

Los estallidos de rayos-gamma (GRBs) fueron descubiertos en 1967 y hoy sabemos que los de larga duración (≥ 2 s) por lo general están producidos por colapsos de estrellas masivas dando lugar a agujeros negros recién nacidos en remotas galaxias a un ritmo de uno por día en nuestro Universo (por término medio) mientras que los de corta duración (< 2 s) se originan en fusiones de estrellas binarias de neutrones, liberándose energías del orden de 10^{51} erg en el caso de los primeros y algo menor y formándose lantánidos en el caso de los segundos. Todos estos avances se detallan en la presente contribución, justo veinticinco años tras la que abría el primer Boletín de la SEA allá por noviembre de 1998 [1], cuando reportábamos la detección de las primeras contrapartidas electromagnéticas gracias al descubrimiento por el satélite *BeppoSAX* de las postluminiscencias en rayos-X (que propició la detección posterior de la misma en óptico y en radio) y la determinación de la escala de distancia cosmológica para los GRBs, con las primeros corrimientos al rojo en torno a $z = 1$.



Alberto J. Castro-Tirado

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) / Universidad de Málaga
ajct@iaa.es / [@AJCastroTirado](https://twitter.com/AJCastroTirado)

La física de los GRBs ha avanzado mucho desde entonces y de hecho me atrevo, sin ánimo de ser exhaustivo, a dar las siguientes pinceladas de los hitos observacionales más relevantes acaecidos en el campo desde entonces.

PRINCIPALES HITOS OBSERVACIONALES EN EL CAMPO DE LOS GRBs ENTRE 1998 Y 2024

- 1999. La emisión de los GRBs es colimada con lo que la energía total liberada pasa de $E \sim 10^{52}$ - 10^{54} erg (considerando emisión isotropa) a ser $E \sim 10^{51}$ erg [2,3]. En este año también se anunció la primera detección de emisión óptica simultánea a un GRB [4].
- 2003. La relación entre las supernovas (SNe) altamente energéticas (en especial las SN I c) con los GRBs de larga duración [5,6] confirmando los indicios (cinco años antes) de la relación entre SN1998bw y un GRB de baja luminosidad en una galaxia cercana. Ese mismo año también se reporta la detección de variabilidad en la polarización de la postluminiscencia óptica, para el mismo GRB [7].
- 2005. La detección de las primeras contrapartidas electromagnéticas de los GRBs de corta duración tanto en rayos X [8,9] como en el óptico [10,11]. En este año también se reporta la detección del primer GRB a alto corrimiento al rojo, por encima de $z = 6$ [12,13].
- 2006. Un GRB de baja energía (a modo de destello de rayos X) asociado a una SN [14,15]. En este año también se publica la no existencia de la esperada SN asociada a un GRB de larga duración cercano [16,17] así como la primera detección de polarización óptica en la emisión temprana de un GRB [18].
- 2008. La detección de un GRB cuya postluminiscencia óptica llegó a ser visible a simple vista por unos segundos [19].
- 2009. Detección de un GRB con corrimiento al rojo de 8,1 [20,21].
- 2012. Asociación de la SN subyacente de un GRB ultra largo (10^4 s) con una magnetar [22]. En este año también se reporta la primera detección de polarización circular en la postluminiscencia óptica de un GRB [23].
- 2013. Uno de los GRBs más brillantes registrados hasta la fecha [24] y primera detección de una kilonova en un GRB, distinto del anterior [25].

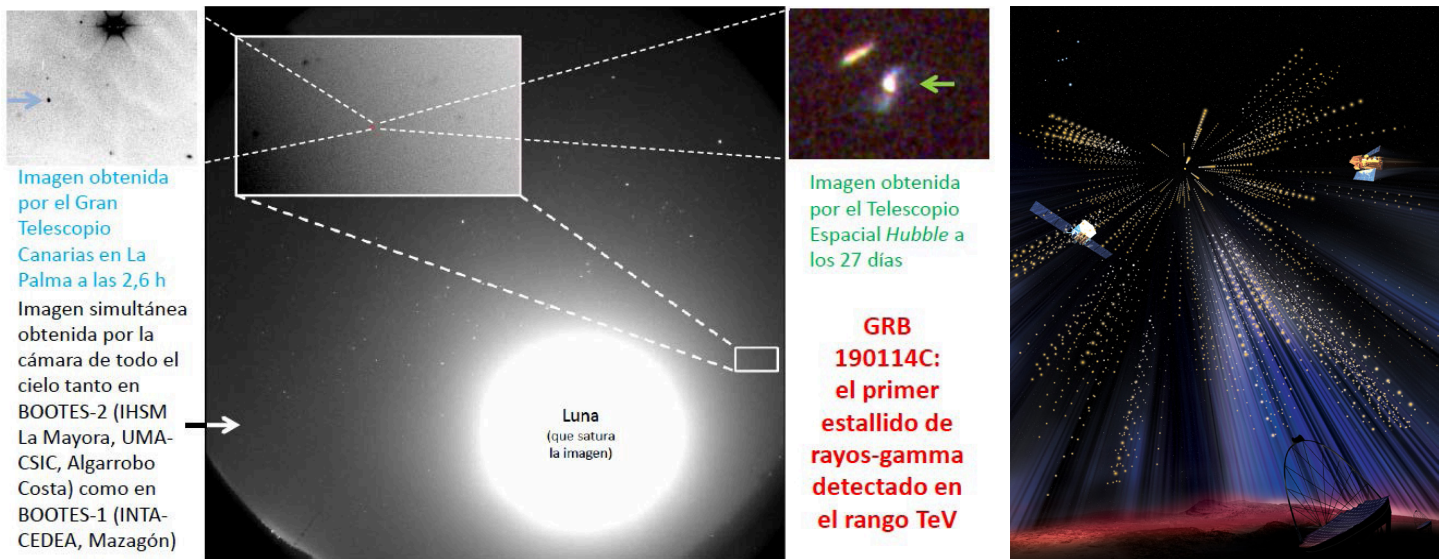


Figura 1. La primera detección de un GRB en el rango TEV, por parte de MAGIC. Elaboración propia (izda.) y A. Simonnet (dcha.).

- 2017. Detección de un GRB débil y de corta duración sólo 2 segundos tras la llegada de la correspondiente onda gravitacional a la Tierra (modelada por la colaboración LIGO como la fusión en un sistema binario de dos estrellas de neutrones) y la kilonova asociada [26,27]
- 2018. Evidencia de la afloración del chorro como consecuencia del colapso del progenitor de un GRB antes de detectarse la SN de larga duración asociada al mismo [28].
- 2019. Primera detección de un GRB en el rango de los TeV [29] (Figura 1). En este año también se presentan evidencias de magnetares como resultado final (en algunos casos) de la fusión de sistemas de estrellas binarios [30].
- 2021. Detección de una kilonova asociada a un GRB de larga duración, implicando la existencia de GRBs de duración $>2s$ en una subclase de fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones [31,32].
- 2022. La detección del GRB más intenso hasta la fecha, con la primera detección de uno por encima de 10 TeV [33,34].
- 2023. Detección de una kilonova asociada a un GRB de larga duración con evidencias de producción de lantánidos [35].

IMPLICACIÓN EN LA COMPRESIÓN DE LOS GRBS Y LOS AVANCES TEÓRICOS

Entonces, ¿qué sabemos a estas alturas, veinticinco años después?

De entrada, el número de GRBs con postluminiscencias ha sobrepasado ya los 1700, con ~ 450 corrimientos al rojo ya medidos [36] y un valor medio de $z \sim 2.5$ [37]. Centrándonos en nuestro país, investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) han usado los observatorios españoles (en particular los telescopios de 1,5m de Sierra Nevada, 2.2m de Calar Alto, y el Gran Telescopio Canarias) para contribuir en muchas de estas detecciones y determinación de corrimientos al rojo, dando lugar resultados muy notables, complementados por las detecciones tempranas (pocos segundos tras recibir la alerta de GRB) de la Red Global BOOTES de Telescopios Robóticos, la primera desplegada por país alguno en los cinco continentes [38,39]. Como anécdota¹, las primeras observaciones de GRB en modo de oportunidad se iniciaron en 1997 en todos los observatorios españoles (cuando los programas de oportunidad en cualquier campo científico eran inexistentes) y el primer resultado científico del GTC en cualquier campo, fue para un GRB ocurrido

durante la fase de comisión en 2009 [40]. Como se ha comentado, con MAGIC (colaboración donde se enmarcan varios grupos de investigación españoles) se registró en 2019 el primer GRB en el rango TeV. También se ha avanzado mucho tanto en la comprensión teórica de los chorros, como en los progenitores de los GRBs de mayor duración, gracias en estos dos últimos casos a los trabajos realizados desde hace años en la Universidad de Valencia (ver [41, 42] a modo de ejemplo).

Desgranamos en los siguientes epígrafes, y de manera muy somera, el estado actual de la cuestión.

Progenitores: (¿Supernova o no supernova? / ¿Kilonova?)

La clasificación convencional de GRBs entre los ahora llamado de tipo I (largos, debido a colapso de estrellas masivas pobres en metales, ‘*collapsars*’) y los de tipo II (cortos, originados en fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones (NS-NS) sigue teniendo vigencia [43,44], pero ya sabemos de varios casos (reflejados anteriormente) que no cumplen esta dicotomía. Aparte, la existencia de varios GRBs de extremadamente larga duración ($> 10^3$ s) apunta a que otra clase de progenitores están involucrados.

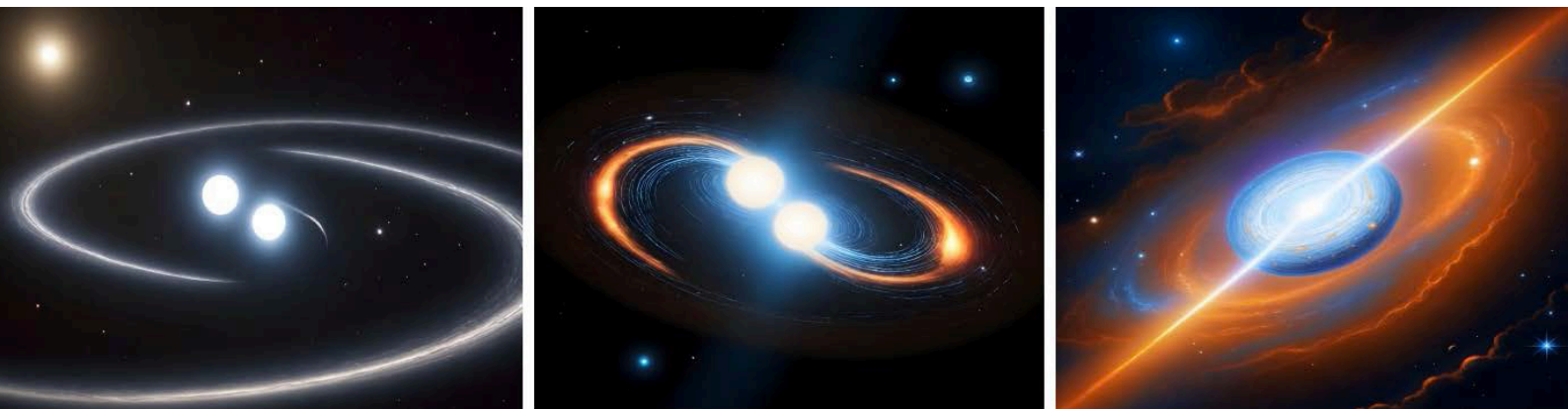
La clave para la determinación unívoca y sin duda alguna de un progenitor masivo en el caso de GRBs de tipo I es la existencia de una SN que se puede inferir, bien como un exceso en la curva de luz de la

postluminiscencia óptica, con el máximo aproximadamente un mes tras el estallido (que son las SNe más débiles que se podrían llegar a observar con sensibilidad suficiente hasta $z \sim 1$) o bien, de manera espectroscópica (limitada en este caso forzosamente a valores de $z < 0.5$), aunque para ello se necesite una alta relación señal-ruido. En estos casos, para mejor caracterizar la SN, los espectros de la misma obtenidos (tras sustraerle el la contribución de la galaxia subyacente), se comparan con SN1998bw, que fue la primera asociada con un GRB de larga duración, siendo además la más cercana de todas las SNe asociadas a GRBs detectadas hasta la fecha.

Y en aquellos casos en los GRBs de tipo I en los que hay evidencias en la postluminiscencia de una fase de emisión continuada en forma de meseta (*‘plateau’*), ésta se explica como una inyección de energía continuada y evidencia de haberse formado un magnetar [45] en vez de un agujero negro, siendo también estos objetos producidos en las fusiones de sistema binarios de estrellas de neutrones.

¿Y en el caso de los de tipo II? La existencia de una kilonova es la prueba evidente de la fusión de un sistema binario de estrella de neutrones (Figura 2), tras la primera detección en GRB 130603B y el hallazgo de la kilonova en la contrapartida electromagnética de la onda gravitacional GW 170817A asociada a un GRB de corta duración.

Figura 2. Concepción artística de la secuencia de formación, a partir de la fusión de dos estrellas de neutrones en un sistema binario, de una kilonova asociada con un estallido de rayos gamma. / Clara & Sofía López Martín (Freepik) y Alberto J. Castro-Tirado (IAA-CSIC/UMA).



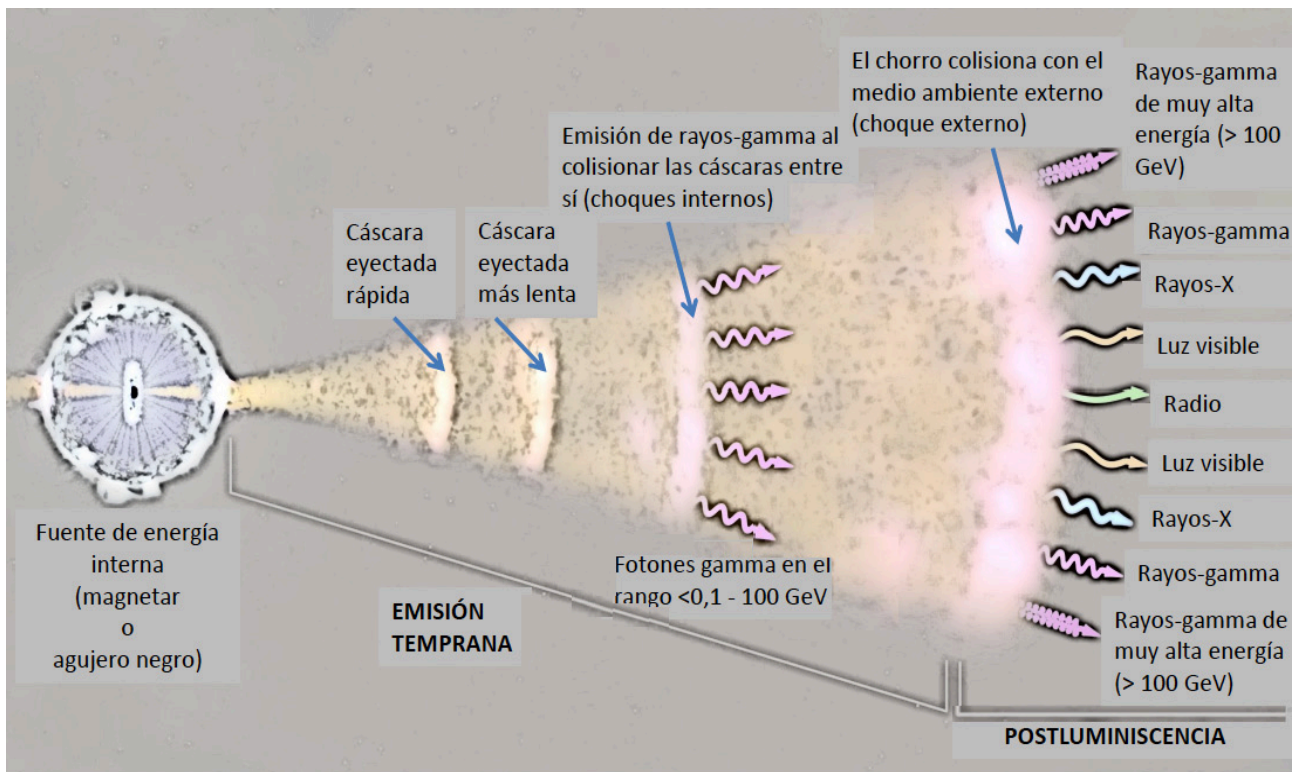


Figura 3. Concepción artística del modelo estándar de GRBs, adaptado de [58].

Postluminiscencias

Desde el punto de vista de su interacción con el medio, la postluminiscencia (el “*afterglow*” en inglés) que se observa en todas las longitudes de onda, satisface la predicción del modelo de bola de fuego (“*fireball model*”) relativista [46], al inyectarse una cantidad de energía nada despreciable en el medio interestelar de la galaxia anfitriona (Figura 3). El proceso físico dominante es radiación sincrotrón, por parte de electrones relativistas en presencia de fuertes campos electromagnéticos ($B \sim 10^6$ G), y originados en la eyección relativista (factores iniciales de Lorentz $\Gamma \sim 10^2 - 10^3$) de material en diversas fases a lo largo de un chorro de emisión colimada en un ángulo con una abertura en el rango $\sim 1^\circ - 10^\circ$.

Sin embargo, estudios más recientes muestran que no todos los GRBs satisfacen las predicciones del modelo estándar, en relación tanto a la emisión temprana como a la postluminiscencia (ver por

ejemplo, [47]) como se muestra en las Figuras 4 y 5. En especial, el ajuste de las postluminiscencias no es tan bueno en las longitudes de onda de radio, cuando se hace el ajuste multifrecuencia de todos los datos. También se han observado, en $\sim 40\%$ de las postluminiscencias de rayos X observadas por el satélite *Swift* pocos minutos tras el GRB, fulguraciones hasta 10^4 s más tarde, episodios a modo de flujo constante o mesetas (“*plateaus*”) que se extienden hasta $10^4 - 10^5$ s y cambios de pendientes (“*jet breaks*”) que hacen más compleja toda la interpretación.

Aparte del modelo estándar mencionado anteriormente, existen otros modelos de emisión temprana (de choques magnéticos internos, de atmósfera magnéticamente disipativa) y el llamado ICMART (“*Internal Collision-induced Magnetic Reconnection and Turbulence*”) así como modelos híbridos resultante de los anteriores.

Figura 4. La postluminiscencia de GRB 021004, desde rayos-X hasta radio, desde 0,01 hasta 250 días tras el GRB, mostrando los 7 episodios de inyección de energía a lo largo de ese tiempo. Adaptado de [59].

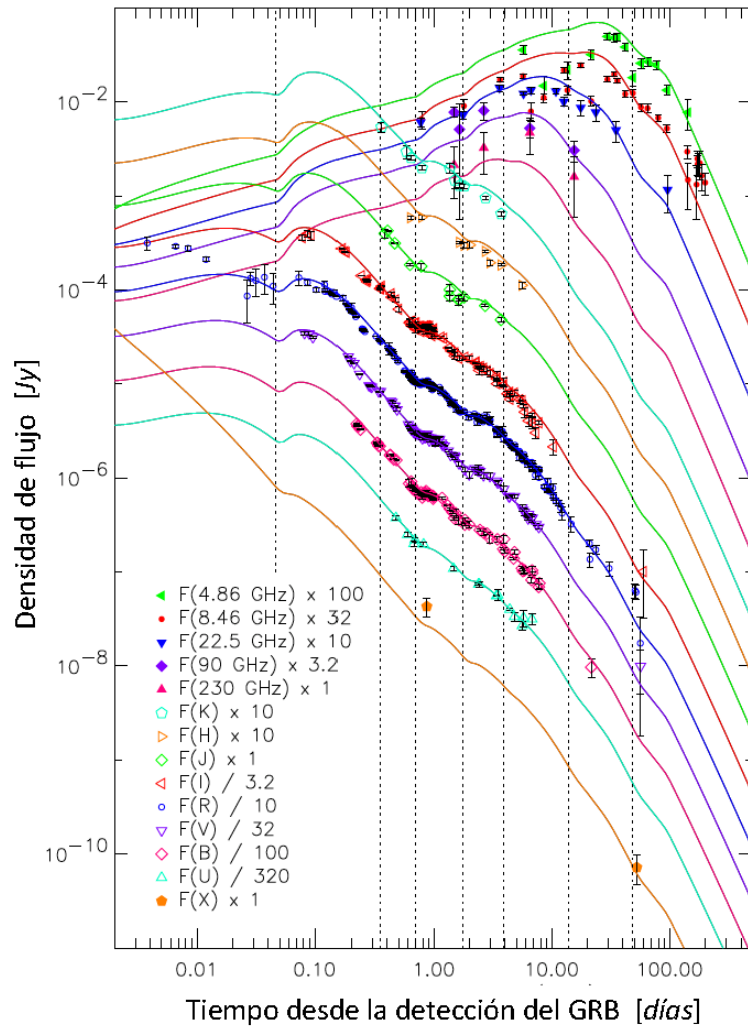
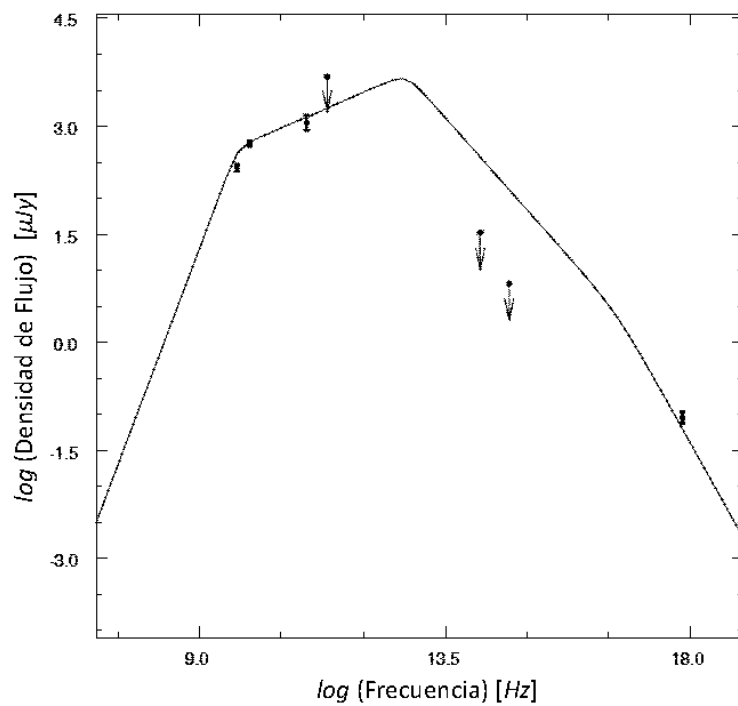


Figura 5. La distribución espectral (desde radio hasta rayos-X) de la postluminiscencia de GRB 051022 (a las 33 h tras su detección), incluyendo datos de Calar Alto con el ajuste según el modelo estándar. Adaptado de [60].



La estructura y composición del chorro

En GRB 030329, uno de los mejor estudiados, se propuso la existencia de un doble chorro. Una primera componente (el chorro más estrecho y con un factor de Lorentz inicial más alto) que sería el responsable de la emisión gamma y una segunda componente (con un chorro más ancho) que sería el causante de la emisión de la postluminiscencia, al menos desde radio hasta el óptico [48].

Pero, ¿cómo es la geometría del chorro? La estructura del chorro depende de varios factores, tales como la presencia de un agujero negro (y de su spin) o de una estrella de neutrones, la estructura, masa y momento angular del disco de acrecimiento, la geometría e intensidad del campo magnético y de la energía transportada por los neutrinos [49].

Hay básicamente tres modelos de estructura del chorro inicial: gaussiano, de sombrero de copa (*'top-hat'*) y como ley de potencia; estructura que obviamente se modifica al interactuar con el medio. La estructura final también se ve configurada en función de ciertas variables: la naturaleza de la energía en el chorro, la magnetización del mismo o la presencia de una SN subyacente. La tipología de chorro estructurado es la que se ha invocado para explicar los GRBs más intensos, como ha sido el caso GRB 221009 [50].

En cuanto a la composición del chorro, se barajan modelos de composición bariónica enteramente o dominados por el flujo de Poynting. Aunque hay casos donde se ha observado una composición híbrida, con dos componentes, como en el referido GRB 221009A, un caso excepcional donde el ángulo de visión fue de sólo 0.6° .

GALAXIAS ANFITRIONAS

La mayoría de las galaxias anfitrionas detectadas inicialmente fueron galaxias de baja metalicidad, brillantes en el UV (implicando alta formación estelar) y siendo la mayoría galaxias enanas irregulares, con masas en el rango 10^9 - $10^{10} M_\odot$. Observaciones en el infrarrojo cercano realizadas de manera más continuada mostraron que $\sim 25\%$ de las postluminiscencias de los GRB largos están

afectadas por el polvo, implicando extinciones $A_V > 1$ (ver por ejemplo [51]). Con ello, la muestra de galaxias anfitrionas ya identificadas ha aumentado considerablemente, estando muchas ya más enriquecidas en metales (con metalicidad próxima a la solar) y siendo más masivas que la anterior muestra, con masas en el rango 10^9 - $10^{10} M_\odot$. De ello se infiere que podría haber dos vías en cuanto a la formación de GRBs de larga duración y la baja metalicidad sería una de las condiciones en una de ellas. En cualquier caso, la adición de estas galaxias más masivas a la muestra de galaxias anfitrionas de GRBs implica que el sesgo para considerar a los GRBs como indicadores de formación estelar es menor, y podrían ser buenos indicadores para determinar la tasa de formación estelar a valores de $z > 3$.

SONDEANDO EL MEDIO INTERESTELAR EN GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR A ALTO CORRIMIENTO AL ROJO

El GRB más lejano observado hasta la fecha tiene un corrimiento al rojo $z \sim 9.4$ [52], y se estima que podrían incluso ser detectados hasta $z \sim 20$ [53]. Aparte de poder sondear distantes galaxias con formación estelar, la espectroscopía de las postluminiscencias de GRBs en las horas iniciales tras la detección de los mismos, propicia el estudio del medio interestelar (ISM) en dichas galaxias de una manera sin precedentes, posibilitando de esta forma evaluar la absorción producida por el gas, los metales y el polvo, de lo que se pueden inferir las propiedades del polvo, el estado de ionización y la cinemática de los sistemas entre medias así como la composición química y la fracción de gas molecular de la galaxia anfitriona. Ver la Figura 6.

COSMOLOGÍA CON GRBS

Debido a su luminosidad extrema, los GRBs se pueden observar hasta muy alto corrimiento al rojo, como hemos reseñado anteriormente. De manera similar a las SNe de tipo Ia, los GRBs pueden considerarse como indicadores cósmicos de distancia usando correlaciones propuestas entre distintos observables y así restringir los parámetros cosmológicos (ver por ejemplo [54]), aunque hay cierta controversia al respecto (ver por ejemplo [55]).

mencionada detección de un GRB de corta duración asociado a la onda gravitacional GW170817 y la posterior detección de la kilonova asociada supuso la confirmación de la asociación de los GRBs de tipo II con las fusiones de estrellas de neutrones en sistemas binarios, como siempre se había sospechado.

Pero aunque se ha avanzado mucho en todo este tiempo, aún quedan muchos interrogantes, y buena prueba de ello son las dos grandes misiones espaciales lanzadas este año para seguir profundizando en este campo: *Einstein Probe* (lanzada en enero) y *SVOM*² (lanzada en junio) en sinergia con toda la batería de instrumentación multirango en tierra firme y los observatorios de ondas gravitacionales y de neutrinos en esta era de la Astrofísica de Multimensajeros.

Si la misión *THESEUS* [57] (Figura 7) con fuerte participación española, es finalmente adoptada por la ESA en 2026, la comunidad de altas energías española en particular y europea en general, se asegurará seguir teniendo un papel preponderante en este campo, toda vez que el Observatorio de rayos-gamma *INTEGRAL* de la ESA dejará de dar servicio en unos meses, después de tantos éxitos cosechados. En ese caso, el lanzamiento de *THESEUS* sería en 2037, y en clara sinergia con el resto de infraestructura en tierra y misiones espaciales previstas para entonces.

AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros de mi equipo por su dedicación y entrega todos estos 25 años (con mención especial a Javier Gorosabel y Mariló Pérez-Ramírez, quienes nos dejaron en 2015, antes de tiempo) y también a todos aquellos colegas que nos han “sufrido” teniendo que interrumpir sus importantes observaciones para atender las nuestras, conscientes de la importancia de la necesidad de la prontitud de las mismas. Y también a los comités de asignación de tiempos, que entendieron igualmente de la importancia de los programas de oportunidad para obtener el máximo rendimiento y publicaciones de alto impacto asociadas a los observatorios ópticos respectivos, en pos de beneficiar a los grupos españoles proponentes (aunque últimamente ya no sea tanto este el caso, atendándose casi más a peticiones con mayoritaria participación extranjera en tiempo español en detrimento de los grupos de nuestro propio país).

NOTAS

1 Historietas de esa época hay a raudales, como salir corriendo del LAEFF en Villafranca en Villafranca del Castillo (en Madrid) con lo puesto para llegar a Calar Alto al atardecer tras 7 horas de coche y entrar literalmente por la ventana –entreabierta– de la biblioteca (ya que nadie escuchaba el timbre para abrirnos la puerta) y “asaltar” al astrónomo de turno para pedirle (tras recuperarse el pobre alemán del “susto” inicial) que por favor observara cierta posición en el cielo donde horas antes había acontecido un GRB. Y explicarle primero qué era un GRB, claro. Anécdota también recogida en [62]. Y es que por entonces aún no se habían descubierto contrapartida óptica alguna y la escala de distancias seguía siendo un misterio...

2 Misión en la que España, por tan sólo 0.5 Meur pudiera haber participado con todas las garantías del resto de países del consorcio, de haberse atendido la petición del autor de esta contribución al Plan Nacional, siguiendo la invitación que se nos cursó desde Francia (donde se co-lidera la misión), para aportar una pequeña componente del hardware, y cuya patente era además de una empresa española. Sin embargo, la propuesta no alcanzó la prioridad suficiente.

REFERENCIAS

- [1] A. J. Castro-Tirado 1998, Explosiones cósmicas de rayos-gamma. Los fenómenos más energéticos del Universo. Boletín de la SEA, 1, 14.
- [2] A. J. Castro-Tirado et al. 1999, Decay of the GRB 990123 Optical Afterglow: Implications for the Fireball Model, *Science* 283, 2069.
- [3] S. R. Kulkarni et al. 1999, The afterglow, redshift and extreme energetics of the γ -ray burst of 23 January 1999, *Nature* 398, 389.
- [4] C. Akerlof et al. 1999, Observation of contemporaneous optical radiation from a γ -ray burst, *Nature* 398. 400.
- [5] J. Hjorth et al. 2003, A very energetic supernova associated with the γ -ray burst of 29 March 2003, *Nature* 423, 847.
- [6] K. Z. Stanek et al. 2003, Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329, *ApJ* 591, L17.

- [7]. J. Greiner et al. 2003, Evolution of the polarization of the optical afterglow of the γ -ray burst GRB030329, *Nature* 26, 157.
- [8] N. Gehrels et al. 2005, A short γ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z = 0.225$, *Nature* 37, 851.
- [9] A. J. Castro-Tirado et al. 2005, GRB 050509b: the elusive optical/nIR/mm afterglow of a short-duration GRB, *A&A* 439, L15.
- [10] E. Berger et al. 2005, The afterglow and elliptical host galaxy of the short γ -ray burst GRB 050724, *Nature* 438, 988.
- [11] J. Hjorth et al. 2005, The optical afterglow of the short γ -ray burst GRB 050709, *Nature* 437, 859.
- [12] N. Kawai et al. 2006, An optical spectrum of the afterglow of a γ -ray burst at a redshift of $z = 6.295$, *Nature* 440, 184.
- [13]. J. B. Haislip et al. 2006, A photometric redshift of $z = 6.39 \pm 0.12$ for GRB 050904, *Nature* 440, 181.
- [14] S. Campana et al. 2006, The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave, *Nature* 442, 1008.
- [15] P. Mazzali et al. 2006, A neutron-star-driven X-ray flash associated with supernova SN 2006aj. *Nature* 442, 1018.
- [16] M. Della Valle et al. 2006, An enigmatic long-lasting gamma-ray burst not accompanied by a bright supernova, *Nature* 444, 1050.
- [17] A. Gal-Yam et al. 2006, A novel explosive process is required for the γ -ray burst GRB 060614, *Nature* 444, 1053.
- [18] C. G. Mundell et al. 2007, Early Optical Polarization of a Gamma-Ray Burst Afterglow, *Science* 315, 1822.
- [19] J. L. Racusin et al. 2008, Broadband observations of the naked-eye γ -ray burst GRB080319B, *Nature* 455, 183.
- [20] N. Tanvir et al. 2009, A gamma-ray burst at redshift $z = 8.2$, *Nature* 461, 1254.
- [21] R. Salvaterra et al. 2009, GRB090423 at a redshift of $z \sim 8.1$, *Nature* 461, 1258.
- [22] J. Greiner et al. 2015, A very luminous magnetar-powered supernova associated with an ultra-long γ -ray burst, *Nature* 523, 189.
- [23] K. Wiersema et al. 2014, Circular polarization in the optical afterglow of GRB 121024A, *Nature* 509, 201.
- [24] D. A. Perley et al. 2014, The afterglow of GRB 130427A from 1 to 1016 GHz. *ApJ* 781, 37.
- [25] N. Tanvir et al. 2013, A 'kilonova' associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B, *Nature* 500, 547
- [26] B. P. Abbott et al. 2017, Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *ApJ* 848, L12.
- [27] E. Pian et al. 2018, Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger, *Nature* 551, 67.
- [28] L. Izzo et al. 2019, Signatures of a jet cocoon in early spectra of a supernova associated with a γ -ray burst, *Nature* 565, 324.
- [29] Colaboración MAGIC 2019, Teraelectronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C, *Nature* 575, 455.
- [30] Y. Q. Xue et al. 2019, A magnetar-powered X-ray transient as the aftermath of a binary neutron-star merger, *Nature* 568, 198.
- [31] E. Troja et al. 2022, A nearby long gamma-ray burst from a merger of compact objects, *Nature* 612, 228.
- [32] J. C. Rastinejad et al. 2022, A kilonova following a long-duration gamma-ray burst at 350 Mpc, *Nature* 612, 223.
- [33] E. Burns et al. 2023, GRB 221009A: The Boat, *ApJ* 496, L1.
- [34] Z. Cao and LHAASO Collaboration 2023, A Teraelectron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst, *Science* 380, 1390.
- [35] Y.-H. Yan et al. 2024, A lanthanide-rich kilonova in the aftermath of a long gamma-ray burst, *Nature* 626, 742.
- [36] D. A. Kann et al. 2010, The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows, *ApJ* 720, 1513.
- [37] M. G. Dainotti et al. 2024, Inferring the Redshift of More than 150 GRBs with a Machine-learning Ensemble Model, *ApJS* 271, 22.
- [38] A. J. Castro-Tirado 2003, La red global BOOTES de telescopios robóticos, *Boletín de Verano de la SEA* 48, 42.
- [39] A. J. Castro-Tirado 2023, Tracking transients day and night, *Nature Astronomy* 7, 1136.
- [40] A. J. Castro-Tirado et al. 2009, GRB 090709A: deep optical observation with the 10.4m GTC, *GCN Circular* 9655.
- [41] J. Martí, J. M. Perucho & J. L. Gómez 2016, The Internal Structure of over pressured, Magnetized, Relativistic Jets, *ApJ* 831, 163.

- [42] M. Obergaulinger & M. A. Aloy 2022, Magneto rotational core collapse of possible gamma-ray bursts progenitors—IV. A wider range of progenitors, *MNRAS* 512, 2489
- [43] P. Kumar, R. Narayan & J. L. Johnson 2008, Mass fall-back and accretion in the central engine of gamma-ray bursts, *MNRAS* 388, 1729.
- [44] R. C. Duncan & C. Thompson C. 1992 Formation of very strongly magnetized neutron stars—Implications for gamma-ray bursts, *ApJ* 392, L9.
- [45] A. Rowlinson et al. 2014, Constraining properties of GRB magnetar central engines using the observed plateau luminosity and duration correlation, *MNRAS* 443, 1779.
- [46] P. Meszáros and M. J. Rees, 1993, Relativistic Fireballs and Their Impact on External Matter: Models for Cosmological Gamma-Ray Bursts, *ApJ*, 405, 278.
- [47] R. Sánchez-Ramírez et al. 2017, GRB 110715A: the peculiar multiwavelength evolution of the first afterglow detected by ALMA, *MNRAS*, 464, 4624.
- [48] E. Berger et al. 2003, A common origin for cosmic explosions inferred from calorimetry of GRB030329, *Nature* 426, 154.
- [49] O. Gottlieb et al. 2022, On the Jet-Ejecta Interaction in 3D GRMHD Simulations of a Binary Neutron Star Merger Aftermath, *ApJ* 933, L2.
- [50] B. O'Connor et al. 2023, A structured jet explains the extreme GRB 221009A, *Science Advances* 9, id. eadi1405.
- [51] L. K. Hunt LK et al. 2014, New light on gamma-ray burst host galaxies with Herschel, *A&A* 565, A112.
- [52] A. Cucchiara et al. 2011, A Photometric Redshift of $z \sim 9.4$ for GRB 090429B, *ApJ* 736, L7.
- [53] D. Q. Lamb & D.E. Reichart 2000, Gamma-Ray Bursts as a Probe of the Very High Redshift Universe, *ApJ* 536, 1.
- [54] J.-L. Li et al. 2023, Constraints on the Cosmological Parameters with Three-Parameter Correlation of Gamma-Ray Bursts, *ApJ* 953, 58.
- [55] D. Kumar et al. 2023, Gamma Rays Bursts: A Viable Cosmological Probe? *JCAP*, en prensa (arXiv:2212.057313).
- [56] B. Zhang 2018, *The physics of Gamma-ray bursts*. Cambridge University Press.
- [57] G. Stratta et al. 2022, Breakthrough Multi-Messenger Astrophysics with the THESEUS Space Mission, *Galaxies* 2022, 10.
- [58] N. Gehrels, L. Piro & P. J. T. Leonard 2002, The brightest explosions in the Universe, *Scientific American*, 287 (Dec 2002).
- [59] A. de Ugarte Postigo et al. 2005, GRB 021004 modelled by multiple energy injections, *A&A* 443, 841.
- [60] A. J. Castro-Tirado et al. 2009, The dark nature of GRB051022 and its host galaxy, *A&A* 475, 101.
- [61] A. J. Castro-Tirado et al. 2024, GRB 130606A within a sub-DLA at redshift 5.91, *A&A*, enviado (<https://arxiv.org/abs/1312.5631>).
- [62] G. Schilling 2002. *Flash! The hunt for the biggest explosions in the Universe*. Cambridge University Press.

Figura 7. Concepción artística de la Misión *THESEUS* (Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor) de la Agencia Espacial Europea. Cortesía ESA.

