



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

CAPTAMOS DISTINTOS PULSOS EN
LA LLAMARADA MAGNÉTICA
GIGANTE DE UNA ESTRELLA DE
NEUTRONES

DRA. CARMEN SÁNCHEZ GIL

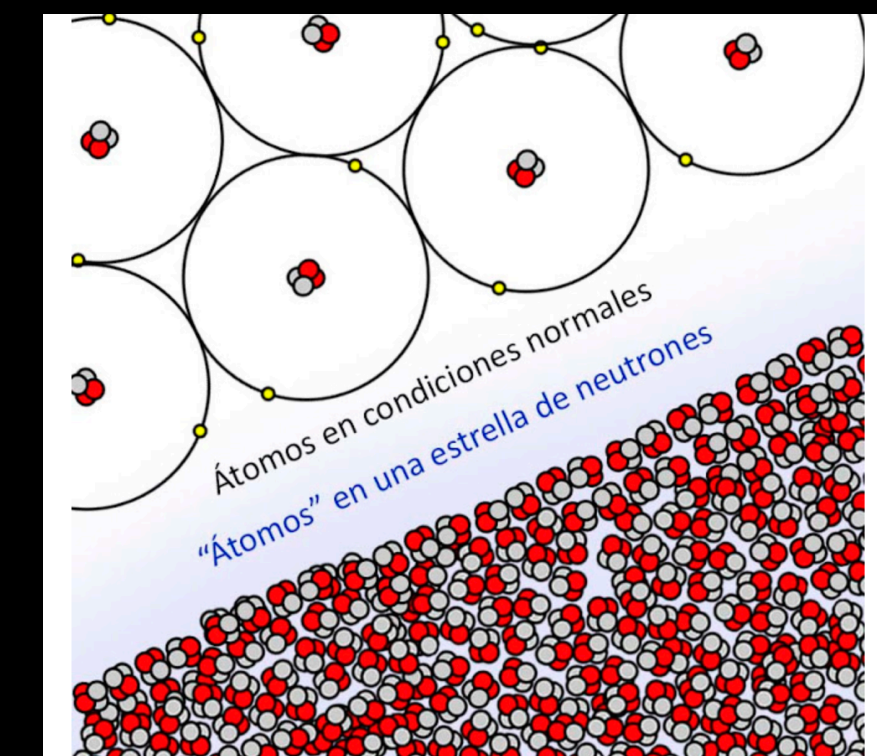
UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCIA (CSIC)



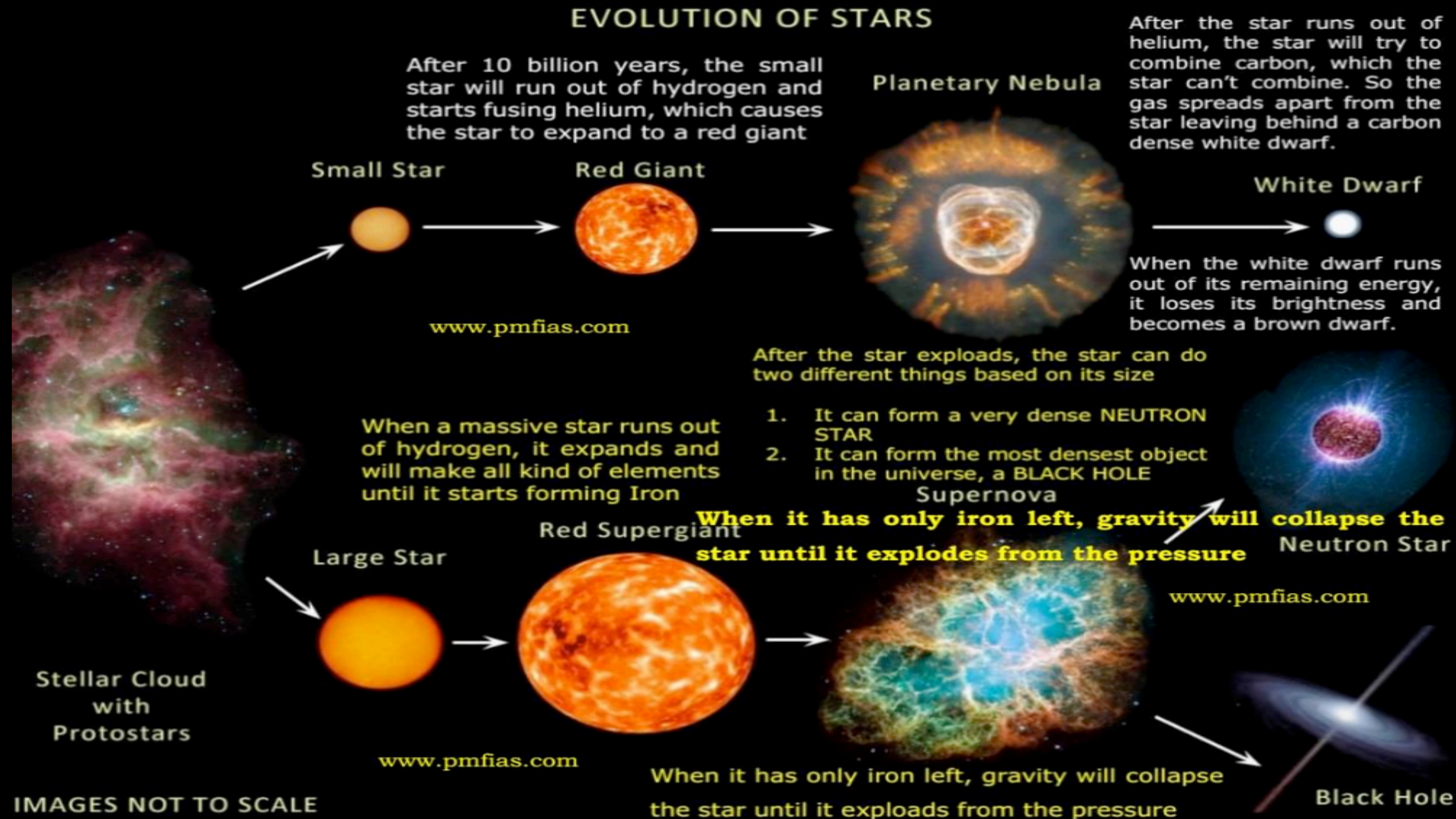
ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

<https://www.nationalgeographic.es/espacio/estrellas-de-neutrones>

- Lo que le da vida a una estrella es la fusión nuclear de hidrógeno para formar helio en su núcleo. Dependiendo de su masa, las estrellas se quedan sin combustible después de millones o miles de millones de años. En este punto, las estrellas masivas con 10 a 25 masas solares explotan como supernovas y pueden dejar sus núcleos colapsados como remanentes compactos. Las **condiciones extremas** cuando se trata, por ejemplo, de **presión y densidad**, hacen que los **protones y electrones se combinen en neutrones**, de ahí el nombre de **estrella de neutrones**.
- Al ser la **clase más pequeña** de objetos estelares pero con una masa de aproximadamente 1,4 masas solares, las estrellas de neutrones son **extremadamente densas**: una cuchara con masa de estrella de neutrones aquí en la Tierra pesaría tanto como el Monte Everest.



ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES



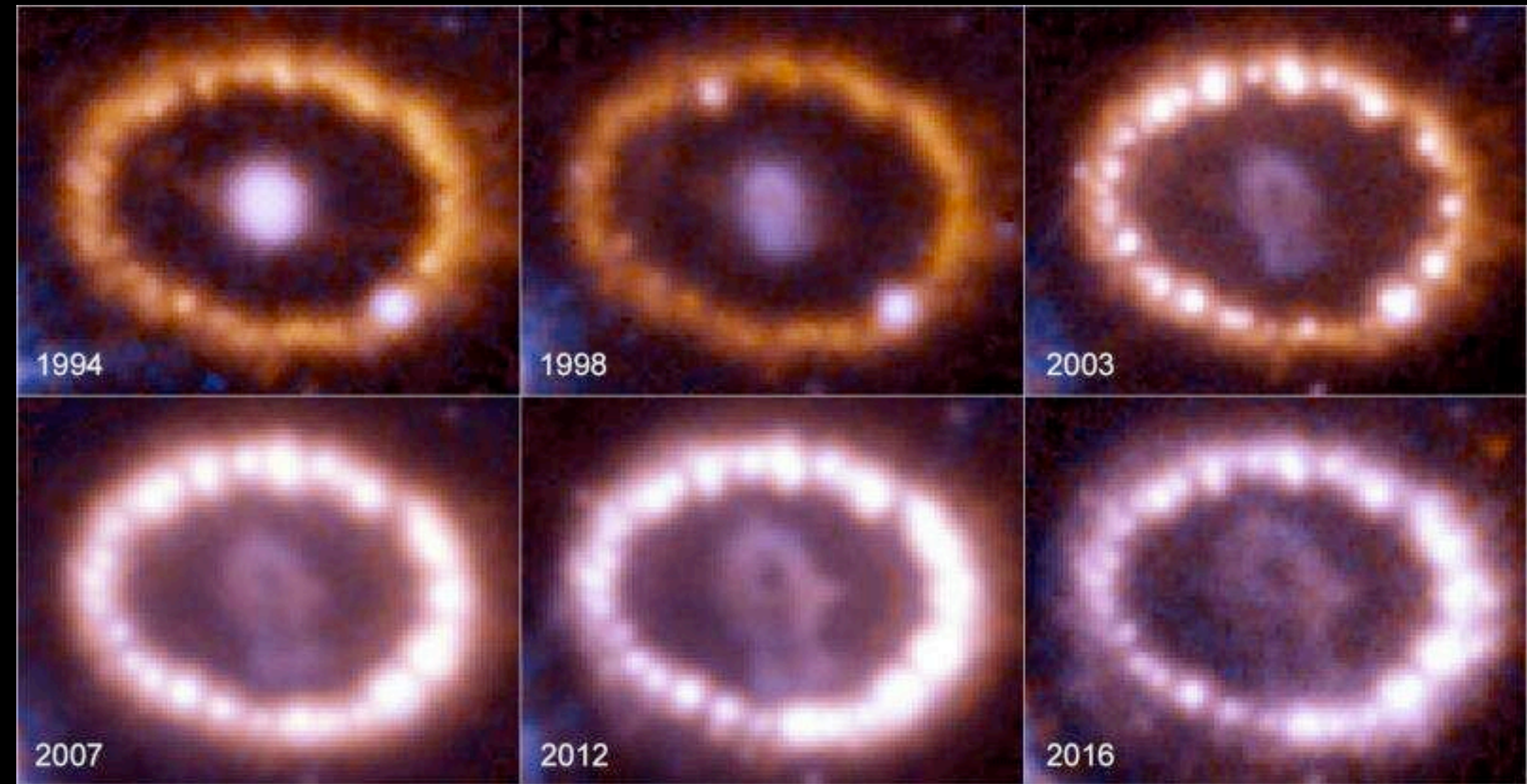
ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

- Estas estrellas también pueden **girar varios cientos de veces por segundo** (en comparación, nuestra Tierra tarda 24 horas en realizar dicha rotación) y poseen **campos magnéticos muy fuertes**. Si bien la intensidad del campo magnético de la Tierra varía de 0,25 a 0,65 Gauss, y la intensidad del campo magnético del Sol en promedio es de alrededor de 1 Gauss, es notable encontrar que el campo magnético en las estrellas de neutrones típicas varía **de diez millones a un billón de Gauss**.
- Concepto artístico de una estrella de neutrones, comparada con una imagen satelital de Manhattan a escala a través de la NASA



Comparación tamaño de la Tierra
con una estrella de neutrones

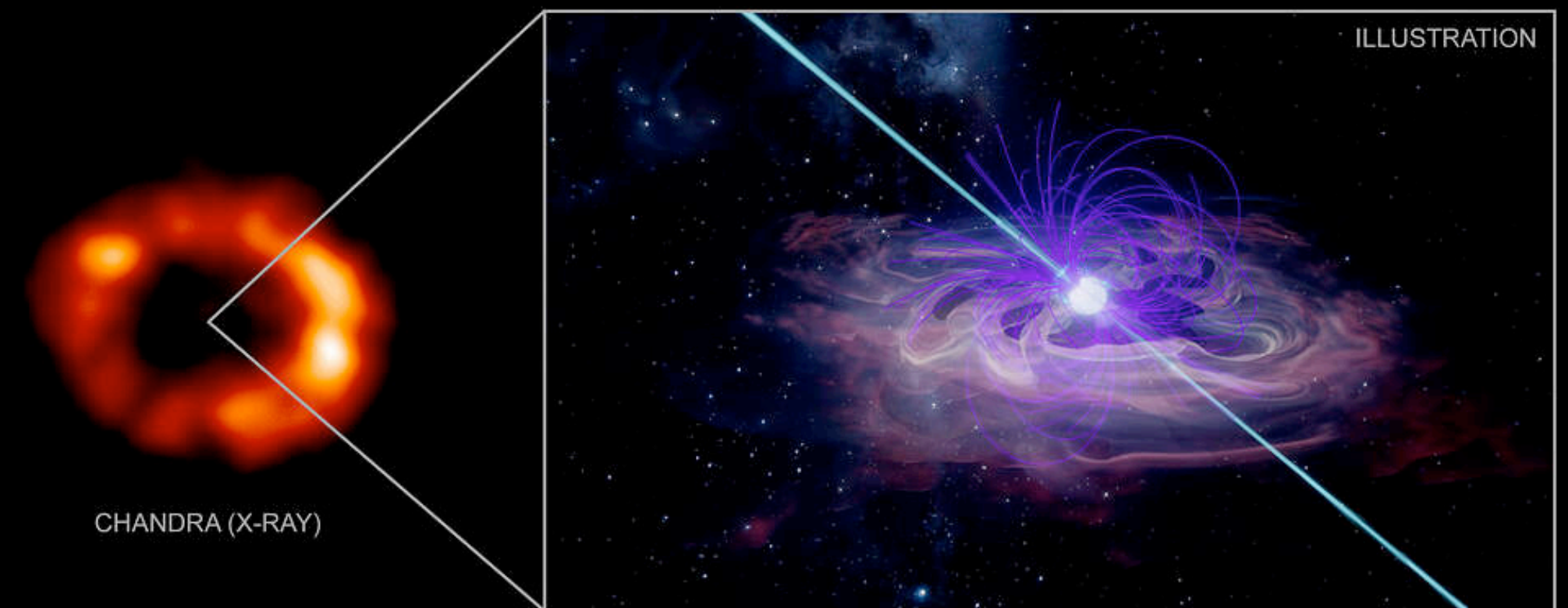
ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES



<https://www.xataka.com/espacio/estrella-neutrones-que-astronomos-han-estado-buscando-durante-34-anos>

Visión en rayos X de los alrededores de una estrella de neutrones oculta en la Pequeña Nube de Magallanes

<https://www.eso.org/public/spain/images/eso1810d/>



ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES



Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

DIFFERENT NEUTRON STAR TYPES

A neutron star is a dense core left behind after a massive star goes supernova and explodes. Though only about 10 to 20 miles (15 to 30 kilometers) wide, they can have three times the mass of our Sun, making them some of the densest objects in the universe, second only to black holes. A teaspoon of neutron star material would weigh 4 billion tons on Earth. There are several types of neutron stars.

MAGNETAR

A magnetar is a neutron star with a particularly strong magnetic field, about 1,000 times stronger than a normal neutron star. That's about a trillion times stronger than Earth's magnetic field and about 100 million times stronger than the most powerful magnets ever made by humans. Scientists have only discovered about 30 magnetars so far.



Magnetic Field Lines

PULSAR

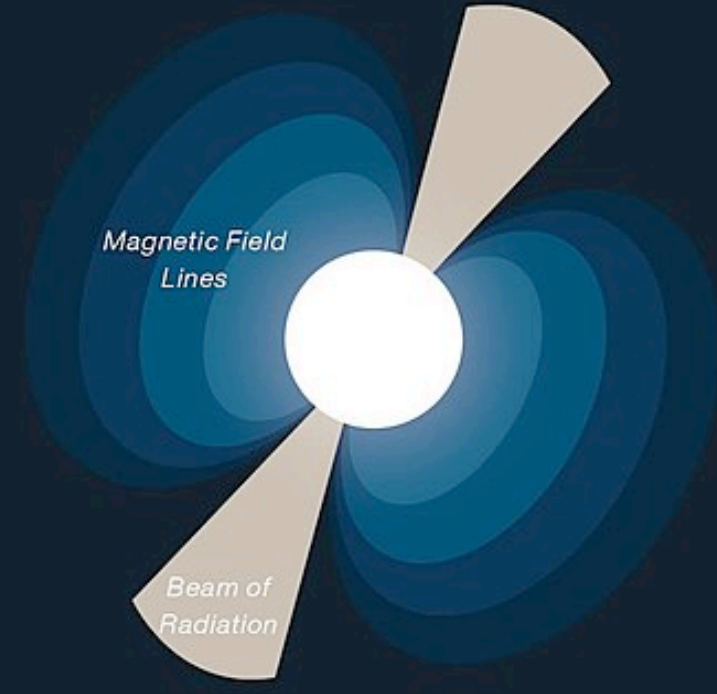
Most of the roughly 3,000 known neutron stars are pulsars, which emit twin beams of radiation from their magnetic poles. Those poles may not be precisely aligned with the neutron star's rotation axis, so as the neutron star spins, the beams sweep across the sky, like beams from a lighthouse. To observers on Earth, this can make it look as though the pulsar's light is pulsing on and off.



Beam of Radiation

MAGNETAR + PULSAR

There are now six known neutron stars that are both pulsars and magnetars.



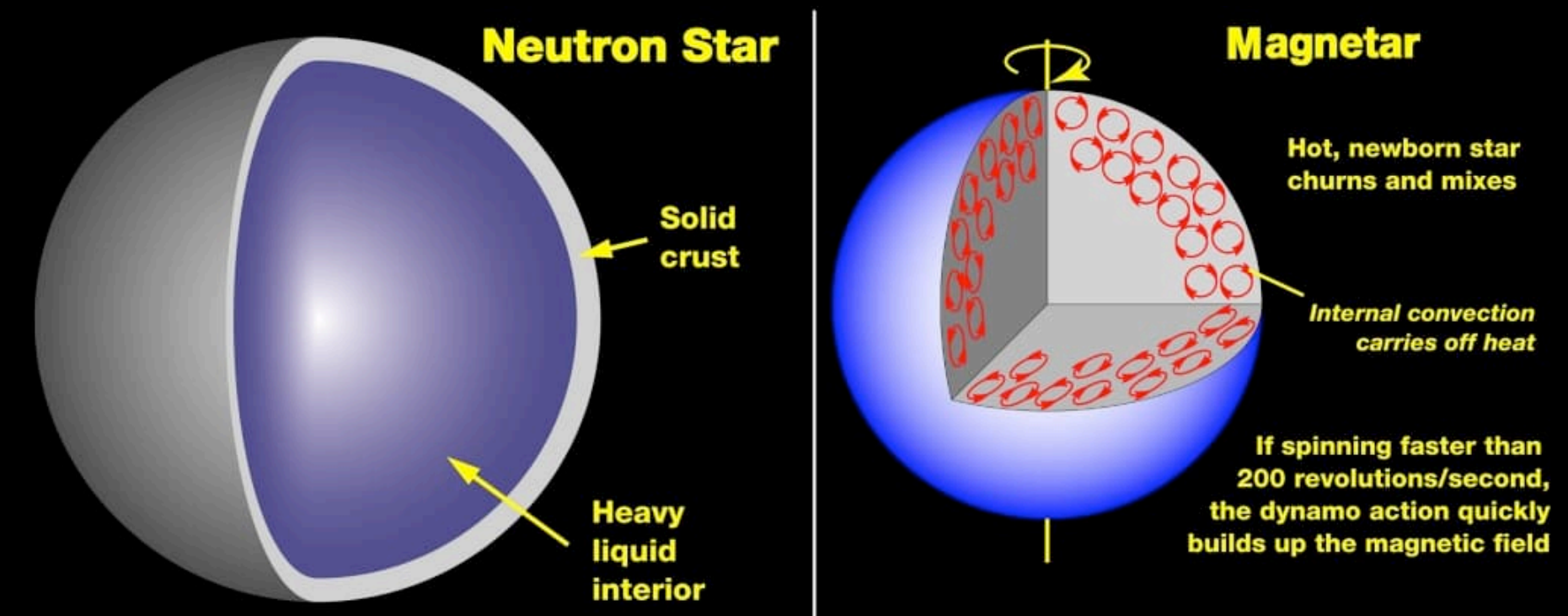
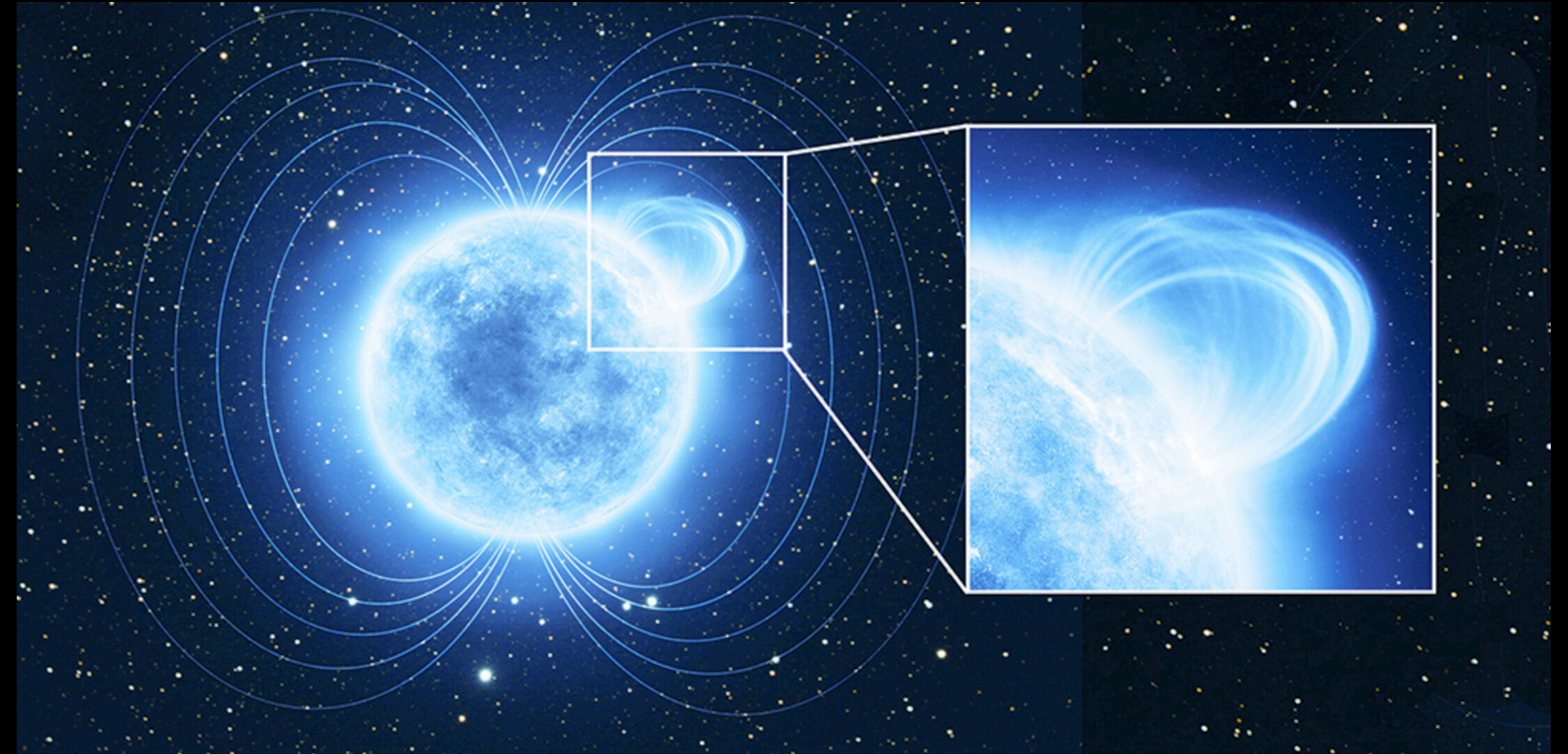
Magnetic Field Lines

Beam of Radiation

Facts accurate as of June 2020

ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

- Una **magnetar** es un tipo raro de estrella de neutrones que posee campos magnéticos extremadamente fuertes (hasta alrededor de un cuatrillón, es decir 10^{15} Gauss), dando lugar a ráfagas muy enérgicas y características de rayos X y rayos gamma.
- En nuestra galaxia, la Vía Láctea, hay pocos miles de estrellas de neutrones. De ellos, solo se sabe que 30 son magnetares. Las llamaradas gigantes de Magnetar son tan brillantes que, cuando provienen de nuestra galaxia, saturan todos los instrumentos, lo que dificulta su investigación completa.

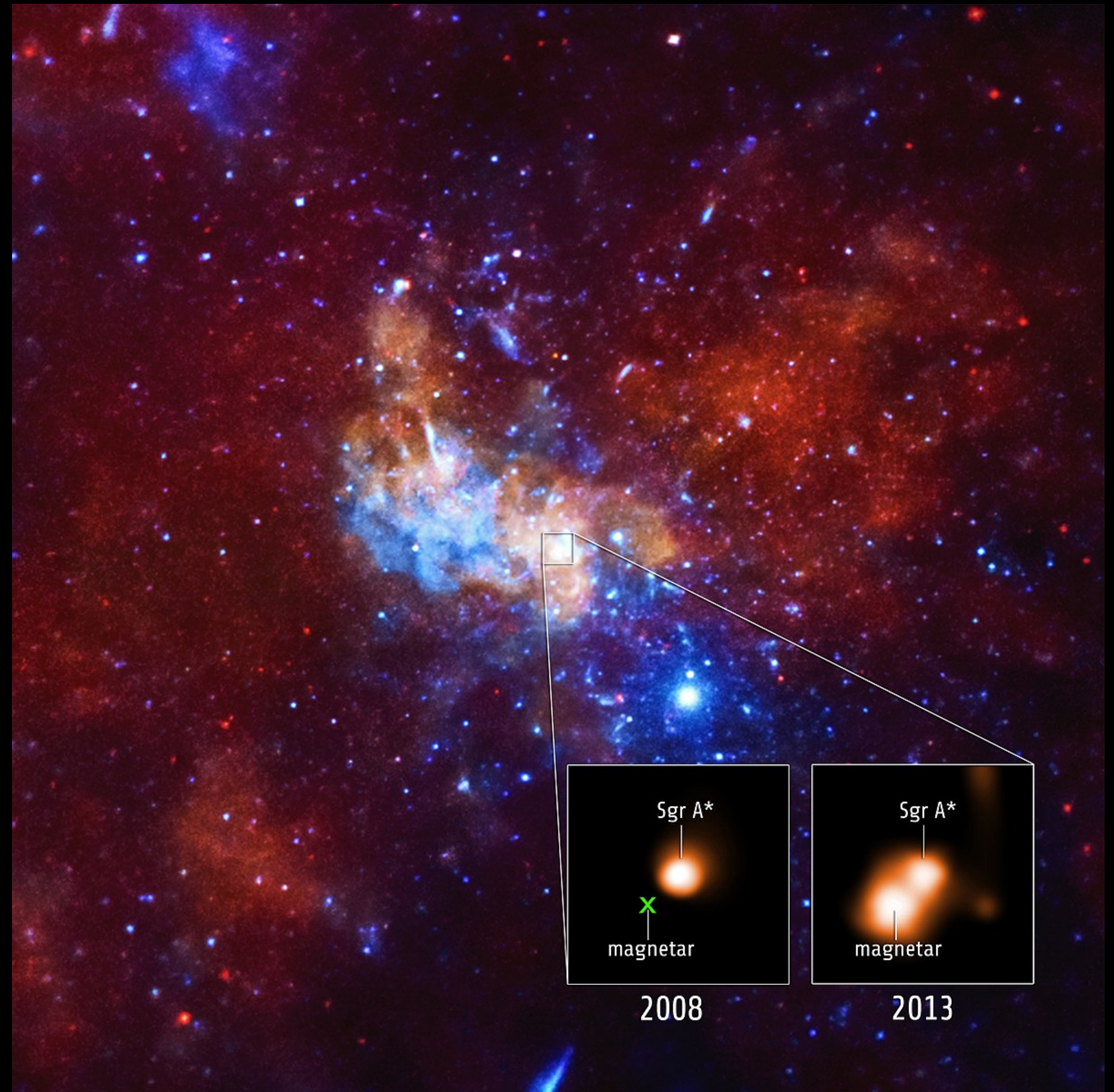


https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Un_misterioso_magnetar_presenta_uno_de_los_campos_magneticos_mas_fuertes_del_Universo

https://www.nasa.gov/missions/deepspace/f_magnetars.html

ACERCA DE LOS MAGNETARES Y LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

- En 2013, se descubrió un magnetar excepcionalmente cerca del agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea utilizando un conjunto de telescopios espaciales, incluido el Observatorio de rayos X Chandra de la NASA.
- Los magnetares son estrellas colapsadas densas ("estrellas de neutrones") que poseen campos magnéticos enormemente poderosos. A una distancia que podría ser tan pequeña como 0,3 años luz (o alrededor de $2,838 \times 10^{12}$ km) del agujero negro de 4 millones de masas solares en el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, este magnetar, denominado **SGR 1745-2900m** es la estrella de neutrones más cercana a un agujero negro supermasivo jamás descubierto, y está probablemente en su agarre gravitatorio.
- La imagen principal del gráfico muestra la región alrededor del agujero negro de la Vía Láctea en los rayos X de Chandra (rojo, verde y azul son los rayos X de energía baja, media y alta, respectivamente). El recuadro contiene la mirada de cerca de Chandra al área alrededor del agujero negro, que muestra una imagen combinada obtenida entre 2005 y 2008 (izquierda) cuando no se detectó la magnetar, durante un período de reposo, y una observación en 2013 (derecha) cuando fue captado como una fuente puntual brillante durante el estallido de rayos X que condujo a su descubrimiento



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

- Un grupo científico encabezado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y el Centro Birkelan para ciencias del espacio de la Universidad de Bergen (BCSS, Noruega), donde participa también una investigadora y profesora de la Universidad de Cádiz (UCA), publican en Diciembre 2022 en la revista Nature el estudio de una erupción en detalle: han logrado medir distintas oscilaciones, o pulsos, en su brillo durante los instantes de mayor energía, que constituyen un componente crucial para comprender las llamaradas gigantes de los magnetares.

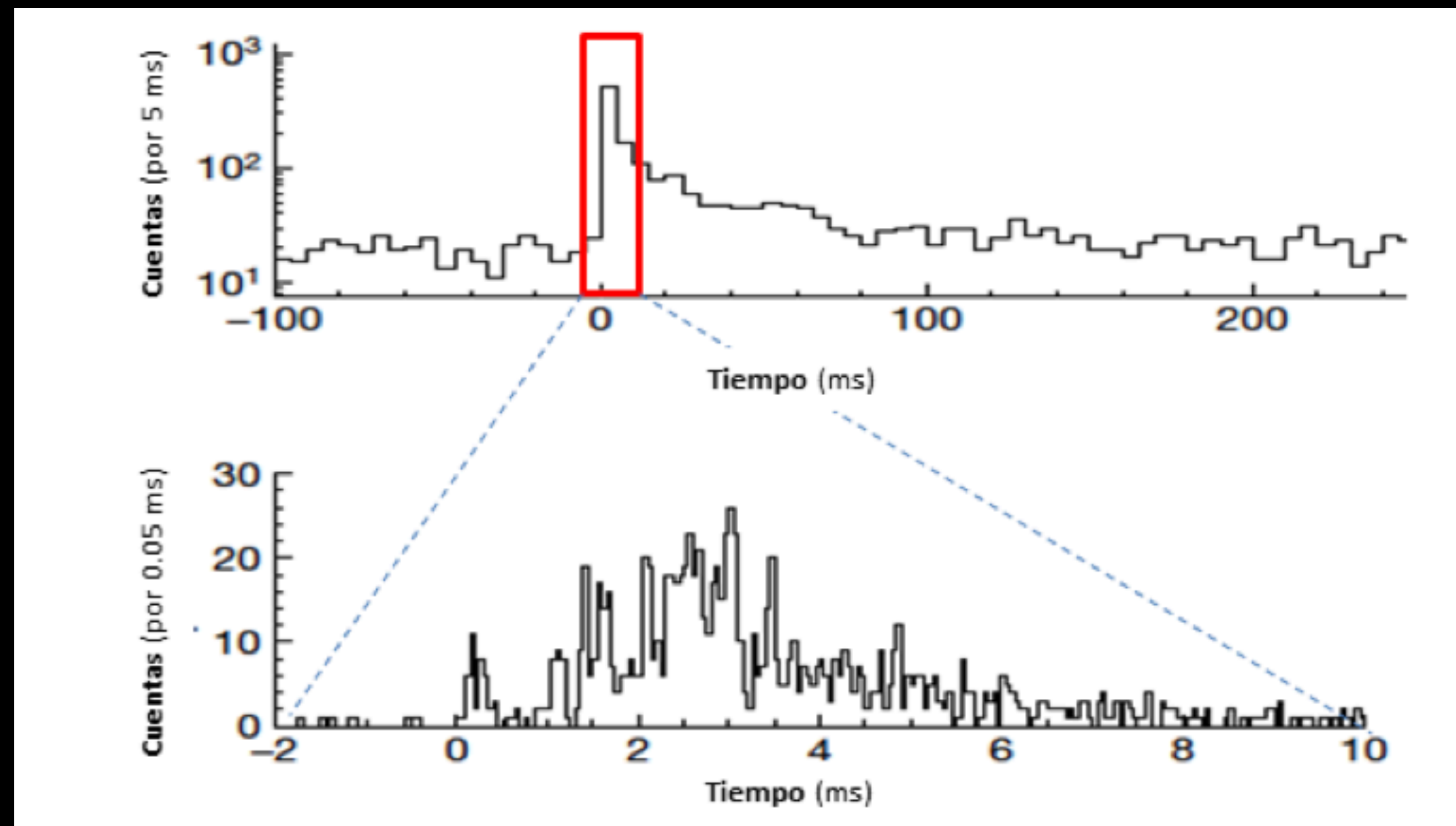


De izquierda a derecha y de arriba a abajo, Alberto J. Castro-Tirado, Mª. Carmen Sánchez-Gil, Javier Pascual-Granado, Michael Gabler y Víctor Reglero Velasco. autores de este artículo.

- Después de un viaje muy largo a través del espacio, el 15 de abril de 2020, el instrumento Monitor de Interacciones Atmosfera-Espacio (ASIM) a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS) detectó un estallido de radiación de alta energía. Se encontró el origen de este estallido energético ser una llamarada gigante de una estrella de neutrones extremadamente magnetizada conocida como magnetar, ubicada a más de 10 millones de años luz de distancia en la galaxia NGC 253.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

- 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



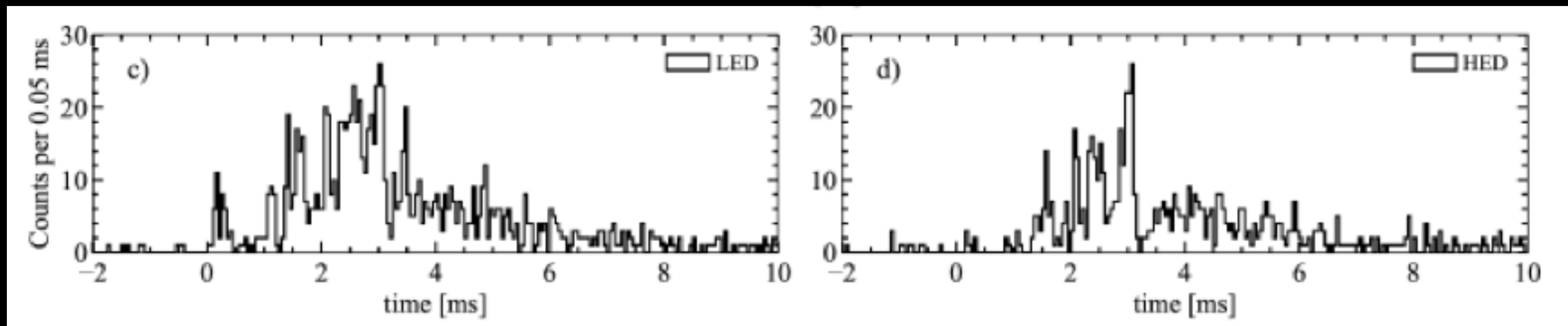
La curva de luz obtenida por ASIM en dos escalas temporales diferentes, mostrando debajo la altísima resolución temporal y la compleja estructura en la fase de rápida subida al máximo de la emisión.



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.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

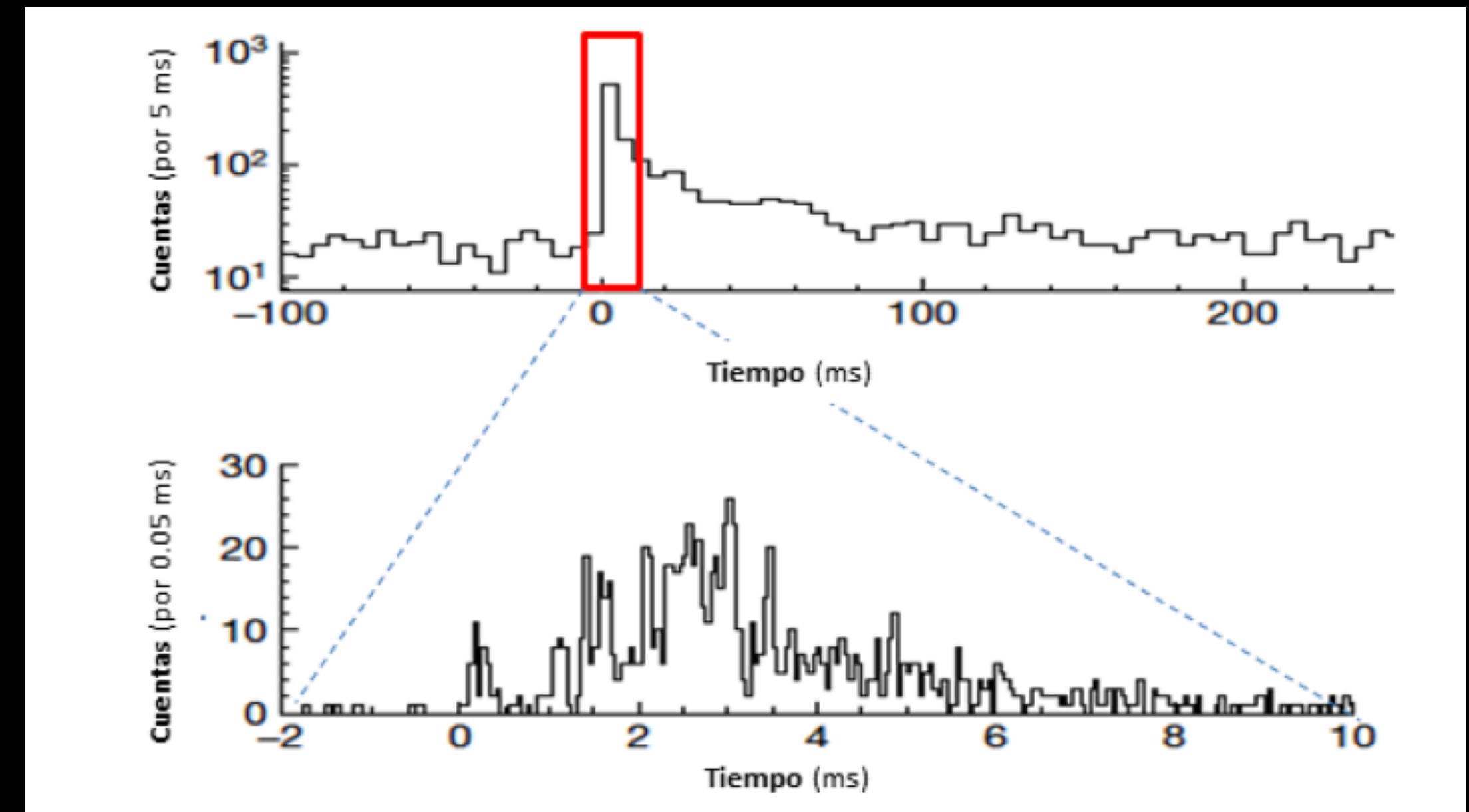
- Con el módulo MXGS de ASIM, se obtuvieron datos durante 2 s centrados alrededor del inicio de la ráfaga [± 1 s]. MXGS está conformado por dos detectores independientes, que cubren rangos de energías complementarios: LED (el de baja energía, 50-400 keV) y HED (el de alta energía, 300 keV- 40 MeV). Ninguno 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 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 μ s. Por lo tanto, ASIM necesitaba tener un área de detección grande [1000 cm²] y una electrónica de lectura rápida [μ s].

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

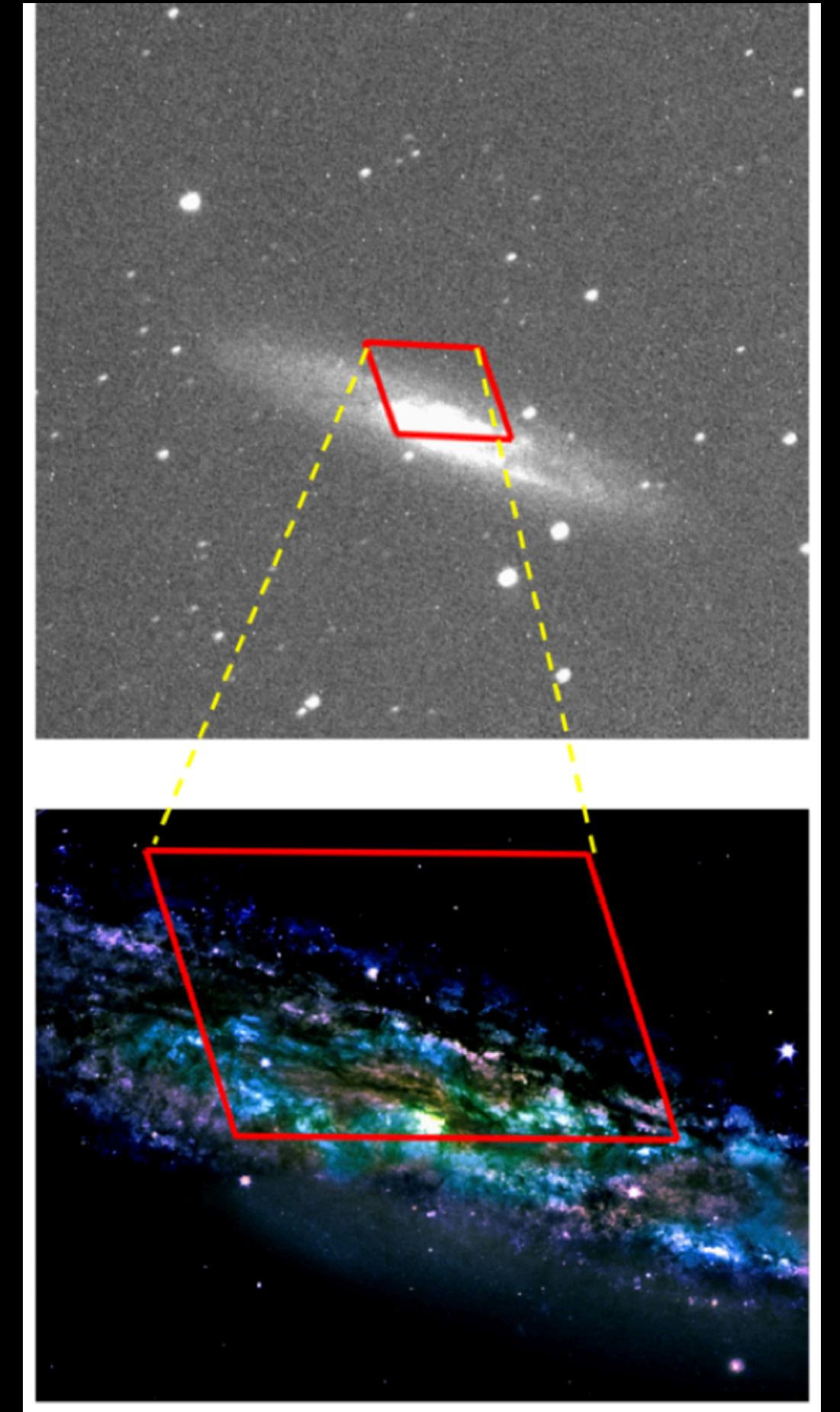
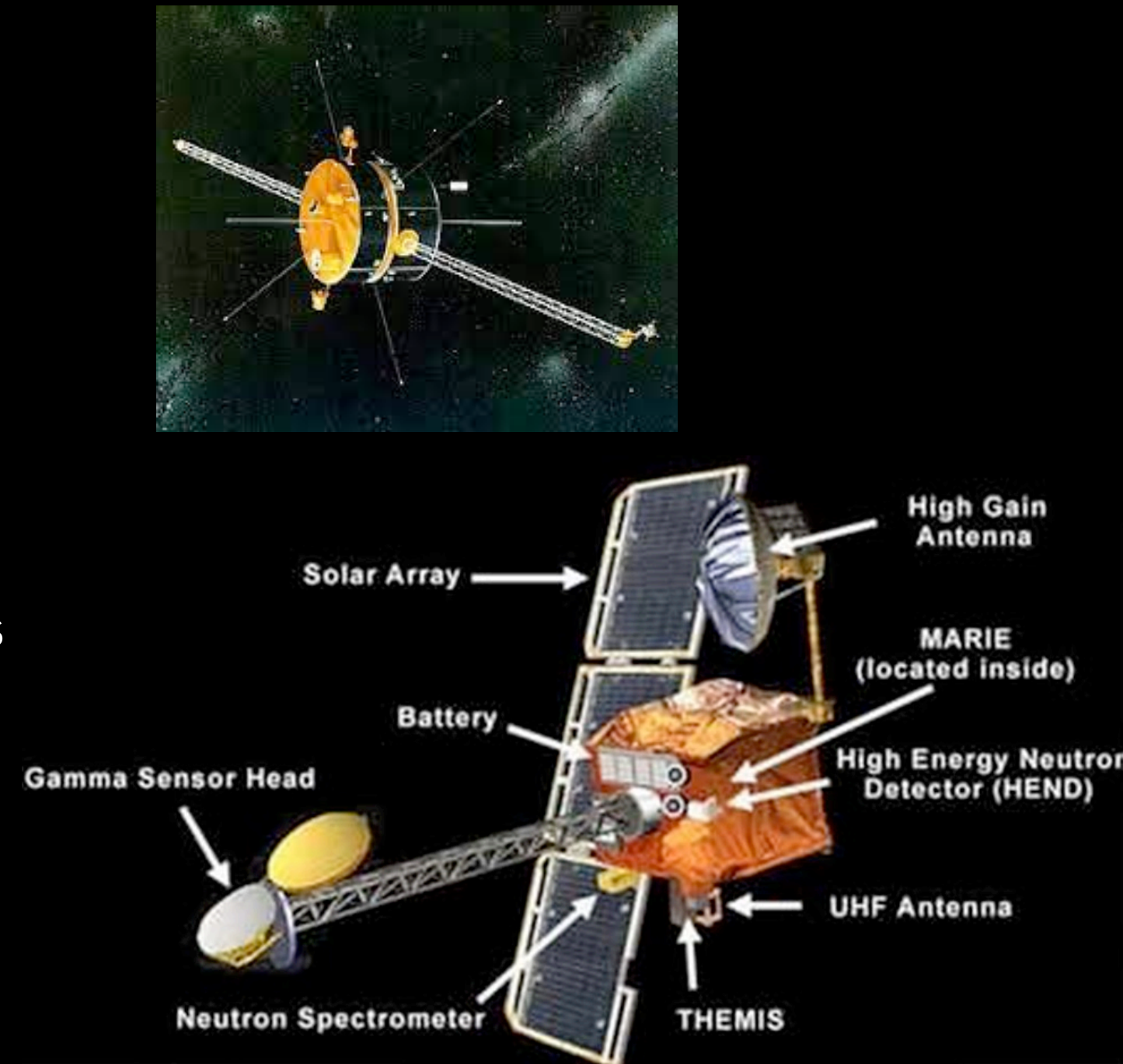
- En comparación con los TGF, la fulguración gigante del evento aquí reportado es un fenómeno lento, y es por eso que el instrumento no se saturó durante la fase más intensa del estallido de la llamarada gigante. Así pues, se pudo resolver la estructura temporal del evento, una tarea verdaderamente compleja 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 μ 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 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.



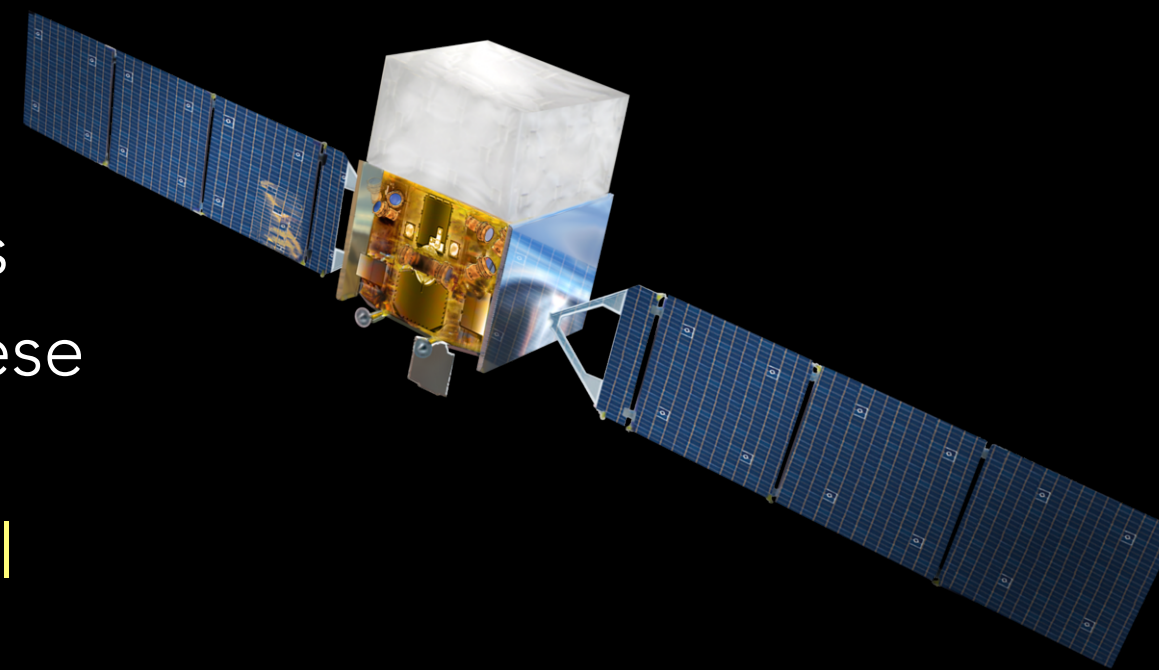
OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

¿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** —Cooperation NASA-Roscosmos, parte de un paquete de instrumentos para observar el viento solar—) 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 **GRB** en **Fermi** por otro, 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.



- Durante los ~ 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.

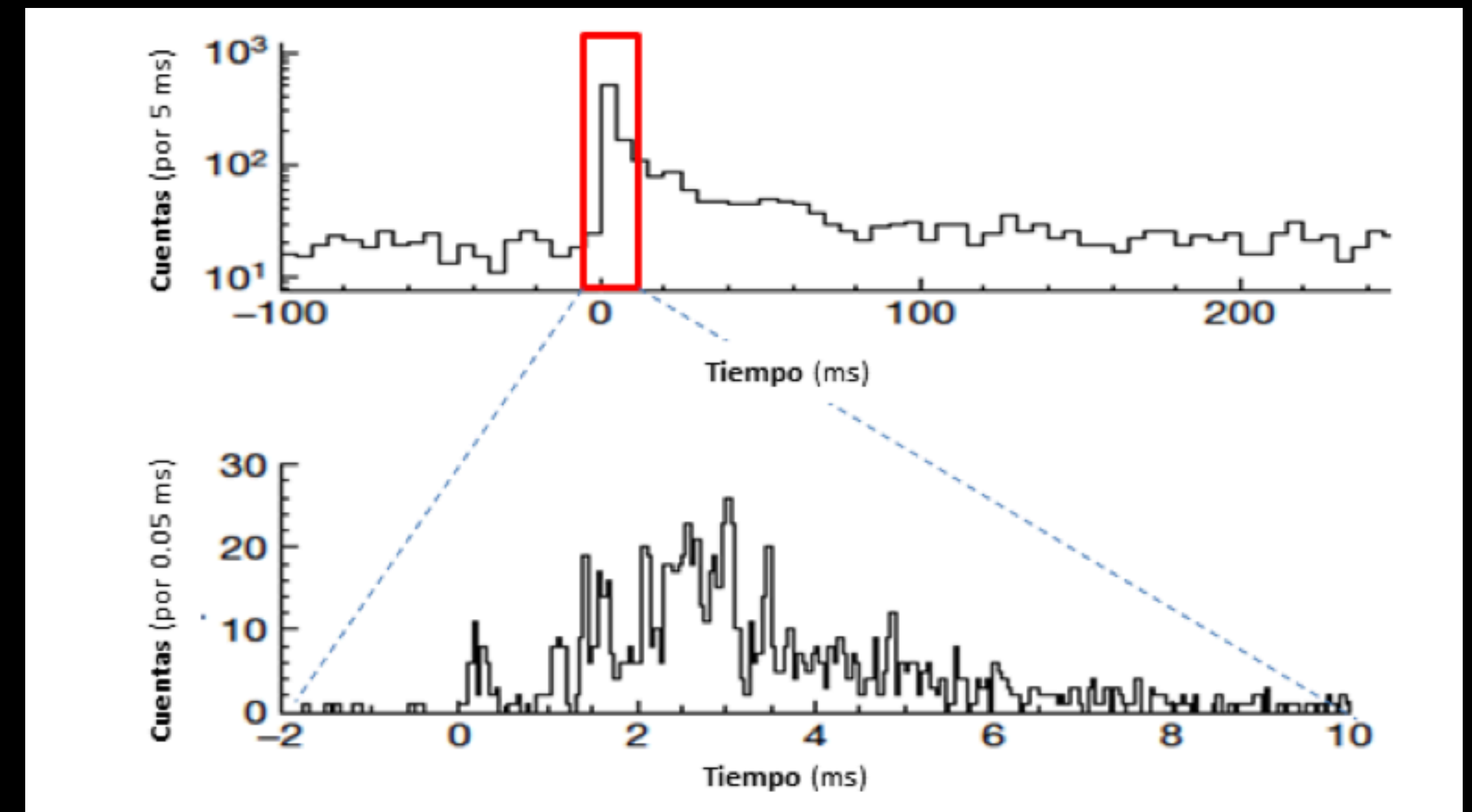


La zona de error más precisa que se ha podido determinar en donde se ubicaría el magnetar (obtenida por la Red Interplanetaria de Satélites, IPN3) y proyectada sobre las imágenes ópticas de NGC 253, a 12,9 millones de años luz, obtenidas por el telescopio de gran campo de la estación BOOTES-1 en el INTA/CEDEA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

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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

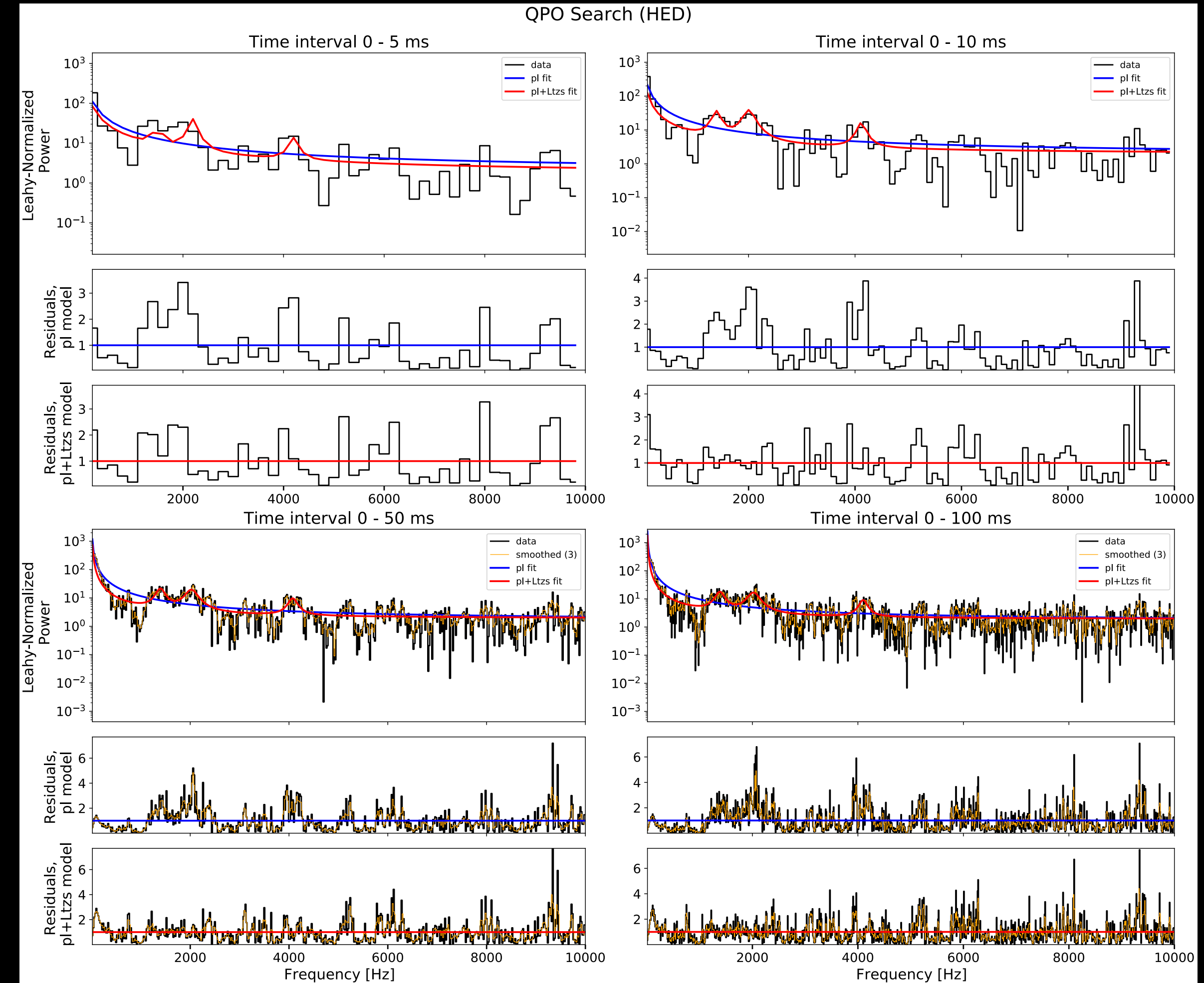
- En general, muchas fuentes astrofísicas, especialmente las fuentes de acreción compactas (como una estrella de neutrones o un agujero negro), muestran fuertes fluctuaciones de brillo aleatorias con amplios espectros de potencia además de oscilaciones periódicas o cuasi-periódicas (QPO) que tienen espectros más estrechos.
- Cerca del borde interior del disco de acreción, el gas se arremolina hacia la estrella y emite luz de rayos X. Llamamos oscilación cuasi-periódica (QPO) a la forma en que la luz de rayos X parpadea alrededor de ciertas frecuencias.
- El fenómeno QPO puede ayudar a comprender las regiones más internas de los discos de acreción y las masas, los radios y los períodos de giro de las enanas blancas, las estrellas de neutrones y los agujeros negros.
- Resultado destacado: En relación con este trabajo, remarcar el significado de encontrar un QPO a alta frecuencia en una llamarada gigante de magnetar, durante su pico de explosión o explosión principal.



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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 μ 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 **10⁴ 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 QPO significativas** centradas en sendas frecuencias: **2156 $\pm$ 150 Hz** y **4256 $\pm$ 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 QPO a **2185 $\pm$ 52 Hz** y **4200 $\pm$ 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 **~1487 $\pm$ 33 Hz**.



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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

AJUSTE DEL RUIDO Y BÚSQUEDA DE PERIODICIDADES

of power spectral shapes well represented in nature are **power laws**:

$$H_0: P(\nu) = \beta \nu^{-\alpha} + \gamma, \quad (7)$$

where α is the power-law index, and **broken power laws**, which can be reduced to Equation (7) by setting $\rho = 0$:

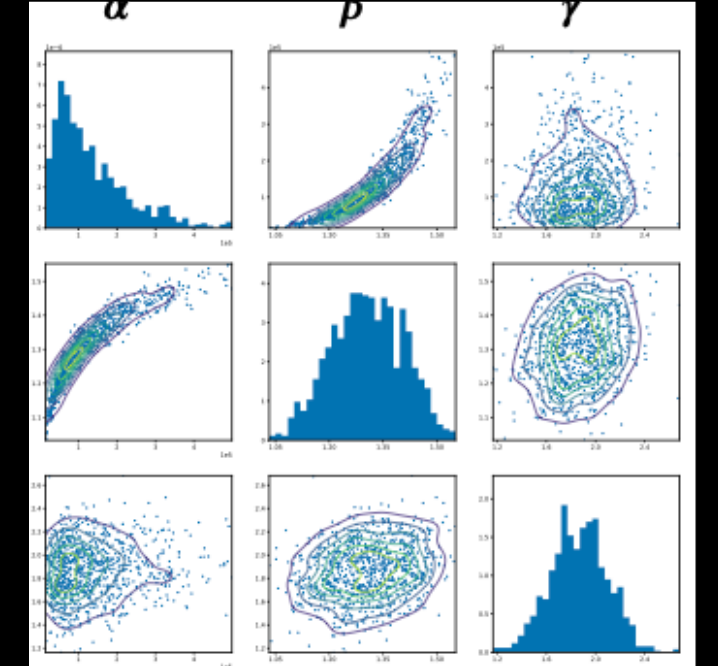
$$H_1: P(\nu) = \beta \nu^{-\alpha_1} \left(1 + \left\{ \frac{\nu}{\delta} \right\}^{(\alpha_2 - \alpha_1)/\rho} \right)^{-\rho} + \gamma, \quad (8)$$

$$\theta_{\text{MAP}} = \arg \max_{\theta} p(\theta | \mathbf{I}, H),$$

$$T_{\text{SSE}} = \chi^2(\mathbf{I}, \hat{\theta}), \quad (10)$$

where

$$\chi^2(\mathbf{I}, \theta) = \sum_{j=1}^{N/2} \frac{(I_j - E[I_j | \theta])^2}{E[I_j | \theta]} = \sum_{j=1}^{N/2} \left(\frac{I_j - S_j(\theta)}{S_j(\theta)} \right)^2$$



$\{\theta_1, \dots, \theta_{1000}\}$

$$T_{\text{LRT}} = -2 \log \frac{p(\mathbf{I} | \hat{\theta}_{\text{MAP}}^0, H_0)}{p(\mathbf{I} | \hat{\theta}_{\text{MAP}}^1, H_1)} = D_{\min}(H_0) - D_{\min}(H_1).$$

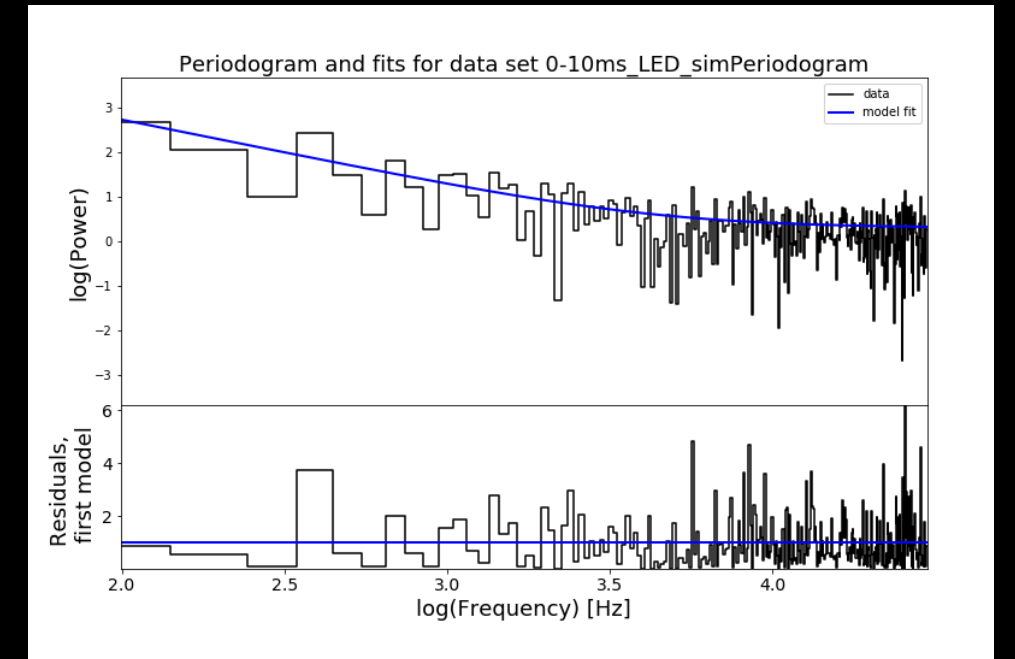
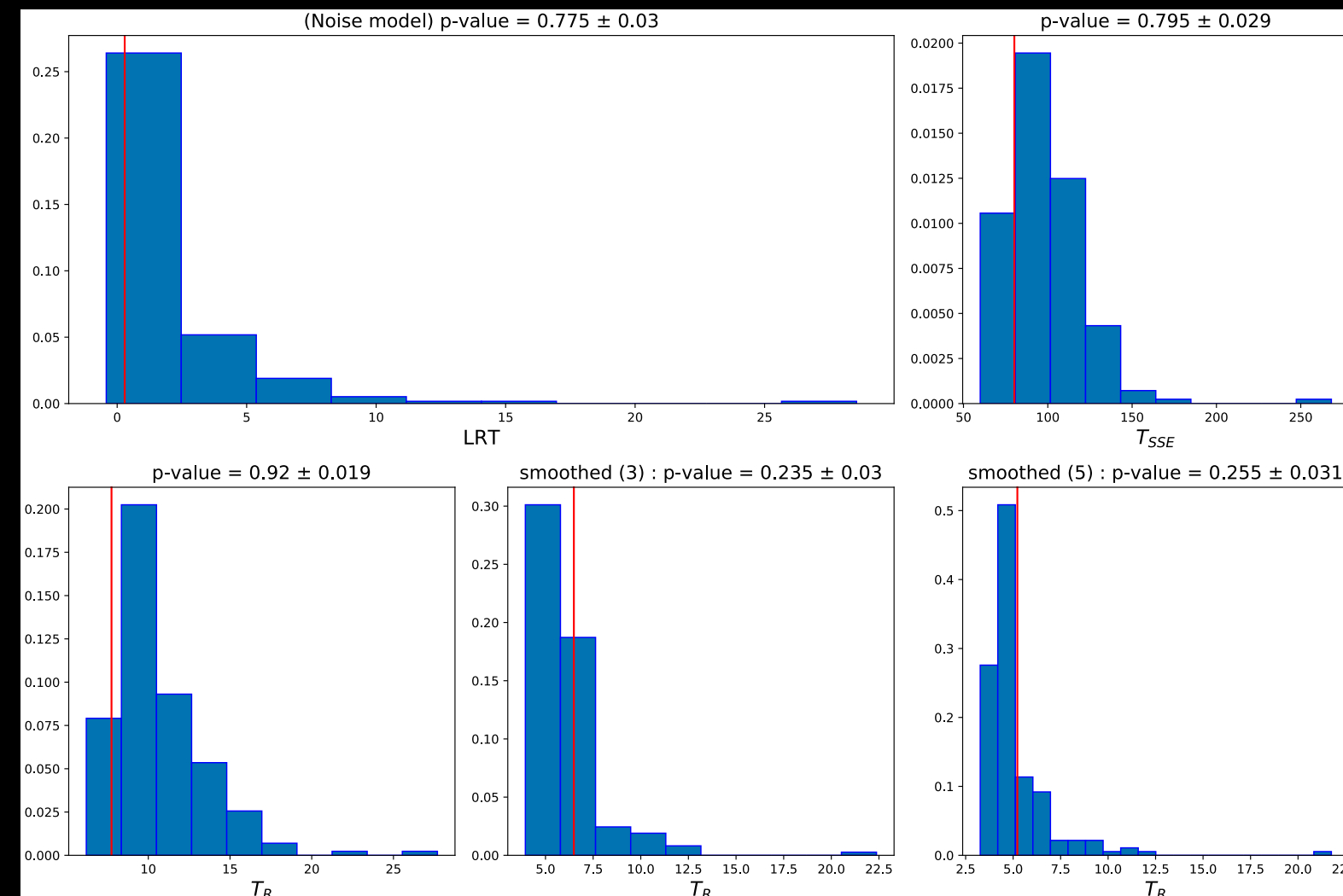
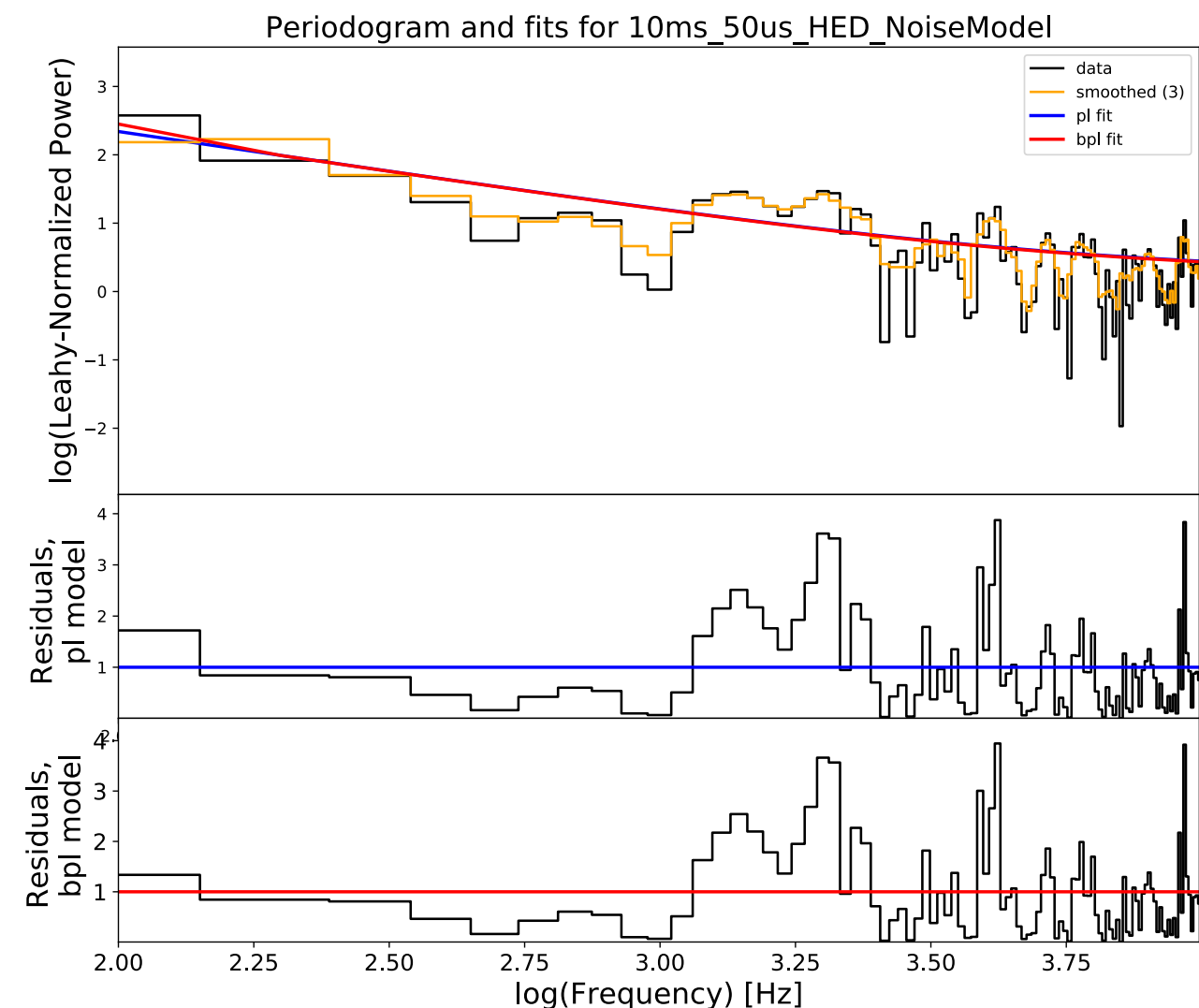
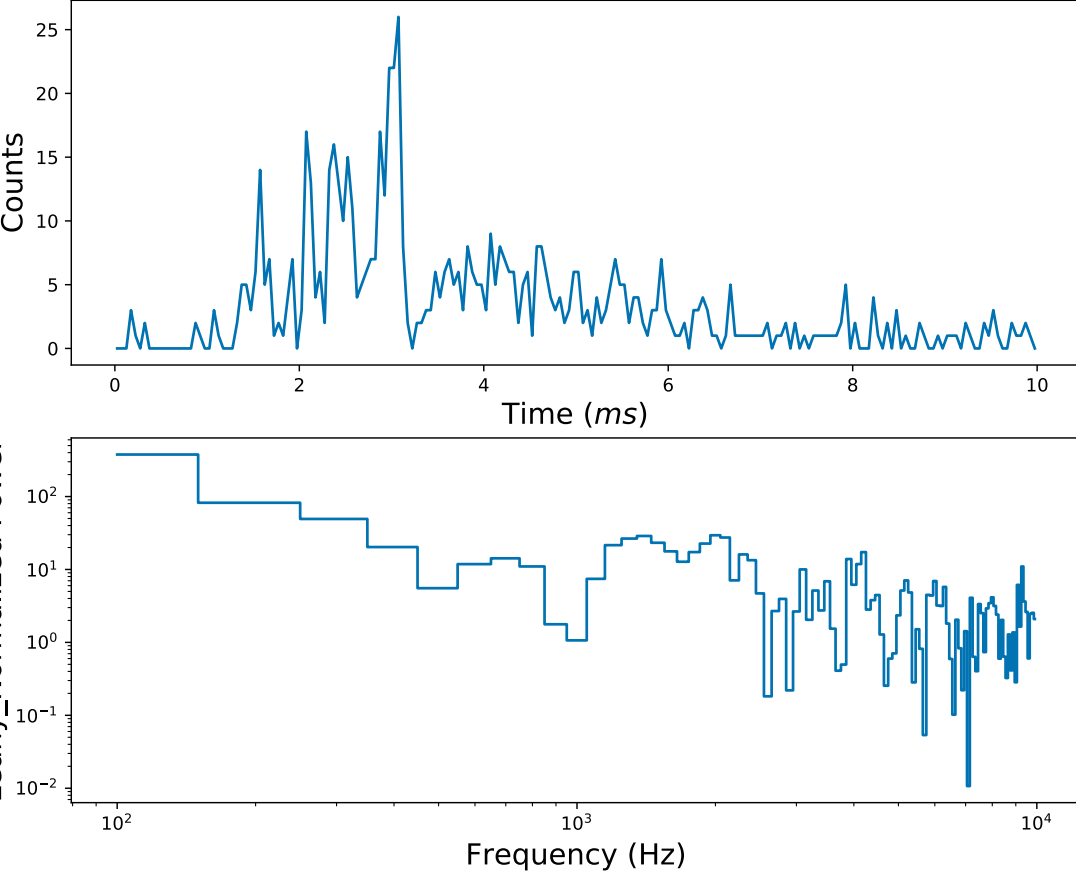
In order to investigate narrow features, a sensible statistic to use is the **maximum ratio of observed to model power**, or

$$T_R = \max_j (\hat{R}_j), \quad (11)$$

where

$$\hat{R}_j = 2I_j/S_j$$

and I_j and S_j are observed and model powers as defined above.



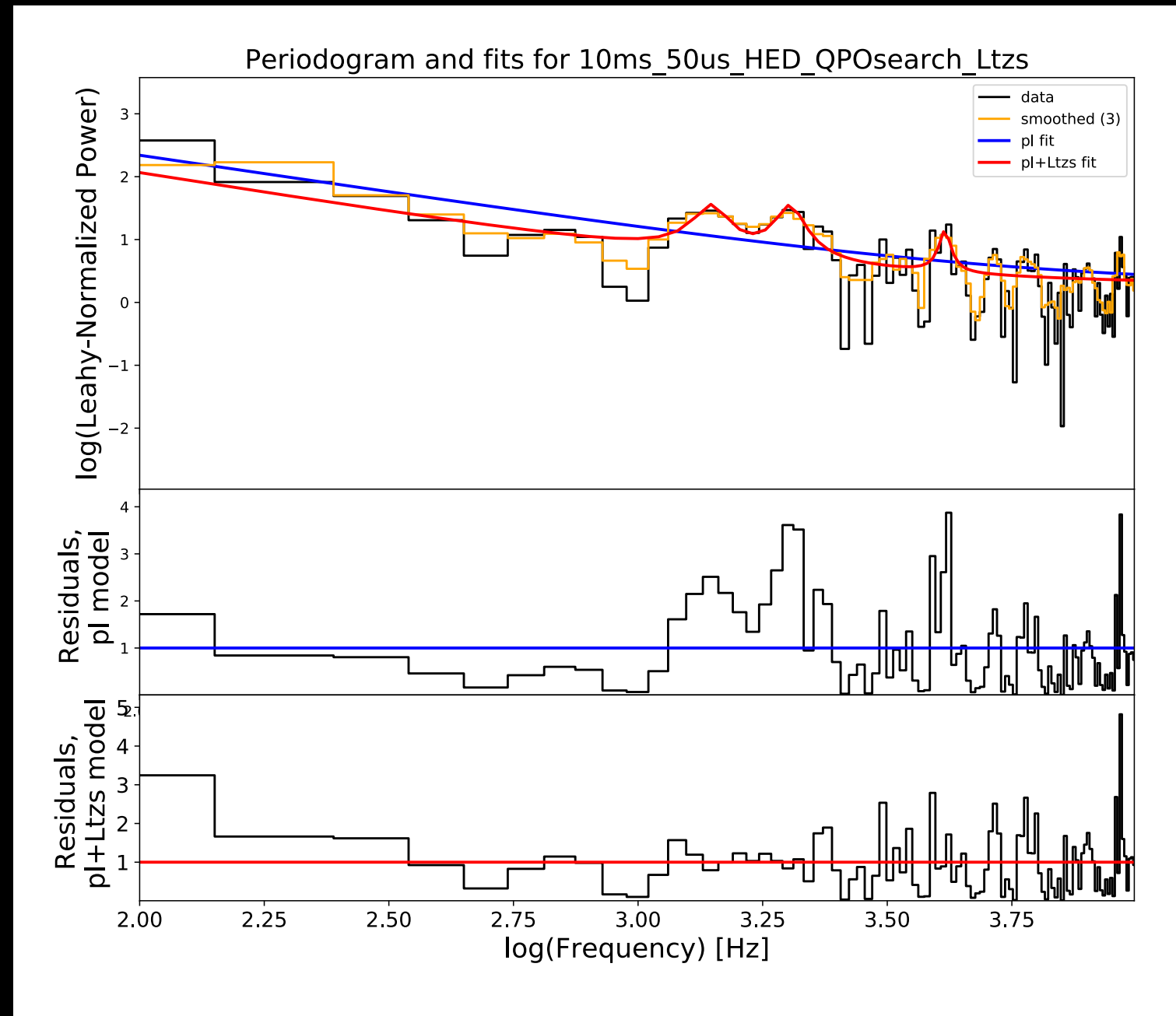
given the parameters. The Bayesian **p-value** is the (tail area) probability that the replicated data could give a test statistic at least as extreme as that observed:

$$p_B(\mathbf{x}) = \int p_C(\mathbf{x}^{\text{obs}}, \theta) p(\theta | \mathbf{x}^{\text{obs}}) d\theta = \Pr\{T(\mathbf{x}^{\text{rep}}) \geq T(\mathbf{x}^{\text{obs}}) | \mathbf{x}^{\text{obs}}, H_0\}. \quad (12)$$

POSTERIOR PREDICTIVE P-VALUES

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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



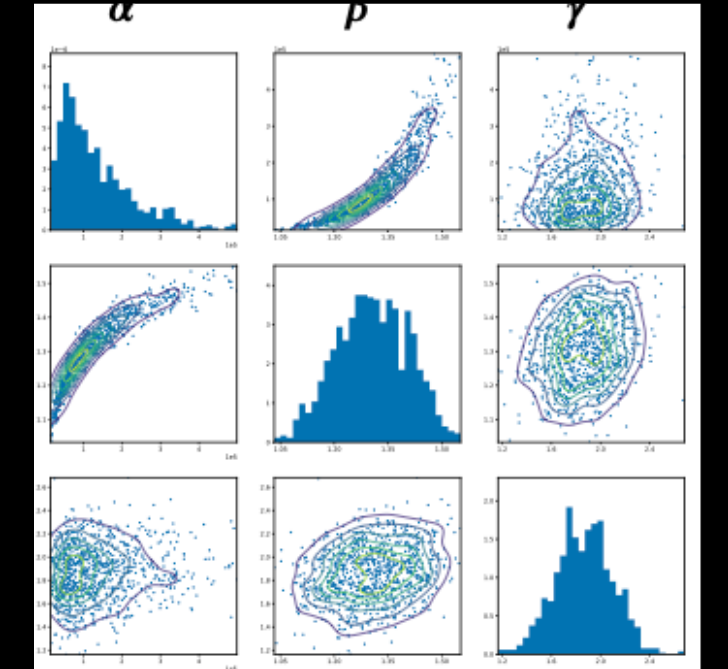
BÚSQUEDA DE QPO

H0: pure broadband model

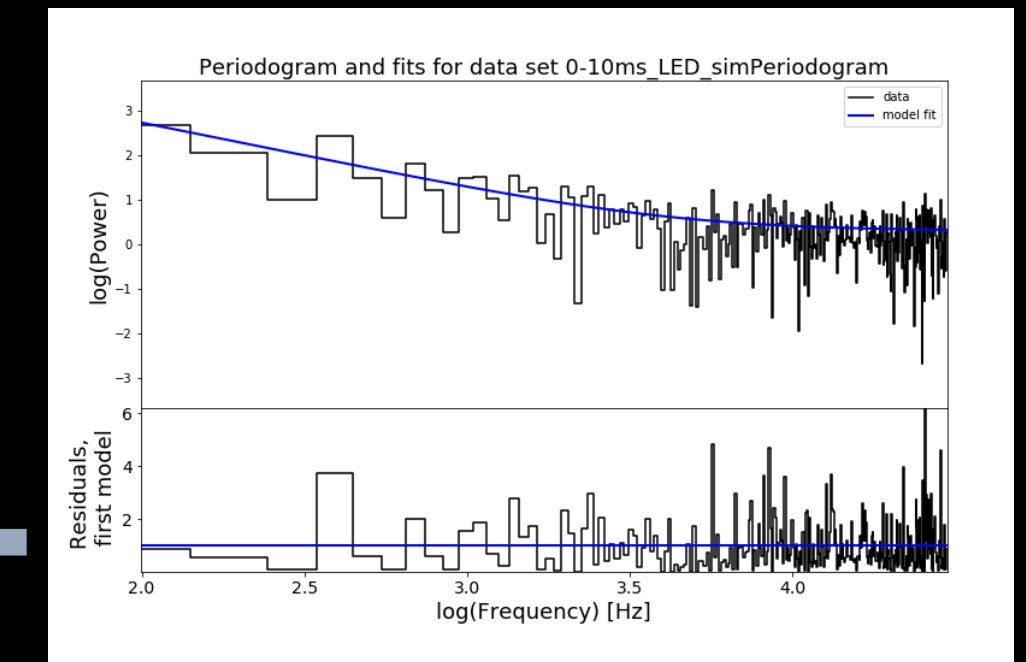
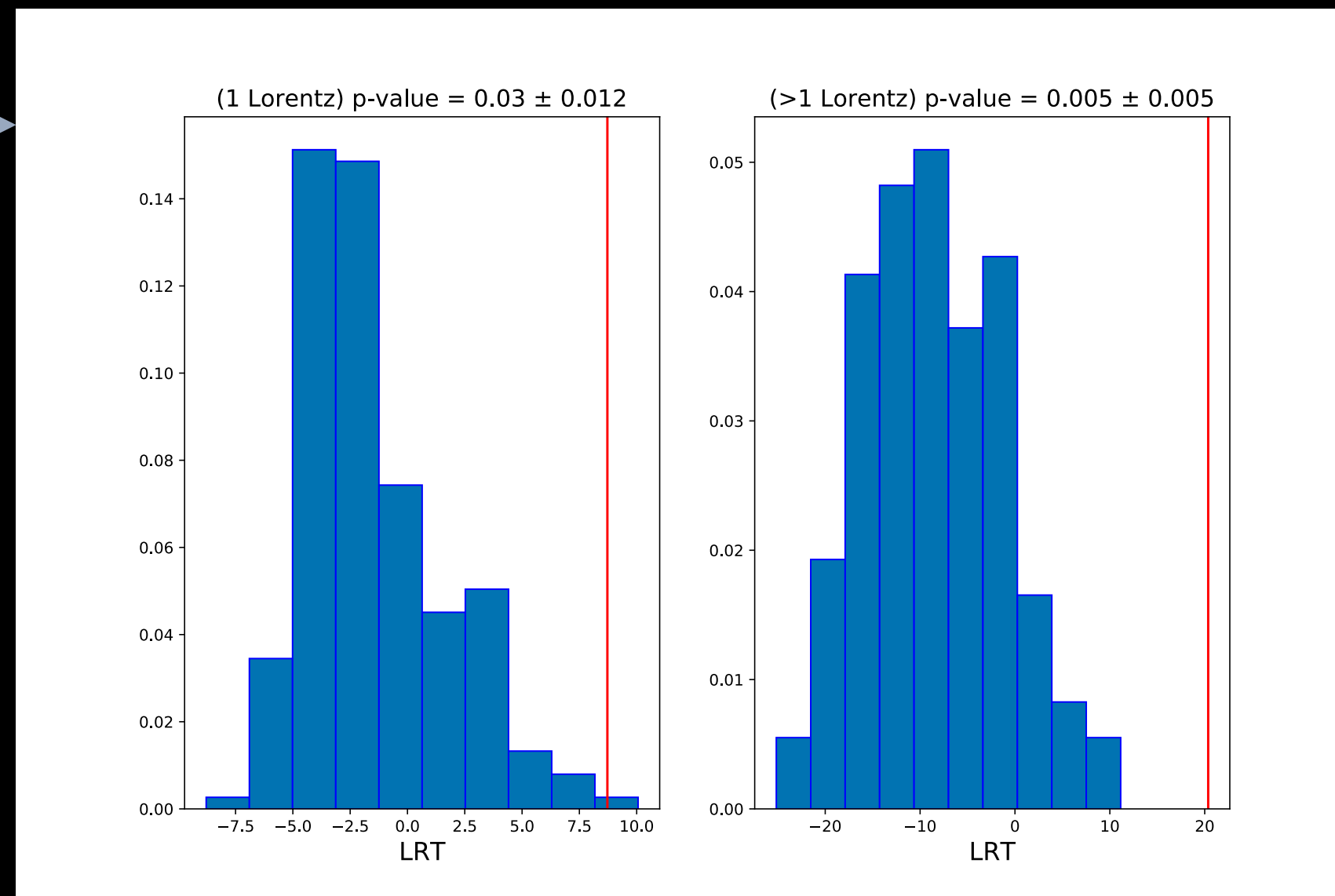
H1: mixture model broadband noise process + Lorentzian/s

$$\theta_{\text{MAP}} = \arg \max_{\theta} p(\theta | \mathbf{I}, H),$$

$$T_{\text{LRT}} = -2 \log \frac{p(\mathbf{I} | \hat{\theta}_{\text{MAP}}^0, H_0)}{p(\mathbf{I} | \hat{\theta}_{\text{MAP}}^1, H_1)} = D_{\min}(H_0) - D_{\min}(H_1).$$



$\{\theta_1, \dots, \theta_{1000}\}$



given the parameters. The Bayesian p -value is the (tail area) probability that the replicated data could give a test statistic at least as extreme as that observed:

$$p_B(\mathbf{x}) = \int p_C(\mathbf{x}^{\text{obs}}, \theta) p(\theta | \mathbf{x}^{\text{obs}}) d\theta = \Pr\{T(\mathbf{x}^{\text{rep}}) \geq T(\mathbf{x}^{\text{obs}}) | \mathbf{x}^{\text{obs}}, H_0\}. \quad (12)$$

POSTERIOR PREDICTIVE P-VALUES

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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

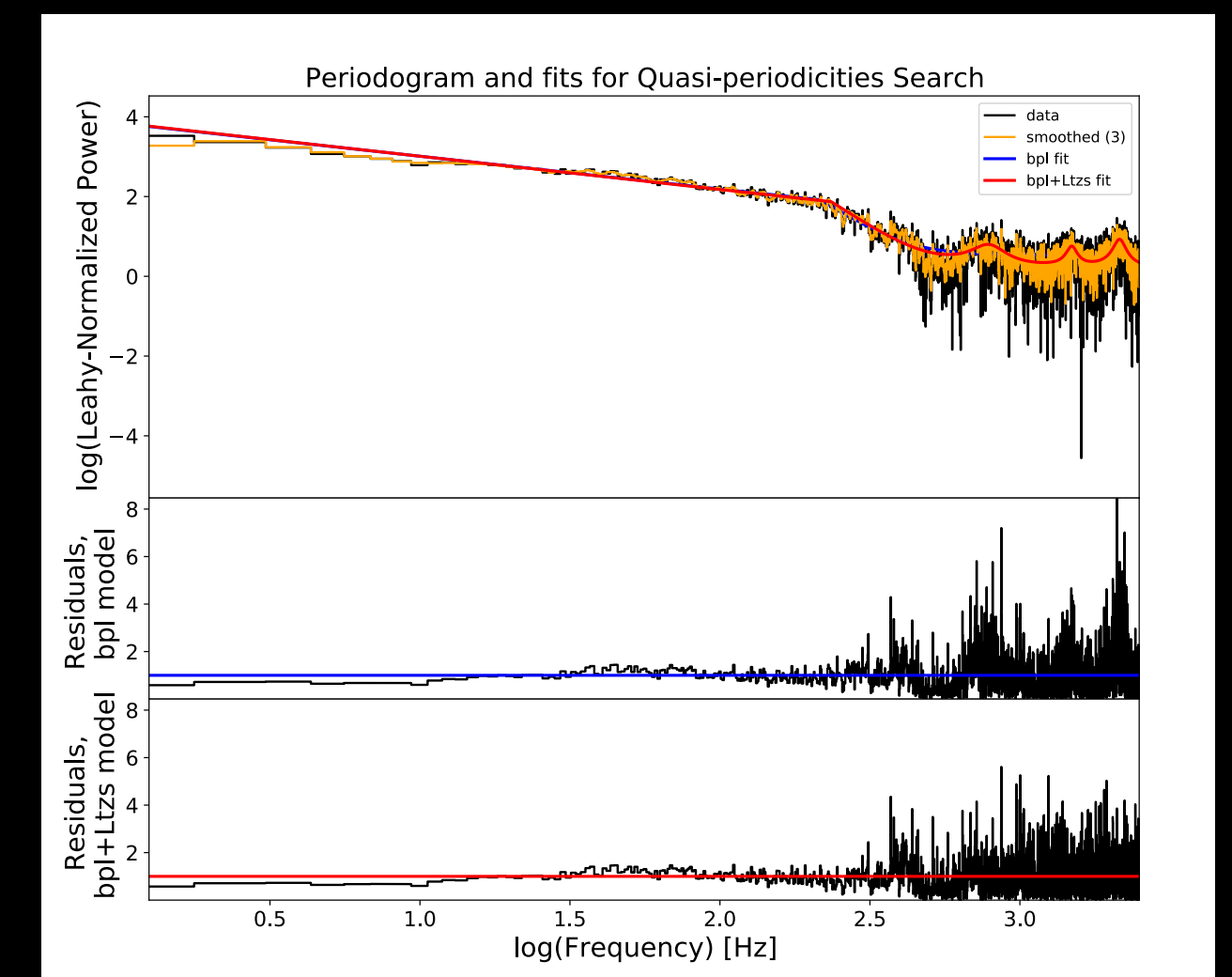
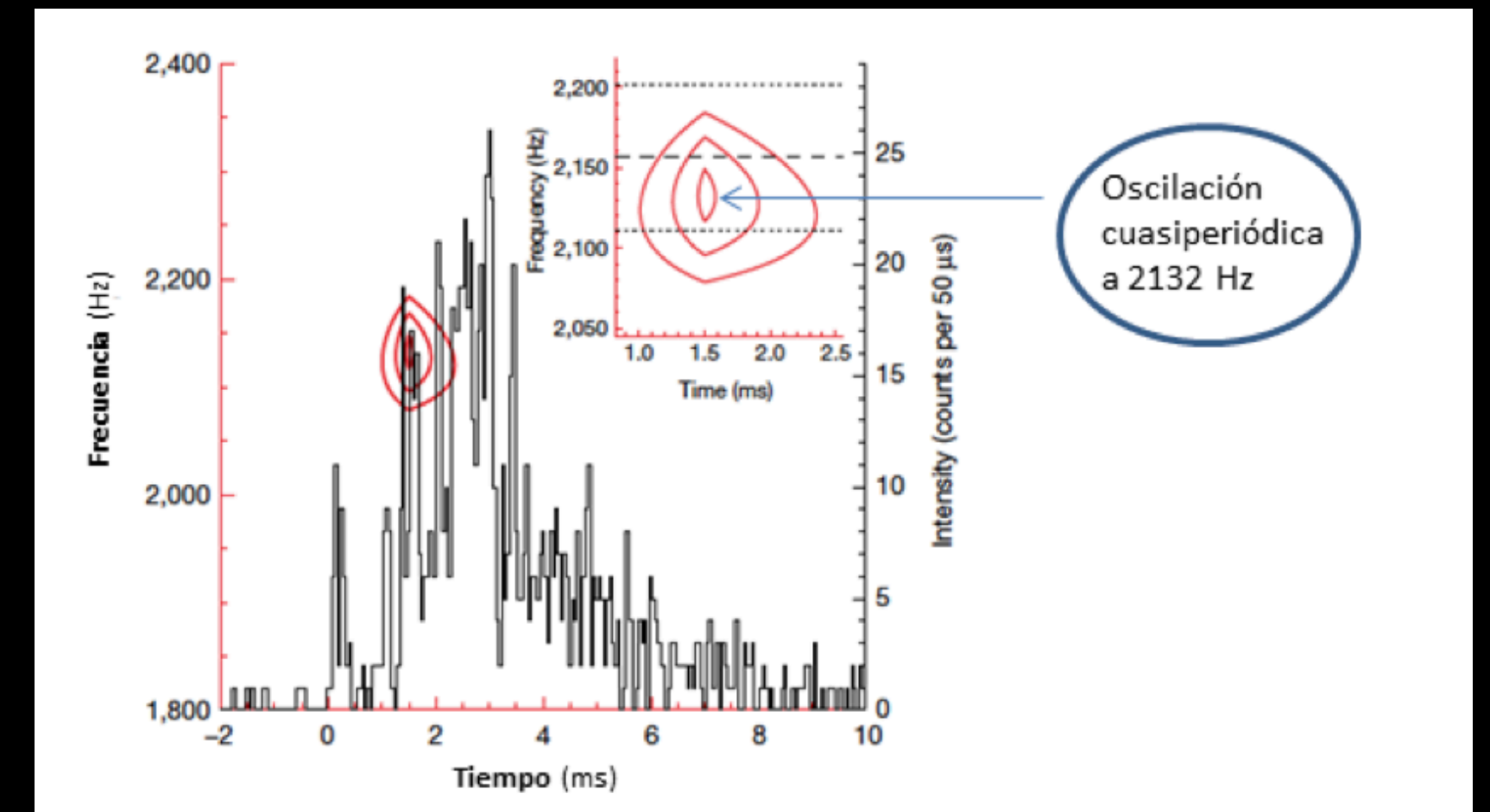
Table 2: Results for the Search for Periodicities and Quasi-periodicities: Posterior Summary 1. The T_R statistic is computed for various binned and smoothed periodograms. The noise model selection was only computed for the unbinned ones.

		HED						LED				
time		Noise model		Periodicity Search			Noise model		Periodicity Search			
interval	δv_{bin}	$p(LRT)$	$p(SSE)$	v_{max}	T_R	$p(T_R)$	$p(LRT)$	$p(SSE)$	v_{max}	T_R	$p(T_R)$	
(s)	(Hz)			(Hz)					(Hz)			
0–100	10	unbin	0.124 ± 0.015	0.89 ± 0.014	9340	13.99	0.588 ± 0.022	0.336 ± 0.021	0.038 ± 0.009	4220	15.91	0.375 ± 0.034
		sm(3)			2070	9.88	0.028 ± 0.007			2190	12.16	0.010 ± 0.007
		sm(5)			2060	8.93	$< 10^{-4}$			2190	10.71	0.015 ± 0.009
	30	bin(3)			8090	7.29	0.324 ± 0.021			4220	10.85	0.015 ± 0.009
	50	bin(5)			2080	7.32	0.025 ± 0.011			2180	9.75	0.020 ± 0.010
0–50	20	unbin	0.488 ± 0.022	0.866 ± 0.015	9340	14.14	0.365 ± 0.034	0.952 ± 0.01	0.09 ± 0.013	7880	13.13	0.592 ± 0.022
		sm(3)			2060	9.75	0.035 ± 0.013			4340	10.73	0.046 ± 0.009
		sm(5)			2080	7.88	0.03 ± 0.012			4340	9.86	0.005 ± 0.005
	60	bin(3)			2080	7.64	0.125 ± 0.023			4360	9.048	0.074 ± 0.012
	100	bin(5)			2060	7.28	0.030 ± 0.012			2160	8.46	0.015 ± 0.009
0–10	100	unbin	0.676 ± 0.021	0.816 ± 0.017	4200	7.75	0.915 ± 0.019	0.938 ± 0.011	0.112 ± 0.014	2200	11.58	0.255 ± 0.031
		sm(3)			2000	6.49	0.220 ± 0.029			4300	8.63	0.055 ± 0.016
		sm(5)			2100	5.22	0.240 ± 0.031			4200	6.74	0.11 ± 0.022
	300	bin(3)			2000	6.28	0.135 ± 0.024			4400	5.97	0.21 ± 0.029
	500	bin(5)			1800	4.09	0.435 ± 0.035			300	5.37	0.145 ± 0.025
0–5	200	unbin	0.546 ± 0.022	0.774 ± 0.019	2000	6.81	0.865 ± 0.024	0.669 ± 0.021	0.182 ± 0.017	2200	11.79	0.095 ± 0.021
		sm(3)			2000	5.34	0.390 ± 0.034			4200	6.29	0.160 ± 0.026
		sm(5)			1800	4.96	0.255 ± 0.031			600	4.17	0.55 ± 0.035
	600	bin(3)			1600	4.27	0.610 ± 0.034			2200	4.97	0.290 ± 0.032
	1000	bin(5)			1600	4.20	0.255 ± 0.031			4600	3.46	0.565 ± 0.035

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

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

- 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 1000 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 $f_1 = 2132$ Hz en el intervalo temporal de 0 a 5 ms, valor consistente con el obtenido por la PSD y con una probabilidad por azar de encontrar esta señal de sólo 2.4×10^{-9} . Una búsqueda a frecuencias más altas reveló otro máximo a $f_2 = 4250$ Hz con una probabilidad por azar de 1.7×10^{-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 2163-2272 Hz y también en el rango 1464-1614 Hz, proporcionando pues una confirmación independiente de la QPO a 2132 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.



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

INFORMACIÓN DERIVADA DE LOS ESPECTROS DE ALTA ENERGÍA

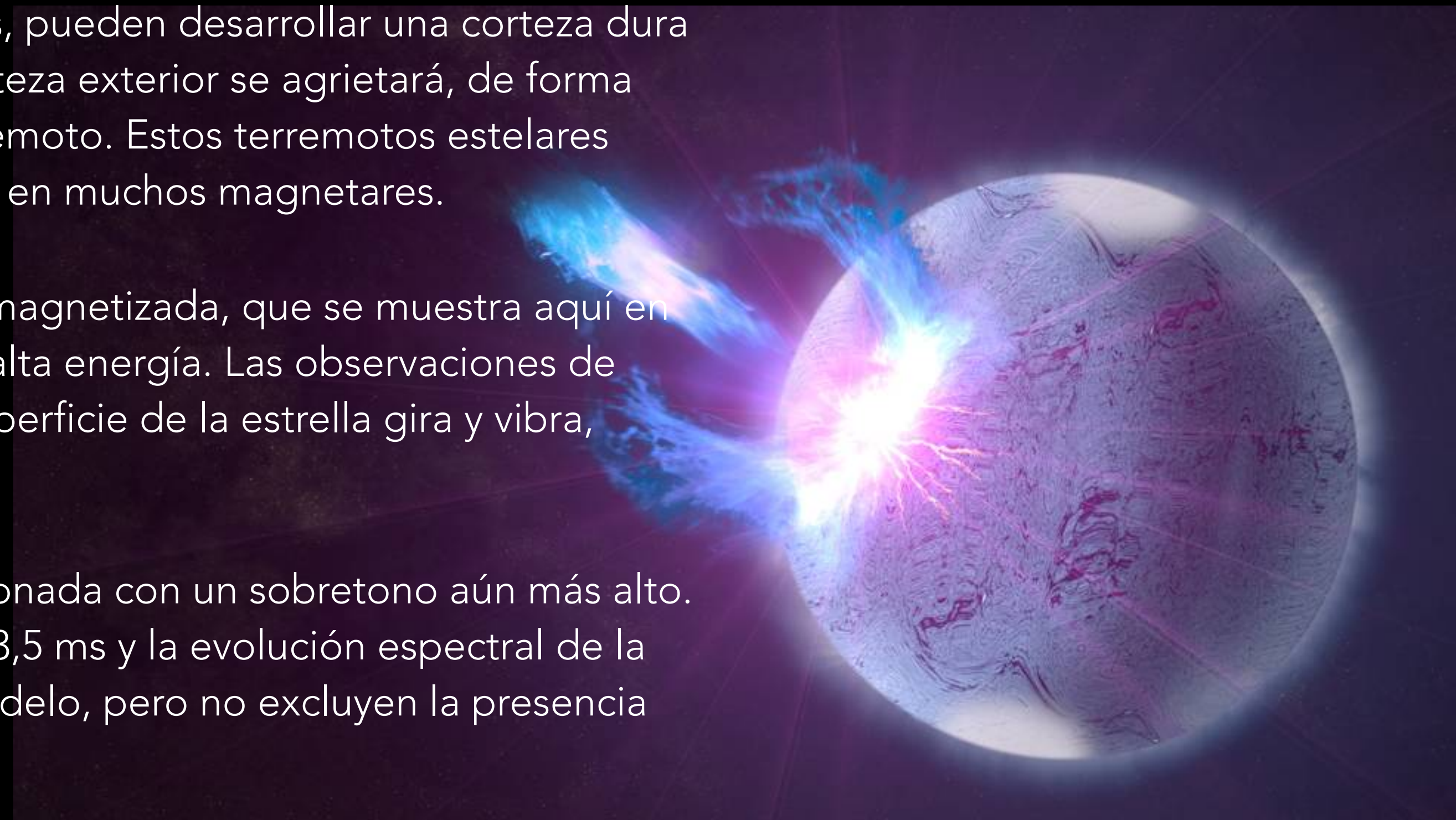
- Las propiedades de los espectros observados son consistentes con lo que se espera que suceda durante un evento de **reconexión en la magnetosfera**. Primero tenemos una bola de fuego ('fireball') de partículas en expansión, con velocidades cercanas a la de la luz, y que se forma como consecuencia de la liberación de energía durante la reconexión, con temperaturas 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, que domina la profundidad óptica de dispersión en magnetosferas altamente magnetizadas 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 ($E_{\text{max}} \sim 1$ 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.



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

'ESTRELLAMOTOS' (STARQUAKE) – UNA INTERPRETACIÓN ALTERNATIVA DE LAS QPO

- 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 que naturalmente deberían provocar oscilaciones.
- Cuando se forman estrellas de neutrones, incluidas las magnetares, pueden desarrollar una corteza dura en el exterior de la estrella condensada. Ocasionalmente, esta corteza exterior se agrietará, de forma similar a como se fractura la superficie de la Tierra durante un terremoto. Estos terremotos estelares pueden explicar el cambio en el brillo y el enfriamiento observado en muchos magnetares.
- Una ruptura en la corteza de una estrella de neutrones altamente magnetizada, que se muestra aquí en la representación artística, puede desencadenar erupciones de alta energía. Las observaciones de Fermi de estas explosiones incluyen información sobre cómo la superficie de la estrella gira y vibra, proporcionando nuevos conocimientos sobre lo que hay debajo.
- Siguiendo esta interpretación, la segunda QPO puede estar relacionada con un sobretono aún más alto. Sin embargo, la repentina desaparición de los QPO después de ~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.



OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

¿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 200415A**. 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 2132 Hz. La segunda QPO a 4250 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 ~ 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.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

CONCLUSIONES



- Así pues, en resumen, podemos decir que fruto de este esfuerzo ha sido el registrar por vez primera dos QPOs centradas en ~ 2132 Hz y ~ 4250 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.
- 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 seísmos 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.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

CONCLUSIONES



- ◆ 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.
- ◆ 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 2001415 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.

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

- ◆ Se sospecha que un porcentaje de los GRBs cortos observados asociados con las galaxias cercanas podrían tratarse en realidad de erupciones gigantes de magnetares.

<https://www.youtube.com/watch?v=yXYvhYXBeP0>



<https://www.youtube.com/watch?v=pcb5rtimVQY&t=1s>

OSCILACIONES DE UN MONSTRUO MAGNÉTICO EN NGC 253

<https://www.nature.com/articles/s41586-021-04101-1>

https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/bv2022_magnetar.pdf

<https://birkeland.uib.no/extraordinary-shakings-of-a-distant-magnetar/>

<https://www.iaa.csic.es/noticias/captan-distintos-pulsos-en-llamarada-magnetica-gigante-estrella-neutrones>

