

# PRIMEROS RESULTADOS DEL LST-1 DE CTA

El telescopio LST-1 (*Large-Sized Telescope*, ver figura 1), inaugurado en octubre de 2018 en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) [1, 2], es el primero del futuro observatorio norte de CTA (*Cherenkov Telescope Array*, [3]). Una vez completado, CTA-Norte será, junto con su homólogo CTA-Sur, en el observatorio de ESO - Cerro Paranal, el instrumento astronómico más sensible en la banda gamma de muy alta energía (VHE,  $E_\gamma > 20$  GeV) en las próximas décadas.



Abelardo Moralejo  
[moralejo@ifae.es](mailto:moralejo@ifae.es)

Rubén López-Coto  
[rlopezcoto@iaa.es](mailto:rlopezcoto@iaa.es)

Daniel Morcuende  
[dmorcuen@ucm.es](mailto:dmorcuen@ucm.es)

En nombre del Proyecto LST de CTA

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los LSTs son telescopios Cherenkov atmosféricos (*Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes* o "IACTs"). Estos instrumentos utilizan grandes espejos parabólicos y cámaras equipadas con fotomultiplicadores para detectar el breve destello de luz Cherenkov producido por la cascada de partículas ultra-relativistas inducida por la absorción en la atmósfera de un fotón de muy alta energía. Esta "cascada atmosférica" es un proceso multiplicativo iniciado y alimentado por la creación de pares electrón-positrón, y de fotones gamma secundarios generados por *bremsstrahlung* (véase la figura 2). Un IACT es capaz de registrar imágenes de la cascada en luz Cherenkov, en el rango de longitud de onda visible y ultravioleta cercano. El análisis de las imágenes permite reconstruir tanto la dirección del fotón primario como su energía. Para un fotón VHE de incidencia vertical, la mayor parte de la luz Cherenkov se distribuye en el nivel de observación en un disco de unos 120 metros de radio, pero dependiendo de su energía, la detección es posible incluso a centenares de metros de distancia del eje de la cascada. La atmósfera actúa por tanto como un gigantesco calorímetro, con una profundidad de  $\approx 22$  longitudes de radiación (a la altura del ORM), y un área efectiva de detección del orden de  $10^5$  m<sup>2</sup>. En contraste, los telescopios gamma espaciales, como *Fermi-LAT*, tienen áreas efectivas de apenas un metro cuadrado, lo que limita fuertemente su sensibilidad en la banda de muy alta energía.

En su primera fase (o "configuración alpha") CTA-Norte constará de cuatro LSTs (equipados con espejos de 23 m de diámetro) y nueve MSTs (*Medium-Sized Telescopes*, de 12 m). La comunidad española ha participado desde su inicio en el proyecto CTA, con gran implicación en el diseño y construcción de los LSTs, sucesores naturales de los telescopios MAGIC que operan en el ORM desde hace veinte años.

## ANÁLISIS DE LOS DATOS

En condiciones ideales de observación (con la luna por debajo del horizonte y buena calidad de la atmósfera) el ritmo de detección de cascadas de LST-1 es de aproximadamente 7000 por segundo. Prácticamente todas ellas son cascadas iniciadas en la atmósfera por rayos cósmicos cargados: un flujo isótropo de protones, partículas alfa, y otros

Figura 1. : LST-1 en el QRM (créditos: Moritz Hütten, LST Collaboration)



núcleos de muy alta energía que constituyen la principal fuente de ruido para un IACT. La identificación de las escasas cascadas iniciadas por fotones supone el mayor reto en el análisis de las observaciones. La reconstrucción de las imágenes se realiza con la ayuda de una detallada simulación Monte Carlo (MC) del desarrollo de las cascadas atmosféricas, la producción de luz Cherenkov, y de su detección por parte del telescopio. El análisis estándar de los datos de LST-1 utiliza los sucesos simulados para entrenar un método de aprendizaje automático supervisado que clasifica las imágenes, según su forma e intensidad, en una escala de 0 a 1 (el llamado parámetro “*gammaness*”). El valor de *gammaness* asignado a

una imagen será mayor cuanto más similar sea la imagen a la esperada, según la simulación, para una cascada iniciada por un fotón. Si bien no puede identificarse con certeza la naturaleza de cada cascada individual, la selección de los sucesos con un cierto valor mínimo de *gammaness* siempre conservará más fotones que sucesos de fondo.

La reconstrucción de la dirección y de la energía del fotón primario utiliza también métodos de aprendizaje automático (en su variante de regresión) entrenados sobre simulaciones. Para cada suceso registrado por LST-1, obtenemos por tanto estimaciones de su dirección y su energía, y un valor de *gammaness*.

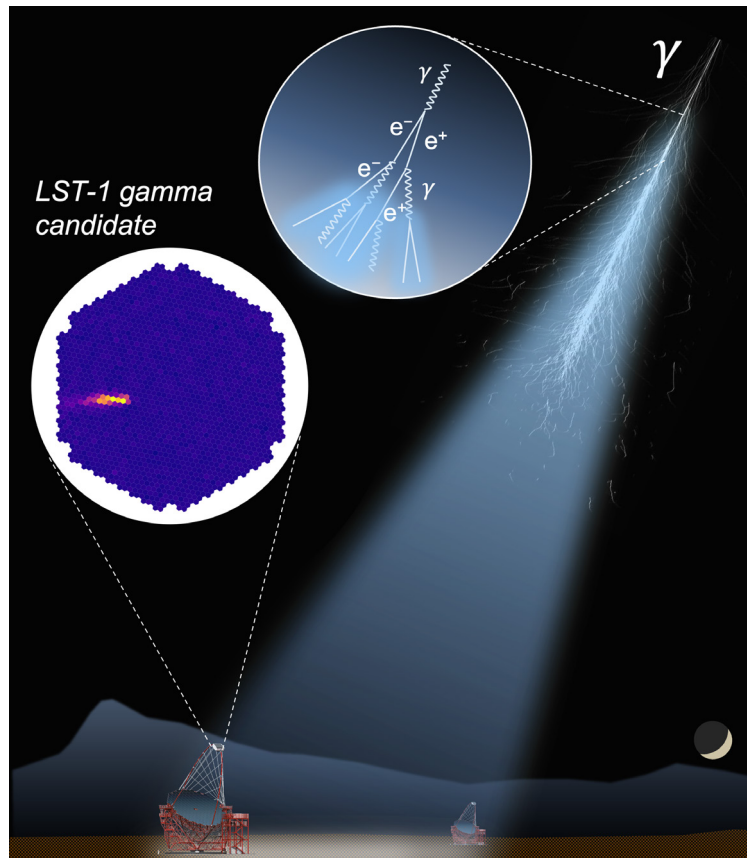
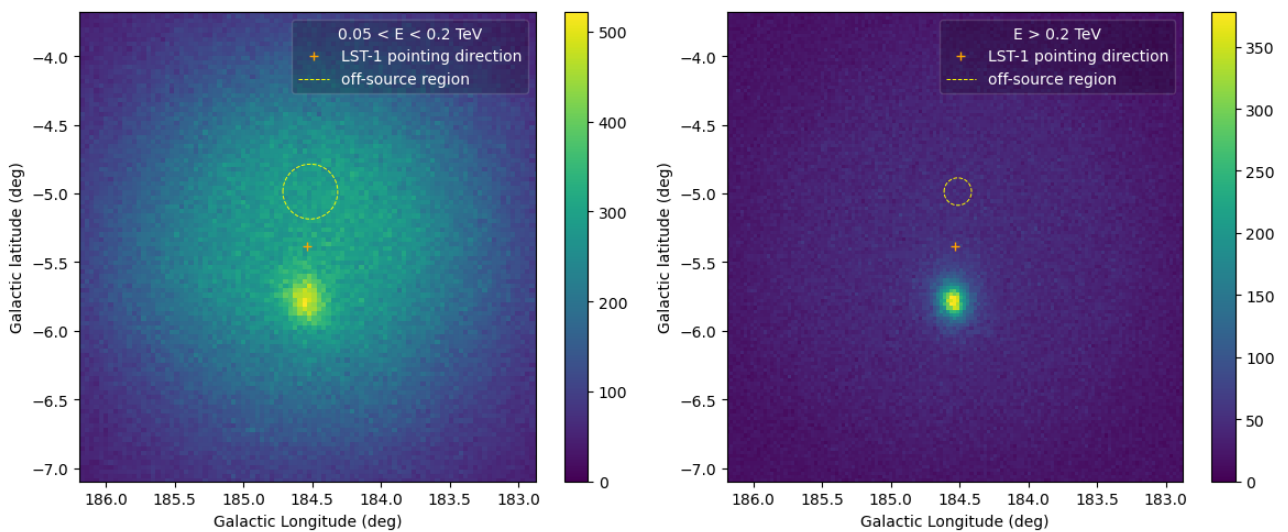


Figura 2. Principio de funcionamiento de un IACT.

Figura 3. Imágenes de la región de la nebulosa del Cangrejo en dos rangos de energía, obtenidas con LST-1. El fondo difuso es debido fundamentalmente a cascadas iniciadas por protones de la radiación cósmica. La escala de colores indica el número de sucesos reconstruidos en cada bin. Se muestran las regiones de control para la estimación del fondo difuso.



Energía [TeV]	0.03	0.1	1	10
Área efectiva [m <sup>2</sup> ]	1.5×10 <sup>4</sup>	6.5×10 <sup>4</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>	2.5×10 <sup>5</sup>
Resolución angular [grados]	0.40	0.25	0.17	0.18
Resolución energética $\Delta E/E$	0.50	0.35	0.19	0.20

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento del telescopio LST-1 en función de la energía.

Dado que no es posible eliminar completamente el fondo isótopo de rayos cósmicos, para obtener el número de fotones procedentes de una fuente gamma utilizamos fotometría de apertura, analizando el conteo de sucesos alrededor de una dirección situada a la misma distancia del centro del campo de visión. La figura 3 muestra la distribución de las cascadas reconstruidas por LST-1 en torno a la nebulosa del Cangrejo en dos rangos de energía, y las regiones utilizadas para la estimación del fondo. Puede apreciarse cómo el exceso debido a la emisión gamma de la nebulosa es más nítido (y más compacto) a mayor energía, como consecuencia de la mejor reconstrucción de las cascadas.

#### VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LST-1

La correcta simulación del telescopio y del desarrollo de las cascadas en la atmósfera es esencial para obtener resultados fiables. Hemos verificado la validez de la simulación utilizando dos métodos independientes. El primero consiste en el análisis de los llamados “anillos de muones”, imágenes producidas por muones de la radiación cósmica secundaria. Cada muon aislado cuya trayectoria intercepta el espejo del telescopio produce una cantidad de luz bien definida, predecible a partir de la posición y geometría del anillo. LST-1 registra cientos de estos sucesos por minuto, lo que nos permite estudiar la estabilidad del telescopio en cuanto a su eficiencia de captación de luz, así como ajustar el valor de dicha eficiencia en la simulación MC. El otro método consiste en utilizar las observaciones de la nebulosa del Cangrejo, la candela estándar en la banda VHE, y obtener a partir de ellas distribuciones de distintos parámetros de imagen para las

cascadas iniciadas por fotones. Las distribuciones obtenidas con LST-1 (por ejemplo, la del parámetro *gammaness* y su evolución con la intensidad de las imágenes) son perfectamente compatibles con las correspondientes a los fotones de la simulación.

Una vez validada, la simulación MC se utiliza para calcular las funciones de respuesta del telescopio (entre ellas el área efectiva en función de la energía), que permiten obtener, a partir del exceso estimado de fotones gamma, el espectro VHE de la fuente observada. También nos proporciona los principales parámetros de funcionamiento de LST-1. El umbral de energía de LST-1 es de alrededor de 20 GeV, que con el análisis actual se incrementa hasta  $\approx 30$  GeV después de la selección de candidatos gamma. El valor óptimo de la sensibilidad (mínimo flujo de rayos gamma detectable de una fuente puntual) es de un 1.1% del flujo de la nebulosa del Cangrejo para  $E > 250$  GeV en 50 horas de observación (12.4% en 0.5 horas). La tabla 1 muestra otros parámetros de LST-1 derivados de las funciones de respuesta.

En la configuración final de CTA-Norte cada cascada será reconstruida estereoscópicamente por dos o más telescopios (LSTs y MSTs), lo que mejorará enormemente la resolución angular y energética del sistema, así como la capacidad de identificar y suprimir el fondo de rayos cósmicos. Los resultados aquí presentados corresponden al funcionamiento del primer LST operado individualmente, en modo “monoscópico”. Pese a las limitaciones que este modo de operación impone, LST-1 es ya un instrumento competitivo, y ha comenzado a desarrollar su programa científico.

### PRIMEROS RESULTADOS OBTENIDOS CON LA NEBULOSA Y EL PÚLSAR DEL CANGREJO

LST-1 inició su primera fase de explotación científica en noviembre de 2019, y ha realizado desde entonces observaciones de manera regular de decenas de fuentes. La fuente astrofísica más observada ha sido la nebulosa del Cangrejo, cuyo espectro de emisión de rayos gamma se ha caracterizado durante varias décadas por instrumentos que observan el cielo en este rango de energía, resultando ser la fuente con emisión estable (dentro de las incertidumbres sistemáticas de los telescopios) más brillante en rayos gamma VHE, por lo que se la considera una fuente de calibración. Por ello, como parte de la verificación del correcto funcionamiento de LST-1, también hemos obtenido el espectro y la curva de luz de la nebulosa del Cangrejo (figuras 4 y 5).

El cálculo del flujo de fotones gamma se basa en fotometría de apertura, como se ha explicado anteriormente (véase figura 3). Teniendo en cuenta las funciones de respuesta del telescopio y asumiendo que el espectro en energía se puede modelar mediante una parábola logarítmica se calculan los parámetros

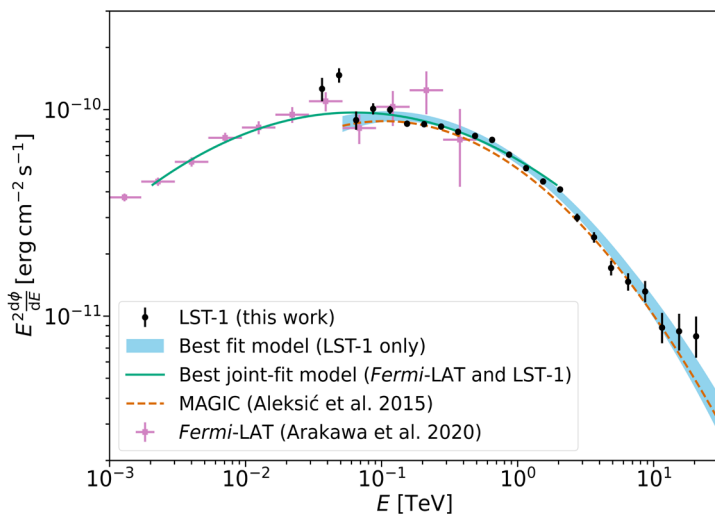


Figura 4. Espectro de la nebulosa del Cangrejo obtenido a partir de observaciones realizadas con el LST-1. La banda azul representa el modelo obtenido ajustando solamente con los datos del LST-1. Como referencia se muestra el espectro obtenido por los telescopios MAGIC y por el telescopio espacial *Fermi*-LAT. La línea continua representa el ajuste conjunto de los datos del LST-1 y *Fermi*-LAT entre 2 GeV y 2 TeV.

espectrales. El resultado obtenido con los datos de LST-1 es comparable al reportado por la colaboración MAGIC en el mismo rango de energía (dentro de un 10% de error sistemático en la normalización del flujo en ambos instrumentos, valor típico en estos telescopios). A bajas energías el espectro obtenido con LST-1 conecta perfectamente con la parte más energética del espectro medido por *Fermi*-LAT como muestra el ajuste conjunto de los datos de ambos instrumentos. Cerca del umbral de energía de LST-1, es especialmente notable el efecto de la incertidumbre sistemática en la determinación del fondo a sustraer para el cálculo del espectro. Una pequeña variación porcentual en el factor de normalización entre las regiones del campo de visión usadas para calcular la señal de fotones provenientes de la fuente y el fondo da lugar a un cambio en el flujo de los puntos espectrales a bajas energías significativamente mayor que la incertidumbre estadística mostrada en la figura 4. Esto explica la aparente incompatibilidad de los puntos espectrales de baja energía y muestra la limitación de un telescopio Cherenkov operando en modo monoscópico para discriminar eventos de señal y fondo cerca de su umbral.

El flujo de rayos gamma de  $E \geq 1$  GeV de la nebulosa del Cangrejo, con un máximo de emisión alrededor de 60 GeV, se explica generalmente como resultado del mecanismo SSC (*Synchrotron-Self-Compton*). La nebulosa contiene una población de electrones y positrones de muy alta energía que emiten radiación sincrotrón en un amplio rango de frecuencias (desde ondas de radio a rayos gamma de  $\approx 1$  GeV). Los fotones sincrotrón pueden interactuar por efecto Compton inverso con esa misma población de electrones y positrones, adquiriendo energías mucho mayores, de hasta 1 PeV [4]. Para comprobar la estabilidad del flujo de fotones VHE de la nebulosa del Cangrejo a lo largo de las observaciones tenidas en cuenta en este trabajo (realizadas entre noviembre de 2020 y marzo de 2022), hemos obtenido la curva de luz integrando el flujo observado por encima de 100 GeV en intervalos temporales de un día (véase la figura 5). La curva de luz a lo largo de todas las observaciones es compatible con un flujo constante si se tiene en cuenta una incertidumbre sistemática del 6% en la determinación de cada uno de los flujos diarios calculados (incertidumbre fundamentalmente debida a pequeñas variaciones en las condiciones de la atmósfera a lo largo del periodo de observación).

Por último, también hemos detectado la emisión pulsada proveniente del púlsar que se encuentra en la parte central de la nebulosa del Cangrejo. La resolución angular de los telescopios Cherenkov no permite resolver el púlsar, pero podemos estudiar el perfil temporal del exceso observado para encontrar la componente pulsada.

El periodo de rotación de la estrella de neutrones resultante de la explosión de la supernova SN1054 que dio lugar a la nebulosa es de 33 ms. La emisión del púlsar se concentra en dos pulsos bien diferenciados, P1 y P2, detectados claramente con LST-1 (véase la figura 6). Es importante destacar que la detección de la emisión pulsada de fotones VHE es prueba del bajo umbral de energía alcanzado por LST-1, ya que la emisión del púlsar se concentra a menores energías que la de la nebulosa antes descrita.

### OTROS RESULTADOS CIENTÍFICOS

En esta primera etapa de su programa científico, LST-1 ha realizado observaciones de otras fuentes astrofísicas. A continuación, enumeramos algunos de los principales resultados obtenidos.

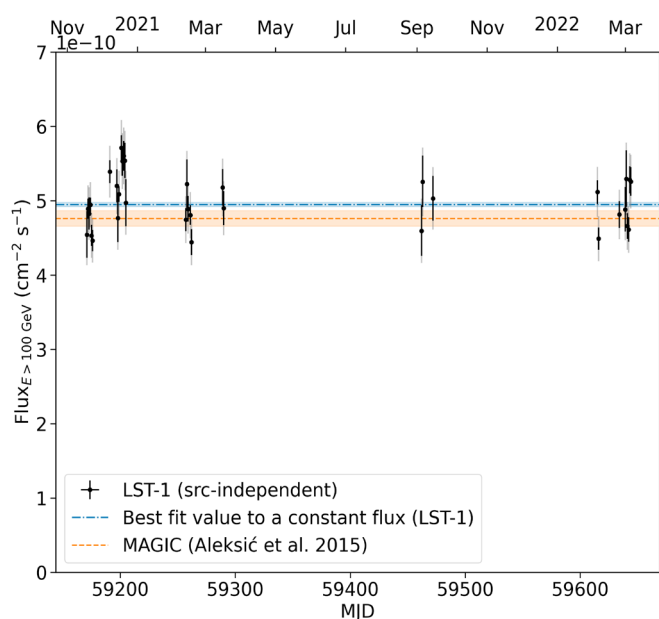


Figura 5. Curva de luz de la nebulosa del Cangrejo obtenida por LST-1 para fotones de energía mayor de 100 GeV y usando intervalos temporales de un día.

### RS Ophiuchi

RS Ophiuchi (RS Oph) es una nova recurrente situada en la constelación de Ophiuchus que experimenta erupciones aproximadamente cada 15 años. La más reciente tuvo lugar el 8 de agosto de 2021, una erupción que fue vista en longitudes de onda desde el radio hasta los rayos gamma de muy alta energía. Esta fue la primera ocasión en la que una nova fue detectada en el rango energético por encima de las decenas de GeV, y junto a MAGIC y H.E.S.S., dos de los sistemas punteros en el mundo operando en este rango energético, LST-1 fue capaz de seguir el fenómeno transitorio y detectar emisión gamma de alta energía proveniente de RS Oph. Junto a los resultados de MAGIC y H.E.S.S. y del telescopio espacial *Fermi*-LAT, los resultados de LST-1 revelan un escenario en el que las ondas de choque de la nova aceleran protones hasta energías ultrarelativistas y son el origen de la emisión en rayos gamma de muy alta energía.

### Fuente LHAASO J2108+5157

LHAASO J2108+5157 es una de las fuentes sin identificar del conjunto de fuentes galácticas detectadas por LHAASO hasta energías más allá de los PeV, y la única que no tiene asociada una contrapartida a energías más bajas. Este objeto, que podría tener una extensión no despreciable a energías del orden del TeV, fue observado por LST-1 durante 49 horas en buenas condiciones. A pesar de no detectarla a energías de TeV, las observaciones de LST-1 (véase la figura 7) imponen límites que, junto al estudio de los datos obtenidos en otras bandas, constriñen los parámetros de los diferentes modelos que explican la emisión de esta fuente [5].

### El Centro Galáctico

El telescopio LST-1 también está llevando a cabo un monitoreo del Centro Galáctico (observable a alto ángulo cenital). A pesar de que la emisión gamma de la fuente central de nuestra galaxia es ya conocida y aparentemente estable a lo largo de los años, la observación de esta región en la banda gamma es de gran interés, por ejemplo en la determinación de la máxima energía de los protones acelerados alrededor del Centro Galáctico (a través de la observación de la emisión difusa resultante de sus interacciones), o en la búsqueda de indicaciones de aniquilación o desintegración de materia oscura.

**BL Lacertae**

El 11 de julio de 2021 LST-1 observó la galaxia activa BL Lacertae (BL Lac), registrando un flujo de rayos gamma procedente de su núcleo significativamente superior al habitual para este objeto [6]. El seguimiento a lo largo de las semanas siguientes mostró picos de emisión varios órdenes de magnitud superiores a los de su estado base, alcanzando a principios de agosto un flujo alrededor de cuatro veces el de la nebulosa del Cangrejo por debajo de 100 GeV. La variabilidad detectada fue tan rápida que se pudo trazar hasta escalas temporales por debajo de las horas.

**Otros núcleos activos de galaxias**

Uno de los objetivos principales de LST son las fuentes gamma situadas a distancias cosmológicas, cuyo brillo en la banda VHE se ve atenuado por la interacción de los fotones gamma con la luz de fondo extragaláctica (a través de la producción de pares  $e^+ - e^-$ ). Si además estas fuentes presentan fenómenos transitorios de variabilidad rápida, como en el caso de BL Lac, la única manera de estudiarlas es a través del uso de IACTs (con áreas efectivas mucho mayores que los telescopios espaciales). Entre 2020 y 2023, hemos detectado con LST-1 varios núcleos activos de galaxias como por ejemplo Mrk 421, Mrk 501, 1ES 1959+650, 1ES 0647+250 y PG 1553+113. Las curvas de luz de estas fuentes se han reconstruido hasta energías de las decenas de los GeV, muy cercanas al umbral de energía de los LSTs. En estos momentos estamos llevando a cabo estudios de variabilidad y de monitoreo a largo plazo de las mismas.

**PERSPECTIVAS**

El telescopio LST-1 continuará funcionando en modo monoscópico durante aproximadamente dos años más, mientras los siguientes telescopios LSTs y MSTs que formarán parte de CTA-Norte se ponen en funcionamiento. Durante este periodo, el primer LST seguirá observando el cielo VHE visible desde el hemisferio norte. Uno de los objetivos claves en su programa científico es la detección de fenómenos transitorios como, por ejemplo, la emisión de fotones VHE provenientes de estallidos de rayos gamma. El rápido apuntado de LST-1 en caso de alertas de otros telescopios, su gran área de colección de luz y su bajo umbral de energía hacen que este ins-

trumento sea único para estudiar este tipo de fuentes esporádicas, cuyos mecanismos de emisión son aún desconocidos. LST-1 tiene un programa de seguimiento de sucesos transitorios en un marco de astronomía multi-mensajero que depende de alertas emitidas por otros instrumentos en diferentes longitudes de onda, así como de telescopios de ondas gravitacionales y neutrinos.

Parte de los esfuerzos de LST-1 también se centrarán en la observación de púlsares, para los cuales este tipo de telescopios es idóneo debido a su sensibilidad a energías del orden de unas pocas decenas de GeV, y a los espectros extremadamente *blandos* de estas fuentes. Por este motivo se espera que LST-1 detecte la emisión pulsada en VHE de púlsares como Geminga y Dragonfly, necesitando menor tiempo de observación que los IACTs actuales.

Por último, LST-1 explotará la posibilidad de realizar observaciones conjuntas con los telescopios MAGIC: la situación de LST-1, junto con su mayor tamaño y campo de visión respecto a MAGIC, hace que la práctica totalidad de las cascadas que activan MAGIC sean visibles también para LST-1. Las observaciones simultáneas permiten por tanto tener un sistema estereoscópico de tres telescopios, con mayor sensibilidad que MAGIC y LST-1 por separado. Ya hemos llevado a cabo con éxito las primeras pruebas de este modo de operación, que utilizaremos frecuentemente hasta que los próximos telescopios de CTA-Norte entren en funcionamiento a lo largo de 2024 y 2025.

**REFERENCIAS**

1. Boletín de la SEA, número 40, verano 2019
2. <https://www.lst1.iac.es/>
3. <https://www.cta-observatory.org/>
4. *PeV gamma-ray emission from the Crab Nebula*, Cao et al, Science 373 (2021)
5. Abe, S. et al., *Multiwavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157*, A&A 673, A75 (2023)
6. <https://astronomersteleggram.org/?read=14783>

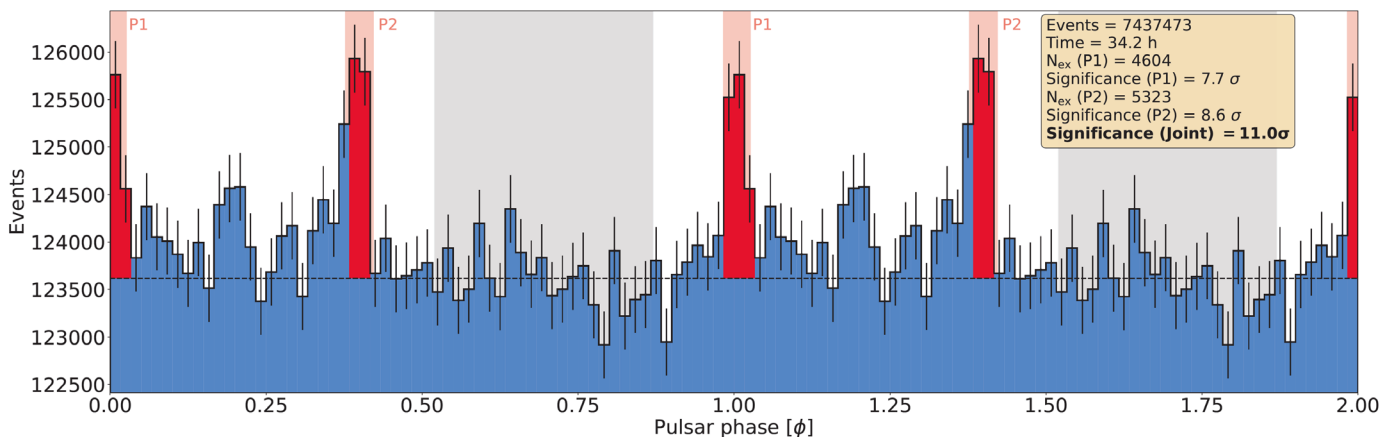


Figura 6. Faseograma del púlsar del Cangrejo.

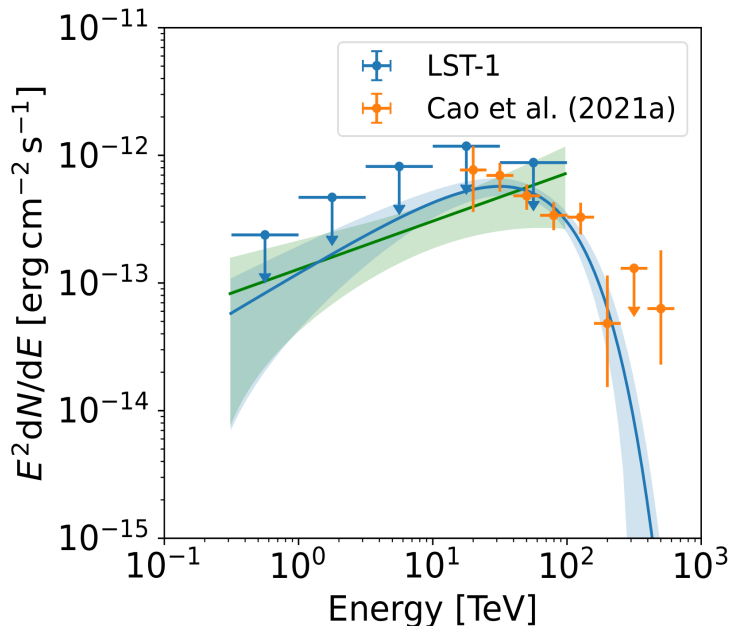


Figura 7. Espectro de la emisión de fotones VHE proveniente de LHAASO J2108+5157 medido por LST-1 (límites superiores) y LHAASO (Cao et al., 2021a).

«La velocidad de apuntado de LST-1, su gran área de colección de luz y su bajo umbral de energía hacen de él un instrumento único para el estudio de fenómenos transitorios a distancias cosmológicas, como los estallidos de rayos gamma.»