

RS OPHIUCHI: ACELERACIÓN HADRÓNICA EN

Tras más de una década intentando detectar la contrapartida más energética de los fenómenos conocidos como novas, RS Ophiuchi se ha convertido en la primera nova en ser detectada en el rango de rayos gamma de muy alta energía. Las observaciones realizadas por los telescopios MAGIC han revelado que existe aceleración hadrónica en estas explosiones termonucleares, dando lugar a la producción de rayos gamma (Acciari et al. 2022). Además, este trabajo ha aportado evidencias adicionales sobre la explicación del origen de los rayos cósmicos en la Vía Láctea.



Alicia López Oramas
Instituto de Astrofísica de Canarias
Miembro de la col. MAGIC
(@magictelesopes)
alicia.lopez@iac.es

En sistemas binarios, parte del material de una estrella puede ser interceptado por la otra. En el caso de que uno de los dos componentes sea una gigante roja, esta puede expandirse más allá de su lóbulo de Roche, lo que provocará que el material sea atraído gravitacionalmente por su compañera. Si esta estrella compañera es una enana blanca, la materia robada se irá acumulando en su superficie, lo que, eventualmente, puede provocar una explosión termonuclear, también conocida como nova (proveniente del latín *stella novae*, ya que visualmente parece que ha nacido una nueva estrella). En este caso de binarias formadas por una pareja enana blanca-gigante roja, denominaremos al sistema *nova simbiótica*. La superficie de la enana blanca se calentará, y se liberará gran cantidad de material, incrementando el brillo del sistema varios órdenes de magnitud. Estas explosiones pueden durar desde varias semanas a varios meses.

Durante estos eventos conocidos como novas, el sistema binario no se destruye, con lo cual, la transferencia de materia puede volver a restablecerse y el ciclo comenzará de nuevo. Sin embargo, muchas novas solo han sido detectadas una única vez. Se cree que muchos sistemas volverán a mostrar otro evento tras (decenas/cientos de) miles de años. Sin embargo, en la Vía Láctea conocemos al menos diez binarias que han mostrado explosiones varias veces en un mismo siglo: las llamadas *novas recurrentes*. Para que una nova simbiótica se convierta en recurrente, se cree que la masa de la enana blanca debe ser mayor de $1.1M_{\odot}$.

RAYOS GAMMA PROCEDENTES DE NOVAS

Las novas han sido ampliamente estudiadas en visible, radio y rayos X desde hace décadas. En el año 2010, el satélite *Fermi*, con su instrumento Large Area Telescope (LAT), descubrió que las novas son fuentes de rayos gamma de alta energía (por encima de 100 MeV). El primer sistema descubierto por *Fermi*-LAT fue la nova simbiótica V407 Cygni (Abdo et al. 2010). Más tarde, *Fermi*-LAT también detectaría emisión de altas energías proveniente de novas clásicas (Ackerman et al. 2014), donde la compañera es una estrella de baja masa en lugar de una gigante roja. La emisión gamma observada por *Fermi*-LAT, debida a la interacción de partículas relativistas con el material eyectado, podría tener dos orígenes: leptónico, provocado por procesos Compton inverso y radiación de frenado; o hadrónico, vía interacción protón-protón.

LA PRIMERA NOVA DE MUY ALTAS ENERGÍAS



Figura 1. Telescopios MAGIC, ubicados en el Observatorio del Roque de los Muchachos. © Giovanni Ceribella

El desarrollo de la técnica Cherenkov por imagen a finales del siglo XX y la construcción de una nueva generación de telescopios tipo Cherenkov a principios del siglo XXI, ha abierto una nueva ventana de observación del Universo: el rango de los rayos gamma de muy alta energía, con la detección de fotones de más de 100 GeV. Con esta tecnología se observan rayos gamma de muy alta energía de manera indirecta, a través de la detección de la luz Cherenkov emitida por los productos de la interacción con la atmósfera. Esto ha permitido descubrir más de 240 fuentes de muy altas energías: núcleos activos de galaxias, remanentes de supernova, sistemas binarios, estallidos de rayos gamma, pleriones... Todas ellas tienen en común ambientes extremos, donde se juntan procesos de acreción/eyección de materia y/o fuertes campos magnéticos, entre otros.

La pregunta evidente que se hizo la comunidad Cherenkov tras el descubrimiento de *Fermi-LAT* fue si las novas pueden emitir radiación de mayor energía. ¿Podría la actual generación de telescopios Cherenkov detectarlas? Claramente, en ellas existen poblaciones de partículas relativistas que producen rayos gamma a través de procesos no térmicos, con lo cual estas fuentes son buenas candidatas para emitir rayos gamma de muy alta energía.

Desde hace más de una década MAGIC (Figura 1), dos telescopios de tipo Cherenkov ubicados en el observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma), ha estado buscando emisión de muy altas energías procedente de novas (Ahnen et al. 2015). Sin embargo, la mayoría de las novas detectadas por *Fermi-LAT* muestran un corte espectral de energía en torno a

6-10 GeV, con lo cual su detección a mayores frecuencias se muestra bastante complicada. No obstante, podría ser que algún sistema exhibiera un espectro diferente o incluso podría existir una segunda componente espectral por encima de estas energías, pero la búsqueda, hasta ahora, no había dado resultados.

NOVAS: UN NUEVO TIPO DE FUENTE DE RAYOS GAMMA DE MUY ALTA ENERGÍA

RS Ophiuchi (RS Oph) es una nova simbiótica recurrente, formada por una estrella gigante roja y una enana blanca. En este caso, se cree que la enana blanca tiene una masa de entre $1.2M_{\odot}$ y $1.4M_{\odot}$, con lo que se encontraría cerca del límite de Chandrasekhar. Una vez sobrepasado este valor, el sistema colapsaría dando lugar a una supernova tipo IA.

Esta nova muestra explosiones termonucleares cada 15 años, aproximadamente. Desde su primera detección en 1898, se han observado nueve erupciones provenientes de este sistema. La última, y más relevante para nosotros, hace apenas unos meses. El 8 de agosto de 2021, a las 22:20 UT, se detecta una nueva explosión termonuclear de RS Oph, reportada en visible con una magnitud estimada 5.0 (Geary, 2021). Unas horas más tarde, a las 05:05 UT del 9 de agosto, *Fermi-LAT* descubre emisión de alta energía proveniente de esta nova (Cheung et al. 2021). Los telescopios MAGIC, dentro de su programa *Galactic Target of Opportunity*, realizan observaciones ese mismo día comenzando a las 22:27 UT. En paralelo, la colaboración H.E.S.S. también observa la fuente y anuncia al día siguiente la detección a muy altas energías (Wagner et al. 2021). [Las observaciones de MAGIC revelan la existencia de una componente de muy altas energías \(Acciari et al. 2022\)](#), contemporánea al máximo medido en visible y en altas energías. La nova se detecta con alta significancia (13.2σ) durante los primeros cuatro días, reduciendo su intensidad por debajo del umbral de detección dos semanas más tarde.

MAGIC fue capaz de medir señal proveniente de RS Oph desde el 9 al 12 de agosto de 2021, ambos inclusive, en el rango desde 60 GeV a 250 GeV. La emisión se describe como una ley de potencias (con índice espectral ~ 4.07). Analizando el espectro medido por *Fermi-LAT* contemporáneamente, observamos que la emisión conjunta *Fermi-LAT*+MAGIC puede describirse como una única componente que se expande desde 50 MeV hasta 250 GeV. Además, MAGIC es capaz de obtener

diariamente la distribución espectral de energías, lo que permite estudiar la evolución de la explosión.

El flujo medido por MAGIC parece mantenerse constante en los primeros cuatro días del evento, mientras que la componente de más bajas energías detectada por *Fermi-LAT* muestra una escala de tiempo de reducción a la mitad de flujo cada 2.2 días. Esto sugiere una migración de la emisión gamma hacia mayores energías, coincidiendo con el incremento de las energías máximas de las poblaciones de partículas.

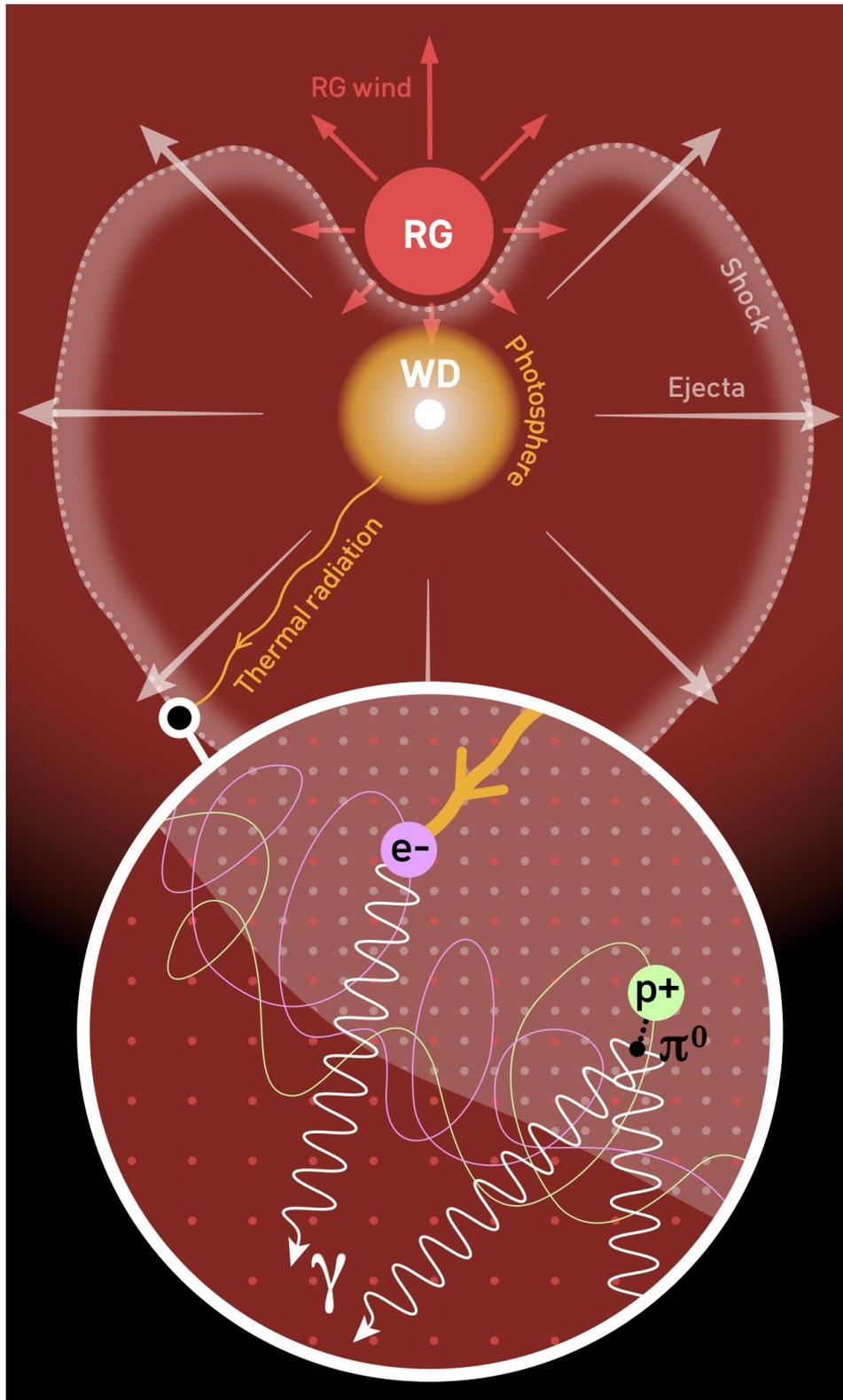
RS Oph es la nova de rayos gamma más energética y con mayor flujo medida hasta hoy, en comparación con el resto de sistemas detectados por *Fermi-LAT*. La detección a muy altas energías parece deberse simplemente a una mayor cantidad de flujo más que al hecho de tener una forma espectral más favorable frente a otros sistemas. La ausencia de detecciones previas de otras novas puede deberse a la falta de sensibilidad por parte de los detectores a dichas erupciones más débiles, sin necesidad de atribuir a RS Oph ninguna característica espectral especial.

ACELERADORES CÓSMICOS DE PROTONES

¿Cuáles son las partículas responsables de la radiación gamma medida en RS Oph? Sabemos que las condiciones en estos sistemas favorecen la aceleración de partículas, tanto electrones como protones. El material en expansión eyectado por la nova interactuará con el medio interestelar, que además se encuentra inmerso en el viento estelar proveniente de la gigante roja. Esto provocará una onda de choque. Además, la quema nuclear en la superficie de la enana blanca crea un viento rápido, que alcanzará la ya nombrada eyección y producirá, adicionalmente, un choque interno. Es en estos choques donde se producen los electrones y protones que, potencialmente, pueden producir la radiación gamma.

Como comentamos con anterioridad, la contrapartida gamma se puede producir por mecanismos leptónicos o hadrónicos (Figura 2). En el caso leptónico, la emisión de rayos gamma puede provenir de la radiación térmica de la fotosfera dispersada a mayores energías por electrones relativistas a través de proceso Compton inverso. La materia ambiente, es decir, el material eyectado y el viento estelar de la gigante roja, pueden actuar como blanco tanto en el caso de radiación de frenado por electrones o en interacciones hadrónicas de protones.

Figura 2. Esquema de la nova simbiótica recurrente RS Ophiuchi. La materia procedente de la gigante roja (RG) y capturada por la enana blanca (WD) genera una explosión termonuclear en la superficie de esta última. El material eyectado crea una onda de choque donde se aceleran partículas que producen la radiación gamma. © G. Pérez/IAC, 2022, Acciari, V. A. et al.



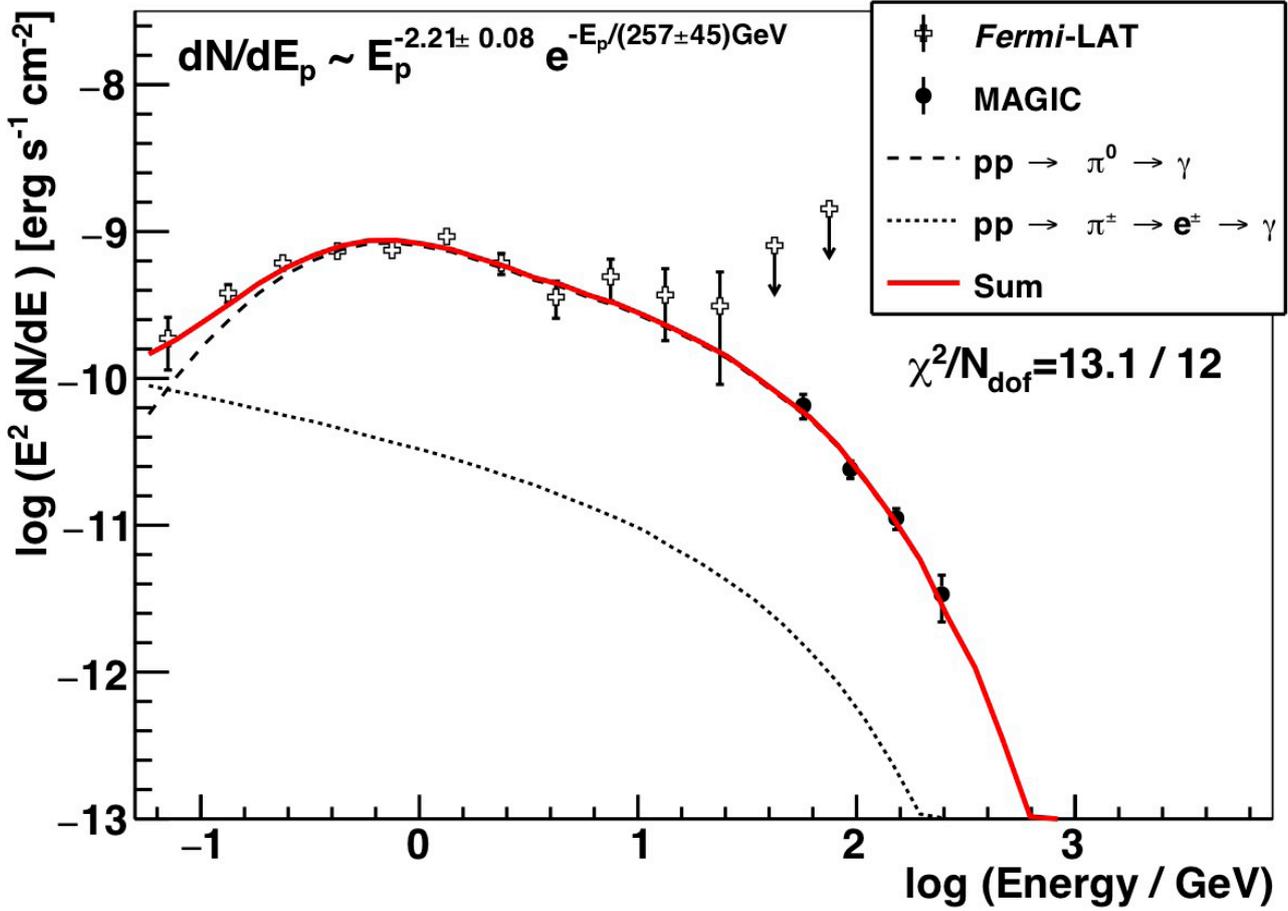


Figura 3. Las observaciones de MAGIC (puntos) y Fermi-LAT (cruces) se ajustan a un modelo hádrónico (línea roja). © 2022, Acciari, V. A. et al.

Para realizar el modelado de la emisión gamma, utilizamos los parámetros fotosféricos y la velocidad de expansión del shock que medimos simultáneamente en visible, e inyectamos poblaciones de electrones o protones.

Estudiando el espectro de RS Oph, tanto el medido diariamente como el promedio, obtenemos que el escenario que mejor describe la emisión gamma es el hadrónico (Figura 3). La radiación gamma medida conjuntamente por *Fermi-LAT* y MAGIC se describe como una ley de potencias ($\Gamma = -2$) con un corte exponencial, que se corresponde con la energía máxima alcanzada por las partículas en su aceleración. Una población de protones se ajusta más naturalmente a este tipo de espectro. Además, el modelado diario muestra evidencias de que el cor-

te en energía de los protones incrementa gradualmente con el tiempo, tal y como se espera dado la ausencia de características espectrales debidas a procesos de enfriamiento. Por otro lado, la curvatura medida en el espectro conjunto es más difícil de explicar en el caso leptónico, que requeriría una inyección de partículas con un corte bastante fuerte y que debería estar incluido en el espectro de inyección, con lo cual dicho corte espectral no podría explicarse por procesos de enfriamiento.

Por tanto, podemos concluir que el escenario hadrónico es el que mejor describe los datos y el que da un mejor ajuste de los mismos. De estas observaciones podemos estimar que la energía empleada por los protones es en torno al 20% de la energía total del material eyectado por la nova.

CONTRIBUYENDO A LA POBLACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS

A pesar de que la mayoría de los protones contribuyen a la producción de rayos gamma en novae, algunos pueden escapar eventualmente del frente de choque. Estos protones tráfugas pasarían a formar parte de los llamados *rayos cósmicos*, partículas con carga que permean la Vía Láctea.

Las medidas obtenidas del espectro hadrónico utilizado para explicar la emisión de RS Oph, nos permite hacer estimaciones sobre las aportaciones de las novae a los rayos cósmicos de origen galáctico. Evidentemente, la contribución por parte de novae es menor que en el caso de supernovas, que son eventos mucho más violentos. Teniendo en cuenta la energía ($\sim 4.4 \times 10^{43}$ erg) y el número de novae por año (en torno a 50), obtenemos del orden de 0.1% de la contribución energética proveniente de supernovas (que son eventos más energéticos aunque menos frecuentes).

Sin embargo, a pesar de realizar una pequeña aportación a la totalidad de rayos cósmicos, las novae sí que incrementan significativamente la densidad de rayos cósmicos en su entorno cercano, creando burbujas que, en el caso de novae recurrentes, pueden llegar a alcanzar ~ 9 pc de tamaño.

DE CARA AL FUTURO

La detección por parte de MAGIC de rayos gamma en el rango 60-250 GeV provenientes de RS Oph ha permitido identificar las novae como un nuevo tipo de fuente emisora de rayos gamma de alta energía. Con estas observaciones hemos podido adentrarnos en el estudio de las poblaciones de partículas aceleradas en estos sistemas. Esto nos ha llevado a concluir que los protones son los responsables de la emisión gamma detectada por *Fermi-LAT* y *MAGIC*, cubriendo el rango de energía desde 50 MeV a 250 GeV. La forma de la distribución energética de las partículas inyectadas, el incremento temporal de las energías máximas y el ajuste del espectro apoyan esta conclusión. Además, hemos visto que los protones que logran escapar del sistema contribuyen a los rayos cósmicos de manera local, creando burbujas que se extienden varios parsecs.

Sin embargo, aún nos quedan muchos enigmas por resolver. No sabemos si el hecho de que RS Oph haya sido detectada a muy altas energías está conectado con su naturaleza como nova simbiótica recurrente o si

simplemente es la primera de una serie de nuevas detecciones. Mientras que sabemos que las novae clásicas son emisoras de rayos gamma de alta energía, aún nos queda averiguar si también pueden ser detectadas a muy altas energías. Mientras tanto, seguiremos trabajando para cazar nuevos estallidos estelares y responder a estas preguntas (aún) sin respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdo, A. A. et al. (Fermi-LAT Collaboration) "Gamma-ray emission concurrent with the nova in the symbiotic binary V407 Cygni". *Science* 329, 817–821 (2010).
- Acciari V.A. et al. (MAGIC Collaboration), "Proton acceleration in thermonuclear nova explosions revealed by gamma rays", *Nature Astronomy* (2022), <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01640-z>.
- Ackermann, M. et al. (Fermi-LAT Collaboration) "Fermi establishes classical novae as a distinct class of gamma-ray sources". *Science* 345, 554–558 (2014).
- Ahnen, M. L. et al. (MAGIC Collaboration) "Very high-energy γ -ray observations of novae and dwarf novae with the MAGIC telescopes". *A&A*. 582, A67 (2015).
- Cheung, C. C., Ciprini, S. & Johnson, T. J. (Fermi-LAT Collaboration) "Fermi-LAT gamma-ray detection of the recurrent nova RS Oph". *ATel* 14834 (2021).
- Geary, K. "Outburst of RS Ophiuchi". *VSNET-alert* 26131 (2021).
- Wagner, S. J. & HESS Collaboration "Detection of VHE gamma-ray emission from the recurrent nova RS Ophiuchi with HESS". *ATel* 14844 (2021).