

# OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO

Los magnetares son estrellas de neutrones aisladas y fuertemente magnetizadas (hasta  $B \sim 10^{15}$  G), con luminosidades  $L_x \sim 10^{31} - 10^{36}$  erg  $s^{-1}$  y periodos de rotación en el rango de 0,3–12 s. Fulguraciones muy energéticas de magnetares galácticos (alcanzando picos de luminosidad de  $10^{44} - 10^{47}$  erg  $s^{-1}$  y durando  $\sim 0,1$  s) habían sido detectadas hasta la fecha en rayos-X y rayos-gamma suaves. Ahora, por vez primera, hemos observado los momentos iniciales de una fulguración muy energética ( $\sim 10^{46}$  erg  $s^{-1}$ ) durante los 0,2 s en los cuales rayos-gamma fueron detectados. En esa fase hemos registrado oscilaciones de muy altas frecuencias que revelan nuevas propiedades de estos eventos tan violentos.

Alberto J. Castro-Tirado

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC  
@AJCastroTirado

M<sup>a</sup>. Carmen Sánchez-Gil

Dpt. de Estad. e Invest. Operativa, U. de Cádiz

Javier Pascual-Granado

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC

Michael Gabler

Dpt. Astron. y Astrofísica, U. de Valencia

Víctor Reglero Velasco

IPL / Dpt. Astron. y Astrofísica, U. de Valencia

Entre las estrellas de neutrones, objetos que pueden contener medio millón de veces la masa de la Tierra en un diámetro de unos veinte kilómetros, destaca un pequeño grupo con el campo magnético más intenso conocido: los magnetares.

A diferencia de las estrellas de neutrones ordinarias, los magnetares tienen campos magnéticos  $10^3$  veces más potentes, alcanzando  $10^{10}$  to  $10^{11}$  Tesla (o  $10^{14-15}$  Gauss). Para entender esta magnitud, la intensidad del campo magnético terrestre oscila entre 25.000 – 65.000 nT (0,25 – 0,65 G), siendo el valor promedio del campo magnético del Sol de 1 G, mientras que en el imán de los frigoríficos de nuestros domicilios se eleva a 100 G.

Volviendo a los magnetares, sólo apenas conocemos treinta de ellos en nuestra Vía Láctea. Sufren violentas erupciones aún poco conocidas debido a su carácter inesperado y a su corta duración, generalmente de apenas décimas de segundo.

Y sólo en unos pocos de ellos, se han detectado fulguraciones gigantes en las cuales se han podido observar oscilaciones cuasi-periódicas (QPOs) con frecuencias tanto bajas ( $< 150$  Hz) como altas ( $> 500$  Hz). Pero esas QPOs nunca habían sido detectadas antes en la fase impulsiva inicial (la que comprende desde el inicio hasta alcanzar el máximo de emisión).

## EL INSTRUMENTO ASIM A BORDO DE LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

El pasado 15 de abril de 2020 a las 08:48:05 UT (en pleno confinamiento por la pandemia) llegó hasta la Tierra una nueva fulguración gigante, inicialmente denominada GRB 200415, al asemejarse observacionalmente a un GRB (*Gamma-ray Burst*), y que se registró con el instrumento ASIM (*Atmosphere-Space Interaction Monitor*) a bordo de la *Estación Espacial Internacional* (ISS, Figura 1).

Con el módulo MXGS de ASIM, se obtuvieron datos durante 2 s centrados alrededor del inicio de la ráfaga [ $\pm 1$  s]. MXGS está conformado por dos detectores independientes, que cubren rangos de energías complementarios: LED (el de baja energía, 50-400 keV) y HED (el de alta energía, 300 keV- 40 MeV). Ninguno de los dos llegó a saturarse. De hecho, ASIM fue el único de un total de siete instrumentos embarcados en otros tantos satélites, capaz de registrar la fase principal de la erupción en su rango completo de energía sin verse afectado por los efectos de la saturación. En virtud de ello se pudo registrar por primera vez en



Figura 1. ASIM (apuntando a la atmósfera terrestre) en el centro de la imagen, adosado al módulo COLUMBUS de la Agencia Espacial Europea (ESA) de la *Estación Espacial Internacional*. Cortesía ESA.

este rango la estructura temporal fina de la fase de explosión principal (0,8-3,2 ms) de un magnetar.

ASIM fue diseñado para observar destellos de rayos gamma terrestres de muy corta y alta intensidad, los llamados TGF (*Terrestrial Gamma-ray Flashes*), producidos por tormentas eléctricas en la alta atmósfera terrestre. Estos son destellos de unos pocos cientos de fotones en un intervalo de entre 50 a 100  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto, ASIM necesitaba tener un área de detección grande [1.000  $\text{cm}^2$ ] y una electrónica de lectura rápida [ $\mu\text{s}$ ]. En comparación con los TGF, la fulguración gigante del evento aquí reportado es un fenómeno lento, y es por eso que el instrumento no se saturó durante la fase más intensa del estallido de la llamarada gigante.

Así pues, el equipo de más de 40 científicos y tecnólogos entre los que nos encontramos los 5 firmantes de este artículo, pudo resolver la estructura temporal del evento, una tarea verdaderamente compleja que implicó más de un año de análisis para tan sólo un segundo de datos. Gracias a la gran área colectora de ASIM, su altísima resolución temporal (hasta 1  $\mu\text{s}$ ) y el amplio rango de energías abarcado (50 keV a 40

MeV), pudimos realizar en detalle tanto un análisis temporal como espectral de las fases principales observadas en dicha fulguración.

Así, por primera vez, pudimos resolver la compleja estructura temporal anterior al máximo de emisión, y constatar que en este caso, la conformaban seis picos de intensidad bien diferenciados durante los primeros 3,2 ms (Figura 2) durante la fase de rápido crecimiento de la emisión, siendo este magnetar el primero en el que se ha visto la estructura fina antes del máximo.

#### ¿A QUÉ DISTANCIA SE PRODUJO LA FULGURACIÓN?

Aunque ASIM no pudo localizar con precisión la posición en el firmamento del evento ya que estaba fuera de su campo codificado [ $\pm 70^\circ$ ], la detección por instrumentos en 7 satélites (algunos de ellos tan distantes de la Tierra como HEND a bordo de *Mars Odyssey* o KONUS embarcado en *Wind*) permitió ubicarlo en la bóveda celeste al trazar dos anillos en la misma y considerar la diferencia de tiempos de llegada de los frentes de onda entre HEND y KONUS por un lado y entre KONUS y GBM en *Fermi* por otro,

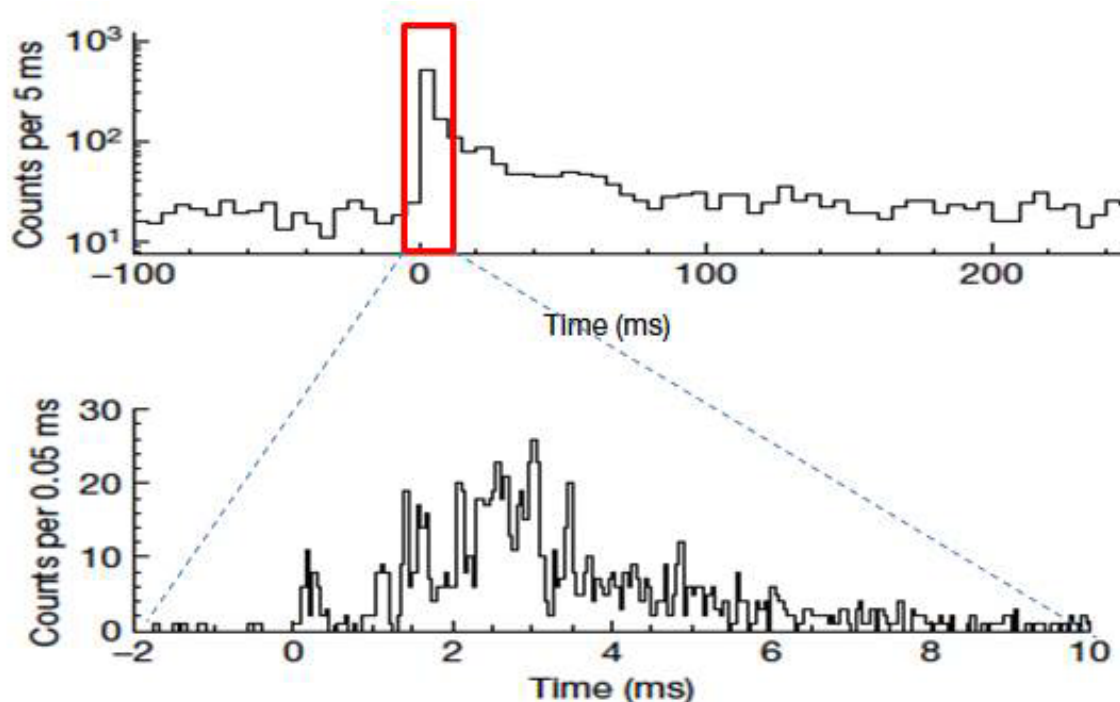


Figura 2. La curva de luz obtenida por ASIM en dos escalas temporales diferentes, mostrando debajo la altísima resolución temporal y la compleja estructura en la fase de rápida subida al máximo de la emisión. Cortesía: Universidad de València.

estando este último a 550 km de la Tierra, de manera que, se pudo localizar de una manera muy precisa y así determinar sin lugar a duda que la fulguración se originó en la galaxia NGC 253 de la constelación del Escultor, a 12,9 millones de años luz (Figura 3).

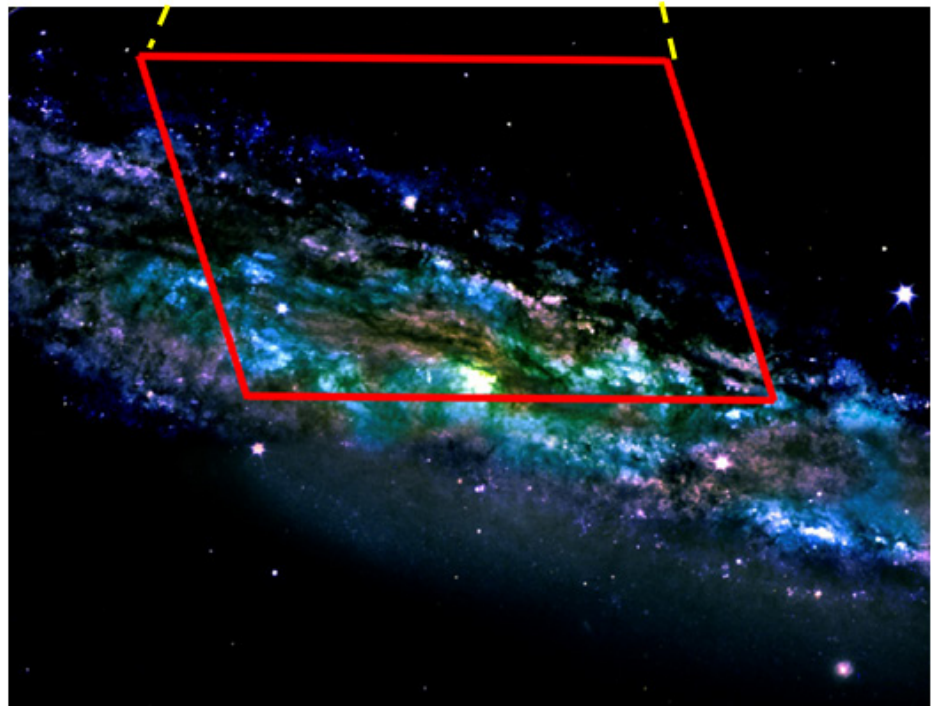
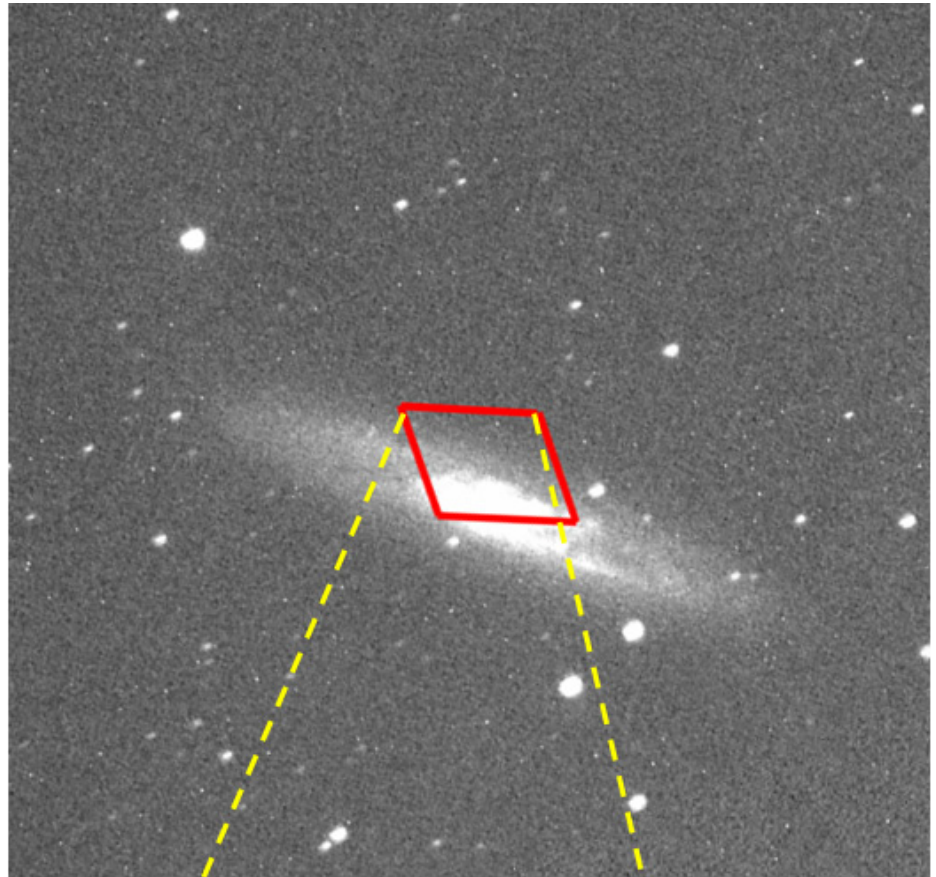
Durante los  $\sim 160$  ms en los cuales se siguió detectando emisión de alta energía, ya sabiendo la distancia, podemos determinar la liberación de una energía que aconteció en ese brevísimo intervalo de tiempo:  $\sim 10^{46}$  erg, y que correspondería aproximadamente con la energía que el Sol irradia en  $\sim 100.000$  años.

**POR PRIMERA VEZ EN MAGNETARES, QPOs DE MUY ALTA FRECUENCIA ANTES DEL MÁXIMO**

Con idea de analizar concienzudamente los datos, y con la esperanza de “cazar” las QPOs en la señal, creamos curvas de luz individuales con una resolución temporal de 50  $\mu$ s cada una para los datos LED y HED, con cuatro ventanas de búsqueda diferentes;

0-5 ms, 0-10 ms, 0-50 ms y 0-100 ms. La densidad espectral de potencia (PSD) resultante alcanzaba una frecuencia de Nyquist de  $10^4$  Hz, que era lo suficientemente alta como para incluir las escalas de tiempo dinámicas más cortas para una estrella de neutrones típica. La PSD usando los datos LED reveló dos QPOs significativas centradas en sendas frecuencias:  $2.156 \pm 150$  Hz y  $4.256 \pm 323$  Hz (probablemente el primer armónico de la anterior), y que eran visibles exclusivamente durante los primeros milisegundos, que incluyen la fase más intensa de la fulguración (0,8-3,2 ms) y desapareciendo sólo 3,5 ms después del inicio. Esta detección de QPOs coincide también con el aumento de la emisión no térmica. La PSD construida usando los datos HED también muestra estas QPOs a  $2.185 \pm 52$  Hz y  $4.200 \pm 37$  Hz, consistentes con las frecuencias de los datos LED dentro de los errores. Además, el espectro de potencias en esta banda HED indica la presencia de una oscilación significativa adicional a  $\sim 1.487 \pm 33$  Hz.

Figura 3. La zona de error más precisa que se ha podido determinar en donde se ubicaría el magnetar (obtenida por la Red Interplanetaria de Satélites, IPN3) y proyectada sobre las imágenes ópticas de NGC 253, a 12,9 millones de años luz, obtenidas por el telescopio de gran campo de la estación BOOTES-1 en el INTA/CEDEA (arriba) y por el GTC en el ORM (debajo). Cortesía IAA-CSIC/UMA e INTA-CEDEA.





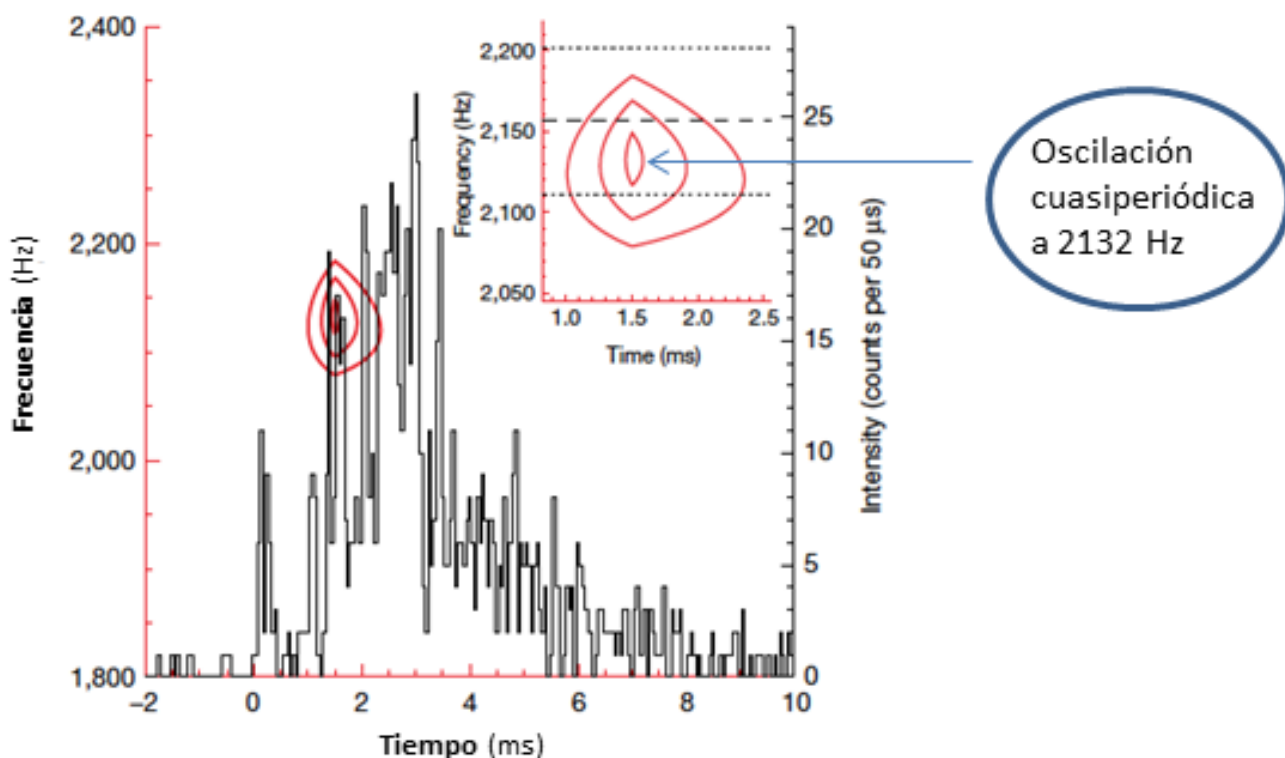


Figura 4. La detección de la oscilación cuasi periódica de muy alta frecuencia, observada por vez primera en la fase impulsiva de un magnetar gracias a ASIM. Cortesía Universidad de Cádiz e IAA-CSIC.

También hemos usado un método alternativo, empleando la estadística  $Z^2_m$  donde  $m$  es el número de armónicos sobre el que se van añadiendo las potencias de Fourier y seleccionando  $m = 1$ , de modo que los valores de  $Z^2$  corresponden al doble de los potencias del test de Rayleigh. Aplicamos esta técnica de manera dinámica, considerando un intervalo de búsqueda de 5 ms en pasos de 1 ms y en el intervalo de -6 ms a 50 ms. Y en el dominio de frecuencias, se usaron 1.000 pasos en un ancho de 600 Hz centrados en los valores de las QPOs reportadas anteriormente. De este modo, para los datos de LED, se obtuvo el valor  $Z^2$  más alto para una frecuencia  $f_1 = 2.132$  Hz en el intervalo temporal de 0 a 5 ms (Figura 4), valor consistente con el obtenido por la PSD y con una probabilidad por azar de encontrar esta señal de sólo  $2.4 \times 10^{-9}$ . Una búsqueda a frecuencias más altas reveló otro máximo a  $f_2 = 4.250$  Hz con una

probabilidad por azar de  $1.7 \times 10^{-4}$  en un intervalo de tiempo idéntico, lo que refuerza que esta segunda señal sea probablemente el armónico de la primera.

Finalmente, y con idea de confirmar de manera independiente estas detecciones, hemos usado los datos recogidos por el instrumento BAT, a bordo del satélite *Swift*, para confirmar la presencia de QPOs de alta frecuencia. La PSD resultante, también mostraba máximos en el rango 2.163-2.272 Hz y también en el rango 1.464-1.614 Hz, proporcionando pues una confirmación independiente de la QPO a 2.132 Hz descubierta por ASIM-LED.

Así ha quedado demostrada la detección por primera vez en magnetares, y gracias a ASIM, de oscilaciones cuasi periódicas de muy alta frecuencia durante el pico de emisión.

## ¿A QUÉ SE DEBE LA ALTA VARIACIÓN TEMPORAL Y LA EXISTENCIA DE QPOs?

Las variaciones en las escalas de tiempo  $t \leq 0,5$  ms correspondientes a las frecuencias observadas pueden ser causadas por inestabilidades del campo magnético en la magnetosfera cerca de la superficie de la estrella de neutrones ( $r \leq 100$  km). Independientemente de si consideramos un reajuste sísmico en la corteza del objeto compacto o posibles inestabilidades magnetosféricas como origen de las ondas de Alfvén (bien conocidas en el Sol) que se crean en la magnetosfera, una u otra causa es el desencadenante inicial de GRB 200415. El tiempo de cruce de Alfvén,  $t_A \sim \pi r/c \sim 1$  ms, de las ondas restringidas a esta región, determina la escala de tiempo de reconexión y es la escala de tiempo típica durante la cual se desarrollan inestabilidades. Mientras rebotan entre los puntos de anclaje de sus respectivas líneas de campo magnético, siendo parte de la energía reabsorbida por la corteza, estas ondas interactúan entre sí de forma no lineal a través de diferentes líneas de campo, disipando energía. Estos 'encuentros' producen emisiones con una variabilidad típica en una escala de tiempo de 1 ms o menos, lo que es consistente con la QPO a 2.132 Hz. La segunda QPO a 4.250 Hz bien sería el sobretono (dentro de los márgenes de error) o bien podría ser producida por la interacción de múltiples ondas de Alfvén que se propagan a lo largo de líneas de campo adyacentes. Después de varios cruces, la mayor parte de la energía de las ondas habrá sido absorbida por la corteza. Se espera que la reconexión termine después de unos ms, lo que naturalmente explicaría la repentina desaparición de las QPOs.

Por último, la escala de tiempo observada de  $t \sim 1/f = 0,469$  ms determina una escala de longitud en la que se libera la energía de la fulguración gigante emanada por el magnetar,  $l = c \times t \sim 140$  km. Suponiendo por simplicidad una línea de campo magnético esférico, su radio sería de  $\sim 20$  km. Por lo tanto, el volumen total de la fulguración ha sido comparable en tamaño o incluso algo mayor, que la propia estrella de neutrones.

## INFORMACIÓN DERIVADA DE LOS ESPECTROS DE ALTA ENERGÍA

Las propiedades de los espectros observados son consistentes con lo que se espera que suceda durante un evento de reconexión en la magnetosfera. Primero tenemos una bola de fuego ('fireball') de

partículas en expansión, con velocidades cercanas a la de la luz, y que se forma como consecuencia de la liberación de energía durante la reconexión, con energías típicas en el rango de 20 a 80 keV, en consonancia con los 40 a 60 keV observados del espectro térmico observado. Luego tenemos la interacción de los fotones y el plasma con el intenso campo magnético. El componente no térmico estaría asociado a dispersión ciclotrón resonante de un plasma no relativista en la propia magnetosfera, altamente magnetizada y que puede aumentar la energía de los fotones emitidos térmicamente en varios órdenes de magnitud. El fuerte campo magnético también nos permite comprender la energía máxima observada ( $E_{\max} \sim 1$  MeV), porque en procesos en campos magnéticos muy fuertes, como la creación de pares, la energía de los fotones se limita a aproximadamente a  $E = 2 m_e c^2$  (siendo  $m_e$  la masa del electrón). Este comportamiento espectral también tiene incidencia en nuestro entendimiento de las QPOs.

## 'ESTRELLAMOTOS' – UNA INTERPRETACIÓN ALTERNATIVA DE LAS QPOs

Una explicación alternativa de las QPOs observadas se basaría en que las QPOs de alta frecuencia en los magnetares se interpretan comúnmente como sobretonos radiales de las oscilaciones (magneto-) elásticas fundamentales con uno o más nodos en la corteza, que se excitarán preferentemente durante la fulguración. Dependiendo de cómo se desencadene exactamente la inestabilidad en la magnetosfera, puede haber fuertes perturbaciones en la corteza de la estrella de neutrones ('estrellamotos') que naturalmente deberían provocar oscilaciones. Siguiendo esta interpretación, la segunda QPO puede estar relacionada con un sobretono aún más alto. Sin embargo, la repentina desaparición de las QPOs después de  $\sim 3,5$  ms y la evolución espectral de la componente de energía favorecen ligeramente nuestro primer modelo, pero no excluyen la presencia de oscilaciones estelares.

## CONCLUSIONES

Así pues, en resumen, podemos decir que fruto de este esfuerzo ha sido el registrar por vez primera dos QPOs centradas en  $\sim 2.132$  Hz y  $\sim 4.250$  Hz durante el episodio principal de emisión de una fulguración de rayos-gamma en la dirección de la galaxia NGC 253 en la constelación del Escultor, oscilaciones que desaparecieron tras 3.5 ms. ASIM fue el único instrumento que registró la fase principal de

la fulguración (entre 0.8 y 3.2 ms) en todo el rango de energía (50 keV–40 MeV).

Conjuntamente con las variaciones espectrales observadas por ASIM, estas QPOs de muy alta frecuencia proporcionan información adicional para entender la física de estas gigantescas fulguraciones magnéticas.

Incluso en un estado inactivo, los magnetares pueden ser cien mil veces más luminosos que nuestro Sol, pero en el caso del destello que hemos estudiado, que se produjo el 15 de abril de 2020 y que duró solo en torno a una décima de segundo, la energía que se liberó es equivalente a la energía que irradia nuestro Sol en cien mil años. Las observaciones revelaron múltiples pulsos, con un primer pulso que apareció solo alrededor de decenas de microsegundos, mucho más veloz que otros fenómenos transitorios extremos.

Se cree que las erupciones en los magnetares pueden deberse a inestabilidades en su magnetosfera o a una especie de ‘estrellamotos’ producidos en su corteza, una capa de carácter rígido y elástico de alrededor de un kilómetro de espesor (Figura 5).

Independientemente del desencadenante, en la magnetosfera de la estrella se crean ondas de Alfvén, y que, mientras rebotan hacia adelante y hacia atrás entre los puntos de la base de sus líneas de campo magnético, interactúan entre sí disipando energía. Así, en unos pocos milisegundos termina el proceso de reconexión magnética y, por lo tanto, también los pulsos detectados en este evento, que desaparecieron a los 3.5 ms después del estallido principal. El análisis del fenómeno ha permitido estimar que el volumen de la llamarada fue similar o incluso mayor al de la propia estrella de neutrones.

Con las frecuencias de oscilación recientemente detectadas, obtenemos información muy valiosa de cómo se comportan los magnetares, lo que hará que nuestra comprensión de estos objetos exóticos avance significativamente. Por un lado, si las frecuencias estuvieran relacionadas con sismos estelares, mejoraría nuestro conocimiento de la estructura de las estrellas de neutrones. Por otro lado, si las oscilaciones estuvieran relacionadas con procesos de reconexión magnética en la magnetosfera, aprenderíamos cómo ocurren estas erupciones gigantes.

Figura 5. Concepción artística de lo que acontecería en el magnetar de NGC 253 en el momento de la gigantesca fulguración observada el 15 de abril de 2020.  
Crédito: BCSS/Mt. Visual.



La detección de oscilaciones cuasi-periódicas en este monstruo magnético ubicado en la galaxia NGC 253 ha supuesto todo un reto desde el punto de vista del análisis de señal. La dificultad radica en la brevedad de la señal, cuya amplitud decae rápidamente y queda embebida en el ruido de fondo. Y, al ser ruido correlado, resulta difícil distinguir la señal del ruido. Debemos, pues, este logro a las sofisticadas técnicas de análisis de datos que se han aplicado de manera independiente por los distintos miembros del equipo, pero también es sin lugar a dudas un logro tecnológico debido a la excelente calidad de los datos proporcionados por el instrumento ASIM a bordo de la *Estación Espacial Internacional*.

Este tipo de llamaradas se habían detectado en tres de los treinta magnetares conocidos en nuestra galaxia, la Vía Láctea, pero también en otros dos situados en otras galaxias. GRB 200415 sería la erupción en un magnetar más distante captada hasta la fecha, al hallarse en la galaxia NGC 253 sita en el grupo de galaxias Sculptor a unos 13 millones de años luz.

Terminamos añadiendo que esta erupción ha proporcionado un componente crucial para comprender cómo se producen las tensiones magnéticas dentro y

alrededor de una estrella de neutrones. El monitoreo continuo de galaxias cercanas y los magnetares de la Vía Láctea ayudará a comprender este fenómeno, y también allanará el camino para aprender más sobre las ráfagas de radio rápidas, a día de hoy uno de los fenómenos más enigmáticos de la astronomía.

### AGRADECIMIENTOS

A todos los coautores del artículo publicado en 2021. En el trabajo se hacen uso de los datos de ASIM, misión de la Agencia Espacial Europea, con fuerte participación española liderada por la Universidad de Valencia y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Coautores del mismo son también investigadores de la referida universidad, y de las universidades de Cádiz y Málaga, así como del Instituto de Astrofísica de Andalucía (de donde son 7 coautores incluyendo el principal). También se han usado datos de la red de telescopios robóticos BOOTES (liderada desde el IAA-CSIC) y del Gran Telescopio Canarias.

### REFERENCIA

A. J. Castro-Tirado *et al.* 2021, "Very high frequency oscillations in the main peak of a magnetar giant flare", *Nature*, 600, pp. 621-624.



De izquierda a derecha y de arriba a abajo, Alberto J. Castro-Tirado, M<sup>a</sup>. Carmen Sánchez-Gil, Javier Pascual-Granado, Michael Gabler y Víctor Reglero Velasco. autores de este artículo.