma medida con Fermi-LAT, que se extiende a unos 30 GeV, los datos MAGIC no muestran ningún exceso significativo de rayos gamma VHE [Acciari et al., 2019c]. En el otoño de 2022, IceCube publicó un exceso con una significancia de 4.2σ en las coordenadas de la fuente NGC 1068, que hizo de esta fuente el exceso más significativo de neutrinos de alta energía en los datos de IceCube [Abbasi et al. 2022]. Este resultado de IceCube aumentó aún más el valor

científico de las 125 horas de datos recopilados con los telescopios MAGIC. ¿De dónde vienen estos neutrinos? Teniendo en cuenta que las emisiones de neutrino y rayos gamma son emisiones secundarias de la misma población de partículas madre de alta energía, se espera que los flujos de estos dos mensajeros producidos en la fuente sean comparables. Sin embargo, como se muestra en la Figura 6, la medición de MAGIC reporta un límite superior al flujo de rayos gamma TeV que es de dos órdenes de magnitud por debajo del flujo neutrino TeV medido por IceCube. Esto significa que los neutrinos de alta energía deben producirse en una región que absorba fuertemente los rayos gamma VHE. Una posible ubicación para ello es la cercanía del agujero negro supermasivo, donde los protones pueden acelerarse en un intenso campo electromagnético, o en los vientos producidos por el disco de acreción. Este es un claro ejemplo de los beneficios de la astronomía de mensajeros múltiples.

PERSPECTIVAS

Dos décadas después de la inauguración del primer telescopio, en octubre de 2003, MAGIC sigue realizando astronomía de rayos gamma en el rango de energía de unas pocas decenas de GeV a más de 100 TeV. A energías por debajo de 0.2 TeV, MAGIC sigue siendo el telescopio Cherenkov más sensible del mundo, y por lo tanto su potencial para hacer ciencia sigue siendo mayúsculo. Por ello, MAGIC continuará funcionando durante los próximos años, al menos hasta que la red de telescopios CTA-LST de 4 telescopios Cherenkov comience a operar científicamente, lo que puede ocurrir en algún momento después de 2026. En los próximos años, además de realizar observaciones regulares de rayos gamma, MAGIC también explorará dos modos de operación no-regulares (no estándar): observaciones conjuntas con el primer telescopio CTA-LST (LST-1) y observaciones de Interferometría de Intensidad Óptica.

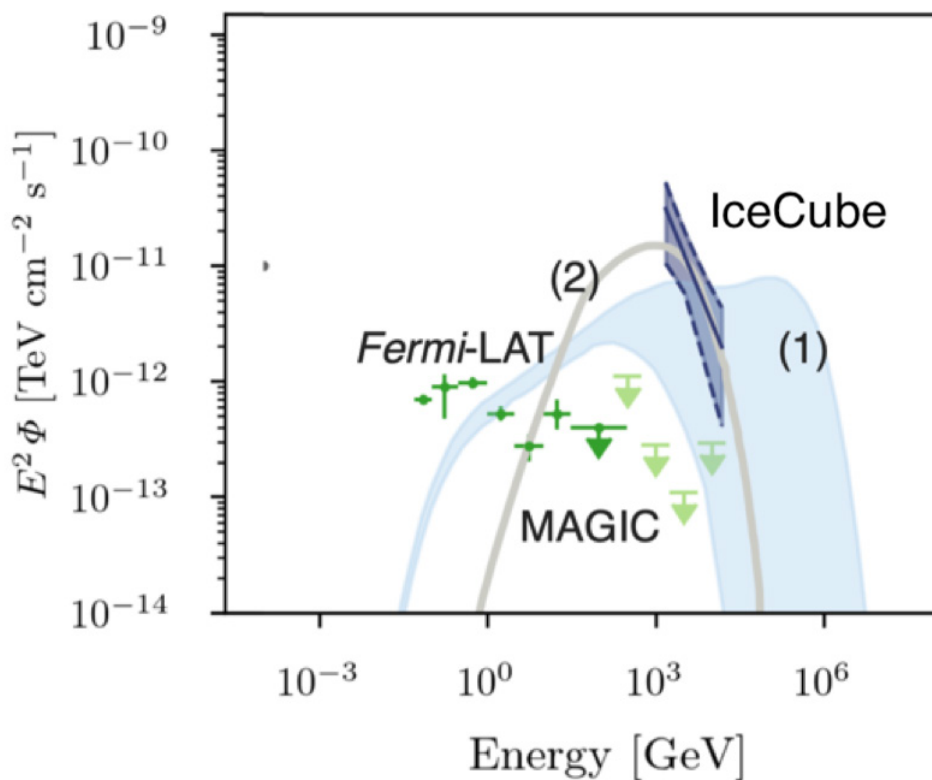


Figura 6. Distribución de la energía espectral (SED) de NGC 1068 obtenido con IceCube, Fermi-LAT y MAGIC. Imagen tomada (con algunas modificaciones editoriales) de [Abbasi et al., 2022].

El LST-1 está en la última etapa de puesta a punto, y ya ha comenzado a hacer ciencia. MAGIC y LST-1 pueden operarse eficazmente como un sistema de tres telescopios. A partir de simulaciones Monte Carlo y observaciones reales de la Nebulosa del Cangrejo se ha evaluado la sensibilidad de MAGIC+LST-1 en comparación con MAGIC-solo. El estudio indica que el sistema de tres telescopios alcanza una mejor sensibilidad por un factor de 1.3 en casi todo el rango de energía. Los resultados han sido aceptados recientemente para su publicación en A&A [Abe et al., 2023b]. Este aumento de la sensibilidad implica una reducción de la cantidad de tiempo por un factor 2 approx. (en comparación con las observaciones realizadas únicamente con MAGIC), que es una ganancia sustancial que vale la pena explotar durante los próximos años, hasta que el conjunto completo de los cuatro telescopios LST comience la operación científica.

Por otra parte, en los últimos años, los telescopios MAGIC se han preparado para realizar observaciones de interferometría de intensidad óptica, y las observaciones MAGIC ahora pueden utilizarse para medir de manera fiable el tamaño de diferentes

estrellas [Acciari et al 2022b]. La gran superficie reflectora de estos telescopios ($> 100 \text{ m}^2$), junto con su sensibilidad a las longitudes de onda azules y UV con un tiempo de respuesta más rápido que 10^{-9} segundos, proporcionan capacidades sin precedentes para explorar fuentes variables en visible con escalas de tiempo que van desde 10^{-3} segundos hasta 10^{-9} segundos. Esta capacidad abre una ventana completamente nueva de oportunidades científicas, que es la de estudiar la física estelar (tamaño y estructura) así como el de estudiar exoplanetas y asteroides a través de tránsitos y observaciones de ocultación de objetos. En los próximos años, la colaboración MAGIC seguirá desarrollando esta técnica, y la desplegará en el LST-1, lo que aumentará aún más la capacidad de realizar astrofísica de alta resolución temporal. Eventualmente, esta técnica no sólo permitirá hacer ciencia con el tamaño de las estrellas, sino que también debería permitir medir la oblicuidad de estrellas que giran rápidamente, oscurecimiento de extremidades de estrella o la variación en el tiempo del tamaño de las explosiones de Novas, lo que aumentará todavía más la cantidad de estudios físicos y descubrimientos que se pueden hacer con los telescopios MAGIC.

Foto de los participantes del simposio “20 MAGIC years” (Hotel Taburiente Playa, Los Cancajos). Credit: Jayant Abhir .



REFERENCIAS

- [Aartsen et al., 2017] Aartsen et al. 2017 ApJ 835.1, 45
- [Aartsen et al., 2018] Aartsen, M.G., Ackermann, M., et al. 2018, Science, 361, eaat1378
- [Abbasi et al., 2022] Abbasi et al. 2022, Science, 378, 538
- [Abbott et al., 2017] B. P. Abbott et al. 2017, ApJL 848.2, L12
- [Abe et al., 2023a] Abe H., Abe S., Acciari V.A. et al. 2023, accepted in MNRAS (arXiv:2310.06473)
- [Abe et al., 2023b] Abe, H., Abe, K., Abe, S., et al. 2023, accepted in A&A (arXiv:2310.01954)
- [Acciari et al., 2019a] Acciari, V.A., Ansoldi, S., et al. 2019, Nature, 575, 455
- [Acciari et al., 2019b] Acciari, V.A., Ansoldi, S., et al. 2019, Nature, 575, 459
- [Acciari et al., 2019c] Acciari V.A. et al. 2019 ApJ 883.2, 135
- [Acciari et al., 2021] Acciari et al. 2021, ApJ 908.1, 90
- [Acciari et al., 2022a] Acciari, V.A., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2022, Nature Astronomy, 6, 689.
- [Acciari et al., 2022b] Acciari V.A. et al. Proc. SPIE Optical and Infrared Interferometry and Imaging VIII. 2022, pp. 12183–11.
- [Ahnen et al., 2016] Ahnen, M.L., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2016, A&A, 595, A98
- [Albert et al., 2007] Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., et al. 2007, ApJ, 669, 862
- [Albert et al., 2008] Albert, J., Aliu, E., et al. 2008, Science, 320, 1752
- [Albert et al., 2008a] Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., et al. 2008, ApJ, 674, 1037.
- [Aleksic et al., 2012] Aleksić, J., Alvarez, E. A., Antonelli, L. A., et al. 2012, Astroparticle Physics, 35, 435.
- [Aleksic et al., 2016a] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. 2016, Astroparticle Physics, 72, 61.
- [Aleksic et al., 2016b] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. 2016, Astroparticle Physics, 72, 76
- [Aleksic et al., 2011] Aleksić, J., Antonelli, L.A., Antoranz, P., et al. 2011, ApJL, 730, L8
- [Aleksic et al., 2014] Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L.A., et al. 2014, Science, 346, 1080
- [Aliu et al., 2008b] Aliu, E., Anderhub, H., Antonelli, L.A., et al. 2008, Science, 322, 1221.
- [Ansoldi et al., 2016] Ansoldi, S., Antonelli, L.A., Antoranz, P., et al. 2016, A&A, 585, A133
- [Ansoldi et al., 2018] Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arcaro, C., et al. 2018, ApJ, 863, L10.
- [Piran 1999] T. Piran. 1999, Physics Reports 314.6, 575–667.